



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Geociências

ADAM BARROS FERNANDES

ESPELEOTOPOGRAFIA DE CAVERNAS FERRÍFERAS NA SERRA DOS CARAJÁS:
DO MÉTODO CONVENCIONAL AO ESCANEAMENTO A LASER 3D

CAMPINAS

2024

ADAM BARROS FERNANDES

ESPELEOTOPOGRAFIA DE CAVERNAS FERRÍFERAS NA SERRA DOS CARAJÁS:
DO MÉTODO CONVENCIONAL AO ESCANEAMENTO A LASER 3D

TESE APRESENTADA AO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS PARA
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM CIÊNCIAS NA
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

ORIENTADOR: PROF. DR. RICARDO PEROBELLI BORBA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA PELO ALUNO ADAM BARROS
FERNANDES E ORIENTADA PELO PROF. DR. RICARDO
PEROBELLI BORBA

CAMPINAS

2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Geociências
Marta dos Santos - CRB 8/5892

F391e Fernandes, Adam Barros, 1995-
Espeleotopografia de cavernas ferríferas na Serra dos Carajás : do método convencional ao escaneamento a laser 3D / Adam Barros Fernandes. – Campinas, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Ricardo Perobelli Borba.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Cavidades. 2. Espeleometria. 3. Topografia. I. Borba, Ricardo Perobelli, 1963-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Speleotopography of iron caves in Serra dos Carajás : from conventional method to 3D laser scanning

Palavras-chave em inglês:

Caves

Speleometry

Topography

Área de concentração: Geologia e Recursos Naturais

Titulação: Doutor em Ciências

Banca examinadora:

Ricardo Perobelli Borba [Orientador]

Allan Silas Calux

Tatiana Barreto dos Santos

Alfredo Borges de Campos

Wanilson Luiz Silva

Data de defesa: 05-04-2024

Programa de Pós-Graduação: Geociências

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-2686-278X>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/9098959494075927>



UNICAMP

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

AUTOR: Adam Barros Fernandes

**"ESPELEOTOPOGRAFIA DE CAVERNAS FERRÍFERAS NA SERRA DOS
CARAJÁS: DO MÉTODO CONVENCIONAL AO ESCANEAMENTO A LASER
3D"**

**"SPELEOTOPOGRAPHY OF IRON CAVES IN SERRA DOS CARAJÁS: FROM
CONVENTIONAL METHOD TO 3D LASER SCANNING"**

ORIENTADOR: PROF. DR. RICARDO PEROBELLI BORBA

Aprovada em: 05/04/2024

EXAMINADORES:

Prof. Dr. Ricardo Perobelli Borba – Presidente

Dr. Allan Silas Calux

Profa. Dra. Tatiana Barreto dos Santos

Prof. Dr. Alfredo Borges de Campos

Prof. Dr. Wanilson Luiz Silva

A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora consta no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 05 de abril de 2024.

SÚMULA CURRICULAR

Adam Barros Fernandes



Geólogo formado pela Universidade Federal do Espírito Santo - UFES (2018), Mestre em Geotecnia pelo Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP (2020), Especialista em Direito da Mineração pelo Centro de Estudos em Direito e Negócios - CEDIN (2021) e discente no curso de Doutorado na área de Geologia e Recursos Naturais do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP.

Possuo experiência nas áreas de Mineração, Meio Ambiente e Geotecnia. Tendo atuado em empresas de mineração e consultorias com ênfase nos setores de geotecnia, direito minerário, meio ambiente e geologia de exploração, desde 2017 até os dias atuais.

Realizei o Mestrado sobre análise da estabilidade física de cavernas próximas a cava da mina de Brucutu no Quadrilátero Ferrífero, em função dos desmontes com uso de explosivos que ocorrem nessa mina. O que acarretou a publicação científica de diversos trabalhos em congressos e simpósios, além da publicação de um artigo científico no Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ.

Realizo o Doutorado sobre mapeamentos topográficos de cavernas em litotipos ferruginosos na Província Espeleológica da Serra dos Carajás utilizando novas tecnologias como o escaneamento a laser 3D e visando a comparação com métodos convencionais de levantamento topográfico de cavidades. Dessa forma, essa pesquisa gerou uma publicação de artigo científico na Revista Brasileira de Geomorfologia, além de um artigo aceito e outro submetido em revistas científicas.

DEDICATÓRIA

Dedico essa Tese aos grandes amores da minha vida:

Aos meus pais, José e Marília, por sempre acreditarem em mim e por não medirem esforços para o investimento na minha educação.

À minha amada esposa Gabrieli, por todo amor, incentivo, paciência e carinho ao longo de todos esses anos.

À toda minha família pela compreensão nos momentos da minha ausência.

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos mentores espirituais, pela incrível oportunidade de viver no planeta Terra e por ter a chance de realizar tantos sonhos junto com uma família extraordinária.

Aos meus pais, José e Marília, por dedicarem toda a sua vida com enorme empenho e amor para que eu conseguisse realizar todos os meus sonhos.

À Gabi por todo carinho, amor e por todos os momentos em que você me ajudou nas rotinas diárias. MUITÍSSIMO obrigado por tudo, amo você!

Ao Programa de Pós-Graduação em Geociências do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) por todos os conhecimentos passados pelos professores, pela excelente infraestrutura disponibilizada e pelos amigos feitos.

Ao meu orientador, professor Dr. Ricardo Perobelli Borba, por todo tempo despendido, acompanhamento e apoio contínuo em todas as etapas do desenvolvimento do curso de doutorado.

À empresa Vale S.A., pela disponibilização de informações, dados, recursos financeiros e humanos para o desenvolvimento da presente pesquisa, além de incentivar fortemente o desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao estudo espeleológico e ambiental. Agradeço especialmente ao Iuri Viana Brandi, Ramon Nunes Araújo, Bruno dos Santos Scherer, Júlio Almeida Moreira e Tomás Romualdo Corrêa, pelo enorme apoio em todas as etapas do presente trabalho e por sempre se mostrarem disponíveis para ajudar.

Ao Allan Silas Calux, por importantes discussões técnicas e incentivo à pesquisa sobre novas tecnologias aplicadas ao levantamento topográfico de cavernas.

Aos membros da banca examinadora desta Tese, por aceitarem o convite e pelas relevantes contribuições visando o aprimoramento do trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma torceram, rezaram e me influenciaram positivamente para a construção desta Tese.

EPÍGRAFE

“A vida é construída nos sonhos e concretizada no amor”

Chico Xavier

RESUMO

De acordo com a Constituição Federal de 1988, as cavidades naturais subterrâneas são bens da União que possuem grande importância em decorrência, principalmente, dos seguintes fatores: grande fragilidade ambiental, significativo endemismo faunístico, beleza cênica, multiplicidade de feições morfológicas, espeleotemas e estratégicos reservatórios de água. Além disso, essas cavernas podem abrigar vestígios paleontológicos, arqueológicos e paleoclimáticos, muitas vezes de grande relevância para uma melhor compreensão da evolução da vida sobre o planeta Terra. Porém, para que fosse possível o desenvolvimento sustentável em consonância com as premissas estabelecidas para a conservação de cavernas no Brasil foi promulgado o Decreto nº 6.640/2008. Esse decreto estabeleceu os parâmetros para classificação de cavernas quanto ao seu grau de relevância, que podem ser enquadradas como de máxima, alta, média ou baixa relevância, determinado com base na análise de atributos ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, avaliados sob enfoque regional e local. Tendo em vista a vasta ocorrência de cavidades em litologias ferríferas na Serra dos Carajás no estado do Pará, a sua coexistência com os empreendimentos minerários, a necessidade de conservação das cavernas na área de estudo e a importância da realização de levantamentos topográficos com elevado grau de precisão dessas cavernas, o presente estudo é proposto. Vale ressaltar também que por meio desse trabalho foi possível estudar a influência das feições morfológicas/geométricas com a ocorrência e gênese de cavernas em litotipos ferríferos, além de fornecer uma contribuição importante para os cálculos espeleométricos, com embasamento metodológico, seguindo preceitos da legislação ambiental vigente e determinar o parâmetro espeleométrico que melhor caracteriza os atributos geométricos de uma cavidade na área de estudo. Sendo a incerteza nos cálculos das dimensões das cavernas obtidos por meio do levantamento topográfico convencional o principal problema investigado na presente pesquisa. Com a meta de atender a esse objetivo foi realizado um levantamento bibliográfico contemplando o estado da arte sobre o mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral no Brasil e no mundo, além de análise da legislação vigente sobre o tema, bem como levantamentos de campo para identificação da gênese dessas cavidades ferruginosas, principais fatores controladores para a formação geológica das cavernas e cálculo dos parâmetros espeleométricos utilizando o método convencional em comparação com a aquisição via escaneamento a laser 3D. Dessa forma, o parâmetro espeleométrico volume foi identificado como o mais importante para a melhor caracterização da geometria de cavernas na amostra de cavidades analisadas. Outro ponto de destaque constatado foi a grande influência supergênica para a formação das cavernas e os principais fatores controladores para a gênese dessas cavidades são estruturais, litológicos, topográficos e hidrológicos. Um outro aspecto importante que foi possível revelar por meio deste estudo é que o padrão planigeométrico Simples Retilíneo Retangular possui alta correlação com cavernas em que o controle estrutural é predominante. Além disso, pode-se constatar que o mapeamento topográfico via escaneamento a laser 3D é mais preciso e em 80% dos resultados levou a redução do valor da variável volume, quando comparado com o levantamento topográfico convencional.

Palavras-chave: cavidades, espeleometria, topografia.

ABSTRACT

According to the Federal Constitution of 1988, natural underground cavities are properties of the Union that hold great importance mainly due to the following factors: high environmental fragility, significant faunal endemism, scenic beauty, multiplicity of morphological features, speleothems, and strategic water reservoirs. Additionally, these caves may harbor paleontological, archaeological, and paleoclimatic traces, often of great relevance for a better understanding of the evolution of life on planet Earth. However, to achieve sustainable development in line with the premises established for cave conservation in Brazil, Decree 6.640/2008 was enacted. This decree established criteria for categorizing caves in terms of their relevance, which can be classified as maximum, high, medium, or low relevance, determined based on the analysis of ecological, biological, geological, hydrological, paleontological, scenic, historical-cultural, and socio-economic attributes, evaluated from a regional and local perspective. Given the extensive occurrence of cavities in ferriferous lithologies in the Serra dos Carajás in the state of Pará, the coexistence between mining projects and cave conservation in the study area, and the need for high-precision topographic surveys in these caves, this study is proposed. It is also intended, through this work, to study the influence of morphological/geometric features on the occurrence and genesis of caves in ferriferous lithotypes, in addition to providing an important contribution to speleometric calculations, with methodological basis and following precepts of current environmental legislation. The aim is to determine the speleometric parameter that best characterizes the geometric attributes of a cavity in the study area. The main problem to be investigated in this research is the uncertainty in the calculations of cave dimensions obtained through conventional topographic surveying. To meet this objective, a bibliographic survey was conducted, covering the state of the art in topographic mapping of caves in the mineral sector in Brazil and worldwide, along with an analysis of current legislation on the subject. Field surveys were also carried out to identify the genesis of these ferruginous cavities, the main controlling factors for the geological formation of caves, and the calculation of speleometric parameters using the conventional method compared to 3D laser scanning acquisition. Thus, the speleometric parameter volume was identified as the most important for better characterizing the geometry of caves in the sample under analysis. Another noteworthy point found was the significant supergenic influence on the formation of the analyzed caves, and the main controlling factors for the genesis of these cavities are structural, lithological, topographic and hydrological. Another important aspect revealed by this study is that the Simple Rectilinear Rectangular planogeometric pattern has a high correlation with caves where structural control is predominant. Furthermore, it was observed that topographic mapping via 3D laser scanning is more accurate and, in 80% of the results, led to a reduction in the value of the volume variable when compared to conventional topographic surveying.

Keywords: caves, morphometry, topography.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das cavidades estudadas e das Serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan, da Bocaina e do Rabo-Estrela, Província Espeleológica da Serra dos Carajás (PA). Fonte: Banco de dados - Vale S.A. (2021).	24
Figura 2 - Evolução do processo de confecção da planta baixa de uma caverna hipotética. Representação das visadas (linhas) e bases topográficas (triângulos), também chamada de linha de trena (A); Fechamento da poligonal com o traçado do contorno das paredes da caverna (B); Plotagem dos detalhes específicos de cada caverna, como blocos abatidos, textura do piso, espeleotemas, cursos d'água etc. Além da identificação dos cortes transversais e perfil longitudinal (C); Mapa topográfico final contendo todas as informações supracitadas (D). Fonte: ICMBio, (2011).	32
Figura 3 - Mapa topográfico da caverna Postojnska jama situada na Eslovênia, elaborado por Joseph Anton Nagel. Fonte: Nagel, (1748).	34
Figura 4 - Mapa topográfico da caverna Mammoth Cave situada no Kentucky, Estados Unidos. Fonte: Lee, (1835).	34
Figura 5 - Mapa topográfico produzido utilizando o levantamento topográfico convencional da caverna RF-26 situada em Formação Ferrífera Bandada (FFB) - Projeto EFVM - Barão de Cocais/MG. Fonte: Vale S.A., (2009).	39
Figura 6 - Trena digital a laser modelo Leica DistoX310 (A); Dispositivo móvel para recebimento, consolidação e edição dos dados obtidos com a trena a laser (B); Funcionamento geral do Leica DistoX, medindo em apenas um equipamento simultaneamente o azimuth (azimuth), inclinação (clino) e distância do equipamento até um ponto "X" (C). Fonte: Hebb, (2010); Corvi, (2020).	40
Figura 7 - Mapeamento topográfico de cavidades utilizando laser scanner. Equipamento laser <i>scanner</i> estático modelo Leica BLK360 com captura de imagens (A1); Instalação do equipamento com captura de imagens no interior de uma cavidade (A2); Nuvem de pontos gerada pelo laser <i>scanner</i> estático com captura de imagens (A3); Equipamento laser <i>scanner</i> portátil modelo Geoslam ZEB REVO (B1); Utilização do modelo portátil no interior de uma cavidade (B2); Nuvem de pontos gerada pelo laser <i>scanner</i> portátil (B3). Fonte: adaptado de Vale S.A., (2021).	43
Figura 8 - Levantamento fotogramétrico de cavidade natural subterrânea (A). Modelo 3D após processamento fotogramétrico da nuvem de pontos (B). Fonte: Wood e Toomey, (2020); Pukanská et al. (2020).	45

Figura 9 - Localização e vias de acesso do platô S11 localizado na Serra Sul, Província Mineral de Carajás (PA). Fonte: Banco de dados - Vale S.A., (2021).	57
Figura 10 - Mapa Geológico da Serra Sul com a localização das cavernas pesquisadas (amarelo) e do banco de dados de cavernas do CECAV (verde) datado de 10/01/2023. Fonte: Banco de dados - Justo e Lopes (2014); CECAV, (2023). Legenda: A3xi - Complexo Xingu; A3squ - Sequência greenstone belt com com níveis de rochas ultramáficas, talco xistos, talco-tremolita xistos, clorita xistos, localmente com textura spinifex; A3sqms - Sequência greenstone belt com mica xistos, biotita xistos, paragneisses finos; A3sqm - Sequência greenstone belt com predomínio de rochas metavulcânicas máficas; A3sqa - Sequência greenstone belt intercaladas a rochas metavulcânicas ácidas a intermediárias; A3_gamma_rp - Metatonalito Racha Placa; A3_gamma_cz - Metagranito Cruzadão; A4ppm - Metabasaltos da Formação Parauapebas; A4ppf - Metabasaltos com níveis amigdaloidais e rochas vulcânicas e metavulcânicas ácidas da Formação Parauapebas; A4cj - Formação Carajás; A4ci - Formação Igarapé Cigarra; A4_mu_c - Suíte Intrusiva Cateté; PP23ac - Formação Águas Claras; PP3_gamma_ba - Granito Fazenda Bananal; PP3_gamma_sc - Granito Serra dos Carajás; Elm - Cobertura Laterítica.....	58
Figura 11 - Imagem esquemática do relevo da área de estudo evidenciando os topos de platô, vertentes e depressões fluviais, onde estão inseridas as cavidades na paisagem. Fonte: Adaptado de BRANDT, (2020).	60
Figura 12 - Distribuição das cavidades de acordo com intervalo topográfico do relevo.	63
Figura 13 - Distribuição das cavidades de acordo com classes hipsométricas.....	63
Figura 14 - Mapa hipsométrico da Serra Sul com a localização das cavernas pesquisadas (amarelo). Fonte: Banco de dados - Farr et al., (2007); Justo e Lopes (2014).	64
Figura 15 - Cobertura de canga cobrindo as formações ferríferas bandadas em alta vertente na cavidade S11D_0010 (A) e depósito de tálus com blocos de ferricrete na cavidade CAV_0018 (B).....	64
Figura 16 - Distribuição das cavernas da Serra Sul por classes morfológicas planigeométricas.	65
Figura 17 - Morfologias extraídas das plantas baixas que representam os 13 padrões morfológicos planigeométricos para as cavernas da Serra Sul. Legenda: A - Simples Disforme; B - Simples Retilínea Retangular; C - Simples Semicircular; D – Simples Curvilínea; E - Simples Curvilínea Bifurcada; F - Simples Bifurcada; G - Composta Mista; H - Composta Ramiforme; I - Simples Afunilada; J - Simples Retilínea Triangular; K - Composta Bifurcada; L - Composta Espongiforme; M - Simples Elíptica.	67

Figura 18 - Distribuição das cavernas da Serra Sul por litotipos.	68
Figura 19 - Relação entre os litotipos e padrões morfológicos planigeométricos.....	68
Figura 20 - Relação entre tipologia das câmaras e projeção horizontal (PH) das cavernas da Serra Sul.	69
Figura 21 - Média da projeção horizontal em metros por litotipos das cavernas da Serra Sul.	70
Figura 22 - Correlação entre dados de área e volume das cavernas da Serra Sul.	70
Figura 23 - Distribuição das Estruturas Geológicas por quantidade de cavernas da Serra Sul.	71
Figura 24 - Controle estrutural para desenvolvimento dos condutos da caverna CAV_0034 em formação ferrífera bandada, sem interpretação (A) e com indicação da direção preferencial do bandamento da FFB que coincide com o desenvolvimento do conduto (B).	72
Figura 25 - Localização das cavidades estudadas e das Serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan, da Bocaina e do Rabo-Estrela, Província Espeleológica da Serra dos Carajás (PA). Fonte: Banco de dados - Vale S.A. (2021).	81
Figura 26 - Equipamento de escaneamento a laser 3D modelo Geoslam ZEB Revo. Fonte: Geoslam, (2023).	85
Figura 27 - Nuvem com cerca de 2 milhões de pontos gerada através do levantamento topográfico de uma cavidade utilizando o equipamento laser scanner portátil modelo Geoslam ZEB REVO. Visão frontal da entrada da caverna (A); Visão da seção horizontal - planta baixa (B).....	86
Figura 28 - Modelo 3D de uma caverna produzido no software 3D Reshaper. Fonte: Tetra Tech, (2018).	87
Figura 29 - Gráfico mostrando a quantidade de cavernas que tiveram aumento ou redução no valor do volume calculado via escaneamento a laser 3D em comparação com o método convencional.....	98
Figura 30 - Gráfico de correlação entre a variável volume calculada via método convencional (Volc) e com base no escaneamento a laser 3D (Vols). A linha vermelha representa a reta de regressão linear obtida com base no banco de dados analisado.	98

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre as técnicas modernas e convencional aplicadas ao levantamento topográfico de cavidades naturais subterrâneas, bem como proposição de contexto mais adequado para aplicação da respectiva técnica moderna.....	45
Quadro 2 - Principais características dos padrões morfológicos planigeométricos das cavernas da Serra Sul.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de categorias locais consideradas para a análise estatística das cavidades da Província Espeleológica da Serra dos Carajás.....	84
Tabela 2 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Regional.....	89
Tabela 3 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra Norte.	90
Tabela 4 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra Sul.	91
Tabela 5 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra da Bocaina.....	92
Tabela 6 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra Leste.....	93
Tabela 7 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra do Rabo-Estrela.....	94
Tabela 8 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra do Tarzan.	95
Tabela 9 - Resultados do cálculo de volume das cavernas por escaneamento a laser 3D (Vols) e método convencional (Volc).....	97

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus Celsius
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
5D	Classificação 5D de grau de precisão para mapeamento topográfico de cavernas, conforme a <i>British Cave Research Association</i> - BCRA
8.Md	8 vezes a mediana – critério estatístico para classificação do grau de relevância máximo de cavernas, conforme a Instrução Normativa 2, de 30 de agosto de 2017 do IBAMA
ADA	Área Diretamente Afetada
AIA	Área Indiretamente Afetada
Al	Alumínio
ASF	<i>Australian Speleological Federation</i>
Au	Ouro
BCRA	<i>British Cave Research Association</i>
BCRA-XD	Classificação XD de grau de precisão para mapeamento topográfico de cavernas, conforme a <i>British Cave Research Association</i> - BCRA
CANIE	Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas
CECAV	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
cm	Centímetro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	Cromo
CRP	<i>Close Range Photogrammetry</i>
Cu	Cobre
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DOCEGEO	Rio Doce Geologia e Mineração
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas
Erro -Volc/Vols	Percentual de erro do método convencional em relação ao escaneamento a laser
Fe	Ferro
FFB	Formação Ferrífera Bandada
GEP	Grupo Espeleológico Paraense

GPS	<i>Global Positioning System</i>
IA	Inteligência Artificial
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IN	Instrução Normativa
IUS	<i>International Union of Speleology</i>
km	Quilômetro
Laser	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
Mn	Manganês
N	Contagem da população amostral de cavernas
NE	Nordeste
NE-SW	Nordeste-Sudoeste
Ni	Níquel
NW-SE	Noroeste-Sudeste
PH	Projeção Horizontal
Pt	Platina
R ²	Coeficiente de determinação
RV	Realidade Virtual
SBE	Sociedade Brasileira de Espeleologia
SEE	Sociedade Excursionista e Espeleológica
Sn	Estanho
UG	Unidade Geomorfológica
Volc	Cálculo do volume de uma caverna obtido por meio do método convencional
Vols	Cálculo do volume de uma caverna obtido por meio do escaneamento a laser

WNW-ESE

Oeste–noroeste - Leste–sudeste

SUMÁRIO

1. ASPECTOS INTRODUTÓRIOS	19
1.1 Contextualização e motivação do trabalho.....	19
1.2 Justificativa	21
1.3 Objetivos	22
1.4 Estrutura da Tese.....	23
2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Etapa 1: Revisão Bibliográfica.....	25
3.2 Etapa 2: Aquisição de Dados	25
3.3 Etapa 3: Integração e Interpretação dos Dados	25
4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
5. REFERÊNCIAS	27
ANEXO 01.....	30
Mapeamento Topográfico de Cavernas no Setor Mineral: Avanços e Novas Tecnologias	30
1. INTRODUÇÃO	30
2. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3. CONTEXTO HISTÓRICO	33
4. LEVANTAMENTO ESPELEOTOPOGRÁFICO CONVENCIONAL	37
5. LEVANTAMENTO ESPELEOTOPOGRÁFICO MODERNO.....	39
5.1 Trena digital a laser	39
5.2 Escaneamento a laser 3D.....	41
5.3 Fotogrametria	43
6. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS	45
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
AGRADECIMENTOS.....	48
REFERÊNCIAS	48
ANEXO 02.....	55
Morfologia e Gênese de Cavernas da Serra Sul - Província Mineral de Carajás/PA.....	55
1. INTRODUÇÃO	55
2. MATERIAIS E MÉTODOS	56
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
3.1 Inserção das Cavernas no Relevo.....	62
3.2 Padrões Morfológicos	65
3.3 Litotipos	67
3.4 Espeleometria.....	69
3.5 Estruturas Geológicas/Hidrologia	71
3.6 Gênese	72

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
AGRADECIMENTOS.....	74
REFERÊNCIAS	74
ANEXO 03	78
Comparação entre Métodos de Mapeamento Topográfico de Cavernas Ferríferas: Estudo de Caso na Amazônia Brasileira.....	78
1. INTRODUÇÃO	78
2. MATERIAIS E MÉTODOS	81
3. ESTUDO DE CASO NA PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DA SERRA DOS CARAJÁS	88
3.1. Análise Estatística Descritiva.....	88
3.2. Cálculo do Volume pelo Método Convencional x Escaneamento a Laser 3D.....	96
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
AGRADECIMENTOS.....	101
REFERÊNCIAS	101
DISCUSSÃO GERAL	104
CONCLUSÃO GERAL	107
REFERÊNCIA GERAL	108

1. ASPECTOS INTRODUTÓRIOS

1.1 Contextualização e motivação do trabalho

A mineração desempenha um papel crucial na economia do Brasil e é impossível conceber uma sociedade contemporânea e futura que não conte com a indústria mineral, dada a sua ampla variedade de aplicações. Sendo um dos principais alicerces da economia brasileira, a mineração tem o potencial de contribuir de maneira significativa para a melhoria do bem-estar e da qualidade de vida das atuais e futuras gerações, desde que seja conduzida com responsabilidade social e esteja em conformidade com os princípios do desenvolvimento sustentável (JEGER; PROFETA, 2018).

No entanto, a exploração de reservas minerais pode resultar em mudanças no meio social e ambiental da região circunvizinha ao empreendimento mineral. Assim, uma das consequências da atividade de mineração pode ser a alteração do ambiente físico nas áreas próximas de cavidades naturais subterrâneas. Dessa forma, vale destacar que conforme estabelecido pelo Decreto nº 6.640/2008, *“Entende-se por cavidade natural subterrânea todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, fuma 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.”* (BRASIL, 2008).

As cavidades naturais subterrâneas representam um ecossistema abundante com características singulares. A falta de luz e a ausência de vegetação possibilitam o surgimento de formas de vida exclusivas nessas condições desafiadoras como, por exemplo, os troglóbios. Essas características, por si só, já justificariam a valiosa natureza desse patrimônio natural e, em particular, ressaltam a necessidade crucial de sua conservação (MALTEZ; ROCHA, 2019). Vale lembrar que além disso, conforme estipulado pela Constituição Federal brasileira, as cavernas são enquadradas como bens da união, assim como ocorre com os recursos minerais que ocorrem no subsolo (BRASIL, 1988). Isso ocorre devido à importância multidisciplinar das cavidades para o povo brasileiro, em decorrência da disponibilização de recursos hídricos, aspectos histórico-culturais, turismo, recreação e educação ambiental (MONTEIRO *et al.*, 2019).

A relevância do patrimônio espeleológico para a humanidade é ampla, além de ser uma rica fonte de conhecimento científico que abarca grande parte da existência humana e da

evolução do planeta, este notável patrimônio não apenas tem se destacado economicamente (depósitos de salitre) desde antes da revolução industrial, mas também tem ganhado cada vez mais importância, especialmente ao longo desse último século, em especial por ser fonte de recursos hídricos (OLIVEIRA; CORREA, 2019).

Um ponto importante sobre as cavernas que precisa ser destacado é que as cavidades naturais subterrâneas são classificadas no Brasil de acordo com o seu grau de relevância em máximo, alto, médio ou baixo. Isso é determinado pela análise de atributos ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, avaliados sob enfoque regional e local (BRASIL, 2008). Dessa forma os levantamentos topográficos em cavernas são pontos fundamentais para a classificação do respectivo grau de relevância.

O mapeamento topográfico (espeleotopografia) das cavernas é fundamental para o entendimento da morfologia, das dimensões, das direções das galerias, dos obstáculos existentes, da relação com a superfície e da localização das entradas. Além disso, o mapa é a prova concreta de uma exploração espeleológica, indicando os locais atingidos pelo levantamento topográfico e as possibilidades de continuções, além dos dados espeleométricos. Os mapas topográficos servem ainda como base para estudos científicos interdisciplinares, bem como para fins de licenciamento ambiental (FERNANDES *et al.*, 2023).

De maneira geral, os levantamentos topográficos envolvem a definição de uma série de estações dentro da caverna, conectando-as de modo a permitir a determinação da posição relativa de cada uma em relação a um ponto de referência previamente estabelecido, como uma entrada, e em relação aos contornos da cavidade, incluindo suas paredes, piso e teto. Esses pontos são conhecidos como bases topográficas (RUBBIOLI; MOURA, 2005).

Com relação ao levantamento topográfico de cavernas, existem vários métodos no Brasil e no mundo, que vão desde mapeamentos utilizando equipamentos mais simples e de baixo custo até métodos modernos e de alto valor agregado. Dessa forma, o método convencional (mais antigo e mais simples) utiliza como instrumentos básicos bússola, clinômetro, trena e GPS de navegação (*Global Positioning System*) (MAGALHÃES; LINHARES, 1997). Com relação aos métodos mais modernos, o que existe na vanguarda dos mapeamentos é o escaneamento a laser 3D, que oferece a aquisição de dados que permite a obtenção de produtos mais precisos, detalhados e apropriados para a utilização em softwares e ambientes digitais (ARAÚJO, 2016).

Dentro da temática de mapeamento topográfico de cavernas, destaca-se atualmente a necessidade de levantamentos topográficos em cavidades situadas em litotipos ferruginosos (itabiritos, jaspilitos, cangas e ferricretes), em especial pela demanda crescente de solicitações de licenciamento ambiental no Brasil, principalmente para empreendimentos de mineração de ferro que vem expandindo as suas operações no país.

Nesse contexto destacam-se as cavidades em litotipos ferruginosos da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, foco desse estudo, e que foram alvo de análises morfológicas, genéticas e espeleotopográficas. Vale destacar que foram realizados estudos biológicos, hidrológicos/hidrogeológicos, geoespeleológicos, classificações geomecânicas e de relevância em algumas dessas cavernas com o intuito de atender aos processos de licenciamento ambiental (CARSTE, 2010; RONAIB *et al.*, 2019).

Dessa forma, no presente estudo pretende-se avançar e aprofundar o entendimento sobre os levantamentos topográficos modernos aplicados ao estudo de cavidades naturais subterrâneas em litotipos ferruginosos, tendo como intuito minimizar os erros associados aos cálculos espeleométricos obtidos através do método de levantamento topográfico convencional, além de compreender os processos de gênese que influenciam na morfologia dessas cavernas. A incerteza nos cálculos das dimensões das cavernas obtidas por meio do levantamento topográfico convencional é o principal problema a ser investigado na presente pesquisa.

1.2 Justificativa

A realização da presente pesquisa é justificada em decorrência da deficiência do levantamento topográfico convencional no mapeamento de cavidades naturais subterrâneas e que é amplamente utilizado nos processos de licenciamento ambiental no Brasil. Para tanto, foram selecionadas cavidades em litotipos ferruginosos da região de Carajás para a realização do presente estudo de caso. Dessa forma, existe uma grande necessidade de mapear o interior dessas cavernas para avaliar sua importância no contexto dos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos, bem como para fonte de estudos científicos multidisciplinares.

É importante destacar também que, como a maior parte das cavernas foi topografada utilizando o método convencional nos processos de licenciamento ambiental no Brasil. Logo, essas cavidades não terão os seus parâmetros espeleométricos calculados de forma precisa e com fidelidade em relação as condições reais de campo.

Vale ressaltar também que há escassez de material bibliográfico sobre espeleotopografia de cavidades utilizando o escaneamento a laser 3D no Brasil e de estudos científicos sobre topografia de cavidades abrangidas por atividades minerárias que exploram minério de ferro. Dessa forma, por meio do levantamento topográfico de cavernas com a utilização do laser scanner, é possível obter milhares de pontos com precisão espacial na escala de milímetros, tornando mais fácil a obtenção de dados geológicos, estruturais e espeleométricos, de forma segura e com precisão muito superior quando comparado com o método topográfico convencional.

1.3 Objetivos

O presente estudo tem o intuito de investigar a acurácia do levantamento topográfico de cavernas via escaneamento a laser 3D frente ao levantamento convencional, além de identificar possíveis distorções entre os resultados obtidos pelo segundo método em relação ao primeiro. Dessa forma, foram analisados os resultados dos levantamentos topográficos convencionais e via escaneamento a laser 3D em cavernas da região da Província Espeleológica da Serra dos Carajás. Para tanto, foram utilizados dados disponibilizados pela empresa Vale S.A., que foram obtidos por meio de processos de licenciamento ambiental.

Os objetivos específicos são:

- Realizar revisão de literatura sobre o histórico e estado da arte a respeito do mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral no Brasil e no mundo;
- Estudar a influência das feições morfológicas/geométricas, da hipsometria, das estruturas geológicas, dos litotipos e da espeleometria com a ocorrência e gênese de cavernas em litotipos ferríferos de Carajás;
- Determinar o parâmetro espeleométrico (projeção horizontal, área ou volume) que melhor caracteriza os atributos geométricos de uma cavidade na área de estudo, no que se refere ao aspecto de dimensões notáveis previsto na legislação (cavidade que apresente extensão, área ou volume superiores a 8 vezes a mediana relativo ao enfoque local ou regional);
- Comparar os métodos convencional e por escaneamento a laser 3D no levantamento topográfico de uma amostra de cavernas situadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com o intuito de investigar e quantificar o nível de imprecisão do levantamento convencional.

1.4 Estrutura da Tese

A presente Tese possui a estrutura de sete capítulos e três anexos (três artigos publicados em revistas científicas). Dessa forma, a Tese é distribuída da seguinte maneira:

Capítulo 1 - Aspectos Introdutórios - apresenta uma revisão bibliográfica sobre os temas de legislação ambiental brasileira, mapeamento topográfico de cavernas e levantamentos topográficos modernos aplicados a espeleologia.

Capítulo 2 - Localização da Área de Estudo - apresenta a localização das cavernas pesquisadas e seu respectivo posicionamento na Província Espeleológica da Serra dos Carajás.

Capítulo 3 - Materiais e Métodos - apresenta toda a metodologia utilizada para a elaboração da Tese, abrangendo desde a revisão bibliográfica, passando por aquisição, integração e interpretação dos dados espeleométricos e morfológicos analisados.

Capítulo 4 - Apresentação dos Resultados - apresenta a consolidação e síntese dos resultados obtidos nos 3 artigos elaborados.

Capítulo 5 - Síntese das Discussões dos Artigos - apresenta a consolidação e síntese das discussões dos 3 artigos elaborados.

Capítulo 6 - Considerações Finais - Conclusões obtidas no presente estudo, bem como a proposição de pesquisas futuras.

Capítulo 7 - Referências - apresenta todos os trabalhos citados e utilizados como bibliografia base para a presente pesquisa.

Anexo 01 - Mapeamento Topográfico de Cavernas no Setor Mineral: Avanços e Novas Tecnologias - Primeiro artigo publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia em 04/09/2023.

Anexo 02 - Morfologia e Gênese de Cavernas da Serra Sul - Província Mineral de Carajás/PA - Segundo artigo publicado na Revista de Geografia (UFPE) em 11/04/2024.

Anexo 03 - Comparação entre Métodos de Mapeamento Topográfico de Cavernas Ferríferas: Estudo de Caso na Amazônia Brasileira - Terceiro artigo publicado na Revista Brasileira de Cartografia em 17/01/2024.

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Serra dos Carajás, está localizada no estado do Pará, Brasil, e estende-se do município de São Félix do Xingu, a oeste, até Curionópolis, extremo leste, sendo os principais platôs encontrados nos municípios de Parauapebas e Canaã dos Carajás (VIANA *et al.*, 2016).

As cavernas do presente estudo estão situadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás, no sudeste do estado do Pará (VALENTIM; OLIVITO, 2011). A Serra dos Carajás abriga depósitos minerais de classe mundial dos metais Fe, Mn, Au, Al, Cu, Sn, Ni, Cr, Pt, entre outros. As jazidas de ferro são hospedadas em uma sequência metavulcanossedimentar do Grupo Grão Pará ao longo de um conjunto de serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan, da Bocaina e do Rabo-Estrela, que são foco deste estudo (Figura 1). Nesse grupo predominam rochas máficas vulcânicas sobrepostas e sotopostas aos jaspilitos e corpos de minério de ferro de alto teor ($\text{Fe} > 64\%$) (LOBATO *et al.*, 2005).

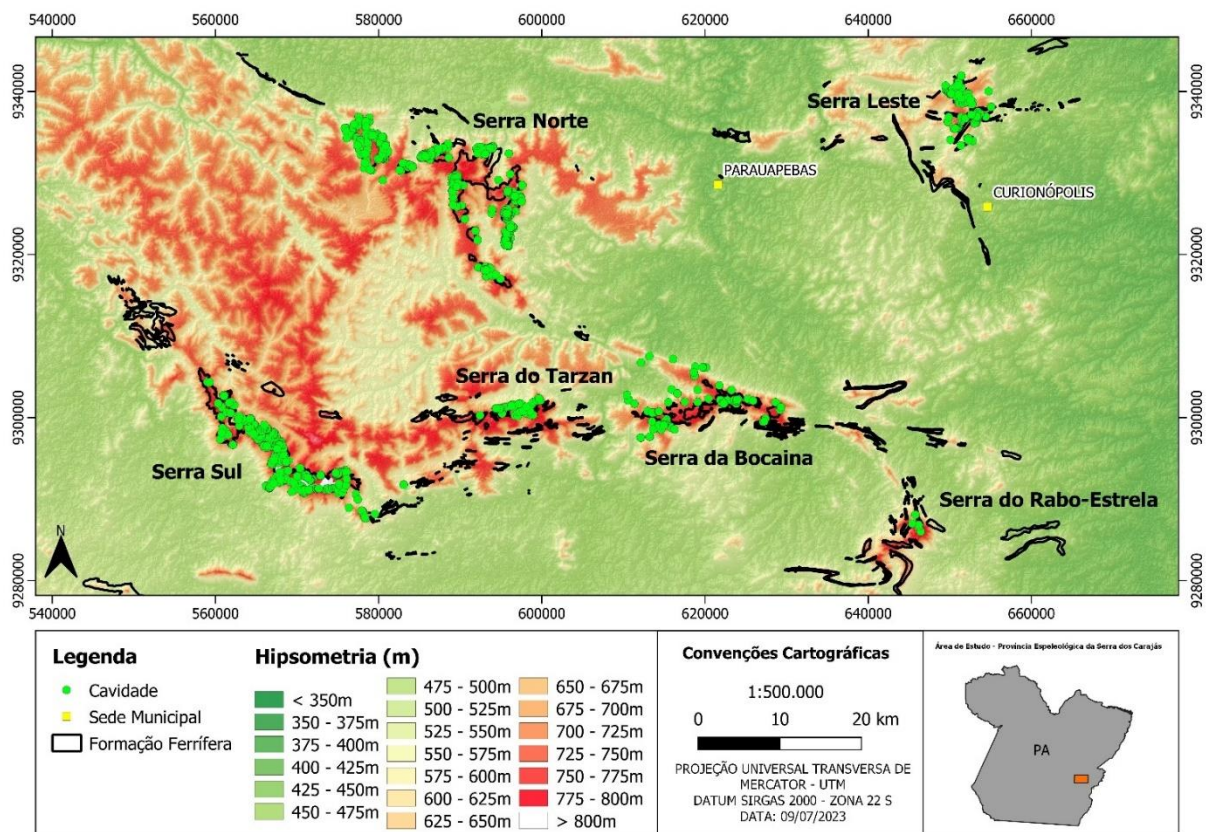


Figura 1 - Localização das cavernas estudadas e das Serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan, da Bocaina e do Rabo-Estrela, Província Espeleológica da Serra dos Carajás (PA). Fonte: Banco de dados - Vale S.A. (2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi dividido em 3 etapas principais, descritas a seguir.

3.1 Etapa 1: Revisão Bibliográfica

Revisão sobre os aspectos geológicos, tectônicos, geomorfológicos, pedológicos e pluviométricos de forma regional e local, que estejam envolvidos com a gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás. Além disso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a ocorrência de cavidades naturais subterrâneas em litotipos ferruginosos, mapeamento topográfico aplicado ao estudo de cavernas e legislação vigente no Brasil aplicada a espeleologia.

3.2 Etapa 2: Aquisição de Dados

Essa etapa consistiu na atividade de obtenção dos dados provenientes dos mapeamentos topográficos nas cavernas da área de estudo. Por meio dos resultados dos trabalhos espeleotopográficos foi possível obter os parâmetros espeleométricos (projeção horizontal, desnível, área e volume), calculados através dos levantamentos topográficos convencional e via escaneamento a laser 3D. Além disso, através desses mapeamentos foram identificadas características morfológicas, geológicas, estruturais, hipsométricas e hidrológicas importantes dessas cavernas.

Foi construído um banco de dados com base nas informações obtidas através de processos de licenciamento ambiental disponibilizados pela empresa Vale S.A. Dessa forma, foi possível, definir a área de estudo, reunir e consolidar informações sobre 1.758 cavernas da Província Espeleológica da Serra dos Carajás. Vale destacar que foram selecionadas essas cavernas da Província de Carajás por conta do grande potencial espeleológico desse local e da importância dessa região para a indústria da mineração brasileira.

3.3 Etapa 3: Integração e Interpretação dos Dados

Os dados provenientes dos mapeamentos topográficos das cavernas supracitadas foram consolidados utilizando a ferramenta *Microsoft Excel*. Após essa consolidação foram produzidos gráficos e análises estatísticas descritivas a partir dos dados obtidos.

Dessa forma, foi realizada uma análise planigeométrica, conforme padrões morfológicos planimétricos propostos por Palmer (1991; 2003) e geométricos por Calux *et al.* (2019), tendo por base a relação geométrica entre as paredes e a entrada, ou seja, leva em consideração as partes mais limítrofes das cavidades. Além da correlação com dados geológicos e estruturais e, conseqüentemente, a proposição dos processos de gênese e evolução geológica para o grupo de cavidades naturais estudadas.

Além disso, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos por meio do levantamento topográfico convencional e do escaneamento utilizando o laser *scanner* 3D para fins de cálculo volumétrico, com o intuito de verificar o quão discrepante os resultados do método convencional são em relação aos do escaneamento a laser 3D. Sendo utilizada a premissa de que o segundo método é mais preciso que o primeiro, pelo fato de utilizar um número infinitamente maior de seções topográficas no cálculo da integral. Dessa forma, foi possível analisar as variações geográficas, geológicas e estruturais que condicionam a gênese, morfologia e parâmetros espeleométricos das cavernas.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da presente Tese atingiram todos os objetivos estabelecidos para o seu desenvolvimento. Para que isso fosse possível foram elaborados 3 artigos científicos que foram submetidos em periódicos revisados por pares e que estão apresentados como anexo a este documento.

O Artigo 1 (Anexo 01 - Mapeamento Topográfico de Cavernas no Setor Mineral: Avanços e Novas Tecnologias) contempla uma revisão bibliográfica onde é abordada sobre a evolução e o estado da arte no que se refere aos métodos e equipamentos para levantamento topográfico de cavernas no setor mineral. Vale destacar que os registros cartográficos das cavernas desempenham um papel essencial como dados primordiais para uma variedade de pesquisas científicas, processos de licenciamento ambiental e decisões tomadas por entidades públicas, visando à conservação do patrimônio espeleológico.

O Artigo 2 (Anexo 02 - Morfologia e Gênese de Cavernas da Serra Sul - Província Mineral de Carajás/PA) aborda a relação entre as feições morfológicas/geométricas das cavernas com os dados levantados das seguintes variáveis: hipsometria, estruturas geológicas, litotipos e espeleometria. Tendo como intuito principal o estabelecimento de correlações dessas variáveis com atributos genéticos de um conjunto de cavernas em litotipos ferruginosos na Serra Sul, Província Mineral de Carajás (PA).

O Artigo 3 (Anexo 03 - Comparação entre Métodos de Mapeamento Topográfico de Cavernas Ferríferas: Estudo de Caso na Amazônia Brasileira) define o parâmetro espeleométrico mais relevante para a caracterização morfológica/geométrica das cavernas ferruginosas analisadas. Além disso, compara os resultados obtidos do levantamento topográfico convencional e via escaneamento a laser 3D da variável espeleométrica volume em uma amostra de cavernas da Província Espeleológica da Serra dos Carajás com o

propósito de reduzir as incertezas associadas ao levantamento topográfico convencional.

Neste estudo de caso observa-se que, de modo geral, o escaneamento a laser, que é mais preciso que o convencional, resultou em estimativas de volume inferiores para cavernas ferríferas em comparação com o método convencional de levantamento topográfico. Adicionalmente, uma equação de regressão linear foi proposta ($Volc = 1,1385 * Vols + 41,157$, onde: $Volc$ é o resultado obtido do parâmetro espeleométrico volume por meio do método convencional de levantamento topográfico e $Vols$ é o resultado calculado do volume com base no escaneamento a laser 3D). Dessa forma, essa equação fornece uma base para análise do comportamento dos dados de volume dentro da população amostral examinada e facilitando comparações com futuros levantamentos em cavernas de grandes extensões e em ambientes geológicos distintos aos das formações ferríferas.

5. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R. N. **Levantamento de parâmetros geomecânicos de uma cavidade natural subterrânea utilizando tecnologias de laser *scanner* 3D e realidade virtual**. 2016. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Diário Oficial da União, Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. **Decreto Federal nº 6.640, de 07 de novembro de 2008**. Dá nova redação ao Decreto nº 99.556, de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Diário Oficial da União, Brasília, DF: Senado Federal, 2008.

CALUX, A.; CASSIMIRO, R; SALGADO, A.A.R. Caves in iron formation in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, southeastern Brazil: lithological, morphological and hydrological settings and speleogenesis. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v.62/2, p.125-144, 2019.

CARSTE. **Espeleologia do S11D Serra Sul, Região de Carajás – PA**. Belo Horizonte: Carste, 2010.

FERNANDES, A.B.; BORBA, R.P.; BRANDI, I.V.; ARAÚJO, R.N.; SCHERER, B.S.; CORRÊA, T.R.; BOULHOSA, G.S. Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.24, n.3, p. 1-15, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i3.2315

JEBER, A.; PROFETA, A.L. Meio Ambiente e Mineração. *In*: Pedrosa-Soares, A.C.; Voll, E.; Cunha, E.C. (eds.) **Recursos Minerais de Minas Gerais On Line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, meio ambiente e mineração de Minas Gerais**: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), ed. 1. Belo Horizonte: CODEMGE, 2018. p. 1-67. Disponível em: <<http://recursomineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/MAMineracao.pdf>> Acesso em: out. 2023.

LOBATO, L.ROSIÈRE, C.; FIGUEIREDO E SILVA, R.; ZUCCHETTI, M.; BAARS, F.; SEOANE, J. C.; RIOS, F.; PIMENTEL, M.; MENDES, G. E.; MONTEIRO, A. M. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás, controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. *In*: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W. **Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia**. ed. 1. Brasília: ADIMB/DNPM, 2005. p. 21-92. Disponível em: <https://www.adimb.com.br/site/publicacoes_amazonia/indice/Cap_I.pdf> Acesso em: out. 2023.

MAGALHÃES, E. D.; LINHARES, J.C. **Curso Prático de Topografia - Espeleo Grupo de Brasília (EGB)**. 1ª Ed. Brasília: Espeleo Grupo de Brasília (EGB), 1997. 43p. Disponível em: <<https://repositorio.icmbio.gov.br/handle/cecav/258>> Acesso em: out. 2023.

MALTEZ, R.T.; ROCHA, C.S.C. As cavidades naturais subterrâneas como bens ambientais especialmente protegidos. **Cadernos Jurídicos**, v. 20, nº 48, p. 87-111, 2019.

MONTEIRO, F.A.D; MONTEIRO, J.F.N.; MOURA, P.E.F. Que riquezas podemos encontrar nas cavernas?. *In*: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35, 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p.430-438. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_430-438.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2024.

OLIVEIRA, I.P.M.R.; CORREA, D. Instrumentos de proteção ao patrimônio espeleológico de Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35, 2019. Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p.253-262. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_253-262.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2024.

PALMER, A.N. Origin and morphology of limestone caves. **Geological Society of America Bulletin**, v. 103, p. 1-21, 1991.

PALMER, A.N. Speleogenesis in carbonate rocks. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 1, p. 1-11, 2003.

RONAIB, C.; DOUGLAS, A.; VIEIRA, V.; BARBOSA, M.; GUIMARÃES, R.; BRANDI, I. Estudos Preliminares de Caracterização Litoestrutural e Geomecânica em Cavidades Ferríferas, Carajás - PA. **Espeleotema**, v.29, n.2, p. 195-212, 2019.

RUBBIOLI, E.; MOURA, V. **Mapeamento de Cavernas – Guia Prático**. Belo Horizonte: Redespeleo, 2005.

VALE S.A. **Resumo do Relatório Técnico de recursos e reservas minerais das minas do Complexo Serra Norte**. Parauapebas: Vale S.A., 2021.

VALENTIM, R. F.; OLIVITO, J. P. R. Unidade Espeleológica Carajás: delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da IN-02/2009 MMA. **Espeleotema**, v.22, n.1, p. 41-60, 2011.

VIANA, P.L.; MOTA, N.F.O.; GIL, A.S.B.; SALINO, A.; ZAPPI, D.C.; HARLEY, R.M.; ILKIU-BORGES, A.L.; SECCO, R.S.; ALMEIDA, T.E.; WATANABE, M.T.C.; SANTOS, J.U.M.; TROVÓ, M.; MAURITY, C.; GIULIETTI, A.M. Flora of the cangas of the Serra dos Carajás, Pará, Brazil: history study area and methodology. **Rodriguésia** v. 67, n. 5, p. 1107-1124, 2016. DOI: 10.1590/2175-7860201667501

ANEXO 01

Artigo publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia em 04/09/2023

DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2315>

Mapeamento Topográfico de Cavernas no Setor Mineral: Avanços e Novas Tecnologias

Adam Barros Fernandes¹, Ricardo Perobelli Borba¹, Iuri Viana Brandi², Ramon Nunes Araújo², Bruno dos Santos Scherer², Tomás Romualdo Corrêa³ e Gabrieli Santos Boulhosa⁴

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências do Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

² Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil.

RESUMO

Os mapas topográficos de cavernas são base de dados fundamentais para uma série de estudos científicos, trabalhos de licenciamento ambiental e tomadas de decisão dos órgãos públicos para preservação do patrimônio espeleológico. Porém, a confecção desses mapas segue praticamente a mesma metodologia dos últimos 100 anos, utilizando três equipamentos básicos: bússola, clinômetro e trena. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica da evolução dos métodos de levantamento topográfico de cavernas aplicadas ao contexto de atividades de mineração. São comparados os tipos de instrumentos utilizados nas diferentes técnicas de mapeamento topográfico de cavidades naturais subterrâneas. No que se refere aos levantamentos topográficos mais atuais, o uso do laser *scanner* 3D e da fotogrametria vem se mostrando como métodos promissores com relação a obtenção dos parâmetros espeleométricos (ex: área, volume e projeção horizontal), tendo em vista a maior agilidade para a realização do levantamento de campo, maior facilidade para interpretação das estruturas geológicas, além do ganho em segurança para a equipe em campo.

Palavras-chave: Espeleologia; Topografia; Disto X; Laser *Scanner* 3D; Fotogrametria.

1. INTRODUÇÃO

A espeleologia brasileira vivenciou uma grande transformação em decorrência das mudanças ocorridas na legislação do Brasil no âmbito do licenciamento ambiental, em especial com a publicação da Resolução nº 005/1987 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, que aprovou o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, instituindo a obrigatoriedade da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental nos casos de empreendimento potencialmente lesivo ao Patrimônio Espeleológico Nacional (CONAMA, 1987).

As cavernas no Brasil são estabelecidas como bens da União, conforme disposto pelo art. 20 da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988). Além disso, de acordo com o Decreto nº 6.640/2008, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, menciona-se: “*As cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional deverão ser protegidas, de modo a permitir a realização de estudos e de pesquisas de ordem técnico-científica, bem como atividades de cunho espeleológico, étnico-cultural, turístico, recreativo e educativo.*” (BRASIL, 2008). Dessa forma, pode-se perceber a relevância do patrimônio espeleológico para todo povo brasileiro.

As empresas de mineração ao realizarem o mapeamento das cavernas existentes na área diretamente afetada (ADA) e indiretamente afetada (AIA) pelo empreendimento acrescentam a elas um raio de influência de 250 metros para preservação e incluem em seu inventário todas aquelas cavidades cujo raio de 250 metros intercepta essa área, independentemente do seu grau de relevância (SALUM, 2013).

De acordo com o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), no Brasil, existem por volta de 21.500 cavidades naturais subterrâneas cadastradas no banco de dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) (ICMBio, 2021). Porém, conforme proposto por Auler e Zogbi (2005), há uma expectativa de que o Brasil possua mais de 100.000 cavidades. Dessa forma, com o intuito de realizar pesquisas multidisciplinares e preservar o patrimônio espeleológico, é primordial a realização do mapeamento topográfico das cavernas.

O mapa espeleológico é essencial por uma série de motivos, tais como: definição da morfologia da cavidade em relação ao relevo externo, orientação espacial e dimensão dos condutos, identificação de instabilidades geotécnicas (ex: abatimento de blocos), existência de surgências, presença de estruturas geológicas e espeleotemas. Além disso, o mapa é evidência de que a exploração foi de fato realizada, também indicando novas possibilidades de continuidade dos condutos.

Por intermédio do resultado do mapeamento é possível obter os parâmetros espeleométricos da caverna (posicionamento geográfico da(s) entrada(s), área, volume, projeção horizontal, desenvolvimento linear e desnível). Por fim, o mapa serve de base para outros trabalhos a serem desenvolvidos dentro das cavernas nas áreas da geologia, biologia, paleontologia, paleoclimatologia, arqueologia, história, turismo etc. (RUBBIOLI et al., 2019). Com a inclusão da espeleologia no âmbito dos processos de licenciamento ambiental,

o mapeamento topográfico tornou-se ponto fundamental para reconhecer, documentar e preservar cavernas nas áreas direta e indiretamente afetadas por empreendimentos de mineração, obras civis e produção de energia elétrica.

Conforme disposto por Rubbioli et al. (2019), com relação aos levantamentos topográficos, tem-se que: “os levantamentos consistem em estabelecer uma série de pontos dentro da caverna (bases ou estações), interligados por visadas, de forma que seja possível saber a posição relativa de cada um em relação a um referencial predeterminado (uma entrada, por exemplo) e em relação aos limites da cavidade (paredes, piso e teto). Esses pontos são chamados de bases topográficas.” Dessa forma, pode-se perceber que conceitualmente o mapeamento de cavernas não mudou ao longo do tempo, mas sim os equipamentos e ferramentas utilizadas para levantamento e produção dos mapas (Figura 2).

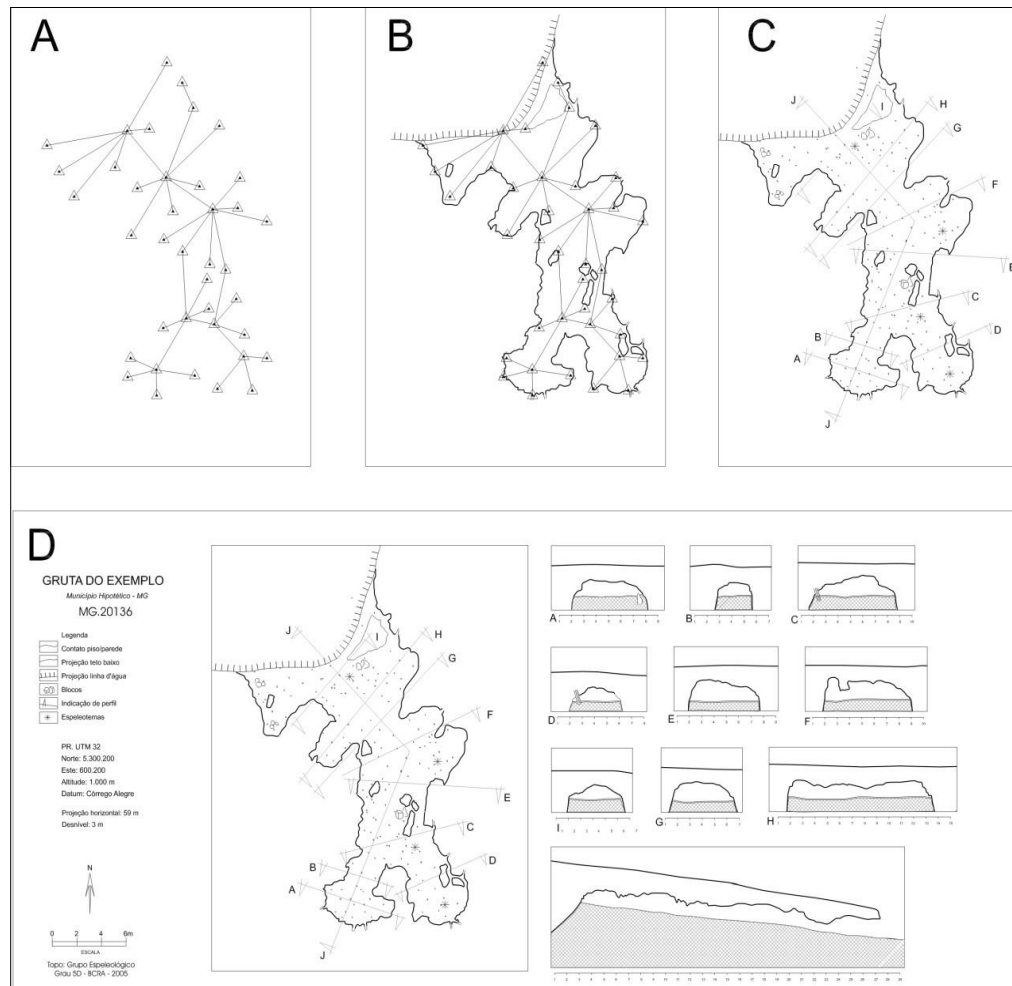


Figura 2 - Evolução do processo de confecção da planta baixa de uma caverna hipotética. Representação das visadas (linhas) e bases topográficas (triângulos), também chamada de linha de trena (A); Fechamento da poligonal com o traçado do contorno das paredes da caverna (B); Plotagem dos detalhes específicos de cada caverna, como blocos abatidos, textura do piso, espeleotemas, cursos d'água etc. Além da identificação dos cortes transversais e perfil longitudinal (C); Mapa topográfico final contendo todas as informações supracitadas (D). Fonte: ICMBio, (2011).

Vale destacar também que grande parte da literatura sobre a espeleologia demonstra o papel fundamental dos mapas topográficos para embasamento de outros estudos interdisciplinares para fim de registro inicial, pesquisas científicas ou licenciamento ambiental (RUBBIOLI; MOURA, 2005; LOTT, 2013). Porém, como existem escassos trabalhos científicos que discutem especificamente sobre o tema de levantamento topográfico em cavernas no setor mineral, este artigo pretende ser uma contribuição relevante do ponto de vista conceitual quanto à evolução das técnicas para mapeamento de cavernas ao longo do tempo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este artigo contempla uma revisão de literatura sobre o histórico e estado da arte a respeito do mapeamento topográfico de cavidades naturais subterrâneas em áreas de mineração, tendo em vista as escassas publicações sobre essa temática. Dessa forma, buscou-se informações referentes a evolução das metodologias, técnicas, equipamentos e softwares utilizados para tratamento dos dados dos levantamentos topográficos em cavernas ao longo do tempo.

3. CONTEXTO HISTÓRICO

No âmbito do levantamento e registro topográfico de cavernas, o ato de mapear passou de uma forma rudimentar de documentação para uma ferramenta essencial na definição do grau de relevância e respectiva conservação das cavidades (RUBBIOLI et al., 2019).

Durante o século 16, viajantes, tais como estudiosos, comerciantes, artistas e nobres visitavam as regiões cársticas da Europa. Eles ansiavam por novas descobertas, inspiração romântica ou até mesmo algum tipo de distração prazerosa, que poderia ser satisfeita explorando cavernas. Os motivos desses viajantes, no entanto, eram diversos. Por exemplo, alguns adentravam nas cavernas para expandir seus conhecimentos e prosseguir com pesquisas, enquanto outros tinham o objetivo de ampliar suas coleções de objetos naturais como plantas raras, insetos, fósseis e minerais (SHAW, 2008).

A necessidade de realizar o mapeamento de cavernas é reconhecida há séculos. O mapa mais antigo com precisão razoável, que se tem notícia, é datado de 1748 da caverna *Postojnska jama* situada na Eslovênia (NAGEL, 1748) (Figura 3). A evolução gradual na qualidade e precisão dos mapas das cavernas pode ser rastreado seguindo a sequência histórica de mapas da *Mammoth Cave* nos Estados Unidos (SUTTON, 2017) (Figura 4). Sendo que o primeiro mapa da *Mammoth Cave* é um esboço com pouco detalhamento da

caverna publicado em 1811, já a última atualização do mapeamento dessa caverna (ainda incompleto) exibe um comprimento de aproximadamente 663 km (SUTTON, 2017).

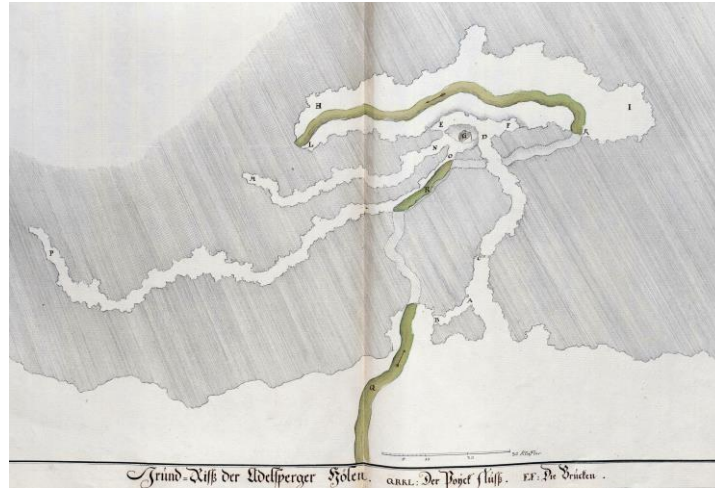


Figura 3 - Mapa topográfico da caverna Postojnska jama situada na Eslovênia, elaborado por Joseph Anton Nagel. Fonte: Nagel, (1748).

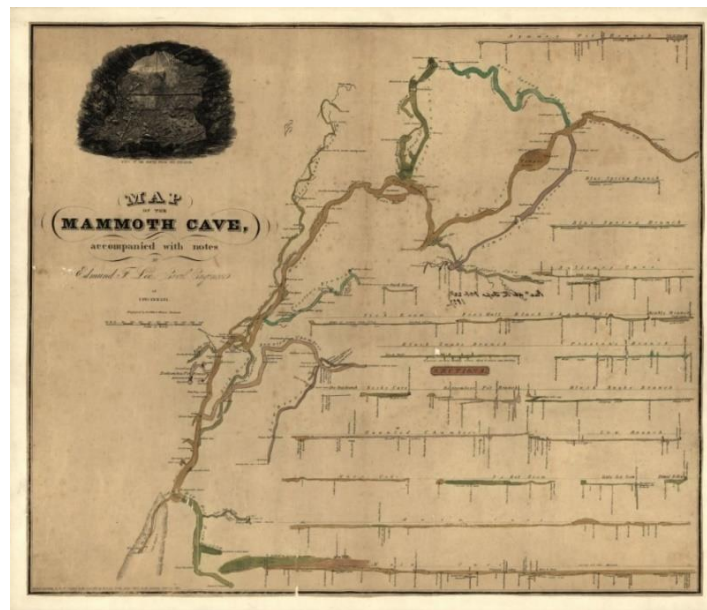


Figura 4 - Mapa topográfico da caverna Mammoth Cave situada no Kentucky, Estados Unidos. Fonte: Lee, (1835).

Historicamente, o trabalho de campo voltado para pesquisas sobre espeleologia se iniciou em meados do século 18, quando práticas empíricas utilizando conceitos básicos das ciências da terra eram aplicados em estudos de campo (WYSE JACKSON, 2007). Antes desse período as hipóteses sobre a espeleogênese eram formuladas sem observações diretas de campo. Porém, a partir do século 18, estudos espeleológicos se tornaram impensáveis sem a coleta de dados em campo. Desde então, a prática de campo foi um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento da espeleologia como uma área de estudo específico da ciência (VACCARI, 2007; KLEMUN, 2012). No final do século 19, com o avanço dos métodos topográficos,

baseados anteriormente nas técnicas aplicadas para as operações de mineração na Eslovênia, os espeleólogos começaram a estabelecer seus próprios métodos para levantamento de cavernas (ARNBERGER, 1966).

No início para a medição indireta das distâncias dentro de uma caverna era calculado o tempo em horas, ou seja, o tempo necessário para atravessar os condutos da caverna. Já com relação aos primeiros estudos espeleológicos do século 19, eles começaram a calcular distâncias nas cavernas utilizando unidades de comprimento. Como exemplo, pode ser citada a exploração de Adolf Schmidl de mais de 15 quilômetros em cavernas eslovenas, cujas pesquisas foram publicadas no anuário do Serviço Geológico Austríaco (SCHMIDL, 1850; SHAW, 1978). Este pesquisador também criticou a prática de considerar o tempo necessário para cobrir uma distância como o comprimento equivalente da caverna (SCHMIDL, 1854).

Em meados do século 19, o número de viajantes interessados em cavernas aumentou devido as melhorias na infraestrutura de transporte, o que facilitou viajar para regiões cársticas remotas. As fontes de informação, além de conselhos de companheiros de viagem, variavam de livros dos primeiros viajantes que descreviam maravilhas e manuais detalhados de algumas cavernas. Na década de 1820, os primeiros guias ilustrados foram difundidos, descrevendo as cavernas mais conhecidas da Croácia e Eslovênia. Esses guias foram publicados por pesquisadores como Girolamo Agapito (1823), Franz Hohenwart (1830-32), e Adolf Schmidl (1853) em várias línguas como italiano, alemão, francês e esloveno (MATTES, 2015). Por outro lado, nos Estados Unidos, a principal causa para o levantamento inicial das cavernas no início do século 19 foi a exploração de jazidas de salitre (WOOKEY, 2004).

Especialmente na Eslovênia, o mapeamento e nomeação de cavernas foi um ato político que representava o domínio social nas regiões do país de língua alemã ou italiana. Com o avanço do nacionalismo e contextos imperialistas no início do século 20 na Europa, este processo foi extremamente significativo. O espeleólogo austríaco Hans Reisner descreveu a cartografia de cavernas como um método para tomar posse de uma área subterrânea, com o objetivo de explorar os recursos subterrâneos de forma comercial e/ou científica (REISNER, 1921). Por fim, a adoção de métodos cartográficos e geodésicos para mapeamento de cavernas pode ser considerada como elemento fundamental para o estabelecimento da espeleologia como um campo independente da ciência (KYRLE, 1923).

É importante destacar que no campo da espeleologia, a primeira metade do século 20 é marcada pela busca por instrumentos adequados especificamente para o levantamento topográfico de cavernas e não a utilização dos mesmos equipamentos já aplicados em minerações subterrâneas nos países europeus (LÜDEMANN, 1927). Em decorrência das suas dimensões, peso e dificuldade para serem transportados, os instrumentos utilizados pelas mineradoras não foram considerados os mais adequados para o uso em cavernas. Dessa forma, após a Primeira Guerra Mundial, foram desenvolvidos e testados novos instrumentos, que foram eventualmente, modificados para a realidade das cavidades naturais. A partir disso, vários trabalhos foram publicados em revistas de espeleologia com o intuito de apresentar novas técnicas e instrumentos para o mapeamento de diversos tipos de cavernas (grutas, abismos, cavernas submersas, formadas pelo gelo etc.) (OEDL, 1923). Vale destacar também que cada clube ou sociedade espeleológica de meados do século 20 criou/padronizou um método específico de mapeamento e definiu a utilização de instrumentos para o levantamento topográfico, que basicamente era composto pelos seguintes equipamentos: bússola, nível, clinômetro e trena.

Com relação a espeleologia brasileira, a primeira descrição e levantamento de parâmetros espeleométricos que se tem registro no país foi realizado na Gruta da Onça, próxima a Vila Bela da Santíssima Trindade/MT no século 18. Esse mapeamento foi realizado pelo Alferes José Joaquim Leite de Campos, porém, o registro ficou restrito à informação escrita, não possuindo evidência de croqui ou mapa (AULER; RUBBIOLI; BRANDI, 2001).

Em meados do século 19, uma série de naturalistas estrangeiros também se interessaram pelo estudo de cavernas no Brasil. Esses cientistas se tornaram essenciais para o início do mapeamento e catalogação de cavidades. Dentre eles, destaca-se o dinamarquês Peter Wilhelm Lund e o norueguês Peter Andreas Brandt, que começaram os primeiros mapeamentos espeleológicos regulares do Brasil. Lund desenvolveu suas pesquisas no período de 1835 a 1844, gerando uma série de descobertas científicas, dentre elas mais de 100 cavidades naturais subterrâneas no estado de Minas Gerais, a descoberta de ossadas de animais e até mesmo ossos humanos, denominado popularmente como “homem de Lagoa Santa”. Além disso, Brandt era responsável pelas ilustrações e mapas que compunham a obra do naturalista Peter Lund (FIGUEIREDO, 2011).

Ao longo do século 20, com a criação dos grupos de espeleologia no Brasil ocorreu um grande avanço na realização de mapeamentos topográficos das cavernas brasileiras. Em 1950,

Richard Krone produziu o primeiro cadastro espeleológico brasileiro, catalogando 41 cavernas do Vale do Ribeira - SP, contendo mapas e fotografias dessas cavidades. Dessa forma, com o desenvolvimento da espeleologia brasileira, tornou-se necessária a criação de um grupo de espeleologia no país. Assim, em 1937 foi fundada a Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), da Escola de Minas de Ouro Preto. Em 1960 foi criada a seção de espeleologia do Clube Alpino Paulista, com o intuito de desenvolver os estudos espeleológicos no estado de São Paulo. Além disso, com o objetivo de incentivar a criação de novos grupos de espeleologia no Brasil, foi fundada em 1969 a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) (LINO, 1989; AULER, 1997).

Nos dias atuais novas tecnologias de mapeamento estão sendo cada vez mais utilizadas para a realização do mapeamento topográfico de cavernas, em especial as voltadas para o mapeamento em três dimensões (3D) das cavidades, com o intuito de levantar parâmetros espeleométricos e visualização em 3D, diferente da topografia tradicional que apresenta produtos em duas dimensões. Os resultados dos mapeamentos atuais além de gerarem mapas também produzem modelos em 3D com base na obtenção de nuvem de pontos por meio do levantamento de campo. Porém, consomem muito mais tempo de trabalho em escritório com o processamento e análise dos dados. Entretanto, os mapeamentos atuais geram um ganho de tempo no levantamento topográfico em campo e são capazes de gerar arquivos digitais que podem ser revisitados várias vezes.

4. LEVANTAMENTO ESPELEOTOPOGRÁFICO CONVENCIONAL

Em decorrência das suas características peculiares, para se mapear uma caverna com um grau de precisão satisfatório necessita-se de técnicas específicas para a realização do levantamento topográfico. Embora possam ser aplicados equipamentos topográficos tradicionais utilizados em superfície (como teodolito e estação total) nas cavernas com grandes salões, na maior parte das cavidades, que possuem pequenas dimensões, instrumentos leves, compactos e de baixo custo são essenciais.

Atualmente, para a realização do levantamento topográfico convencional de uma caverna são utilizados os seguintes instrumentos básicos: bússola, clinômetro, trena e GPS de navegação (*Global Positioning System*) (MAGALHÃES; LINHARES, 1997).

Utilizando esses equipamentos básicos da topografia convencional, consegue-se garantir uma relação custo/desempenho razoável, bem como uma boa operacionalidade dos instrumentos. Com o intuito de pesquisar condutos principais com maior precisão, os

espeleólogos também utilizam, em alguns casos, teodolito e estação total. Teodolitos e sistemas de GPS são frequentemente usados para levantamento de superfície de formações cársticas e entradas de cavernas (HELLER; NEUMANN, 2001).

É importante ressaltar também uma vantagem relevante do levantamento convencional em comparação aos métodos modernos que é a simplicidade, ou seja, o mapa em 2D é mais intuitivo e fácil para posicionamento e localização em campo do que os modelos muitas vezes mais complexos obtidos em 3D. Além disso, o mapa é por definição, uma representação da direta realidade, já o produto do escaneamento 3D é um modelo geométrico que precisa ser analisado e interpretado.

Um ponto importante sobre a técnica de levantamento topográfico convencional é que atualmente existem métodos disponíveis com maior precisão nas medições, pois esse método convencional depende da interpretação direta e experiência do espeleólogo em campo sobre as feições cársticas identificadas visualmente. Dessa forma, é um grande desafio representar um ambiente tridimensional de forma bidimensional (mapa topográfico), sendo necessário inferir alguns pontos. Além disso, por conta da iluminação insuficiente e da constante utilização da interpretação visual os erros associados se tornam mais comuns.

Vale destacar que o produto do levantamento topográfico convencional é um mapa topográfico bidimensional da cavidade mapeada (Figura 5), contendo: a planta baixa, seções transversais, seção longitudinal, localização geográfica da entrada da caverna, parâmetros espeleométricos (área, volume, projeção horizontal, desnível, grau de precisão etc.), características geológicas, biológicas, arqueológicas etc.

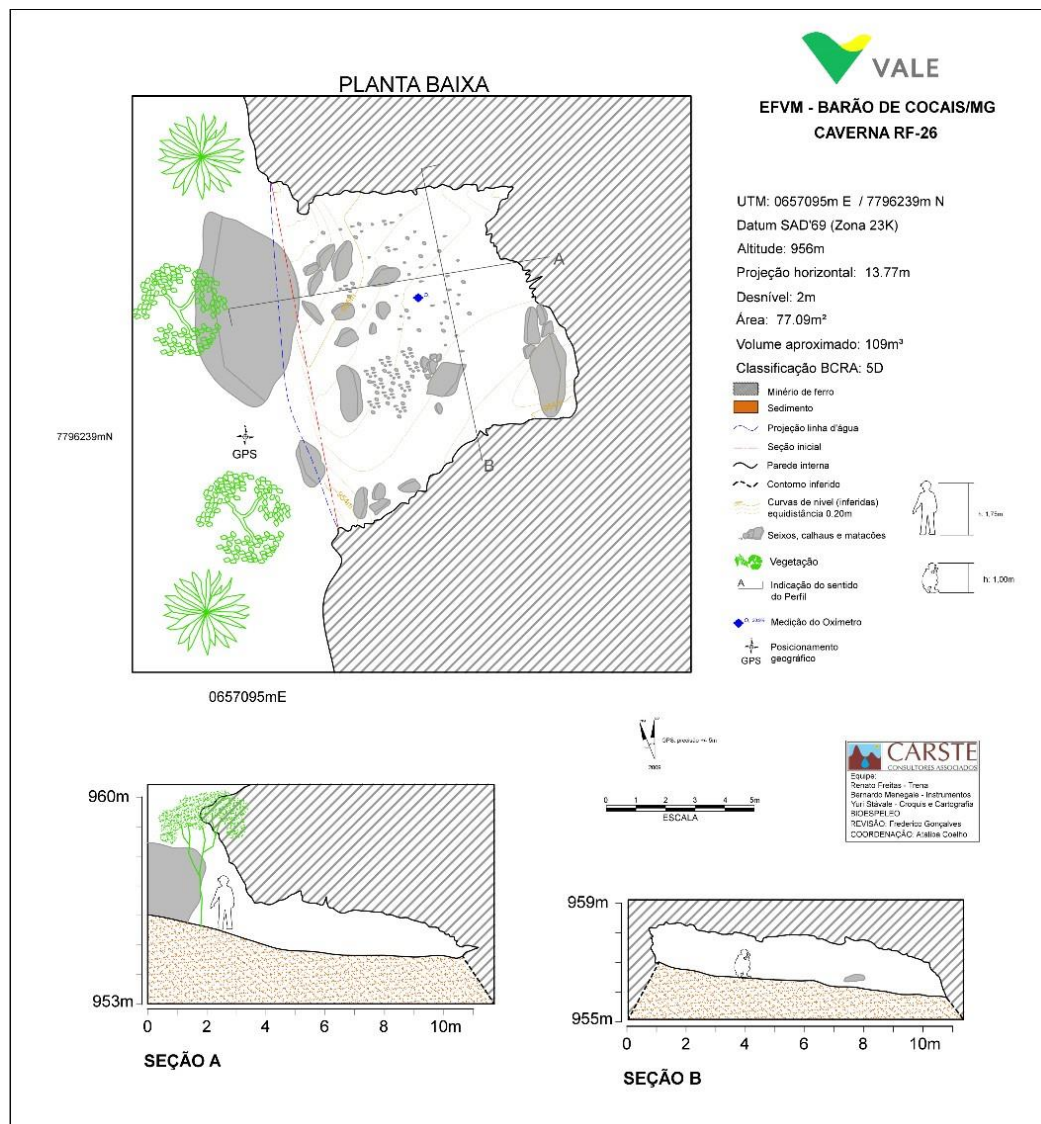


Figura 5 - Mapa topográfico produzido utilizando o levantamento topográfico convencional da caverna RF-26 situada em Formação Ferrífera Bandada (FFB) - Projeto EFVM - Barão de Cocais/MG. Fonte: Vale S.A., (2009).

5. LEVANTAMENTO ESPELEOTOPOGRÁFICO MODERNO

Neste artigo, o levantamento topográfico moderno é caracterizado como aquele que utiliza equipamentos distintos dos convencionais (bússola, clinômetro, trena e GPS). Dessa forma, com a evolução tecnológica dos equipamentos utilizados no mapeamento topográfico de cavernas, além do levantamento topográfico tradicional, são utilizados novos métodos: trena digital a laser, escaneamento a laser 3D e fotogrametria, que são descritos a seguir.

5.1 Trena digital a laser

A trena digital a laser atualmente é um equipamento que funciona baseado na emissão de um impulso eletromagnético em forma de raio laser por meio de um sistema ótico-eletrônico. O feixe de luz desse equipamento reflete no plano a ser medido e retorna ao instrumento de

medição. Consequentemente, a trena a laser processa o feixe de luz refletido e determina a distância medida entre o equipamento e a superfície de interesse (TME, 2019). A trena a laser foi modificada por espeleólogos com uma placa de circuito adicional que permite a medição de ângulos horizontais e verticais (ex: equipamento Leica DistoX). Dessa forma esse instrumento consegue substituir de forma integral o conjunto bússola, clinômetro e trena, sendo possível medir o azimuth, a inclinação e a distância das visadas.

Vale destacar que esse equipamento possui uma série de vantagens quando comparado com o método de levantamento topográfico tradicional: (1) Permite fazer a leitura diretamente no ponto da base topográfica (a bússola e o clinômetro normalmente devem ser afastados para permitir a visão do mostrador); (2) leituras realizadas com uma casa decimal para azimuth e inclinação, além de duas casas decimais para as distâncias; e (3) transmissão dos dados via Bluetooth para outros dispositivos móveis (smartphones e tablets), evitando erros de anotação e diminuindo o tempo no tratamento dos dados no trabalho pós-campo. Outro ponto relevante é que o sistema permite ainda que o desenho possa ser feito na própria caverna com auxílio de um dispositivo móvel. À medida que a topografia progride e as leituras são realizadas, a posição das bases aparece na tela do *smartphone* e/ou *tablet*, facilitando e melhorando a qualidade do croqui (esboço inicial do interior da caverna) (Figura 6).

Com relação as desvantagens, a calibração da trena digital a laser é complexa e esse equipamento possui elevada sensibilidade a interferências magnéticas, sejam elas provenientes de minerais/rochas (ex: formações ferríferas) ou de equipamentos metálicos usados pelo espeleólogo.

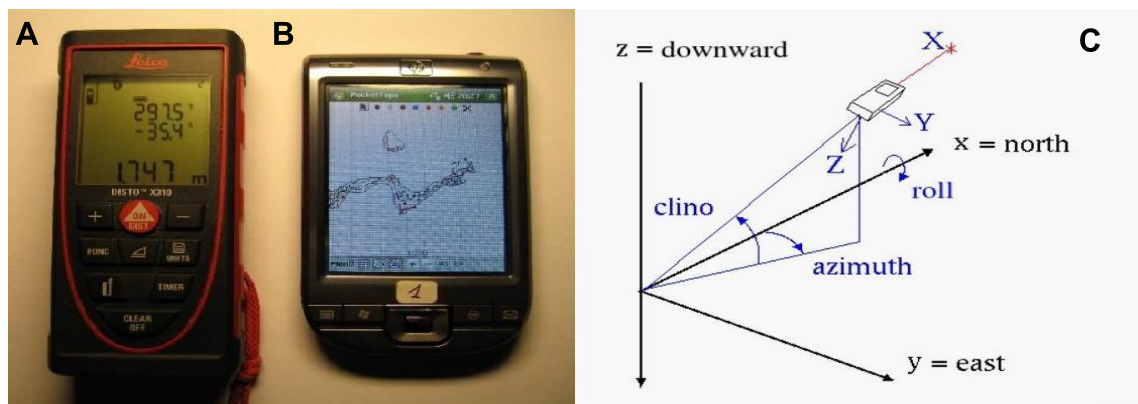


Figura 6 - Trena digital a laser modelo Leica DistoX310 (A); Dispositivo móvel para recebimento, consolidação e edição dos dados obtidos com a trena a laser (B); Funcionamento geral do Leica DistoX, medindo em apenas um equipamento simultaneamente o azimuth (azimuth), inclinação (clino) e distância do equipamento até um ponto “X” (C). Fonte: Hebb, (2010); Corvi, (2020).

5.2 Escaneamento a laser 3D

O levantamento via laser *scanner* 3D em cavernas é uma tecnologia relativamente recente, que fornece resultados inéditos de aquisição permitindo a obtenção de produtos mais precisos, detalhados e apropriados para utilização em *software* e ambientes multidisciplinares (ARAÚJO, 2016).

O escaneamento a laser 3D é feito com um equipamento que utiliza como base espelhos giratórios com o intuito de gerar os pulsos de laser que conseguem combinar dados de distância e de ângulos horizontais e verticais para produzir coordenadas em três dimensões (BUCKLEY et al., 2008). Cada varredura desse equipamento gera uma nuvem de pontos (com dezenas a centenas de milhares de pontos por segundo) com abrangência de 360° horizontal e 270° vertical e com alcance efetivo por volta de 50 a 60 metros, dependendo das condições da topografia local de cada caverna (GROHMANN et al., 2019). O *scanner* a laser é um instrumento de linha de visão, que é utilizado atualmente em dois modelos principais: o modelo estático necessita de marcação de bases com visadas entre elas, como no método convencional; com o modelo portátil é necessário marcar uma referência externa à cavidade, sendo realizado o mapeamento sem necessidade de marcação de bases para assegurar a cobertura completa da caverna (LERMA; BIOSCA, 2008).

Atualmente, existem equipamentos capazes de produzir imagens tridimensionais das cavernas com alta precisão e ótima qualidade gráfica (Figura 7). O mapeamento produz um modelo digital de alta precisão a partir de uma série de pontos georreferenciados distribuídos de forma tridimensional, comumente chamado de ‘nuvem 3D’. A precisão é da ordem de milímetros e o detalhamento é capaz de representar até mesmo as texturas da rocha, feições morfológicas e estratigráficas. Além disso, o produto é apresentado em um modelo tridimensional, permitindo uma visualização virtual da distribuição e do formato das galerias. Infelizmente esses equipamentos ainda são muito caros, frágeis e não podem ser aplicados de forma indiscriminada em qualquer cavidade. Mas, no caso de cavidades onde se deseja obter um registro definitivo, essa tecnologia é o que existe de mais moderno.

Os mapeamentos topográficos com a utilização do laser *scanner* são aplicados para coletar informações mais detalhadas do que um levantamento convencional, além de serem capazes de produzir uma visualização da caverna em um modelo 3D (ZLOT; BOSSE, 2014).

A aplicação do escaneamento 3D para o levantamento topográfico de cavidades apresenta algumas vantagens quando comparado com o método tradicional, são elas: maior precisão das medidas e dos cálculos de área e volume, além de seções de grande exatidão; a utilização dessa técnica poderá ser válida em trabalhos de “salvamento” espeleológico, por meio da aplicação de um equipamento compacto e de fácil transporte; o mapeamento com o *scanner* 3D facilita a interpretação de estruturas geológicas, por conseguir obter dados em locais de difícil acesso para pessoas e permitir o tratamento dos dados em ambiente de realidade virtual (RV). Com isso, há um aumento da produtividade, redução das equipes e diminuição da exposição aos riscos em campo (GALDEANO et al., 2016).

Com relação as desvantagens, o laser *scanner* 3D não é adequado para o mapeamento topográfico de cavernas de pequenas dimensões, com pequenos salões e condutos de difícil acesso, tendo em vista que para a aplicação dessa tecnologia é necessário que os condutos entre galerias tenham no mínimo 50 cm x 50 cm para a instalação do equipamento (ARAÚJO et al., 2015). Dessa forma, ainda é muito difícil topografar cavernas mais complexas, como grandes abismos e cavernas com presença de água. Porém, novas versões de *scanner* 3D são portáteis eliminando grande parte dessas limitações. Um outro ponto de desvantagem é que se torna necessária a iluminação artificial para os levantamentos fotográficos realizados por determinados modelos de *scanners* em cavernas com ausência total ou parcial de luz, mas isso pode ser contornado com fontes de luz portátil de alta intensidade (ARAÚJO, 2016).

Vale destacar também que do ponto de vista técnico, o aspecto restritivo é o de que em anteparos translúcidos (água) a informação se perde, já que não é refletida. Por outro lado, no mapeamento convencional, a depender da cavidade, o mapa mostra o nível da água de forma clara e de fácil interpretação. Outra questão importante é a complexidade do processamento de uma nuvem de pontos tão densa como a gerada pelo laser *scanner*. Isso ocorre, pois atualmente existem vários modelos de *software* para tratamento dos dados com variações nas precisões obtidas e diferentes graus de experiência dos usuários, que podem influenciar no resultado/confiabilidade do processamento (GALLAY et al., 2015).

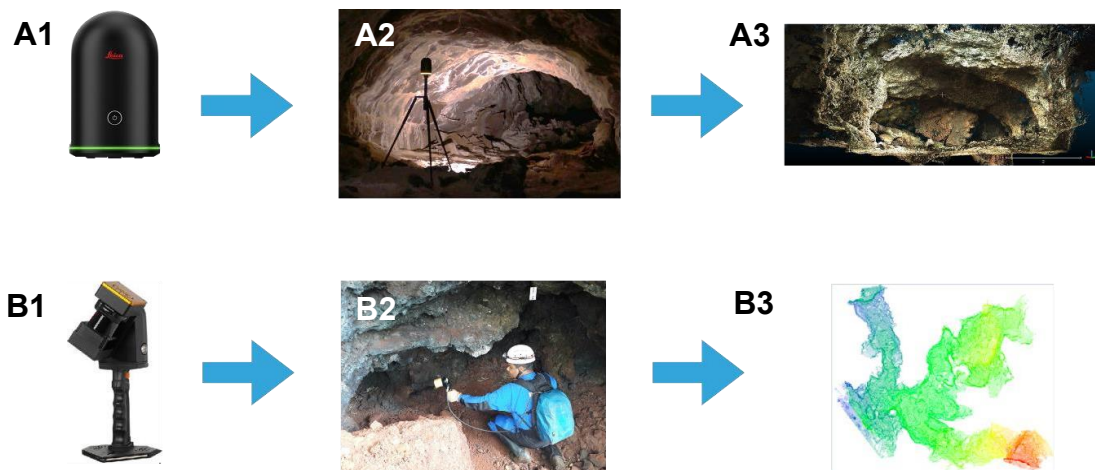


Figura 7 - Mapeamento topográfico de cavidades utilizando laser scanner. Equipamento laser *scanner* estático modelo Leica BLK360 com captura de imagens (A1); Instalação do equipamento com captura de imagens no interior de uma cavidade (A2); Nuvem de pontos gerada pelo laser *scanner* estático com captura de imagens (A3); Equipamento laser *scanner* portátil modelo Geoslam ZEB REVO (B1); Utilização do modelo portátil no interior de uma cavidade (B2); Nuvem de pontos gerada pelo laser *scanner* portátil (B3). Fonte: adaptado de Vale S.A., (2021).

5.3 Fotogrametria

A fotogrametria é definida como a técnica que consegue reconstruir o espaço tridimensional com base em imagens bidimensionais (SIMÕES, 2019). Por meio da aplicação da fotogrametria é possível a produção de modelos 3D com base em uma nuvem de pontos extraída de fotografias que devem se sobrepor em pelo menos 60% (MATTHEWS, 2008). Vale destacar que as fotografias podem ser geradas com o auxílio de câmeras profissionais ou com simples câmeras de celular e depois processadas em softwares específicos com o intuito de alinhar as imagens e produzir o modelo tridimensional (SILVA et al., 2020) (Figura 8). A fotogrametria de curto alcance (ou *close range photogrammetry* - CRP) é definida por operações fotogramétricas que são realizadas a menos de um metro até 300 metros do alvo de interesse, sendo essa metodologia a mais utilizada para o levantamento topográfico de cavidades por meio da marcação de bases topográficas utilizadas como pontos de controle para o mapeamento (MATTHEWS, 2008).

Os levantamentos fotogramétricos de cavidades são normalmente realizados com câmeras fotográficas digitais de alta resolução com auxílio de painéis de iluminação LED. As fotografias são capazes de registrar paredes, condutos, pilares, pendentes, espeleotemas, tetos, pisos e entrada das cavernas em variados ângulos e direções com o intuito de abranger a maior parte do interior da caverna. Para construção dos modelos fotogramétricos utilizando as fotografias levantadas é necessário utilizar *software* para processamento fotogramétrico de

imagens digitais e geração de dados espaciais em 3D, conforme os seguintes passos: alinhamento das fotografias; inclusão das coordenadas nos pontos de controle das fotos; inserção de máscaras; otimização do alinhamento; geração da nuvem de pontos; geração de malhas e texturas; construção do modelo 3D; exportação dos produtos gerados (SIMÕES; VEIGA; SCHMIDT, 2022).

A densidade, a nitidez e a resolução de um conjunto de imagens determinarão a qualidade da nuvem de pontos resultante, pois quanto mais curta é a distância entre a câmera e a superfície do objeto de interesse, maior será a resolução espacial da imagem, a densidade e a resolução da nuvem de pontos (VILLASENÍN; DOCAMPO; SANZ, 2017; WESTOBY et al., 2012).

As principais vantagens do método de levantamento fotogramétrico são: (1) garantir maior precisão em relação ao método convencional quanto aos produtos gerados e permitir que estas feições sejam visitadas virtualmente através dos modelos tridimensionais; (2) baixos custos para aquisição de equipamentos; (3) tempo relativamente baixo empregado para realizar os levantamentos fotográficos; (4) o levantamento fotogramétrico não apresenta susceptibilidade magnética, sendo adequado para aplicação em cavidades situadas em formações ferríferas; (5) equipamentos utilizados possuem melhor resolução para cores, normalmente são à prova d'água e facilmente transportados através de passagens estreitas das cavernas (SIMÕES, 2019).

As desvantagens do método incluem: a necessidade de iluminação artificial suficiente para o levantamento ao longo dos condutos das cavidades; conhecimento adequado para processar a nuvem de pontos em modelos 3D usando *software* fotogramétrico, pois é complexo e necessita de recursos avançados da computação, assim como o levantamento via laser *scanner* 3D (PUKANSKÁ et al., 2020).



Figura 8 - Levantamento fotogramétrico de cavidade natural subterrânea (A). Modelo 3D após processamento fotogramétrico da nuvem de pontos (B). Fonte: Wood e Toomey, (2020); Pukanská et al. (2020).

6. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

Com a evolução tecnológica nos levantamentos topográficos de cavernas ao longo do tempo, foi possível obter os parâmetros espeleométricos de forma mais precisa, com menor custo e de forma mais veloz. No Quadro 1 é feita a comparação entre os métodos de levantamento topográfico de caverna mais modernos e o convencional. São também propostos os contextos mais adequados para a aplicação das respectivas técnicas modernas.

Quadro 1 - Comparação entre as técnicas modernas e convencional aplicadas ao levantamento topográfico de cavidades naturais subterrâneas, bem como proposição de contexto mais adequado para aplicação da respectiva técnica moderna.

Técnica moderna de levantamento espeleotopográfico	Comparação com a técnica convencional	Contexto espeleológico mais adequado para aplicação da técnica
Trena digital a laser (Leica DistoX)	A trena digital a laser melhora a velocidade da coleta de dados, reduz a barreira para ensinar novos espeleólogos a fazer o levantamento e elimina ou reduz o potencial de muitos tipos de erros na coleta de dados. Assim como as bússolas, as trenas a laser são influenciadas pela interferência do campo magnético terrestre. Dessa forma, pilhas, baterias, partes metálicas ou até mesmo rochas que contenham minerais magnéticos (ex: magnetita) costumam causar erros significativos nas leituras, sendo comuns em cavidades situadas em formações ferríferas. Além disso, a trena digital a laser possui ótima relação custo-benefício e possui manuseio simples. Apresenta precisão de cerca de 3mm e 0,5° para distâncias e ângulos verticais e horizontais, respectivamente.	Pode ser aplicada em qualquer tipo de caverna. Porém, como a calibração da trena a laser é complexa e esse equipamento possui elevada sensibilidade a interferências magnéticas, sejam elas provenientes de minerais/rochas ou de equipamentos metálicos usados pelo espeleólogo, o equipamento não é o mais adequado para ser utilizado em cavidades situadas em formações ferríferas ou litotipos contendo minerais com susceptibilidade magnética.

Escanejamento a laser 3D	O escaneamento a laser 3D utiliza ferramentas portáteis de mapeamento móvel, é capaz de obter detalhes diferentes do sistema tradicional (que podem garantir muito mais precisão e maior definição), sendo possível reconstruir em três dimensões os ambientes subterrâneos com maior semelhança com a realidade de cada cavidade. Além disso, se houver boas condições de iluminação no interior da caverna, uma imagem digital em cores verdadeiras da nuvem de pontos pode ser obtida. Os dispositivos utilizados para o escaneamento 3D, além de mais caros, muitas vezes também exigem treinamento específico complexo e demandam mais tempo para o levantamento em campo e processamento da nuvem de pontos na etapa pós-campo, em especial em cavernas com dimensões notáveis (centenas a milhares de metros). Além disso, são muito suscetíveis a danos nos equipamentos em alguns ambientes cavernícolas e podem possuir a mobilidade mais limitada em comparação ao método tradicional. Como a obtenção das variáveis espeleométricas é influenciada pela quantidade de cortes e pelo grau de inclinação das galerias, a utilização do escaneamento a laser 3D é capaz de corrigir essas discrepâncias, que se tornam maiores utilizando a técnica convencional. As imagens tridimensionais das cavernas produzidas por essa técnica, aliado aos programas específicos para tratamento dos dados coletados em campo, permitem cálculos precisos de áreas, volume e podem fornecer seções transversais em qualquer lugar da cavidade. Porém, para a geração desses produtos cartográficos espeleológicos é preciso desenhar os elementos a partir da nuvem de pontos obtida, demandando mais tempo. Apresenta precisão milimétrica para a obtenção de distâncias.	É mais adequado para o mapeamento topográfico de cavernas de grandes dimensões, com grandes salões e condutos de fácil acesso. É necessário que os condutos entre galerias tenham no mínimo 50 cm x 50 cm para a instalação do equipamento. Com a aplicação desse método ainda é muito difícil topografar grandes abismos e cavernas com presença de água subterrânea. Porém, novas versões de <i>scanner</i> 3D são portáteis eliminando grande parte dessas limitações. Como não apresenta susceptibilidade magnética, esse método é adequado para aplicação em cavidades situadas em formações feríferas.
Fotogrametria	A fotogrametria é uma técnica que permite construir produtos mais precisos do que os métodos convencionais, sendo mais acessível, com maior mobilidade e menor custo, quando comparada com o escaneamento a laser. Esse método por ser associado a captura de imagens pode obter com grande resolução, em cores, a geometria e orientação espacial das feições cársticas encontradas, tais como: estruturas geológicas, espeleotemas, pinturas rupestres, litotipos, além de aspectos geológicos, biológicos, históricos e arqueológicos gerais. A utilização da fotogrametria pode não se mostrar eficaz em cavidades com grande desenvolvimento linear, locais com difícil deslocamento, entradas com vegetação expressiva ou com a existência de extensos corpos d'água. Essas condições citadas podem impactar na iluminação mínima necessária para esse tipo de levantamento, servir como obstáculo para a câmera ou até mesmo refletir o imageamento, como ocorre em cavernas com a presença de água. Apresenta precisão milimétrica para a obtenção de distâncias.	Pode ser utilizada em cavernas com condutos de fácil acesso pelo ser humano e com iluminação natural ou artificial adequada para a realização do imageamento. Além de locais com a inexistência ou com pequenas concentrações de blocos de rocha, sedimentos ou grandes volumes de água, pois podem servir de obstáculo para o levantamento topográfico. Como não apresenta susceptibilidade magnética, esse método é adequado para aplicação em cavidades situadas em formações feríferas.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento de cavidades, juntamente com os registros fotográficos, são os dados mais básicos sobre cavernas. Todas as investigações geológicas, biológicas, arqueológicas e históricas precisam de mapas base para subsidiar as observações e interpretações realizadas em campo. Vale destacar que o método tradicional de levantamento topográfico de cavernas é utilizado até hoje por diversos grupos de espeleologia no Brasil e no mundo e ainda geram milhares de produtos cartográficos que são muito úteis para a sociedade. No entanto, o método convencional está sendo rapidamente substituído pelos levantamentos topográficos mais modernos em empresas de consultoria ambiental e no setor mineral.

É importante ressaltar que a criação do Leica DistoX, aplicando a trena digital a laser dentro do mundo espeleológico, foi um dos maiores avanços tecnológicos obtidos para o mapeamento topográfico de cavernas. Dessa forma, tornou-se mais fácil o levantamento topográfico, aumentando a quantidade e qualidade das medidas obtidas. Porém, as outras técnicas modernas (escaneamento a laser e fotogrametria) aplicadas a topografia de cavernas conseguem extrapolar os levantamentos para um modelo em três dimensões e se mostram como alternativas muito eficazes, principalmente quando associadas aos mapeamentos de campo. Além disso, esses métodos inovadores podem ser utilizados como forma de validação dos dados em uma etapa pós-campo em um ambiente de realidade virtual (RV). Essa disponibilização em RV acarretou a redução da quantidade de pessoas expostas aos riscos de segurança e diminuição do custo total da atividade.

Apesar dos inúmeros avanços tecnológicos aplicados ao levantamento topográfico de cavernas, ainda há muito o que ser feito. Dentre os pontos de melhoria que ainda estão latentes incluem o grande volume de dados das nuvens de pontos 3D, a complexidade dos softwares para processamento das nuvens 3D e a dificuldade de acesso em determinados condutos das cavidades. Vale destacar também que o mundo subterrâneo possui uma série de feições complexas que nem sempre podem ser reproduzidas de forma fidedigna nos modelos matemáticos que comandam os sistemas de medição. Dessa forma, muitas vezes os modelos não poderão ser replicados para uma série de cavernas, devido a especificidade das feições de cada uma.

Um ponto relevante é que os três sistemas de classificação para os graus de precisão topográfica (BCRA, IUS e ASF) ainda não contemplam de forma clara e específica os métodos de levantamento espeleotopográfico modernos. Dessa forma, eles precisam ser

revisados para conseguir comparar métodos e precisão, abrangendo as novas tecnologias existentes que são aplicadas ao mapeamento topográfico de cavernas.

Assim, para estudos futuros torna-se necessário realizar a comparação do levantamento topográfico via metodologia convencional com os das técnicas modernas em cavernas com geometrias complexas, grandes salões, condutos sinuosos e com vários níveis com o intuito de confrontar os resultados espeleométricos e analisar as vantagens e desvantagens em uma abordagem prática para o tema.

AGRADECIMENTOS

À empresa Vale S.A. pelo incentivo a pesquisa e preservação do patrimônio espeleológico brasileiro e ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) pela oportunidade de desenvolvimento dessa pesquisa a nível de pós-graduação. Aos revisores do artigo pelo tempo despendido e pelas relevantes contribuições.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R.N.; MUNIZ, F.; SILVA, B.R.; BRANDI, I. Controle morfológico de cavidades com a utilização de laser scanner. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33., 2015, Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE. 2015. p.321-327. ISSN 2178-2113.

ARAÚJO, R. N. **Levantamento de Parâmetros Geomecânicos de uma Caverna Natural Subterrânea Utilizando Tecnologias de Laser Scanner 3D e Realidade Virtual.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós- Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2016. 130p.

ARNBERGER, E. **Handbuch der thematischen Kartografie.** 1ª Ed. Wien: Deutike, 1966. 554p.

AULER, A. Espeleologia no Brasil: Uma abordagem histórica. **Espeleo-Tema**, v.18, p.23-30, 1997.

AULER, A. S.; RUBBIOLI, E.L.; BRANDI, R. **As Grandes Cavernas do Brasil.** 1ª Ed. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 2001. 227p.

AULER, A. S.; ZOGBI, L. A. **Espeleologia: Noções Básicas.** 1ª Ed. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005. 103p.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidente da República, 1988.

BRASIL. **Decreto Federal nº 6.640 de 7 de novembro de 2008**. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF: Presidente da República, 2008.

BUCKLEY, S.J.; HOWELL, J.A.; ENGE, H.D.; KURZ, T.H. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. **Journal of the Geological Society**, v.165, p. 625- 638, 2008. DOI: 10.1144/0016-76492007-10

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 005, de 6 de agosto de 1987, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. Aprova o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeológico. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1987.

CORVI, M. **DistoX and TopoDroid Calibration, precision, accuracy - Version 2020.10.10**. 2020. Disponível em: <<https://ia802904.us.archive.org/27/items/distoxandtopodroid/DistoXAndTopoDroid.pdf> >. Acesso em: 03 jun. 2022.

FIGUEIREDO, L.A.V. de. História da Espeologia Brasileira: protagonismo e atualização cronológica. In: Congresso Brasileiro de Espeologia, 31., 2011, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: Grupo Universitário de Pesquisas Espeológicas (GUPE), p.379-395.

GALDEANO, M.G.; MUNIZ, F.G.; PETTERSEN, C.; SEBASTIÃO, C.; SOARES, L.M.; REZENDE, B. Aplicação do Laser *Scanner* 3D como Ferramenta de Interpretação de Dados Litoestruturais em Caverna Natural localizada na Serra do Curral-MG. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 48., 2016, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. 2016. p.1.

GALLAY, M.; KANUK, J.; HOCHMUTH, Z.; MENEELY, J.D.; HOFIERKA, J.; SEDLAK, V. Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. **International Journal of Speleology**, v. 44, p. 277-291, 2015. DOI: 10.5038/1827-806X.44.3.6

GROHMANN, C.H.; ZACHARIAS, G.; GARCIA, G.P.B.; BARALE, F.; ALMEIDA, F.V.; ARNONE, I.S. Mapeamento e modelagem 3D do setor turístico da Caverna do Diabo (SP) com laser *scanner*: resultados preliminares. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Campinas. **Anais...** Campinas: SBE. 2019. p.201-206. Disponível em:<<http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe201-206.pdf>>. Acesso em: 03 jun 2022.

GUNN, J. **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. 1ª Ed. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. 902 p.

HEBB, B. **Paperless Caving Surveying**. 2010. Disponível em: <<http://paperless.bheeb.ch/>>. Acesso em: 02 jun 2022.

HELLER, M.; NEUMANN, A. **Inner-Mountain Cartography-From Surveying Towards Information Systems**. Disponível em: <https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2001/icc2001/file/f28008.pdf>. 2001. Acesso em: 15 mai 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Downloads Geociências**. 2021. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-doterritorio/malhas territoriais/15774malhas.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 23 mar 2022.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. 2011. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Apostila%20Curso%20de%20Espeleologia%20e%20Licenciamento%20Ambiental.pdf>>. Acesso em: 21 out 2022.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2020**. 2021. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/publicacoes/107-anuario-do-patrimonio-espeleologico.html>>. Acesso em: 27 fev 2022.

KLEMUN, M. Verwaltete Wissenschaft: Instruktionen und Forschungsreisen. In: HIPFINGER A.; LÖFFLER J.; NIEDERKORN J. (Ed.), **Ordnung durch Tinte und Feder? Genese und Wirkung von Instruktionen im zeitlichen Längsschnitt vom Mittelalter bis zum 20**. 1ª Ed. Wien: Böhlau & Oldenbourg, 2012. p. 391-412.

KYRLE, G. **Grundriss der Theoretischen Speläologie**. 1ª Ed. Wien: Österreichische Staatsdruckerei, 1923. 353 p.

LEE, E.F. **Map of the Mammoth Cave: Accompanied with notes**. Cincinnati: Doolittle & Munson, 1835. Dimensões 52 x 61 cm. Escala 1:3000. Disponível em: <<https://www.loc.gov/item/2006626050/>>. Acesso em: 19 mai. 2022.

LERMA, J.; BIOSCA, J. **Teoria y practica del Escaneado Laser Terrestre**. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2008. 253p. Disponível em: <<http://www.jllerma.webs.upv.es/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

LINO, C. F. **Cavernas: o fascinante Brasil subterrâneo**. 1ª Ed. São Paulo: Rios, 1989. 279p.
 LOTT, C. F. S. Cartografia espeleológica: dos mapas primitivos às experiências atuais em mapeamento de caverna. **Pedagogia em Ação**, v. 5, n. 1, p. 82-101, 2013.

LÜDEMANN, K. Ein Universalinstrument für die Höhlenmessung. **Mitteilungen des Hauptverbands Deutscher Höhlenforscher**, v. 5, n. 2, p. 50-56, 1927.

MAGALHÃES, E. D.; LINHARES, J.C. **Curso Prático de Topografia - Espeleo Grupo de Brasília (EGB)**. 1ª Ed. Brasília: Espeleo Grupo de Brasília (EGB), 1997. 43p. Disponível em: <<https://www.portalagrimensura.com/cloud/download/dXBsb2Fkcy9hcG9zdGlsYXMvdG9wb2dyYWZpYS1kZS1jYXZlc m5hLnBkZg==/h/653dea909cb6ff1b3091ede70f125d1c>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

MATTES, J. Underground fieldwork – A cultural and social history of cave cartography and surveying instruments in the 19th and at the beginning of the 20th century. **International Journal of Speleology**, v. 44, n. 3, p. 251-266, 2015. DOI: 10.5038/1827-806X.44.3.4

MATTHEWS, N. A. **Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource documentation, Interpretation, and Preservation**. Colorado: U.S Department of Interior, 2008. 62p. Technical Note 428.

NAGEL, J.A. **Beschreibung deren auf allerhöchsten Befehl Ihro Röm. kaiserlichen königlichen Maytt. Francisci I untersuchten, in dem Herzogthume Crain befindlichen Seltenheiten der Natur**. Austrian National Library, manuscript- code: 7854. 1748.

OEDL, R. Auswertungsmöglichkeiten von Höhlenvermessungen. **Speläologisches Jahrbuch**, v. 3, p. 138-144, 1923.

PUKANSKÁ, K.; BARTOŠ, K.; BELLA, P.; GAŠINEC, J.; BLISTAN, P.; KOVANIČ, Ľ. Surveying and High-Resolution Topography of the Ochtiná Aragonite Cave Based on TLS and Digital Photogrammetry. **Applied Sciences**. v. 10, n. 13, p.1-19, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app10134633>>. Acesso em: 28 jul. 2022. (2020). DOI: 10.3390/app10134633

REISNER, H. Anleitung zur Aufnahme von Grundrißplänen, Längen- und Querprofilen in Höhlen. **Berichte der staatlichen Höhlenkommission**, v. 2, p. 10-24, 1921.

RUBBIOLI, E.; MOURA, V. **Mapeamento de Cavernas – Guia Prático**. 1ª Ed. Belo Horizonte: Redespeleo Brasil, 2005. 93p.

RUBBIOLI, E.; AULER, A. S.; MENIN, D.; BRANDI, R. **Cavernas: Atlas do Brasil Subterrâneo**. 1ª Ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. 340p.

SALUM, M. J. G. Cavidades Naturais Subterrâneas: Desafio para a Mineração de Ferro. In: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 43., 2013, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABM. 2013. p. 146-158. DOI: 10.5151/2594-357X-23799SCHMIDL, A. Die Untersuchung einiger Höhlen im Karst. **Jahrbuch der k. k. Geologischen Reichsanstalt**, v. 1, p. 701- 705, 1850.

SCHMIDL, A. **Zur Höhlenkunde des Karstes**. Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas. Mit Beiträgen von Alois Pokorny, Johann Rudolf Schiner und Wilhelm Zippe. 1ª Ed. Wien: Wilhelm Braumüller, 1854. 317p.

SHAW, T.R. Adolf Schmidl (1802-1863). The father of modern speleology? **International Journal of Speleology**, v. 10, p. 253-267, 1978.

SHAW, T.R. **Foreign travellers in the Slovene karst 1486–1900**. 1ª Ed. Ljubljana: Karst Research Institute at ZRC SAZU, 2008. 338p.

SILVA, M.M; SILVA, M.A.D.; MARTINS, G.D. Fotogrametria terrestre aplicada à espeleotopografia: Estudo de caso na Gruta do Urubu (Coromandel-MG). In: Simpósio de Ciências Agrárias e Ambientais, 8., 2020, Monte Carmelo. **Anais...** Monte Carmelo: UFU. 2020.

SIMÕES, P.R. Levantamento fotogramétrico e modelagem 3D aplicados à cartografia espeleológica e à espeleometria da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual de Ibitipoca – MG. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE. 2019 p.229-237. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_229-237.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2022.

SIMÕES, P.R.G.; VEIGA, L.A.K.; SCHMIDT, M.A.R. Automação de processos no mapeamento espeleológico 3D a partir de modelos fotogramétricos de cavidades subterrâneas em Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira e Espeleologia**, v.11, n. 1, p. 87–116, 2022. DOI: <https://doi.org/10.37002/rbsp.v1i11.2319>.

SUTTON, M. A History of map-making at Mammoth Cave. In: HOBBS III, H.H.; OLSON, R.A.; WINKLER, E.G.; CULVER, D.C. (Ed.). **Mammoth Cave: A Human and Natural History**. 1ª Ed. Cham: Springer, 2017. p. 77–95.

TME. **Telémetro Laser: como funciona e qual escolher?**. 2019. Disponível em: <<https://www.tme.com/br/pt/news/library-articles/page/21956/Telemetro-laser-como-funciona-e-qual-escolher/>>. Acesso em: 23 jun. 2022.

VACCARI, E. The organized traveler. Scientific instructions for geological travels in Italy and Europe during the eighteenth and nineteenth century. In: WYSE JACKSON, P.N. (Ed.). **Four centuries of geological travel: The search for knowledge on foot, bicycle, sledge and camel**. 287ª Ed. London: Geological Society, 2007, p. 7-17. DOI: 10.1144/SP287

VALE S.A. **Estudos Ambientais para Mapeamento Topográfico de Cavidades Naturais Subterrâneas próximas a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM)**. Belo Horizonte: Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, 2009.

VALE S.A. **Workshop - Revisão dos atributos espeleométricos e atualização da relevância de nove cavidades**. Belo Horizonte: Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, 2021.

VILLASENÍN, S. P.; DOCAMPO, M.G.; SANZ, J.O. 3-D Modeling of Historic Façades Using SFM Photogrammetry Metric Documentation of Different Building Types of a Historic Center. **International Journal of Architectural Heritage**. v.11, n.6, p.871–890, 2017. DOI: 10.1080/15583058.2017.1317884

WESTOBY, M.J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N.F.; HAMBREY, M.J.; REYNOLDS, J.M. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217?via%3Dihub>>. Acesso em: 25 jul. 2022. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021

WOOD, J.; TOOMEY, R. **Using Photogrammetry and 3D Models to Document Shark Fossils at Mammoth Cave National Park**. Kentucky: National Park Service. 2020. Disponível em: <<https://www.nps.gov/subjects/fossils/using-photogrammetry-and-3d-models-to-document-shark-fossils-at-mammoth-cave-national-park.htm>>. Acesso em: jul. 2022.

WOOKEY. Cave Surveying. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. 1ª Ed. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 714-717.

WYSE JACKSON, P.N. **Four centuries of geological travel: The search for knowledge on foot, bicycle, sledge and camel**. 287ª Ed. London: Geological Society, 2007. 415 p.

ZLOT, R.; BOSSE, M. Three-dimensional mobile mapping of caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 76, n. 3, p. 191–206, 2014. Disponível em: <<https://caves.org/pub/journal/PDF/v76/cave-76-03-191.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2022. DOI:10.4311/2012EX0287

ANEXO 02

Artigo publicado na Revista de Geografia (UFPE) em 11/04/2024.

DOI: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2024.261258>

Morfologia e Gênese de Cavernas da Serra Sul - Província Mineral de Carajás/PA

Adam Barros Fernandes¹, Ricardo Perobelli Borba¹, Iuri Viana Brandi², Ramon Nunes Araújo², Bruno dos Santos Scherer² e Gabrieli Santos Boulhosa³

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências do Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

² Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil.

RESUMO

Os estudos espeleológicos realizados nas Serras de Carajás vêm mostrando cada vez mais a importância desse local quanto a abundância e diversidade de cavernas em litotipos ferríferos. No âmbito desta temática, o presente trabalho tem como objetivo estudar as feições morfológicas/geométricas, relação da hipsometria com a ocorrência de cavernas, estruturas geológicas, litotipos e espeleometria, com o intuito de correlacionar com os aspectos genéticos de uma amostra de cavernas existentes na Serra Sul, Província Mineral de Carajás (PA). Para que isso fosse possível, o presente trabalho foi subdividido em três macro etapas: (1) levantamento bibliográfico; (2) coleta, compilação e organização do banco de dados; (3) análise, interpretação e discussão dos dados. Por meio da presente pesquisa foi possível constatar que o padrão planigeométrico Simples Retilíneo Retangular possui alta correlação com cavernas em que o controle estrutural é predominante. Além disso, com relação ao modelo genético das cavidades estudadas da Serra Sul é perceptível, através deste estudo, que há uma grande influência supergênica no processo de formação dessas cavernas com participação concomitante dos fatores controladores (estrutural, litológico, topográfico e hidrológico).

Palavras-chave: Espeleogênese; Dissolução; Minério de Ferro.

1. INTRODUÇÃO

As pesquisas em cavernas encontradas em litotipos ferruginosos vem crescendo no mundo e em especial no Brasil. Isso se deve no Brasil, principalmente, ao fato dessas cavidades naturais subterrâneas ocorrerem normalmente em locais onde há um teor elevado de minério de ferro. Sendo viável nesses locais o aproveitamento econômico de uma jazida mineral após a obtenção de licenças ambientais que abrangem entre outros itens a prospecção de cavernas, estudos de relevância, definição de áreas de influência e análise de impactos aprovados nos órgãos ambientais nos processos de licenciamento. Dessa forma, tendo em vista esse cenário, desde o início da década de 1970, com a descoberta das grandes jazidas de

ferro da Província Mineral de Carajás, ocorreu também de forma concomitante a descoberta de uma grande quantidade de cavernas em formações ferríferas nas serras de Carajás (TOLBERT et al., 1971).

A partir dessa “descoberta” espeleológica, com o passar do tempo, universidades, empresas privadas, centros de pesquisa e grupos de espeleologia realizaram pesquisas sobre cavernas da região de Carajás. Porém, destaca-se os grandes avanços obtidos por meio das pesquisas do Grupo Espeleológico Paraense (GEP), Fundação Casa da Cultura de Marabá e Grupo de Espeleologia de Marabá que se iniciaram em meados da década de 1980 e seguem até os dias atuais (PINHEIRO *et al.*, 1985; ATZINGEN *et al.*, 2009; FREIRE, 2018).

O presente trabalho tem como objetivo estudar a influência das feições morfológicas/geométricas, da hipsometria, das estruturas geológicas, dos litotipos e da espeleometria com a ocorrência e gênese de 99 cavidades naturais subterrâneas existentes no corpo mineralizado D, situado na Unidade Geomorfológica da Serra Sul na Província Mineral de Carajás (PA). O Corpo D possui grandes jazidas de minério de ferro de alto teor e está situado em uma Unidade de Conservação em meio a floresta amazônica (Floresta Nacional de Carajás).

Dessa forma, a partir da definição dos aspectos genéticos dessas cavidades, pretende-se promover o conhecimento para assegurar a conservação dessas cavernas de modo a conciliar com a realização das atividades de mineração que ocorrem no seu entorno.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Localização da Área de Estudo

O platô ou corpo geológico de S11, onde está localizado o Projeto Ferro Carajás S11D (maior projeto de mineração de ferro do mundo), é situado no município de Canaã dos Carajás, na porção sudeste do estado do Pará (Figura 9).

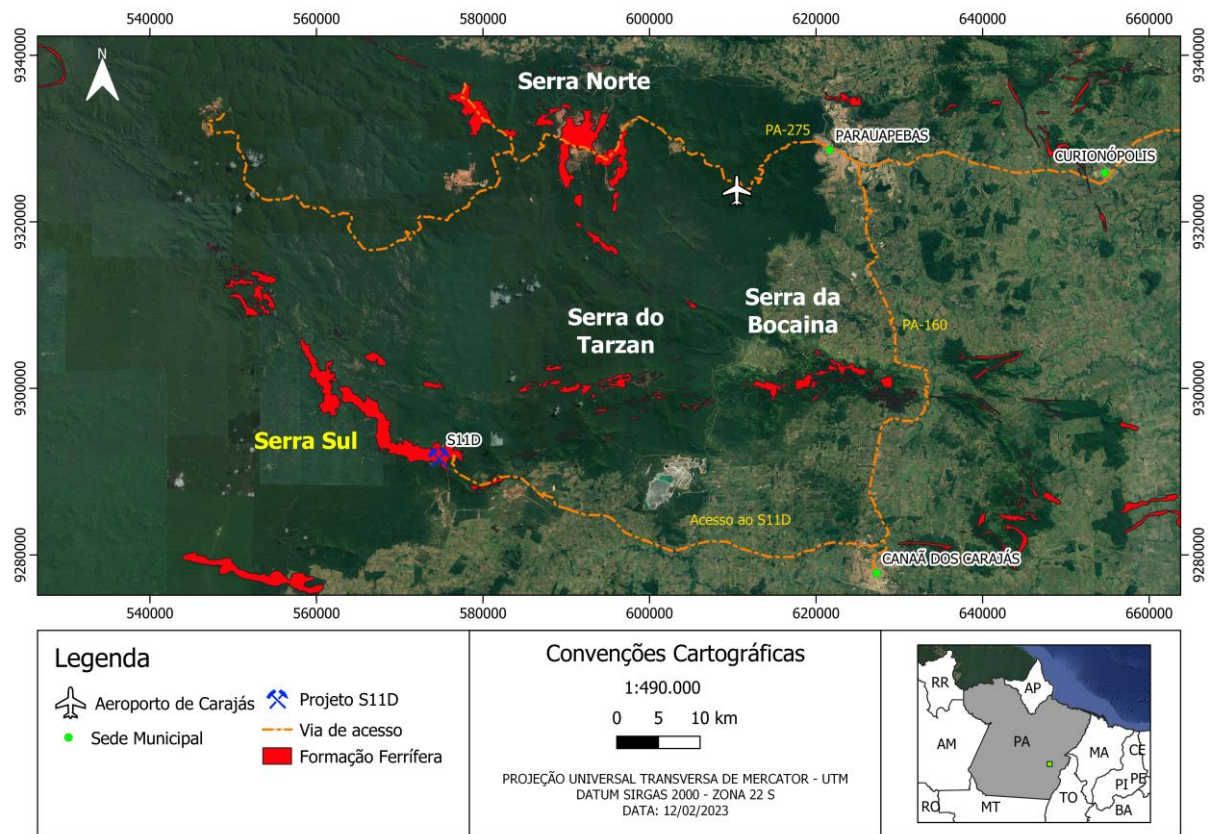


Figura 9 - Localização e vias de acesso do platô S11 localizado na Serra Sul, Província Mineral de Carajás (PA). Fonte: Banco de dados - Vale S.A., (2021).

2.1.1 Geologia local

A Província Mineral de Carajás está localizada no setor oriental do Escudo Brasil Central (sudeste do Cráton Amazônico), limitada a leste pelo Cinturão Araguaia e a oeste pelo rio Xingu. O embasamento da província é formado pelo Complexo Xingu, constituído por gnaisses graníticos, granodioríticos e tonalíticos, migmatitos, anfibolitos, rochas máficas e ultramáficas, que compõem o embasamento cristalino (CARSTE, 2010).

O Supergrupo Itacaiúnas é uma sucessão neoarqueana que engloba o Grupo Grão Pará e suas unidades correlacionadas (Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca e Igarapé Bahia) (CVRD, 1972; BEISEGEL et al., 1973; DOCEGEO, 1988).

Os litotipos predominantes na Serra Sul, mais especificamente no corpo S11, são rochas metavulcanossedimentares do Grupo Grão Pará de idade neoarqueana, compostos por metavulcânicas máficas a félsicas. Na base do Grupo ocorre a Formação Parauapebas, com idade por volta de 2,75 Ga, constituída de rochas metavulcânicas (basaltos e riolitos). Na unidade intermediária ocorre a Formação Carajás, com idade por volta de 2,74 Ga, composta por Formações Ferríferas Bandadas (FFB) com soleiras de basalto, além de corpos de

hematititos e magnetititos, compondo os depósitos de minério de ferro de classe mundial. Já sobre a Formação Carajás, no topo do Grupo, ocorre a Formação Igarapé Cigarra, composta por sequência metavulcanossedimentar (basaltos, tufos, FFB, chert, quartzo wacke e quartzo arenito), o contato das rochas dessa unidade com a Formação Carajás é marcado localmente na Serra Sul por um horizonte de brecha na formação ferrífera (MACAMBIRA et al., 1990) (Figura 10).

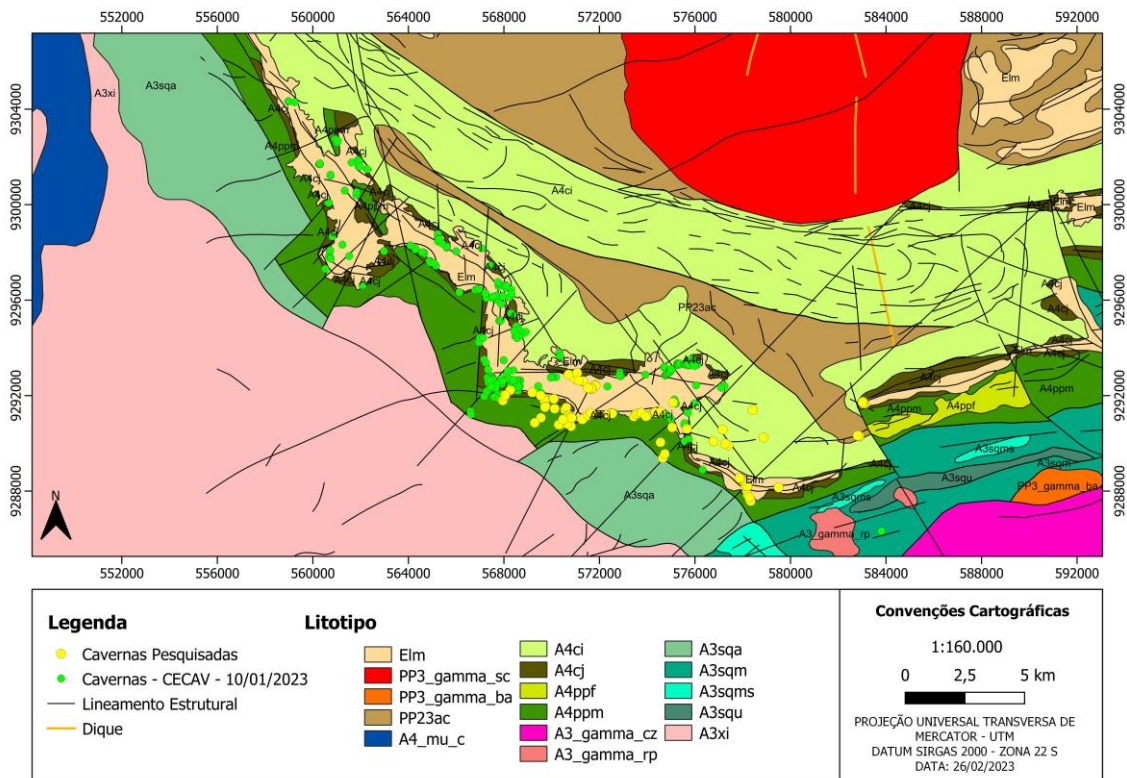


Figura 10 - Mapa Geológico da Serra Sul com a localização das cavernas pesquisadas (amarelo) e do banco de dados de cavernas do CECAV (verde) datado de 10/01/2023. Fonte: Banco de dados - Justo e Lopes (2014); CECAV, (2023). Legenda: A3xi - Complexo Xingu; A3sqa - Sequência greenstone belt com níveis de rochas ultramáficas, talco xistos, talco-tremolita xistos, clorita xistos, localmente com textura spinifex; A3sqms - Sequência greenstone belt com mica xistos, biotita xistos, paragnaisses finos; A3sqm - Sequência greenstone belt com predomínio de rochas metavulcânicas máficas; A3sqa - Sequência greenstone belt intercaladas a rochas metavulcânicas ácidas a intermediárias; A3_gamma_rp - Metatonalito Racha Placa; A3_gamma_cz - Metagranito Cruzadão; A4ppm - Metabasaltos da Formação Parauapebas; A4ppf - Metabasaltos com níveis amigdaloidais e rochas vulcânicas e metavulcânicas ácidas da Formação Parauapebas; A4cj - Formação Carajás; A4ci - Formação Igarapé Cigarra; A4_mu_c - Suíte Intrusiva Cateté; PP23ac - Formação Águas Claras; PP3_gamma_ba - Granito Fazenda Bananal; PP3_gamma_sc - Granito Serra dos Carajás; Elm - Cobertura Laterítica.

2.1.2 Tectônica

A evolução tectônica das Serras de Carajás foi iniciada com o desenvolvimento da zona de cisalhamento dúctil Itacaiúnas de idade arqueana com direção preferencial E-W. Posteriormente, a ocorrência de um evento transpressivo causou a deformação de litotipos,

tendo em sequência um evento transtrativo dextral, responsável pela subsidência no interior da Bacia de Carajás. O limite dos litotipos que receberam a subsidência, bem como o deslocamento dextral transtensivo das estruturas de Carajás marcam a existência da Falha regional denominada Carajás. Essa falha é por vezes preenchida por sills e diques máficos que datam de 2,6 bilhões de anos. Após esse fato um evento de transpressão sinistral entre 2,6 Ga e 2,0 Ga reativou a Falha Carajás (PINHEIRO; HOLDSWORTH, 1997).

O Cinturão Itacaiúnas é a principal estrutura geotectônica de idade arqueana da Província Mineral de Carajás. Na porção norte do cinturão ocorre o domínio transcorrente com sequências vulcanossedimentares associadas. Já ao sul do cinturão existe um domínio composto por lentes de granulitos, gnaisses, granitóides e rochas supracrustais (ARAÚJO et al., 1988; ARAÚJO; MAIA, 1991). Conforme proposto por esses mesmos autores, o domínio situado na porção norte do Cinturão Itacaiúnas, pode ser dividido em dois sistemas principais:

- 1) Sistema Serra dos Carajás: estrutura sigmoidal, alongada na direção WNW-ESE e limitada pelas Serras Norte e Sul;
- 2) Sistema Cinzento: sequência vulcanossedimentar tipo greenstone belt pertencente ao Grupo Rio Novo, rochas do Complexo Xingu e gnaisses, localizada na porção NE da Província Mineral de Carajás.

2.1.3 Geomorfologia, pedologia e vegetação

A área do presente estudo está contida no domínio dos Planaltos Residuais do Sul da Amazônia, que é caracterizado por maciços residuais de topo aplainado ou ondulado, além de poucas cristas e picos envolvidos por faixas de terrenos rebaixados.

As principais serras da região estudada são Serra Norte, Leste, da Bocaina, do Tarzan e Serra Sul. Essas serras apresentam amplitude de aproximadamente 300 m, com altitude média de 700 m e com trechos que chegam a atingir mais de 800 metros em relação ao nível do mar (PROJETO RADAMBRASIL, 1974).

Nos níveis mais altos do planalto dissecado dessas serras, também denominados de platôs, ocorrem litotipos mais resistentes, tais como metarenitos da Formação Águas Claras, formações ferríferas bandadas (FFB), jaspilitos e rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará, além de crostas lateríticas ferruginosas (canga) provenientes da alteração intempérica das FFB (VALENTIM; OLIVITO, 2011).

Vale destacar também que os solos que possuem gênese relacionada às rochas do Grupo Grão Pará são formados principalmente por processos de lixiviação e erosão da rocha matriz (CAMPOS; CASTILHO, 2012). Além disso, podem ser encontrados normalmente em 9 geofácies nativas na área da Floresta Nacional de Carajás (vegetação rupestre aberta, vegetação rupestre arbustiva, mata baixa, mata alta, campo graminoso, lajedo, campo brejoso, buritizal e lagoa) (SCHAEFER et al., 2018).

O relevo da área é composto por três geoformas principais: topos de platôs (áreas relativamente planas em topo), vertentes (áreas de encostas montanhosas) e depressões fluviais (fundos do vale). Os topos de platôs situados sobre as formações ferríferas são ondulantes, podem atingir mais de 800 metros de elevação e apresentam vegetação rasteira de campos ferruginosos. As vertentes, limitadas entre os platôs e depressões, ocorrem em grandes desníveis topográficos podendo chegar a mais de 300m de intervalo. Já as depressões fluviais constituem as áreas localizadas abaixo de 300 metros de altitude e correspondem à parte inferior dos taludes e ao fundo dos vales dos “igarapés” e córregos locais, compostos por basaltos cobertos por florestas em solos espessos (VALE S.A., 2021) (Figura 11).

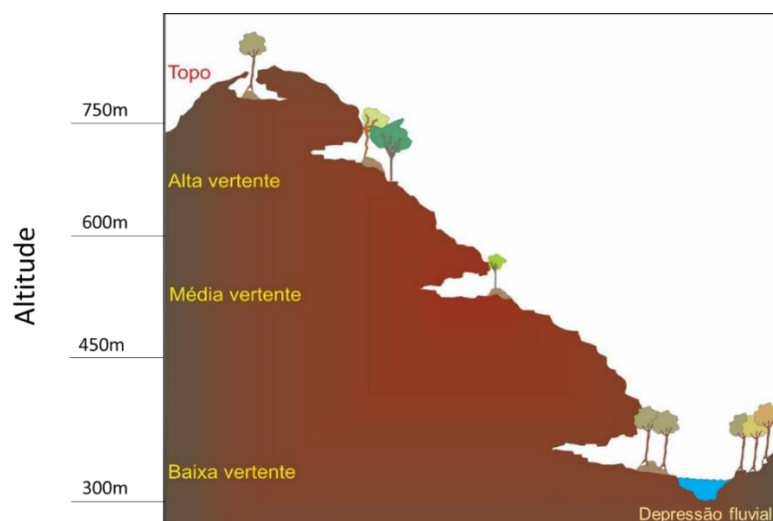


Figura 11 - Imagem esquemática do relevo da área de estudo evidenciando os topos de platô, vertentes e depressões fluviais, onde estão inseridas as cavidades na paisagem. Fonte: Adaptado de BRANDT, (2020).

2.1.4 Clima e pluviometria

Do Plano de Manejo para Uso Múltiplo da Floresta Nacional de Carajás produzido pela empresa Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) e aprovado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA) em 2004, foram obtidas as informações sobre clima e pluviometria da área de estudo:

A região da Serra dos Carajás apresenta duas compartimentações climáticas principais: o Clima Equatorial Continental e o Clima Equatorial Mesotérmico de Altitude. O primeiro corresponde a extensa região das áreas colinosas de altitudes baixas, geomorfologicamente incluídas na classificação da Depressão Periférica do Sul do Pará. Já o segundo é condicionado pelo fator altitude que faz com que as temperaturas médias anuais fiquem com valores mais baixos por conta das oscilações do relevo, acarretando o aparecimento de um clima equatorial mesotérmico de altitude (IBAMA, 2004).

O clima da região de estudo é do tipo tropical chuvoso ("AWi" - segundo a classificação de Köppen). Esse clima é caracterizado pela presença de um longo período de estiagem, altos níveis médios de precipitação de chuva anuais e temperaturas mensais acima de 18°C (KÖPPEN, 1918). Nas serras de Carajás existem dois subtipos climáticos existentes: 1) de Encostas, localizado em regiões abaixo de 300m em relação ao nível do mar, apresentando temperaturas médias anuais em torno de 26°C, fraca circulação de ventos e médias anuais de precipitação que variam de 1.900 a 2.000mm; 2) de Topos, situado em regiões acima de 700m em relação ao nível do mar, possui temperaturas médias que variam entre 23°C e 25 °C, média circulação de ventos e médias anuais de precipitação que variam entre 2.000 e 2.400mm (IBAMA, 2004).

2.2 Procedimentos Metodológicos

O presente trabalho foi subdividido em três macro etapas: (1) levantamento bibliográfico; (2) coleta, compilação e organização do banco de dados; (3) análise, interpretação e discussão dos dados.

Na primeira etapa de levantamento bibliográfico buscou-se informações sobre aspectos geológicos, tectônicos, geomorfológicos, pedológicos, clima, pluviometria e da vegetação da região da Serra Sul de Carajás, bem como sobre o processo de gênese de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferruginosos. Para que fosse possível esses levantamentos foram consultados artigos científicos, livros, teses, dissertações e relatórios técnicos de processos de licenciamento ambiental.

A segunda etapa compreendeu a coleta, compilação e organização do banco de dados obtido de 99 cavernas presentes na unidade geomorfológica da Serra Sul. Esse banco de dados contempla informações referentes aos dados coletados no processo de licenciamento ambiental do projeto S11D pela empresa Carste em contrato com a Vale S.A. no ano de 2010. As informações utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho, foram: coordenadas

geográficas da entrada das cavernas, altitude, parâmetros espeleométricos obtidos com grau de precisão 5D (com base no sistema *British Cave Research Association* – BCRA) área, volume e projeção horizontal, inserção na paisagem, estruturas geológicas, litotipo, hidrologia, plantas baixas e perfis topográficos.

Na terceira etapa, com base no banco de dados construído na segunda etapa, foi possível realizar a análise, interpretação e discussão dos dados obtidos. Dessa forma, foi realizada a análise planigeométrica, conforme padrões morfológicos planimétricos propostos por Palmer (1991; 2003) e geométricos por Calux (2013), tendo por base a relação geométrica entre as paredes e linha d'água, ou seja, leva em consideração as partes mais limítrofes das cavidades. Além da correlação com dados geológicos e estruturais e consequentemente a proposição dos processos de gênese e evolução geológica para o grupo de cavidades naturais estudadas da Serra Sul.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Inserção das Cavernas no Relevo

A distribuição espacial das cavernas estudadas da Serra Sul pode ser dividida em quatro classes principais: alta, média ou baixa vertente (bordas do platô) em relação ao nível de base local e topo de platô.

Dessa forma, as cavernas estudadas estão situadas em maior concentração na alta vertente, com cerca de 50%. Em média vertente estão situadas aproximadamente 28% das cavidades estudadas. Já nos topos de platô foram identificadas cerca de 13% das analisadas e destacam-se nesse intervalo topográfico do topo de platôs as cavidades nas bordas de lagos (12 das 13 encontradas). Por fim, as demais cavernas ocorrem em baixa vertente representando cerca de 9% da amostra (Figura 12).

Outro ponto importante a se destacar é que a grande maioria das cavernas estudadas (cerca de 87%) está situada nas escarpas ou bordas dos platôs e não no interior ou topo dos platôs. Isso ocorre em decorrência do aumento da capacidade erosiva nas bordas em relação aos topos de platô, por conta do aumento do gradiente hidráulico nas bordas dos platôs.

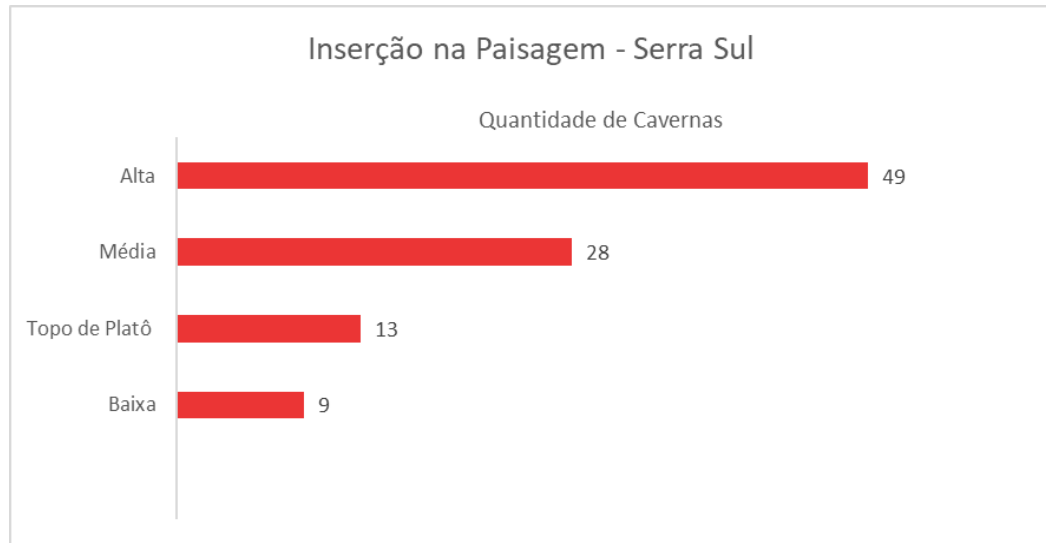


Figura 12 - Distribuição das cavidades de acordo com intervalo topográfico do relevo.

Com relação ao posicionamento das cavernas em relação às classes hipsométricas (nível do mar) o intervalo altimétrico de 700 a 799 m se destacou com maior frequência de cavernas com cerca de 40%, seguido pela classe hipsométrica de 600 a 699 m (23%). Todas as cavidades juntas que ocorrem abaixo de 600 m representam cerca de 22%, já as cavernas acima de 799 m representam aproximadamente 15% da população amostral (Figuras 13 e 14). Vale ressaltar que essa distribuição das classes hipsométricas também foi relatada por Silva (2021) em estudo desenvolvido sobre cavernas de Carajás. Porém, Pinheiro et al. (1985) e Scherer (2019), colocam o intervalo de 600 a 700 m, como o mais relevante para a ocorrência de cavernas nas regiões das Serras Norte e da Bocaina em Carajás, respectivamente.

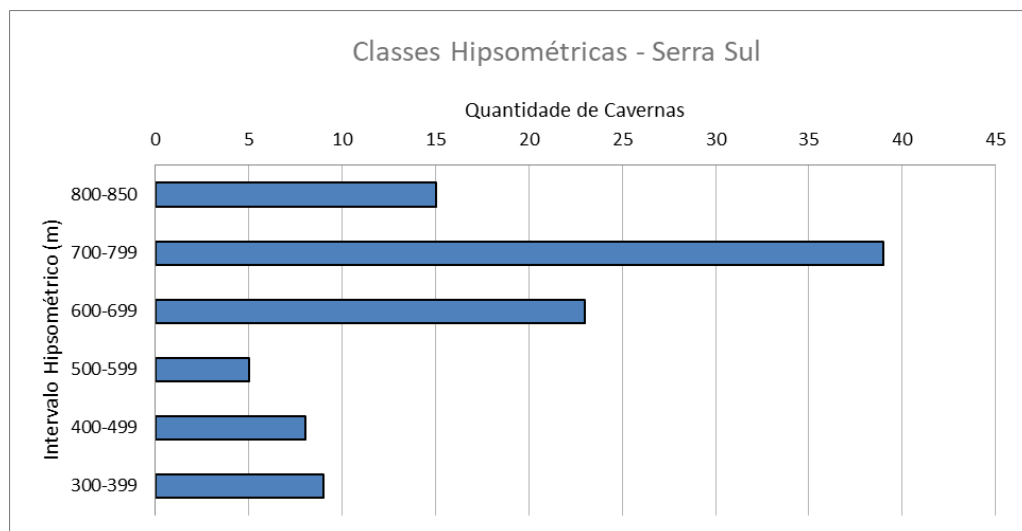


Figura 13 - Distribuição das cavidades de acordo com classes hipsométricas.

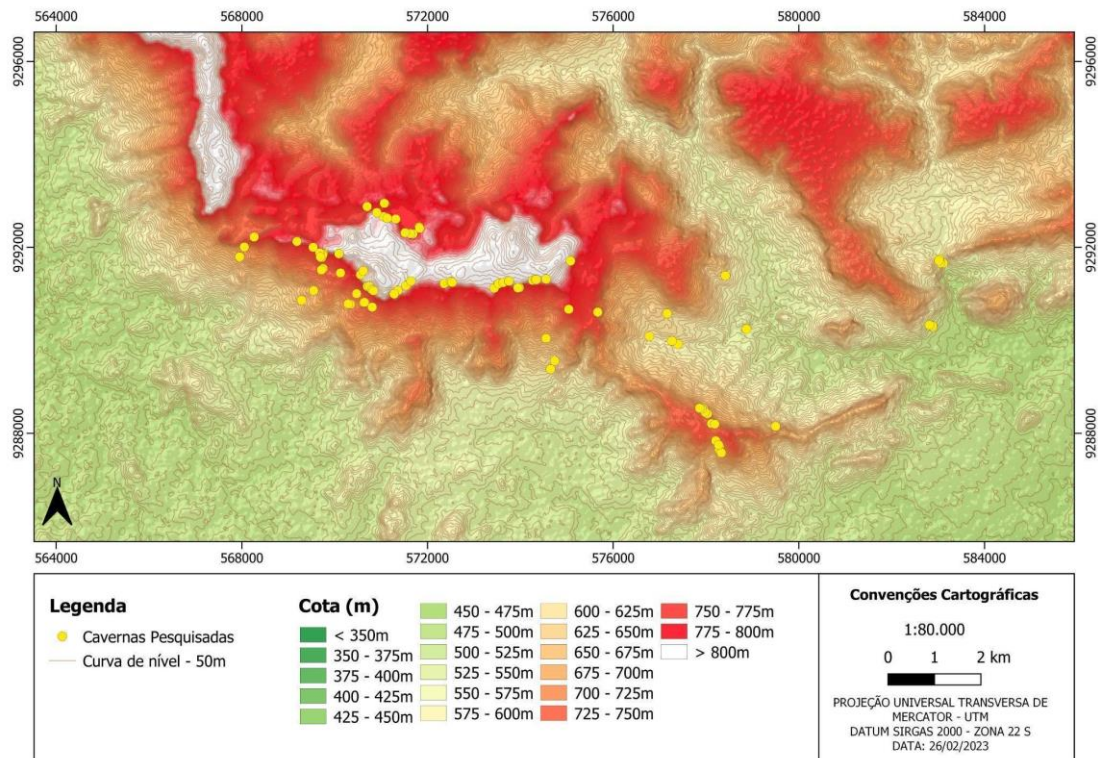


Figura 14 - Mapa hipsométrico da Serra Sul com a localização das cavernas pesquisadas (amarelo).
Fonte: Banco de dados - Farr et al., (2007); Justo e Lopes (2014).

É importante destacar que as cavernas do presente estudo ocorrem de forma abrangente na vertente inclinada (alta e média) e de forma mais restrita nos platôs. A restrição da formação das cavernas no interior dos platôs se deve a presença de afloramentos rochosos de formações ferríferas bandadas cobertas por uma carapaça de canga ferruginosa ou até mesmo depósitos de tálus nas vertentes (Figura 15). Já nas áreas mais baixas no sopé da Serra Sul as cavernas estão normalmente contidas nas bordas de canais de drenagem, onde são encontradas as carapaças de ferricrete (rocha argilosa ferruginizada de origem coluvionar).



Figura 15 - Cobertura de canga cobrindo as formações ferríferas bandadas em alta vertente na cavidade S11D_0010 (A) e depósito de tálus com blocos de ferricrete na cavidade CAV_0018 (B).

3.2 Padrões Morfológicos

Com base na análise das plantas topográficas das 99 cavidades naturais pesquisadas, partindo dos modelos de classificação Planimétrica e Geométrica propostos por Palmer (1991; 2003) e Calux *et al.* (2019), respectivamente, foi possível definir 13 padrões planigeométricos, que são a combinação dos padrões planimétricos e geométricos, conforme proposto por Scherer, (2019). Sendo eles em ordem decrescente de abundância na área de estudo: 1) Simples Disforme; 2) Simples Retilínea Retangular; 3) Simples Semicircular; 4) Simples Curvilínea; 5) Simples Curvilínea Bifurcada; 6) Simples Bifurcada; 7) Composta Mista; 8) Composta Ramiforme; 9) Simples Afunilada; 10) Simples Retilínea Retangular; 11) Composta Bifurcada; 12) Composta Espongiforme; 13) Simples Elíptica.

Vale destacar que a maior parte das cavernas apresenta câmara simples (90%), ou seja, composta por compartimento único e que foram descritas através de 9 padrões identificados. Já as demais cavernas (10%) possuem câmaras compostas com compartimentos mais complexos e foram descritas através de 4 padrões identificados.

Cabe ressaltar que para a distribuição das classes morfológicas planigeométricas, a classe que se destacou sendo encontrada na grande maioria das cavernas foi a Simples Disforme em 38 cavernas, seguida pela Simples Retilínea Retangular (15 cavernas) e Simples Semicircular (12 cavernas). As demais classes ocorreram de maneira mais restrita, representando menos de 10% do total cada um dos grupos (Figura 16).

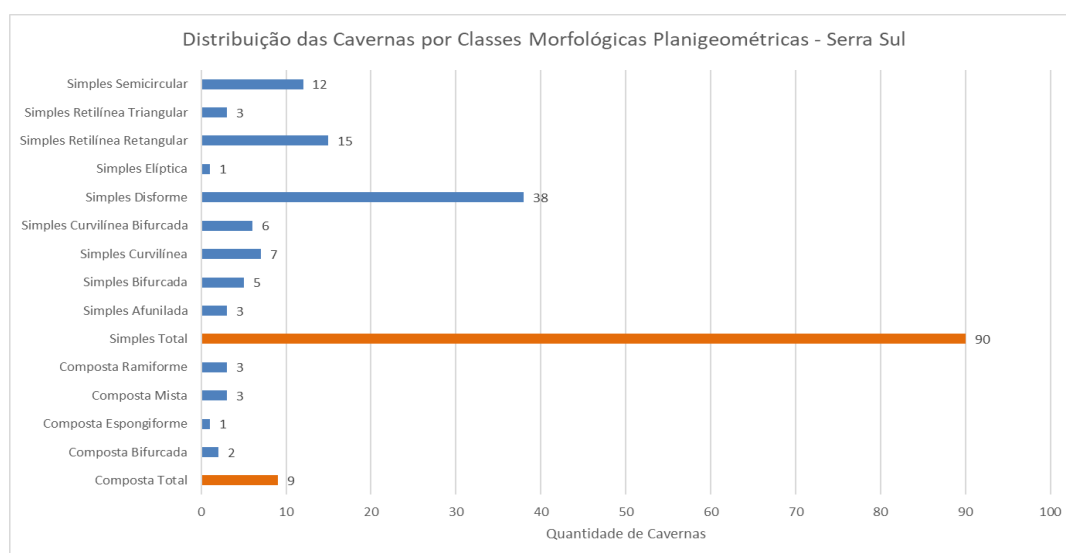


Figura 16 - Distribuição das cavernas da Serra Sul por classes morfológicas planigeométricas.

Dessa forma, com base no banco de dados construído foi possível organizar em ordem decrescente de abundância os padrões identificados e elencar quais são as principais características identificadas em cada classe, conforme Quadro 2.

Quadro 2 - Principais características dos padrões morfológicos planigeométricos das cavernas da Serra Sul.

Item	Padrão Planigeométrico	Principais características identificadas
1	Simples Disforme	Salão único com arranjo da planta baixa não se assemelhando a nenhuma forma geométrica ou planimétrica
2	Simples Retilínea Retangular	Salão único com direção preferencial do conduto em um só sentido, normalmente controlada pela presença de estruturas geológicas (bandamento, fratura, falha ou dobra). As paredes formam ângulos aproximadamente retos entre si, gerando uma morfologia retangular da planta baixa
3	Simples Semicircular	Salão único com morfologia semicircular da planta baixa
4	Simples Curvilínea	Salão único com eixo principal do conduto de desenvolvimento curvilíneo. Essa curvatura normalmente é controlada pelo contato entre diferentes estruturas geológicas (planos de falha ou juntas, ou contato entre plano de fratura e bandamento)
5	Simples Curvilínea Bifurcada	Salão único com dois eixos de desenvolvimento curvilíneos. Essas curvaturas normalmente são controladas pelo contato entre diferentes estruturas geológicas (planos de falha ou juntas, ou contato entre plano de fratura e bandamento)
6	Simples Bifurcada	Salão único que se desdobra para dois sentidos
7	Composta Mista	Conjunto de vários salões, condutos e canalículos composto por mais de um tipo de padrão planigeométrico
8	Composta Ramiforme	Conjunto de vários salões, condutos e canalículos apresentando condutos de tamanho variado, que se desenvolvem em diversas direções e normalmente não se interconectam
9	Simples Afunilada	Salão único que se estreita na direção distal, apresentando forma que se assemelha a um funil
10	Simples Retilínea Triangular	Salão único com paredes que seguem em direções transversais e se conectando no eixo de desenvolvimento
11	Composta Bifurcada	Conjunto de vários salões, condutos e canalículos em que os salões se dividem em duas direções preferenciais
12	Composta Espongiforme	Conjunto de vários salões, condutos e canalículos que apresenta condutos de tamanho variado, que se interconectam normalmente por passagens mais estreitas com ocorrência de diversos pilares.
13	Simples Elíptica	Salão único na forma elíptica. Geralmente não é influenciado por controle estrutural para a sua gênese

A Figura 17 apresenta as morfologias extraídas das plantas baixas das cavidades que melhor representam os padrões planigeométricos identificados nas cavidades da Serra Sul.

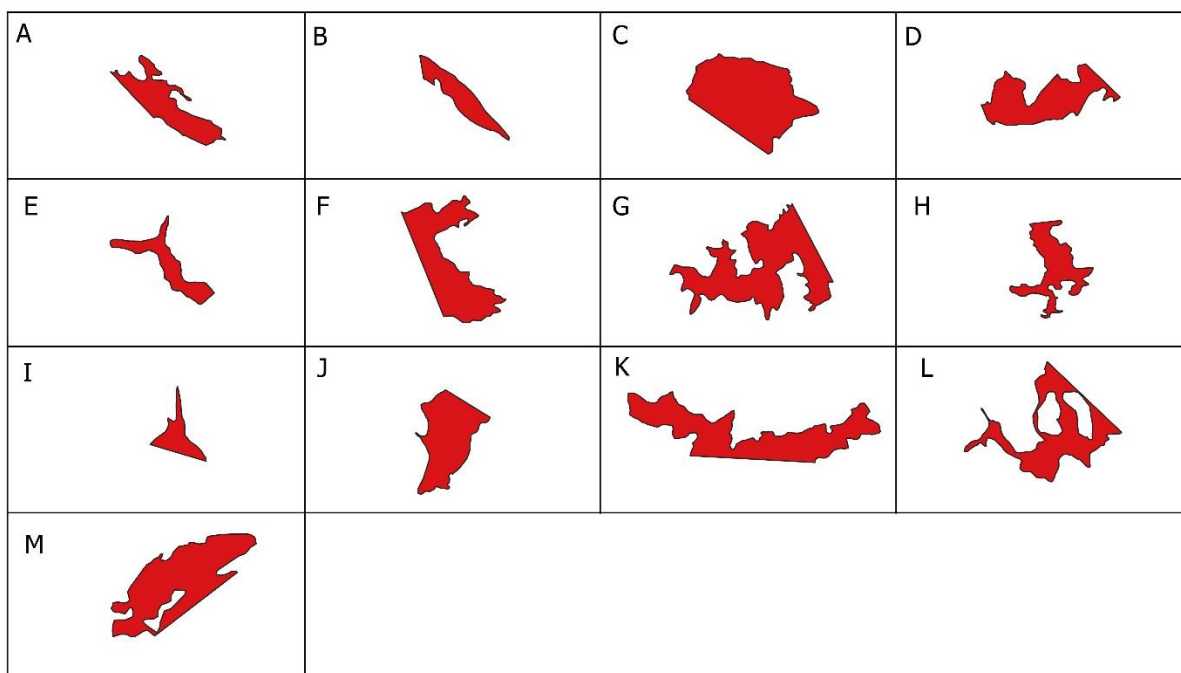


Figura 17 - Morfologias extraídas das plantas baixas que representam os 13 padrões morfológicos planigeométricos para as cavernas da Serra Sul. Legenda: A - Simples Disforme; B - Simples Retilínea Retangular; C - Simples Semicircular; D – Simples Curvilínea; E - Simples Curvilínea Bifurcada; F - Simples Bifurcada; G - Composta Mista; H - Composta Ramiforme; I - Simples Afunilada; J - Simples Retilínea Triangular; K - Composta Bifurcada; L - Composta Espongiforme; M - Simples Elíptica.

3.3 Litotipos

Com relação aos aspectos litológicos, as cavernas pesquisadas da Serra Sul são encontradas em 4 litotipos principais, são eles: canga, formação ferrífera bandada (FFB), ferricrete¹ e rocha máfica (metabasalto). Em FFB, foram registradas 28 cavernas, 26 em canga e 21 no contato entre FFB/canga. Essa soma representa cerca de 76% de todas as cavernas mapeadas no presente estudo na Serra Sul.

Após os litotipos supracitados, destaca-se o ferricrete que foi registrado em 17 cavernas de forma isolada, mas em outras pode ser visualizado em contato com canga (1 caverna) e máfica (1 caverna). Além disso, foram registradas 3 cavidades em metabasalto de forma isolada, mas também foram encontradas cavernas que apresentam essa rocha máfica em contato com canga (1 caverna), ferricrete (1 caverna) e FFB (1 caverna) (Figura 18).

¹ Rocha proveniente de leques coluvionares cimentados, representados por brechas ferruginosas formadas por clastos de rochas de diferentes origens, incluindo rochas vulcânicas e metarenitos, na região de estudo.

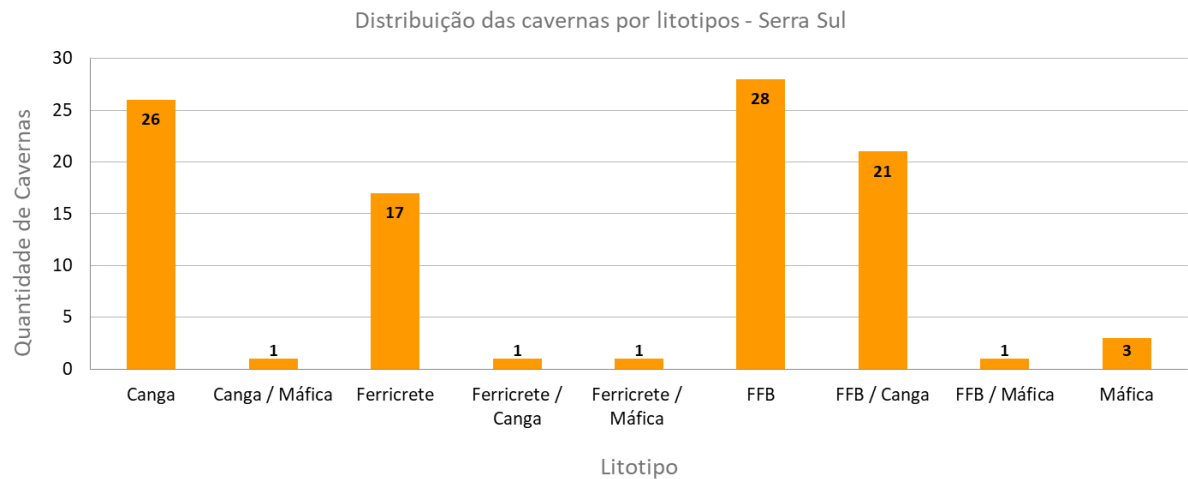


Figura 18 - Distribuição das cavernas da Serra Sul por litotipos.

No que se refere a relação dos litotipos com os padrões morfológicos planigeométricos, percebe-se que o padrão Simples Disforme é o mais abundante em quantidade de cavernas e apresenta a maior diversidade de litotipos, só não ocorrendo no contato ferricrete/canga (Figura 19).

Os litotipos canga de forma restrita, máfica e o contato entre esses dois grupos ocorre apenas na tipologia de simples câmaras, não sendo identificados em câmaras compostas. Já a FFB e contato FFB/canga ocorrem na maior parte dos padrões morfológicos identificados.

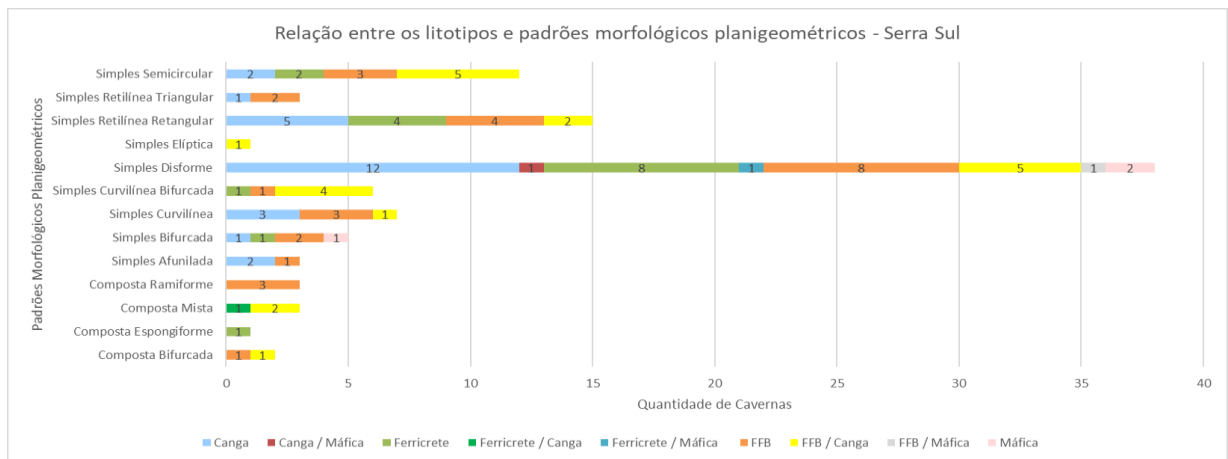


Figura 19 - Relação entre os litotipos e padrões morfológicos planigeométricos.

3.4 Espeleometria

Com relação à análise espeleométrica das cavernas, quando é comparada a tipologia das câmaras (simples ou composta) com os dados de projeção horizontal (PH), verificamos que a grande maioria das cavernas analisadas (76 cavidades) possui tipologia de câmaras simples com PH no intervalo de 5 a 20m, ou seja, apresentam normalmente um salão único com pequenas dimensões (Figura 20). Vale destacar que as cavernas de tipologia composta possuem PH superior a 22m, com maior frequência de ocorrência em valores próximos a 65m de PH (6 cavernas).

Quando analisamos os dados estatísticos da variável PH, percebemos que a média geral do banco de dados é igual a 18,85 m, com valor mínimo e máximo de 5,1 e 111m, respectivamente. Além disso, quando comparamos as médias de PH de cada litotipo, percebemos que os contatos entre ferricrete/canga (31,9m), ferricrete/máfica (25m) e FFB/Canga (24,48m), juntamente com cavernas exclusivamente em FFB (26,08) representam litotipos com PH acima da média do banco de dados analisado (Figura 21).

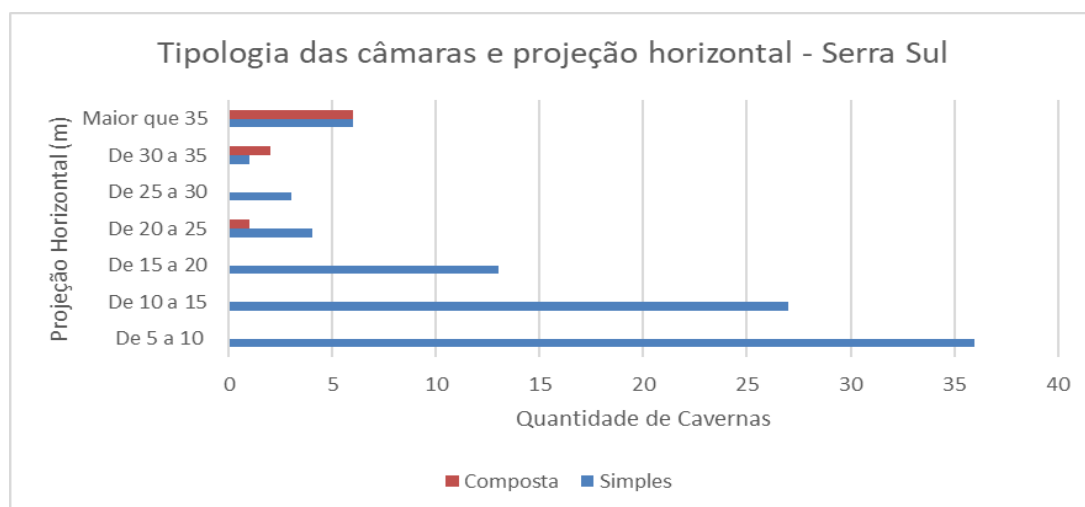


Figura 20 - Relação entre tipologia das câmaras e projeção horizontal (PH) das cavernas da Serra Sul.

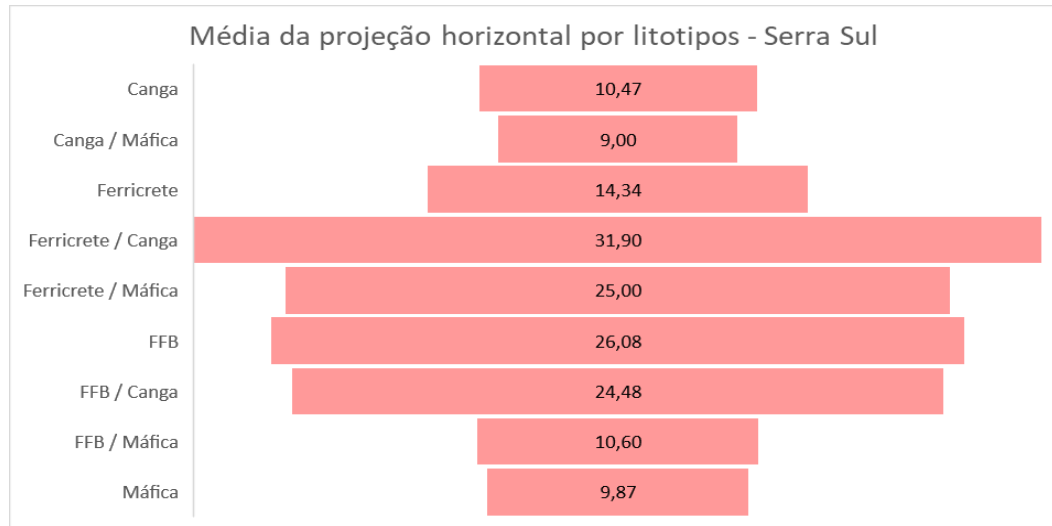


Figura 21 - Média da projeção horizontal em metros por litotipos das cavernas da Serra Sul.

Quando realizamos uma correlação entre os dados de volume e área das cavernas estudadas, podemos verificar que a maior parte das cavidades possui baixos valores de área e volume, pois cerca de 87% das cavernas pesquisadas apresentam área menor que 100 m² e 91% possuem volume menor que 200 m³ (Figura 22). Dessa forma, essas informações corroboram com os resultados obtidos sobre PH, pois cerca de 76% das cavidades apresentam projeção horizontal de 5 a 20 m. Mostrando assim que a grande maioria das cavernas estudadas da Serra Sul possuem pequenas dimensões.

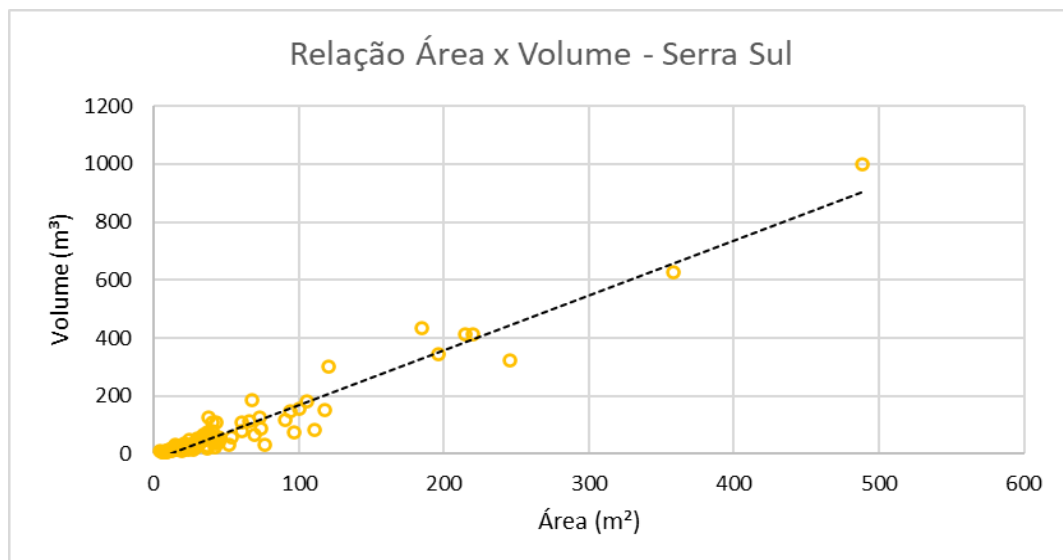


Figura 22 - Correlação entre dados de área e volume das cavernas da Serra Sul.

3.5 Estruturas Geológicas/Hidrologia

No que se refere às estruturas geológicas presentes nas cavernas amostradas da Serra Sul, a maior parte das cavidades analisadas (52) apresenta no mínimo um tipo de estrutura identificada (bandamento, fratura ou junta, falha e dobra) e nas outras 47 cavernas não foi possível identificar estruturas (Figura 23). Dessa forma, podemos perceber que o controle estrutural é um dos importantes fatores para a gênese e desenvolvimento dessas cavidades.

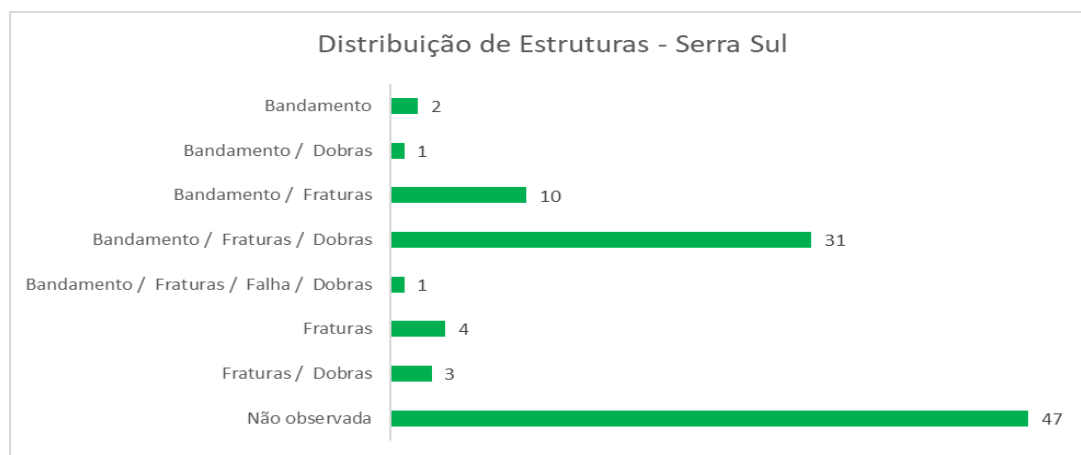


Figura 23 - Distribuição das Estruturas Geológicas por quantidade de cavernas da Serra Sul.

Por meio da relação entre a presença de estruturas e a descrição dos litotipos nas cavernas, é possível definir os seguintes padrões:

- Na maior parte das cavernas em canga (88%) e todas em ferricrete (100%) não foram identificadas estruturas geológicas;
- Cerca de 96% das cavernas em FFB e 95% no contato FFB/canga apresentam estruturas geológicas possíveis de identificar.

Esses fatos correlacionados com as projeções horizontais das cavernas mostram que cavernas que ocorrem em litotipos com a presença de estruturas geológicas normalmente têm a capacidade de se desenvolver com PH superior quando comparadas com cavidades com ausência ou pequena concentração de estruturas.

Além disso, essas descontinuidades (bandamento, dobras, juntas e falhas) presentes principalmente na FFB e contato FFB/canga possuem orientação preferencial nas direções NE-SW e NW-SE, sendo a mesma direção preferencial da maior parte dos condutos identificados nas cavernas estudadas e a mesma orientação das estruturas presentes nos litotipos da Serra Sul (Figura 24).

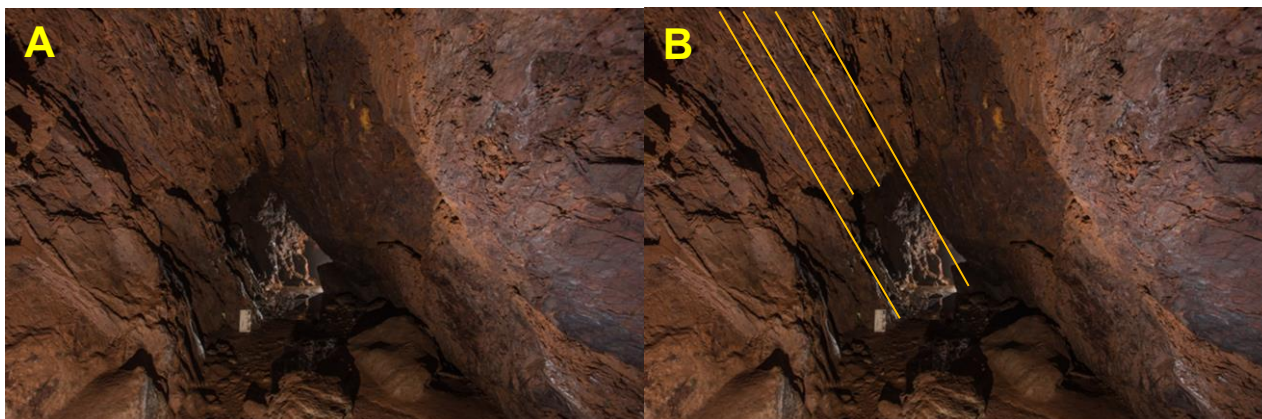


Figura 24 - Controle estrutural para desenvolvimento dos condutos da caverna CAV_0034 em formação ferrífera bandada, sem interpretação (A) e com indicação da direção preferencial do bandamento da FFB que coincide com o desenvolvimento do conduto (B).

3.6 Gênese

Dentre os fatores controladores para espeleogênese das cavernas da amostra estudada na Serra Sul, destacam-se:

1 - Estrutural: Os contatos entre litotipos e as estruturas geológicas servem como caminhos preferenciais para a água meteórica, o que favorece a dissolução, mobilização da sílica e até mesmo do ferro, gerando microcavidades, assim como verificado em cavernas na Serra Norte por Braga *et al.* (2017). Além disso, após a abertura dessa porosidade secundária nas rochas se iniciam os processos de intemperismo e erosão (diminuindo o volume da rocha alterada) possibilitando o desenvolvimento dos salões dessas cavernas por abatimento de blocos do teto e das paredes, influenciando a morfologia dessas cavidades. Logo em sequência as cavidades podem ficar expostas na superfície através do recuo das vertentes com a evolução dos processos erosivos. Dessa forma, o fator estrutural é considerado como o principal por proporcionar o início do processo de alteração supergênica que acarreta a gênese dessas cavernas. Esse fato também é relatado por Pinheiro e Maurity, (1988), Piló e Auler, (2005) e Auler *et al.* (2022).

2 - Litológico: Conforme verificado na área de estudo as cavernas em litotipos ferríferos (FFB, canga e contato entre os dois) apresentaram-se em maior quantidade e distribuição geográfica, ou seja, marcam um controle litológico associado a espeleogênese, pois representam cerca de 76% das cavernas analisadas da Serra Sul. Além disso, os contatos geológicos de fato favorecem a espeleogênese, proporcionando a formação de cavernas com maiores PH.

3 - Topográfico: As cavernas pesquisadas encontram-se em maior parte em alta vertente, com cerca de 50% da amostra pesquisada. Além disso, o intervalo hipsométrico de 600 a 800 m se destacou com maior frequência de cavernas com cerca de 63%. Dessa forma, percebe-se também um forte controle topográfico na área de estudo em decorrência da percolação e infiltração da água meteórica de montante para jusante, moldando a morfologia dos platôs e favorecendo a formação das cavidades subterrâneas. Vale ressaltar que esse comportamento das classes hipsométricas é um fator secundário, pois apenas reflete a principal faixa de ocorrência das FFB nas vertentes, mas isso também é relatado por Silva (2021) em estudo desenvolvido sobre cavernas de Carajás. Porém, Pinheiro et al. (1985) e Scherer (2019), colocam o intervalo de 600 a 700m, como o mais relevante para a ocorrência de cavernas nas regiões das Serras Norte e da Bocaina, respectivamente.

4 - Hidrológico: A percolação da água meteórica e consequentemente sua infiltração favorece a criação de canalículos e condutos favorecendo a formação das microcavidades no ambiente subterrâneo. Nesse ambiente o processo de dissolução predomina em detrimento aos processos erosivos, pois com a presença de água a sílica é lixiviada, diminuindo o volume total da rocha e formando poros. Esse fato é validado pela presença de poros em substituição as bandas silicosas nas formações ferríferas e na ausência de sílica em algumas porções das cangas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme mostrado no presente estudo a classificação planigeométrica, conforme padrões morfológicos planimétricos propostos por Palmer (1991; 2003) e geométricos por Calux (2013), se mostrou como muito importante para cavernas em que o controle estrutural é predominante. Porém, essa classificação não se mostrou muito eficaz para as cavernas que apresentaram padrão simples disforme, ou seja, não se assemelham a nenhuma forma geométrica ou planimétrica definida na literatura. Sendo necessário a criação de novos métodos para classificar de forma qualitativa e quantitativa as morfologias da maior parte dessas cavernas ferríferas.

Com relação ao modelo genético das cavernas estudadas da Serra Sul é perceptível a grande influência das estruturas geológicas, pois elas criam condições favoráveis para o processo de dissolução que influencia na espeleogênese com participação concomitante dos fatores controladores (estrutural, litológico, topográfico e hidrológico).

AGRADECIMENTOS

À empresa Vale S.A., por disponibilizar o banco de dados com as informações das cavernas estudadas e por investir em pesquisa e inovação no âmbito espeleológico. Ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) por proporcionar uma estrutura de excelência de ensino e pesquisa que contribuiu fortemente para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N.; JOÃO, X.S.J.; COSTA, J.B.S. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. *In: Congresso Latino- Americano de Geologia*, 7, 1988, Belém. *Anais[...]* Belém: SBG, 1988. p. 324-328.

ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil**. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília: DNPM/CPRM, 1991.

ATZINGEN, N.V.; CRESCÊNCIO, G.; CUNHA JR., W.R. Estudos espeleológicos na Serra dos Carajás, município de Parauapebas-PA. **Boletim Informativo da Fundação Casa da Cultura de Marabá, Marabá**, p. 51-73, 2009.

AULER, A.S.; BARTON, H.A.; ZAMBELLI, B.; SENKO, J.; PARKER, C.W.; SASOWSKY, I.D.; SOUZA, T.A.R.; PUJONI, D.; PEÑARANDA, J.; DAVIS, R. Silica and Iron Mobilization, Cave Development and Landscape Evolution in Iron Formations in Brazil. **Geomorphology**, v. 398, n. 1, p. 1-15, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X21004761>. Acesso em: 26 fev. 2023.

BEISIEGEL, V.R.; BERNARDELLI, A.L.; DRUMMOND, N.F.; RUFF, A.W.; TREMAINE, J.W. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.3 n.4, p. 215-242, 1973.

BRAGA, A.A.J; FIORI, A.P.; GONÇALVES, D.F.; COSTA, F.R. Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas, Carajás-PA. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 25 n. 1, p. 24-39, 2017.

BRANDT. **Projeto Bloco 8 – Estudo de Relevância de Cavidades – Barragem do Rio Vacaria**. Nova Lima: Brandt, 2020.

CALUX, A.S. **Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em rochas ferríferas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 2013. 220p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CARSTE. **Espeleologia do S11D Serra Sul, Região de Carajás – PA**. Belo Horizonte: Carste, 2010.

CAMPOS, J.F.; CASTILHO, A.F. Uma visão geográfica da região da Flona de Carajás. *In*: Martins, F.D.; Castilho, A.F.; Campos, J.; Hatano, F.M.; Rolim, S.G. (Org.). **Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres**. São Paulo: Nitro Imagens, 2012. p.16-27.

CECAV. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>>. Acesso em: 26 fev. 2023.

CVRD. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 26, 1972, Belém. **Anais[...]** Belém: SBG, 1972. p. 78-80.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 35, 1988, Belém. **Anais[...]** Belém: SBG, 1988. p. 11- 54.

FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Review of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1-33, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005RG000183> Acesso em: 21 mar. 2023.

FREIRE, L.; LIMA, J.; VERÍSSIMO, C.; SILVA, E. Estudo Geomorfológico em Cavernas de Arenito da Amazônia Paraense. **Revista de Geografia (Recife)**, Recife, v. 35. n. 4, p. 14-31, 2018.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Plano de Manejo para Uso Múltiplo da Floresta Nacional de Carajás**. Brasília: MMA, 2004.

JUSTO, A.P.; LOPES, E.S. **Programa Geologia do Brasil-PGB. Serra dos Carajás**. Folha SB.22-Z-A-II. Estado do Pará. Carta Geológica. Belém: CPRM, 2014.

KÖPPEN, W. Classification of climates according to temperature, precipitation and annual run. **Petermanns Geographische Mitteilungen**, v. 64, p. 193-203, 1918.

MACAMBIRA, M.J.B.; RAMOS, J.F.F.; ASSIS, J.F.P.; FIGUEIRAS, A.J.M. **Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca**. Belém: UFPA, 1990.

PALMER, A.N. Origin and morphology of limestone caves. **Geological Society of America Bulletin**, v. 103, p. 1-21, 1991.

PALMER, A.N. Speleogenesis in carbonate rocks. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 1, p. 1-11, 2003.

PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W.; HENRIQUES, A.L.; SILVEIRA, L.T.; MOREIRA, J.R.A.; LOPES, P.R.C.; SILVEIRA, O.T.; PAIVA, R.S.; LINS, A.L.F.A.; VERÍSSIMO, C.U.V.; PINHEIRO, S.H.S., HENRIQUES, R.V.L. **Considerações Preliminares sobre a Espeleologia da Serra dos Carajás (PA)**. Grupo Espeleológico Paraense - GEP. Relatório inédito, 1985. 38p.

PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W. As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA) – Brasil. *In*: Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe, 1, 1988, Belo Horizonte. **Anais[...]** Belo Horizonte: SBE, 1988. p. 179-186.

PINHEIRO, R.V.L.; HOLDSWORTH, R.E. The structure of the Carajás N-4 ironstone deposit and associated rocks: relationship to the archaean strike-slip tectonics and basement reactivation in the Amazon region, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, n. 3-4, p. 305-319, 1997.

PILÓ, L.B.; AULER, A.S. Cavernas em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. **O Carste**, v.17, n.3, p.92-105, 2005.

PROJETO RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais - Folha SA.22 Belém**. Rio de Janeiro: MME, 1974.

SCHAEFER, C.E.; CÂNDIDO, H.G.; CORRÊA, G.R.; SIMAS, F.; CAMPOS, J.F. Ecossistemas e Geoambientes de Canga Ferruginosa em Carajás: Paisagens Singulares em Risco de Extinção. *In*: MARTINS, F.F.; KAMINO, L.H.Y.; RIBEIRO, K.T. **Projeto Cenários Conservação de Campos Ferruginosos diante da Mineração em Carajás**. Tubarão: Copiart, 2018, p. 39-103.

SCHERER, B.S. **Morfologia e aspectos geométricos das cavidades de ambientes cársticos na Serra da Bocaina em Canaã dos Carajás-PA**. 68 p. Monografia (Bacharel em Geografia) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá-PA, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unifesspa.edu.br/handle/123456789/2085>. Acesso em: 21 mar. 2023.

SILVA, A.G.A. **Caracterização morfométrica de cavidades naturais subterrâneas: perspectivas para uma classificação morfológica e planimétrica das cavernas ferríferas no Brasil**. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - UFMG, Belo Horizonte - MG, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/41020>. Acesso em: 21 mar. 2023.

TOLBERT, G. E.; REMAINE J.W.; MELCHER, G.C.; GOMES, C.B. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, northern Brazil. **Economic Geology**, v. 66, n. 7, p. 985, 1971. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.7.985>. Acesso em: 21 mar. 2023.

VALE S.A. **Resumo do Relatório Técnico de recursos e reservas minerais das minas do Complexo Serra Norte**. Parauapebas: Vale S.A., 2021.

VALENTIM, R.F.V.; OLIVITO, J.P.R. Unidade Espeleológica Carajás: Delimitação dos Enfoques Regional e Local, Conforme Metodologia da IN-02/2009 MMA. **EspeleoTema**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 41-60. 2011.

ANEXO 03

Artigo publicado na Revista Brasileira de Cartografia em 17/01/2024.

DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv76n0a-71241>

Comparação entre Métodos de Mapeamento Topográfico de Cavernas Ferríferas: Estudo de Caso na Amazônia Brasileira

Adam Barros Fernandes¹, Ricardo Perobelli Borba¹, Iuri Viana Brandi², Ramon Nunes Araújo², Bruno dos Santos Scherer², Júlio Almeida Moreira² e Gabrieli Santos Boulhosa³

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências do Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

² Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, VALE S/A, Mina de Águas Claras, Nova Lima, Minas Gerais, Brasil.

³ Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo, Brasil.

RESUMO

O cálculo dos parâmetros espeleométricos (projeção horizontal, desnível, área e volume) em meio ao mapeamento topográfico de cavernas é um requisito legal para a definição do grau da relevância de cavidades no Brasil. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é a comparação do método convencional e via laser scanner no que tange ao levantamento topográfico em uma amostra de cavernas situadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás. Assim, foi realizada a análise estatística descritiva dos dados espeleométricos angariados pelo método de levantamento topográfico convencional de 1758 cavidades. A partir da definição do parâmetro espeleométrico a ser levantado via laser scanner foi feita a comparação entre o levantamento topográfico desse parâmetro utilizando o método convencional e o escaneamento a laser 3D. O método utilizado no presente estudo trouxe maior rapidez e segurança na coleta de dados de volume em campo. O mapeamento topográfico com o scanner a laser 3D é mais preciso e em 80% dos resultados levou a redução do valor da variável volume, quando comparado com o levantamento topográfico convencional. Além disso, foi proposta a equação de regressão linear ($y=1,1385 \cdot x + 41,157$) para fins de intercâmbio dos dados de volume na população amostral analisada e para comparação com outros levantamentos a serem realizados em cavernas com grandes dimensões e em ambientes geológicos distintos.

Palavras-chave: Espeleometria; Volume; Grau de relevância; Cavidades; Carajás.

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento topográfico de cavernas é uma atividade de extrema importância dentro da ciência espeleológica. Isso ocorre devido a importância dos mapas, seções transversais, seções longitudinais e até mesmo modelos em 3D para a realização de estudos científicos multidisciplinares sobre as cavidades naturais subterrâneas (RUBBIOLI et al., 2019). Vale apontar que os parâmetros espeleométricos (projeção horizontal, desnível, área e volume) obtidos após o mapeamento topográfico das cavernas são essenciais e premissas básicas também para a documentação das cavidades abrangidas em processos de licenciamento ambiental (FERREIRA, 2017). Esse fato torna os levantamentos topográficos de cavernas

ainda mais fundamentais para a ciência espeleológica e para as atividades econômicas que tenham interferência com o patrimônio espeleológico (BERBERT-BORN, 2010).

Os levantamentos topográficos modernos de caverna são definidos pela utilização de instrumentos diferentes daqueles utilizados pelo método convencional (bússola, clinômetro, trena e GPS). Com o avanço tecnológico dos dispositivos empregados na cartografia de cavernas, novos métodos foram introduzidos além do levantamento topográfico convencional. Agora, incorporam-se novas abordagens, como a trena digital a laser, o escaneamento a laser 3D e a fotogrametria (FERNANDES et al., 2023).

Conforme ordenação estabelecida pela legislação ambiental brasileira, foram fixadas 4 classes quanto ao grau de relevância para cavidades naturais subterrâneas (máximo, alto, médio ou baixo), sendo levados em consideração vários atributos, tais como: ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, avaliados sob enfoque regional e local (BRASIL, 2022). É necessária a análise individual de cada um dos atributos encontrados nas cavernas, com o intuito de detectar o seu nível de importância com relação: (i) a unidade geomorfológica, que apresenta continuidade espacial, como serras, morrotes ou sistema cárstico (enfoque local) e (ii) a unidade espeleológica, entendida como a área com homogeneidade fisiográfica que pode congrega diversas formas do relevo cárstico, como dolinas, sumidouros, ressurgências, vales cegos, lapíás e cavernas, que engloba, no mínimo, um grupo ou formação geológica e suas relações com o ambiente no qual se insere (enfoque regional) (BRASIL, 2022).

Para a definição do grau de relevância de cavidades naturais subterrâneas é necessário obter o resultado dos cálculos dos parâmetros espeleométricos previstos como requisito legal pelo Decreto nº 6.640/2008 e detalhado pela Instrução Normativa nº 2/2017 do Ministério do Meio Ambiente. Esses cálculos dos parâmetros espeleométricos são extremamente relevantes tendo em vista que esses atributos são levados em consideração para a classificação do grau de relevância dentro do aspecto de dimensões notáveis em extensão de uma caverna brasileira (MMA, 2017; BRASIL, 2022). Vale destacar que o resultado dos cálculos espeleométricos dos parâmetros projeção horizontal, desnível, área e volume de uma caverna podem ser obtidos por diferentes tipos de equipamentos de mapeamento topográfico, tais como: levantamento topográfico convencional (utilizando bússola, clinômetro, trena e GPS de navegação), trena digital a laser, escaneamento a laser 3D, fotogrametria etc. (SIMÕES, 2019).

Mesmo com o detalhamento dos cálculos dos parâmetros espeleométricos na legislação ambiental brasileira, a execução dessa equação não se torna trivial quando existem fatores ambientais envolvidos no momento do levantamento topográfico em campo, tais como: dificuldade de acesso e progressão do levantamento topográfico, limitação ao uso de instrumentos de maior precisão, interferência magnética, dentre outros (CALUX *et al.*, 2017).

Isso posto, atualmente, a realização dos cálculos espeleométricos de uma cavidade via levantamento topográfico convencional ainda é muito complexa e envolve um alto grau de incertezas por conta da limitação de alguns equipamentos e pela complexidade de acesso a alguns condutos e salões das cavernas. Por outro lado, a obtenção dos parâmetros espeleométricos de uma caverna, através do escaneamento a laser 3D, se torna mais rápida e com menos incertezas quando comparado ao método convencional (SIMÕES, 2019).

Nos dias atuais, há dispositivos disponíveis com a capacidade de criar representações tridimensionais (3D) das cavernas com uma precisão e qualidade gráfica sem igual em comparação com outras tecnologias. Esse processo de mapeamento gera uma maquete digital extremamente precisa através da análise de uma série de pontos dispostos em três dimensões, frequentemente referidos como “nuvem 3D”. A precisão alcançada chega a níveis da ordem de milímetros e a riqueza de detalhes é suficiente para reproduzir até mesmo as texturas das formações rochosas, pichações, bem como características morfológicas e estratigráficas presentes (ICMBio, 2019).

Além disso, o resultado é apresentado como um modelo 3D, permitindo uma visualização virtual da disposição e formato das passagens subterrâneas. No entanto, é válido mencionar que esses equipamentos ainda têm custos elevados, são delicados e pesados, o que limita sua aplicação indiscriminada em qualquer caverna. Contudo, quando se trata de cavernas onde um registro preciso é essencial, essa tecnologia representa o que há de mais moderno (ICMBio, 2019).

Assim, apesar da evolução ocorrida nos últimos anos com relação ao mapeamento topográfico de cavernas no Brasil e no mundo, ainda há muito o que ser feito em relação a aplicação e entendimento sobre as novas tecnologias. O presente estudo tem como objetivos (i) a determinação do parâmetro espeleométrico de maior importância para a definição de cavernas de máxima relevância na área de estudo (ii) e a comparação dos métodos convencional e por escaneamento a laser 3D no levantamento topográfico de uma população amostral de cavernas situadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com o intuito

de mitigar as incertezas do levantamento topográfico convencional. Para que isso fosse possível esse trabalho utilizou análises estatísticas e comparação entre os dados calculados do parâmetro espeleométrico volume utilizando a técnica convencional e por escaneamento a laser 3D.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

As cavernas do presente estudo estão situadas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás, no sudeste do estado do Pará. A Serra dos Carajás abriga depósitos minerais de classe mundial dos metais Fe, Mn, Au, Al, Cu, Sn, Ni, Cr, Pt, entre outros. As jazidas de ferro são hospedadas em uma sequência metavulcanossedimentar do Grupo Grão Pará ao longo de um conjunto de serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan, da Bocaina e do Rabo-Estrela, que são foco deste estudo (Figura 25). Nesse grupo predominam rochas vulcânicas máficas sobrepostas e sotopostas aos jaspilitos e corpos de minério de ferro de alto teor ($\text{Fe} > 64\%$) (LOBATO et al., 2005).

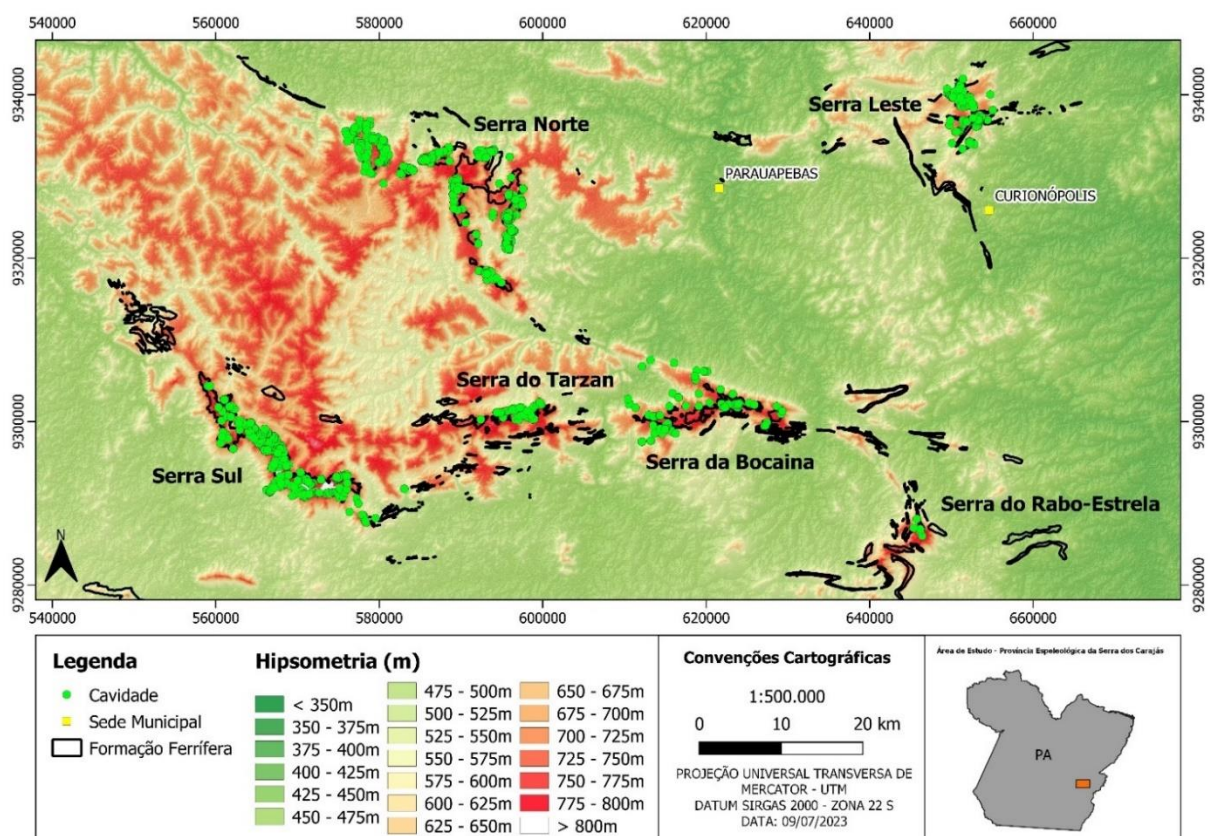


Figura 25 - Localização das cavernas estudadas e das Serras Norte, Sul, Leste, do Tarzan, da Bocaina e do Rabo-Estrela, Província Espeleológica da Serra dos Carajás (PA). Fonte: Banco de dados - Vale S.A. (2021).

2.2. Procedimentos Metodológicos

Para o desenvolvimento do escopo proposto, foi utilizada uma metodologia organizada em 3 etapas principais, conforme os procedimentos descritos a seguir:

- Etapa 1: análise estatística descritiva dos parâmetros espeleométricos projeção horizontal (PH), desnível, área e volume levantados através do mapeamento topográfico convencional de 1758 cavernas na Província Espeleológica da Serra dos Carajás.
- Etapa 2: cálculo dos valores do parâmetro espeleométrico volume a partir dos mapas topográficos (método convencional) e do sólido 3D gerado a partir da nuvem de pontos (método de escaneamento a laser 3D) em uma amostra de 60 cavernas para cada método.
- Etapa 3: comparação dos resultados obtidos do parâmetro espeleométrico volume e análise das inconsistências entre os dois métodos de levantamento topográfico de modo a subsidiar a mitigação das incertezas do levantamento topográfico convencional.

2.2.1. Etapa 1 - Análise Estatística Descritiva

Na primeira etapa de análise estatística foi realizado o processo de obtenção, organização e interpretação dos dados quantitativos de espeleometria (projeção horizontal, desnível, área e volume) obtidos pelo método de levantamento topográfico convencional de uma amostra de cavernas situada na Província Espeleológica da Serra dos Carajás. É importante ressaltar que o banco de dados utilizado foi disponibilizado pela empresa Vale S.A. e foram obtidos para fins de licenciamento ambiental (VALE S.A., 2023).

Vale destacar que a Instrução Normativa (IN) 2/2017 lista os atributos e seus respectivos conceitos a serem considerados para fim da classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. Para o grau de relevância máximo com relação ao atributo “dimensões notáveis em extensão, área e/ou volume” é definido pela legislação vigente que a cavidade apresente extensão (horizontal ou vertical), área ou volume superiores a 8 vezes a mediana (8.Md) relativo ao enfoque local ou regional (MMA, 2017). Já no que se refere aos graus de relevância entre baixo, médio e alto eles também são definidos em relação aos mesmos atributos espeleométricos. Porém, eles são classificados quanto ao resultado de cada atributo em uma determinada caverna em relação a outras cavidades que se distribuem na mesma unidade espeleológica, considerando os percentis 20 e 50 do conjunto de dados. Desse modo, para fins de classificação do grau de relevância, os valores menores ou iguais ao percentil 20 são de baixa relevância, valores entre os percentis 20 e 50 correspondem a média relevância

e valores superiores ou iguais ao percentil 50 são de alta relevância (MMA, 2017).

Da lista de parâmetros espeleométricos para a classificação do grau de relevância de cavernas proposto pela IN 2/2017 foram selecionados 4 (quatro) parâmetros (projeção horizontal, desnível, área e volume) para a análise estatística, por serem variáveis quantificáveis e passíveis de alterações a depender da metodologia de levantamento topográfico empregada. Seguem os parâmetros e suas respectivas definições, conforme a Instrução Normativa supracitada:

- Projeção Horizontal (m): Soma da projeção horizontal dos eixos de desenvolvimento da cavidade e classificação do resultado em relação aos percentis 20 e 50 observados nas cavidades que se distribuem na mesma unidade espeleológica.
- Desnível (m): Comparação da diferença entre a cota do piso mais alta e a mais baixa da cavidade sob análise, em relação aos desníveis calculados de outras cavidades (considerando os percentis 20 e 50 do conjunto de dados) que se distribuem na mesma unidade espeleológica.
- Área (m²): Área calculada em superfície da cavidade em relação às áreas calculadas de outras cavidades (considerando os percentis 20 e 50 do conjunto de dados) que se distribuem na mesma unidade espeleológica.
- Volume (m³): Volume da cavidade sob análise em relação aos volumes calculados de outras cavidades (considerando os percentis 20 e 50 do conjunto de dados) que se distribuem na mesma unidade espeleológica.

Para o presente estudo as análises estatísticas foram realizadas com base nos preceitos da análise descritiva. A análise estatística descritiva é o processo em que é possível resumir e descrever as características de um conjunto de dados. Isso inclui o cálculo de medidas de tendência central (média e mediana) e medidas de dispersão (desvio padrão e variância).

Considerando os atributos espeleométricos da amostra local e regional das cavidades da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com foco na definição das cavernas com grau de relevância máximo, conforme o inciso II do parágrafo 4º do art. 2º do decreto 10.935/2022 (BRASIL, 2022), foi realizada análise estatística completa com enfoque regional e local, conforme ilustra a Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição de categorias locais consideradas para a análise estatística das cavidades da Província Espeleológica da Serra dos Carajás.

Enfoque Regional	Enfoque Local (Unidade Geomorfológica - UG)	Quantidade de Cavernas
Serra dos Carajás	UG Serra Norte	794
Serra dos Carajás	UG Serra Sul	554
Serra dos Carajás	UG Serra da Bocaina	123
Serra dos Carajás	UG Serra Leste	220
Serra dos Carajás	UG Serra do Rabo-Estrela	7
Serra dos Carajás	UG Serra do Tarzan	60
Total	6	1758

2.2.2. Etapa 2 – Cálculo do Parâmetro Espeleométrico Volume

Após a etapa 1 foram obtidos os valores calculados do parâmetro espeleométrico volume de uma amostra escolhida de forma aleatória utilizando o comando =ALEATÓRIOENTRE (1;1.758) do *software Microsoft Excel*, sendo obtido um total de 60 cavernas dentro do grupo de cavernas da Etapa 1 (1758 cavidades), a partir dos mapas topográficos (método convencional) e do sólido gerado a partir da nuvem de pontos (método de escaneamento a laser 3D). Vale destacar que esses dados foram obtidos através da análise de relatórios técnicos disponibilizados pela empresa Vale S.A. (TETRA TECH, 2018).

É importante ressaltar que foi selecionado o parâmetro espeleométrico volume por conta da presença de várias incertezas associadas ao seu cálculo e também pelo fato do valor final desse parâmetro acarretar diretamente em classificações de relevância de forma inadequada, conforme constatado nesse presente trabalho.

Com o intuito de obter o volume de uma cavidade por intermédio do método convencional de levantamento topográfico é necessário inicialmente calcular a área da representação em planta da caverna, que foi mensurada no presente estudo através do programa *AutoCAD 2019*. Vale destacar que locais não acessíveis por seres humanos e pilares devem ser descontados nas medições (ICMBio, 2019), conforme mostrado na Eq. (1).

$$Sph = St - Sp \quad (1)$$

Onde:

Sph é a área da projeção horizontal

St é a área total da planta

Sp são as áreas dos pilares

Além da variável área, é necessário também calcular a altura média da caverna, que neste estudo é obtida através da média de várias alturas equidistantes. Vale destacar que a precisão no cálculo da altura média está diretamente relacionada com o a quantidade e a distância entre as seções verticais (cortes) obtidas no levantamento topográfico em campo (ICMBio, 2019). Logo, para a mensuração do volume final da caverna é necessário multiplicar a área da projeção horizontal com a altura média das seções, conforme mostrado na Eq. (2).

$$V = Sph((\Delta h1 + \Delta h2 + \Delta h3... + \Delta hn)/n) \quad (2)$$

Onde:

V é o volume

Sph é a área da projeção horizontal

Δh é a altura das seções

n é o número de seções

Para realização do levantamento topográfico, via escaneamento tridimensional, das cavidades em campo foi utilizado o equipamento Geoslam ZEB Revo (Figura 26). Por se tratar de um aparelho móvel, este equipamento tem como diferencial o fácil manuseio em ambientes com restrição de movimentos, por exemplo, cavernas com pequenas dimensões em que é necessário rastejar. Além disso, esse equipamento apresenta capacidade de leitura de 43.000 pontos por segundo, precisão de até 6mm, alcance de até 30m, registro automático de varreduras em campo e processamento em tempo real.

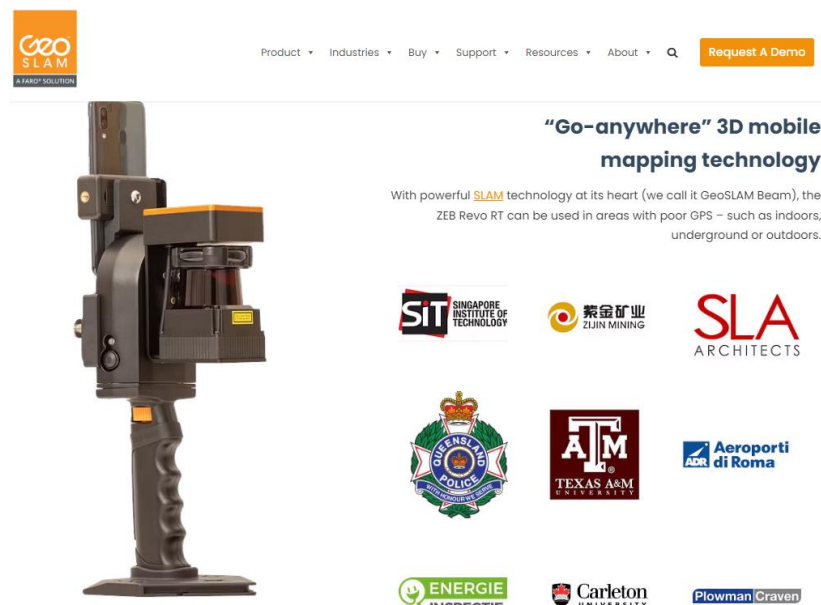


Figura 26 - Equipamento de escaneamento a laser 3D modelo Geoslam ZEB Revo. Fonte: Geoslam, (2023).

Vale destacar também que o equipamento Geoslam ZEB Revo permite a obtenção dos dados espeleométricos após o tratamento das nuvens de pontos, assim como o contorno das cavidades. Assim, para o cálculo do parâmetro volume através do método de escaneamento a laser 3D foram utilizadas como base as nuvens de pontos geradas pelos escaneamentos, disponibilizadas pela empresa Vale S.A. (Figura 27), sendo possível produzir as superfícies em 3D com o auxílio do *software 3D Reshaper*. Através desse *software* juntamente com o *AutoCAD 2019* foram gerados tanto os mapas topográficos quanto os cálculos espeleométricos, que foram capazes de atingir o nível de detalhe BCRA-XD (Classificação de detalhe para mapeamento topográfico de cavernas, conforme a *British Cave Research Association* - BCRA).

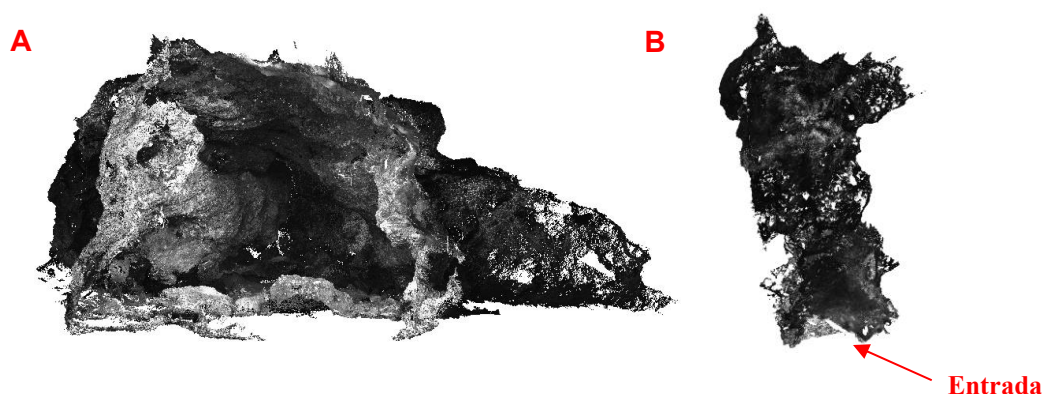


Figura 27 - Nuvem com cerca de 2 milhões de pontos gerada através do levantamento topográfico de uma cavidade utilizando o equipamento laser scanner portátil modelo Geoslam ZEB REVO. Visão frontal da entrada da caverna (A); Visão da seção horizontal - planta baixa (B).

Após a atividade em campo, em gabinete, as nuvens de pontos foram trabalhadas da seguinte forma:

- 1) Tratamento da nuvem de pontos: *3D Reshaper*;
- 2) Elaboração da planta baixa, cortes e perfis: *3D Reshaper*;
- 3) Cálculo de Área, Volume e Desnível: *3D Reshaper*;
- 4) Elaboração do mapa topográfico: *AutoCAD 2019*;
- 5) Cálculo de PH: *AutoCAD 2019*.

O *software 3D Reshaper* possibilita uma análise minuciosa de uma determinada região das cavernas antes de ser manualmente "fechada" usando tetraedros. Durante essa análise, são examinadas as curvaturas do entorno do polígono formado no modelo 3D da caverna (se ele é convexo ou côncavo). Uma vez concluída a verificação, uma superfície é criada através da interpolação, ajustando-se aos pontos do contorno de maneira mais precisa. Esse tipo de

avaliação proporciona resultados altamente precisos quanto à forma da cavidade, especialmente em áreas pequenas onde a coleta de dados não foi possível. Dentro desse programa as etapas executadas para determinar os valores de volume incluíram a limpeza e separação da nuvem de pontos, seguidas pela criação de uma malha tridimensional (ARAÚJO et al., 2015).

Para criar a estrutura tridimensional, foi essencial aplicar múltiplas interpolações, combinando-as através dos critérios disponíveis no *software* (Figura 28). Dessa forma, buscava-se identificar as combinações mais adequadas que produziriam os resultados mais otimizados. Após explorar diversas combinações, a abordagem adotada envolveu a interpolação de novos pontos. Essa técnica é particularmente útil em situações envolvendo conjuntos densos de pontos, onde a presença de ruídos é possível (ARAÚJO et al., 2015).

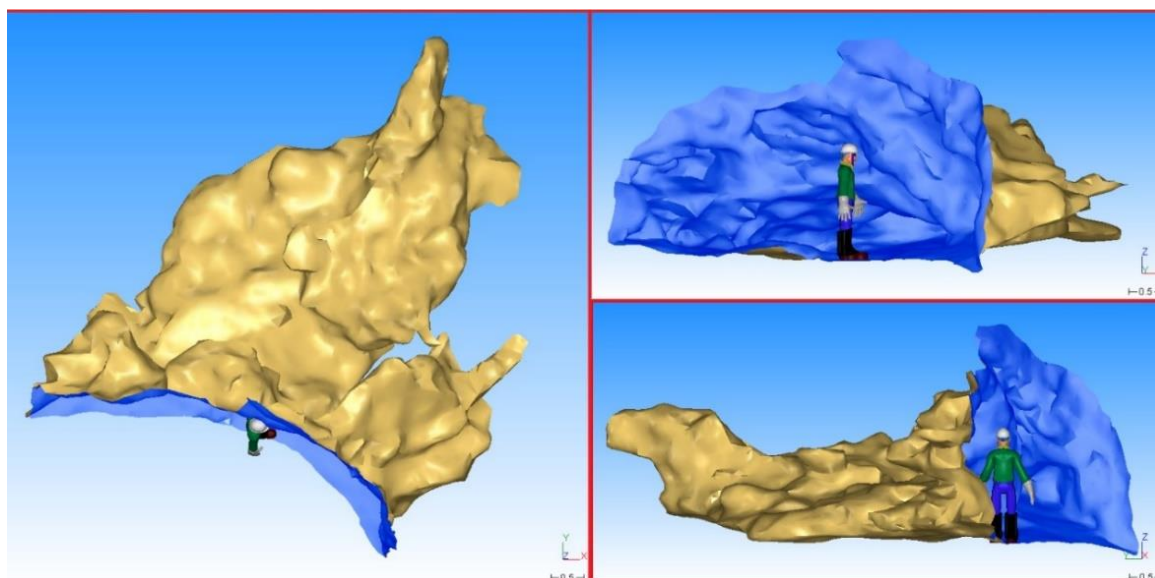


Figura 28 - Modelo 3D de uma caverna produzido no software 3D Reshaper. Fonte: Tetra Tech, (2018).

Após finalizar o processo de criação da estrutura tridimensional, a partir da nuvem de pontos devidamente processada, procedeu-se aos cálculos de volume das cavidades utilizando o *software 3D Reshaper*. Esses cálculos foram fundamentados no conceito de cálculo integral, seguindo as premissas da Eq. (2), empregando o método de prismas triangulares com abordagem trapezoidal.

Partindo da entrada da caverna é construído um tetraedro para cada face (triângulo), em que os quatro pontos do tetraedro consistem nos três pontos dos triângulos somados ao centro de gravidade da estrutura tridimensional. Mesmo que algum dos triângulos se estenda parcialmente além da estrutura (devido à sua configuração global), isso é sempre

contrabalançado por outros tetraedros. Para garantir a eficiência e precisão matemática desse método é essencial que a estrutura esteja completamente fechada, sem qualquer abertura. Abaixo, de forma simplificada, encontra-se a fórmula empregada pelo programa para a realização dos cálculos volumétricos, conforme mostrado na Eq. (3).

$$V = \sum_{i=1}^n F_i * h_{mi} \quad (3)$$

Onde:

i é o triângulo de referência

n é a quantidade de triângulos analisados

F_i é a área do triângulo i

h_{mi} é a altura média do triângulo i

V é o volume de uma caverna

2.2.3. Etapa 3 - Comparação - Método Convencional x Escaneamento a Laser 3D

Como última etapa do trabalho, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos por meio do levantamento topográfico convencional e o escaneamento utilizando o laser scanner 3D para fins de cálculo volumétrico, com o intuito de verificar o quão discrepante os resultados do método convencional são em relação ao escaneamento a laser 3D.

3. ESTUDO DE CASO NA PROVÍNCIA ESPELEOLÓGICA DA SERRA DOS CARAJÁS

3.1. Análise Estatística Descritiva

3.1.1. Enfoque Regional

No enfoque regional, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 2. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque regional da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 1758 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ($N > 8.Md = 519$ cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo ($8.Md - 8$ vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque regional como igual a $488m^3$ para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada.

Tabela 2 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Regional.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Média	33	3,9	112	203
Erro padrão	1	0,1	4	9,6
Mediana	17,5	2,4	46	61
Moda	10	1	20	17
Desvio padrão	42	5,7	187	404
Variância da amostra	1794	33	35154	163799
Curtose	16	244	22	30
Assimetria	3,5	11	4	4,6
Intervalo	362	149	2217	4474
Mínimo	5	0,03	1,2	3
Máximo	367	150	2218	4477
Soma	56968	6966	198393	357027
Contagem (N)	1758	1758	1758	1758
Nível de confiança (95%)	1,9	0,26	8,7	19
8.Md (máxima relevância)	140	-	370	488
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	1696	-	1402	1237
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	60	-	354	519

3.1.2. Enfoque Local – Serra Norte

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra Norte, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 3. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra Norte) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 794 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ($N > 8.Md = 93$ cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra Norte) como igual a 632m³ para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada.

Tabela 3 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra Norte.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Média	38	4,9	142	271
Erro padrão	1,7	0,1	7,7	17
Mediana	20	3	55	79
Moda	10	2,1	20	15
Desvio padrão	49	5,5	219	491
Variância da amostra	2375	30	48162	241318
Curtose	11	16	11	19
Assimetria	3	3,3	3	3,7
Intervalo	349	53,9	1566	4473
Mínimo	5	0,1	1,2	4
Máximo	354	54	1568	4477
Soma	30608	3912	113200	215605
Contagem (N)	794	794	794	794
Nível de confiança (95%)	3,3	0,3	15	34
8.Md (máxima relevância)	161	-	443	632
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	762	-	720	701
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	32	-	74	93

3.1.3. Enfoque Local – Serra Sul

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra Sul, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 4. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra Sul) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 554 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ($N > 8.Md = 62$ cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra Sul) como igual a 352m³ para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada.

Tabela 4 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra Sul.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Média	28	3	94	154
Erro padrão	1,6	0,1	7,4	14
Mediana	15	2,1	36	44
Moda	11	1	31	7
Desvio padrão	39	3,8	174	350
Variância da amostra	1546	14	30560	123180
Curtose	22	27	47	50
Assimetria	4,1	4,5	5,6	5,9
Intervalo	362	34	2213	4238
Mínimo	5	0,03	4,6	3
Máximo	367	34	2218	4241
Soma	15940	1703	52173	85699
Contagem (N)	554	554	554	554
Nível de confiança (95%)	3,2	0,3	14	29
8.Md (máxima relevância)	122	-	292	352
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	535	-	519	492
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	19	-	35	62

3.1.4. Enfoque Local – Serra da Bocaina

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra da Bocaina, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 5. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra da Bocaina) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 123 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ($N > 8.Md = 11$ cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra da Bocaina) como igual a 528m³ para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada.

Tabela 5 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra da Bocaina.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Média	29	2,6	104	157
Erro padrão	3,4	0,2	13	20
Mediana	17	1,8	48	66
Moda	9,4	0,8	43	17
Desvio padrão	37	2,3	146	223
Variância da amostra	1422	5,5	21468	49829
Curtose	11	4	8,1	6,6
Assimetria	3,1	1,9	2,7	2,5
Intervalo	214	11	807	1206
Mínimo	5,3	0,4	10,3	6
Máximo	220	11	817	1212
Soma	3627	326	12793	19314
Contagem (N)	123	123	123	123
Nível de confiança (95%)	6,7	0,4	26	39
8.Md (máxima relevância)	137	-	384	528
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	119	-	114	112
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	4	-	9	11

3.1.5. Enfoque Local – Serra Leste

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra Leste, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 6. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra Leste) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 220 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ($N > 8.Md = 19$ cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra Leste) como igual a 388m³ para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada.

Tabela 6 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra Leste.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Média	24	3,6	70	126
Erro padrão	1,7	0,6	6	14
Mediana	15	2	34	48
Moda	6,6	1,8	17	9
Desvio padrão	26	10,2	90	215
Variância da amostra	688	105	8100	46235
Curtose	8,9	190	15	19
Assimetria	2,7	13	3,2	3,8
Intervalo	160	149	723	1662
Mínimo	5	0,3	6,4	4
Máximo	165	150	729	1666
Soma	5475	802	15505	27824
Contagem (N)	220	220	220	220
Nível de confiança (95%)	3,4	1,3	11	28
8.Md (máxima relevância)	123	-	276	388
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	217	-	213	201
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	3	-	7	19

3.1.6. Enfoque Local – Serra do Rabo-Estrela

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra do Rabo-Estrela, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 7. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra do Rabo-Estrela) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 7 cavernas (N), não foram encontradas cavernas classificadas como de máxima relevância, no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra do Rabo-Estrela) como igual a 156m³ para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada.

Tabela 7 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra do Rabo-Estrela.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Média	11	1,6	20	39
Erro padrão	1,7	0,6	4,1	19
Mediana	10,1	0,8	16	19
Moda	#N/D	0,8	#N/D	#N/D
Desvio padrão	4,7	1,7	11	52
Variância da amostra	22	2,9	122	2740
Curtose	1,5	-0,6	-1,02	4,7
Assimetria	1,2	1,2	0,7	2,1
Intervalo	14	4,2	28	147
Mínimo	6	0,2	9,6	4,1
Máximo	20	4,4	38	152
Soma	77	11	144	277
Contagem (N)	7	7	7	7
Nível de confiança (95%)	4,3	1,5	10,2	48
8.Md (máxima relevância)	80	-	130	156
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	7	-	7	7
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	0	-	0	0

3.1.7. Enfoque Local – Serra do Tarzan

No enfoque local para a Unidade Geomorfológica da Serra do Tarzan, para cada atributo (Projeção Horizontal, Desnível, Área e Volume), foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados obtidos através do levantamento topográfico convencional, que segue na Tabela 8. Dessa forma, é possível perceber que para o enfoque local (Serra do Tarzan) da Província Espeleológica da Serra dos Carajás, com base em uma população amostral de 60 cavernas (N), o parâmetro espeleométrico volume é o que possui a maior concentração de cavidades classificadas como de máxima relevância ($N > 8.Md = 6$ cavernas), no que se refere ao item dimensões notáveis, previsto na legislação. Além disso, o limite mínimo (8.Md – 8 vezes a mediana) para a classificação de uma cavidade natural subterrânea como de máxima relevância foi estabelecido no enfoque local (Serra do Tarzan) como igual a 404m³ para o parâmetro volume, dentro da população amostral analisada.

Tabela 8 - Resultados da Análise Estatística entre atributos do levantamento topográfico convencional - Enfoque Local – Serra do Tarzan.

Variável Estatística	PH (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Média	21	3,6	77	138
Erro padrão	2,6	0,4	14	37
Mediana	12	2,3	41	50
Moda	11	1,1	#N/D	25
Desvio padrão	20	3,2	115	291
Variância da amostra	426	10,6	13400	84737
Curtose	4,6	8,7	12	25
Assimetria	2,1	2,4	3,2	4,5
Intervalo	98	19	659	1930
Mínimo	5,5	0,5	2,8	3
Máximo	103	19	661	1933
Soma	1266	216	4621	8325
Contagem (N)	60	60	60	60
Nível de confiança (95%)	5,3	0,8	29	75
8.Md (máxima relevância)	102	-	334	404
Quantidade de Cavidades (N ≤ 8.Md)	59	-	57	54
Quantidade de Cavidades (N > 8.Md)	1	-	3	6

3.2. Cálculo do Volume pelo Método Convencional x Escaneamento a Laser 3D

Com base nos resultados da estatística descritiva podemos constatar que o parâmetro espeleométrico volume é o mais importante para definição de cavernas com grau de relevância máximo ($N > 8.Md$) na amostra de cavidades em análise, levando em consideração apenas os aspectos de dimensões notáveis. Isso é verificado diretamente nos resultados estatísticos que mostraram uma maior quantidade de cavernas classificadas como de máxima relevância quando levamos em consideração apenas a variável volume, em detrimento das demais.

Dessa forma, foram realizadas comparações entre os resultados obtidos através do levantamento topográfico convencional e o escaneamento utilizando o laser scanner 3D de uma amostra de 60 cavernas selecionadas aleatoriamente da Província Espeleológica da Serra dos Carajás para fins de cálculo volumétrico, com o intuito de verificar o quão discrepante os resultados do método convencional são em relação ao escaneamento a laser 3D, que é mais preciso como já relatado na bibliografia.

Logo, a Tabela 9 apresenta os resultados obtidos do parâmetro espeleométrico volume por meio do escaneamento a laser 3D (Vols) e do método convencional (Volc), bem como o percentual de erro do método convencional em relação ao escaneamento ($\text{Erro} = \text{Volc}/\text{Vols}$), mostrando assim se os valores obtidos através do escaneamento são maiores (valores positivos) ou menores (valores negativos) do que os previamente calculados por meio do levantamento convencional.

Tabela 9 - Resultados do cálculo de volume das cavernas por escaneamento a laser 3D (Vols) e método convencional (Volc).

Cavidade	Vols (m³)	Volc (m³)	Erro - Volc/Vols (%)	Cavidade	Vols (m³)	Volc (m³)	Erro - Volc/Vols (%)
Caverna 01	82,3	72	14,3	Caverna 31	2072,1	2995	-30,8
Caverna 02	8,1	7	15,7	Caverna 32	1176,4	1706	-31
Caverna 03	206,9	179	15,5	Caverna 33	59,4	88	-32,5
Caverna 04	238,2	87,5	172,2	Caverna 34	949,3	1496	-36,5
Caverna 05	2501,6	2050	22	Caverna 35	67,3	107,5	-37,3
Caverna 06	169,6	139	22	Caverna 36	450,8	730	-38,2
Caverna 07	410,4	330	24,3	Caverna 37	5	8,8	-43,1
Caverna 08	40,3	31,8	26,7	Caverna 38	4	7	-42,8
Caverna 09	72,3	55	31,4	Caverna 39	324,9	580	-43,9
Caverna 10	8,1	7,5	8	Caverna 40	50,9	93	-45,2
Caverna 11	5,5	5	10	Caverna 41	1297,5	1373,1	-5,5
Caverna 12	38,7	20	93,5	Caverna 42	236,4	510	-53,6
Caverna 13	48,6	70	-30,5	Caverna 43	7,7	16,5	-53,3
Caverna 14	402,1	555	-27,5	Caverna 44	847,6	2044	-58,5
Caverna 15	2183,9	2184,5	-0,02	Caverna 45	51,6	55	-6,1
Caverna 16	319,7	325	-1,6	Caverna 46	162,5	418	-61,1
Caverna 17	542,5	552,9	-1,8	Caverna 47	6,2	19	-67,3
Caverna 18	68,1	76	-10,3	Caverna 48	4,6	15	-69,3
Caverna 19	986	1104,9	-10,7	Caverna 49	141	152	-7,2
Caverna 20	1557,5	1779	-12,4	Caverna 50	31,7	35	-9,4
Caverna 21	876,4	1004	-12,7	Caverna 51	67,3	90	-25,2
Caverna 22	19,1	22	-13,1	Caverna 52	50,7	70,5	-28
Caverna 23	861	1007	-14,4	Caverna 53	975,7	1375	-29
Caverna 24	212,8	250,3	-14,9	Caverna 54	31	44,1	-29,7
Caverna 25	69,6	82	-15,1	Caverna 55	80,8	108	-25,1
Caverna 26	12,6	15	-16	Caverna 56	483,5	624,5	-22,5
Caverna 27	10,9	13	-16,1	Caverna 57	54	70	-22,8
Caverna 28	28,6	35,2	-18,7	Caverna 58	433,4	565	-23,2
Caverna 29	1269,6	1617	-21,4	Caverna 59	11,8	15,5	-23,8
Caverna 30	28	36	-22,2	Caverna 60	16,9	22,6	-25,2

Com base nos dados mostrados na Tabela 9 é possível perceber que na maior parte das cavernas pesquisadas (80%) o valor obtido do volume levantado via mapeamento topográfico convencional é maior do que o obtido via escaneamento a laser 3D. Com base no banco de dados analisado, 48 cavidades tiveram a redução no valor total do volume quando obtido via laser scanner em comparação ao levantamento tradicional. Por outro lado, 12 cavernas tiveram um aumento no valor do seu volume (Figura 29).

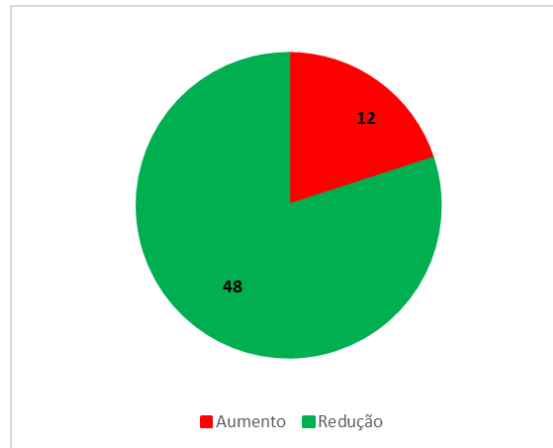


Figura 29 - Gráfico mostrando a quantidade de cavernas que tiveram aumento ou redução no valor do volume calculado via escaneamento a laser 3D em comparação com o método convencional.

Com relação à comparação entre os resultados obtidos no cálculo de volume a partir do Vols e do Volc, é verificado que cerca de 89% do modelo explica a variabilidade dos dados do volume calculado via escaneamento a laser, conforme obtido pelo resultado do coeficiente de determinação (R^2) (Figura 30). Dessa forma, pode-se constatar que houve um bom ajuste do modelo linear em relação ao conjunto de observações. Além disso, foi definida a equação da reta da regressão linear Eq. (4) para fins de intercâmbio dos dados de Vols e Volc na população amostral analisada, tendo o seguinte resultado:

$$y = 1,1385 * x + 41,157 \quad (4)$$

Onde:

y é o valor do volume calculado utilizando o método convencional

x é o valor do volume calculado utilizando o escaneamento a laser 3D

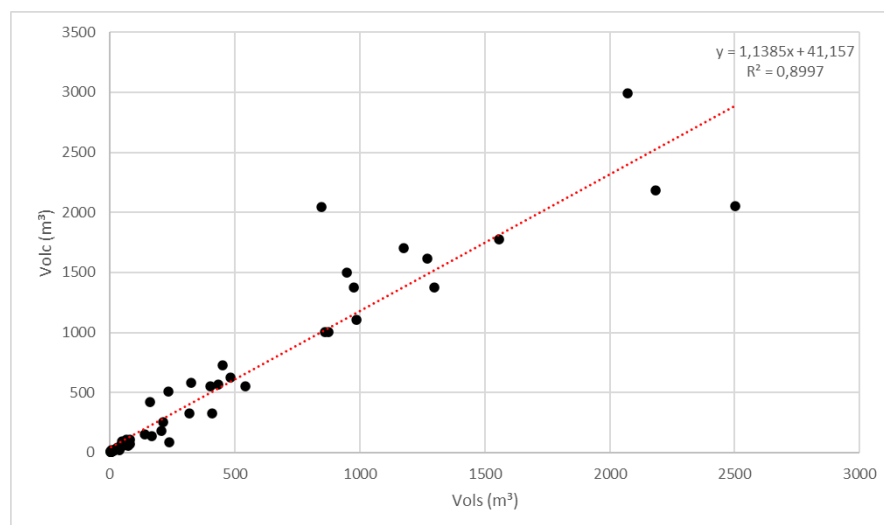


Figura 30 - Gráfico de correlação entre a variável volume calculada via método convencional (Volc) e com base no escaneamento a laser 3D (Vols). A linha vermelha representa a reta de regressão linear obtida com base no banco de dados analisado.

As variações observadas entre as medidas obtidas por meio do método convencional e do escaneamento a laser 3D podem ocorrer por vários fatores, dentre eles os principais são:

- 1) A distorção dessas medidas se torna aparente quando comparamos cavernas com piso predominante plano com aquelas que apresentam inclinação (desnível). Uma vez que as áreas são sempre calculadas a partir de uma projeção horizontal da planta da cavidade, os valores se depreciam ao serem comparados com cavernas que se desenvolvem em planos inclinados. Consequentemente, essa mesma distorção afeta a precisão na determinação do volume. Portanto, a acurácia no cálculo do volume pelo método convencional é influenciada não apenas pela quantidade/escolha de seções transversais consideradas, mas também pelo grau de inclinação das galerias. Em tais situações, o único modelo capaz de corrigir essas disparidades é o escaneamento a laser 3D. Dessa forma, as imagens tridimensionais das cavernas geradas por esse dispositivo, combinadas com programas especializados para o processamento dos dados obtidos em campo, possibilitam cálculos precisos das áreas e dos volumes.
- 2) A presença de blocos de rochas, especialmente matacões, situados dentro da cavidade exerce uma influência significativa nos valores do volume total de uma caverna obtidos nos dois métodos de levantamento topográfico descritos ao longo deste trabalho, tornando necessário subtrair o volume ocupado por esses blocos do volume total calculado da cavidade. Caso essa subtração não seja feita para toda a extensão da cavidade de forma regular ou os volumes dos blocos sejam calculados de forma imprecisa, isso pode acarretar erros significativos no cálculo do volume.
- 3) Como existe um erro embutido no cálculo da área da projeção horizontal e da altura das seções pelo levantamento topográfico convencional, logo para obtermos o valor do volume esses erros são aumentados e geram um valor final de volume ainda mais longe da realidade visualizada em campo. O que pode acarretar grandes distorções entre os valores obtidos pelo método convencional em comparação aos outros métodos mais modernos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo de caso realizado nas cavernas da Província Espeleológica da Serra dos Carajás é perceptível que o escaneamento a laser de forma geral obteve cálculos de volume com valores menores para cavernas ferríferas do que o método convencional de levantamento topográfico. Além disso, para a validação e aprimoramento da técnica de escaneamento a laser é necessário que essa mesma metodologia de trabalho seja aplicada em outras províncias espeleológicas, preferencialmente em cavidades compostas por outros litotipos não ferruginosos e com dimensões diversas.

Vale destacar que o escaneamento a laser 3D, para obtenção do volume de cavernas ferríferas, trouxe maior rapidez na coleta de dados em campo, permitindo uma redução da exposição ao risco dos técnicos em campo, além de ser possível gerar um mapeamento com maior acurácia espeleométrica, sensivelmente superior ao método topográfico convencional. Porém, o tempo despendido em laboratório para processamento da nuvem de pontos e produção do modelo em 3D é muito maior quando comparado ao método convencional.

A partir dessas análises, fica evidente que o uso do volume calculado com base nas plantas e seções (método convencional) das cavernas não é o mais apropriado para mapeamento topográfico de cavernas ferríferas, devido à incerteza inerente a esse cálculo. A aplicação do escaneamento a laser 3D tem sido difundida por várias áreas das geociências e a evolução dos dispositivos caminha no sentido de se tornarem cada vez mais compactos e acessíveis em termos de preço. Isso indica que essa tecnologia está posicionada para ser a abordagem mais vantajosa para o mapeamento e o cálculo desse atributo espeleométrico no processo de licenciamento ambiental.

Alternativamente, estão disponíveis no mercado tecnologias de baixo custo, especialmente desenvolvidas para *tablets* e *smartphones*, que devem ser submetidas a testes no contexto de levantamentos espeleométricos voltados para o licenciamento ambiental.

Para futuros estudos sugere-se que sejam utilizadas técnicas de inteligência artificial (IA) como o aprendizado de máquina (*machine learning*), que possibilite o ajuste e o intercâmbio matemático entre os dois métodos (convencional e escaneamento a laser 3D), por meio da aplicação da equação da reta da regressão linear Eq. (4). Dessa forma, deverá ser possível criar um simulador de cálculo volumétrico, em escala local e regional, para prever o resultado do cálculo de volume por escaneamento, baseado em valores de volume já calculados pelo

método convencional.

AGRADECIMENTOS

À empresa Vale S.A., por disponibilizar o banco de dados com as informações das cavernas estudadas e por investir em pesquisa e inovação no âmbito espeleológico. Ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) por proporcionar uma estrutura de excelência de ensino e pesquisa que contribuiu fortemente para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, R.N.; MUNIZ, F.; SILVA, B.R.; BRANDI, I. Controle morfológico de cavidades com a utilização de Laser Scanner. In: 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia, 2015, Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p. 321-327. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_321-327.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.

BERBERT-BORN, M. Instrução Normativa MMA 2/09 - Método de classificação do grau relevância de cavernas aplicado ao licenciamento ambiental: uma prática possível?. **EspeleoTema**, v.21, n.1, p.67-103, 2010.

BRAGA, A.A.J; FIORI, A.P.; GONÇALVES, D.F.; COSTA, F.R. Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas, Carajás-PA. **Geonomos**, v. 25 n. 1, p. 24-39, 2017.

BRASIL. **Decreto Federal nº 6.640 de 7 de novembro de 2008**. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF: Presidente da República, 2008.

BRASIL. **Decreto Federal nº 10.935 de 12 de janeiro de 2022**. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF: Presidente da República, 2022.

CALUX, A.; CRUZ, J.; ARAÚJO, R.; LOTT, F.; BRANDI, I. O cálculo do volume de cavernas no contexto do licenciamento ambiental: estudo comparativo. In: III Simpósio Mineiro do Carste, 2017, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2017. p. 47. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1ZJmYQN7N_A6Jw_mxUez60G5n1YxVUdsp/view>.

Acesso em: 02 jul. 2023.

FERNANDES, A.B.; BORBA, R.P.; BRANDI, I.V.; ARAÚJO, R.N.; SCHERER, B.S.; CORRÊA, T.R.; BOULHOSA, G.S. Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.24, n.3, p. 1-15, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i3.2315

FERREIRA, G. L. B. A classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas como mecanismo de compatibilização. **Prisma Jurídico**, v. 16, n. 1, p. 123-149, 2017.

GEOSLAM. **ZEB REVO RT – Scan, process and track your process as you go**. Nottingham: Geoslam, 2023.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-esquisa/cecav/publicacoes/espeleologia_e_licenciamento_ambiental.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.

LOBATO, L.ROSIÈRE, C.; FIGUEIREDO E SILVA, R.; ZUCCHETTI, M.; BAARS, F.; SEOANE, J. C.; RIOS, F.; PIMENTEL, M.; MENDES, G. E.; MONTEIRO, A. M. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás, controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W. **Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia**. ed. 1. Brasília: ADIMB/DNPM, 2005. p. 21-92.

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Instrução Normativa nº 2 de 30 de agosto de 2017**. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, conforme previsto no art. 5º do Decreto no 99.556, de 1º de outubro de 1990. Brasília, 2017.

RUBBIOLI, E.; AULER, A. S.; MENIN, D.; BRANDI, R. **Cavernas: Atlas do Brasil Subterrâneo**. 1ª Ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. 340p.

SIMÕES, P.R. Levantamento fotogramétrico e modelagem 3D aplicados à cartografia espeleológica e à espeleometria da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual de Ibitipoca – MG. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p.229-237. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_229-237.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2023.

TETRA TECH. **Relatório Técnico – Estudos Espeleológicos para Licenciamento Ambiental – Validação Espeleométrica com Scanner 3D**. Belo Horizonte: Tetra Tech, 2018.

VALE S.A. **Resumo do Relatório Técnico de recursos e reservas minerais das minas do Complexo Serra Norte**. Parauapebas: Vale S.A., 2021.

VALE S.A. **Banco de dados Espeleométrico de Cavernas da Província Espeleológica da Serra dos Carajás**. Parauapebas: Vale S.A., 2023.

VIANA, P.L.; MOTA, N.F.O.; GIL, A.S.B.; SALINO, A.; ZAPPI, D.C.; HARLEY, R.M.; ILKIU-BORGES, A.L.; SECCO, R.S.; ALMEIDA, T.E.; WATANABE, M.T.C.; SANTOS, J.U.M.; TROVÓ, M.; MAURITY, C.; GIULIETTI, A.M. Flora of the cangas of the Serra dos Carajás, Pará, Brazil: history study area and methodology. **Rodriguésia** v. 67, n. 5, p. 1107-1124, 2016. DOI: 10.1590/2175-7860201667501

DISCUSSÃO GERAL

O Artigo 1 (Anexo 01) aborda exclusivamente sobre uma revisão bibliográfica a respeito do mapeamento topográfico de cavernas no Brasil e no mundo. Dessa forma, foi possível constatar que o método tradicional de levantamento topográfico de cavernas é utilizado até hoje por diversos grupos de espeleologia no Brasil e no mundo e ainda geram milhares de produtos cartográficos que são muito úteis para a sociedade. No entanto, o método convencional está sendo rapidamente substituído pelos levantamentos topográficos mais modernos em empresas de consultoria ambiental e no setor mineral.

Porém, apesar dos inúmeros avanços tecnológicos aplicados ao levantamento topográfico de cavernas, ainda há muito o que ser feito. Dentre os pontos de melhoria que ainda estão latentes incluem o grande volume de dados das nuvens de pontos 3D, a complexidade dos softwares para processamento das nuvens 3D e a dificuldade de acesso a determinados condutos das cavidades. Vale destacar também que o subsolo possui uma série de feições complexas que nem sempre podem ser reproduzidas de forma fidedigna nos modelos matemáticos que comandam os sistemas de medição. Dessa forma, muitas vezes os modelos não poderão ser replicados de forma sistemática para uma série de cavernas, devido a especificidade das feições de cada uma.

Com base nos resultados do Artigo 2 (Anexo 02), pode-se concluir que a maior parte das cavidades analisadas da Serra Sul possui pequenas dimensões, uma vez que cerca de 87% das cavernas pesquisadas apresentam área menor que 100 m² e 91% possuem volume menor que 200 m³. Dessa forma, esse fato corrobora com os resultados obtidos sobre projeção horizontal (PH), pois cerca de 76% das cavidades apresentam PH de 5 a 20 m.

Um outro ponto relevante é que as cavernas que ocorrem em litotipos com a presença de estruturas geológicas, normalmente têm a capacidade de se desenvolver com PH superior quando comparadas com cavidades com ausência ou pequena concentração de estruturas. Além disso, essas descontinuidades (bandamento, dobras, juntas e falhas) presentes principalmente na Formação Ferrífera Bandada (FFB) e contato FFB/canga possuem orientação preferencial nas direções NE-SW e NW-SE, sendo a mesma direção preferencial da maior parte dos condutos identificados nas cavernas estudadas e a mesma orientação das estruturas presentes nos litotipos no âmbito regional da Serra Sul.

Dessa forma, foi constatado que há uma grande influência supergênica para a formação das cavernas analisadas. Além disso, os principais fatores controladores para a gênese dessas cavidades na amostra estudada da Serra Sul na Província Espeleológica da Serra dos Carajás são estruturais, litológicos, topográficos e hidrológicos. Um outro ponto importante deste

estudo é que o padrão planigeométrico Simples Retilíneo Retangular possui alta correlação com cavernas em que o controle estrutural é predominante.

Por meio do Artigo 3 (Anexo 03) é possível perceber, com base nos resultados da estatística descritiva, que o parâmetro espeleométrico volume é o mais importante para definição de cavernas com grau de relevância máximo na amostra de cavidades em análise, levando em consideração apenas os aspectos de dimensões notáveis. Isso é verificado diretamente nos resultados estatísticos que mostraram uma maior quantidade de cavernas classificadas como de máxima relevância quando levamos em consideração apenas a variável volume, em detrimento das demais.

Pode-se constatar que o mapeamento topográfico via escaneamento a laser 3D é mais preciso e em 80% dos resultados levou a redução do valor da variável volume, quando comparado com o levantamento topográfico convencional. Além disso, é verificado que cerca de 89% do modelo linear elaborado explica a variabilidade dos dados do volume calculado via escaneamento a laser, conforme obtido pelo resultado do coeficiente de determinação (R^2). Dessa forma, pode-se constatar que houve um bom ajuste do modelo linear em relação ao conjunto de observações realizadas.

Vale destacar que as variações observadas entre as medidas da variável volume obtidas por meio do método convencional e do escaneamento a laser 3D podem ocorrer por vários fatores, dentre eles os principais são:

- 1) A distorção dessas medidas se torna aparente quando comparamos cavernas com piso predominante plano com aquelas que apresentam inclinação (desnível). Uma vez que as áreas são sempre calculadas a partir de uma projeção horizontal da planta da cavidade, os valores se depreciam ao serem comparados com cavernas que se desenvolvem em planos inclinados. Consequentemente, essa mesma distorção afeta a precisão da determinação do volume.
- 2) A presença de blocos de rochas, especialmente matacões, situados dentro da cavidade exerce uma influência significativa nos valores do volume total de uma caverna obtidos nos dois métodos de levantamento topográfico descritos ao longo deste trabalho, tornando necessário subtrair o volume ocupado por esses blocos do volume total calculado para a cavidade.
- 3) Como existe um erro embutido no cálculo da área da projeção horizontal e da altura das seções pelo levantamento topográfico convencional (quantidade limitada de seções transversais), logo para ser obtido o valor do volume esses erros são

acumulados e geram um valor final de volume ainda mais longe da realidade visualizada em campo.

CONCLUSÃO GERAL

Com base nos dados produzidos por meio desta Tese e dos trabalhos disponíveis na bibliografia foi constatado que:

- O mapeamento topográfico de cavidades, juntamente com os registros fotográficos, são os dados mais básicos sobre as cavernas. Todas as investigações geológicas, biológicas, arqueológicas e históricas precisam de mapas base para subsidiar as observações e interpretações realizadas em campo.

- A classificação planigeométrica da maior parte das cavidades analisadas não se mostrou muito eficaz para as cavernas que apresentaram padrão simples disforme, ou seja, não se assemelham a nenhuma forma geométrica ou planimétrica definida na literatura. Portanto, sugere-se a criação de novos métodos para classificar de forma qualitativa e quantitativa as morfologias da maior parte dessas cavernas ferríferas.

- O escaneamento a laser 3D, para obtenção do volume de cavernas ferríferas, trouxe maior rapidez na coleta de dados em campo, permitindo uma redução da exposição ao risco dos técnicos em campo, além de ser possível gerar um mapeamento com maior acurácia espeleométrica, sensivelmente superior ao método topográfico convencional. Porém, o tempo despendido em laboratório para processamento da nuvem de pontos e produção do modelo em 3D é muito maior quando comparado ao método convencional.

- A partir dessas análises, fica evidente que o uso do volume calculado com base nas plantas e seções (método convencional) das cavernas não é o mais apropriado para mapeamento topográfico de cavernas ferríferas, devido à incerteza inerente a esse cálculo. A aplicação do escaneamento a laser 3D tem sido difundida por várias áreas das geociências e a evolução dos dispositivos caminha no sentido de se tornarem cada vez mais compactos e acessíveis em termos de preço. Isso indica que essa tecnologia está posicionada para ser a abordagem mais vantajosa para o mapeamento e o cálculo dos atributos espeleométricos nos processos de licenciamento ambiental.

REFERÊNCIA GERAL

ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N.; JOÃO, X.S.J.; COSTA, J.B.S. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. *In: Congresso Latino- Americano de Geologia*, 7, 1988, Belém. **Anais[...]** Belém: SBG, 1988. p. 324-328.

ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil**. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília: DNPM/CPRM, 1991.

ARAÚJO, R.N.; MUNIZ, F.; SILVA, B.R.; BRANDI, I. Controle morfológico de cavidades com a utilização de Laser Scanner. *In: 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia*, 2015, Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015a. p. 321-327. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_321-327.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.

ARAÚJO, R.N.; MUNIZ, F.; SILVA, B.R.; BRANDI, I. Controle morfológico de cavidades com a utilização de laser scanner. *In: Congresso Brasileiro de Espeleologia*, 33., 2015b, Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE. 2015. p.321-327. ISSN 2178-2113.

ARAÚJO, R. N. **Levantamento de Parâmetros Geomecânicos de uma Caverna Natural Subterrânea Utilizando Tecnologias de Laser Scanner 3D e Realidade Virtual**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós- Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2016. 130p.

ARNBERGER, E. **Handbuch der thematischen Kartografie**. 1ª Ed. Wien: Deutike, 1966. 554p.

ATZINGEN, N.V.; CRESCÊNCIO, G.; CUNHA JR., W.R. Estudos espeleológicos na Serra dos Carajás, município de Parauapebas-PA. **Boletim Informativo da Fundação Casa da Cultura de Marabá, Marabá**, p. 51-73, 2009.

AULER, A. Espeleologia no Brasil: Uma abordagem histórica. **Espeleo-Tema**, v.18, p.23-30, 1997.

AULER, A. S.; RUBBIOLI, E.L.; BRANDI, R. **As Grandes Cavernas do Brasil**. 1ª Ed. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 2001. 227p.

AULER, A. S.; ZOGBI, L. A. **Espeleologia: Noções Básicas**. 1ª Ed. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005. 103p.

AULER, A.S.; BARTON, H.A.; ZAMBELLI, B.; SENKO, J.; PARKER, C.W.; SASOWSKY, I.D.; SOUZA, T.A.R.; PUJONI, D.; PEÑARANDA, J.; DAVIS, R. Silica and Iron Mobilization, Cave Development and Landscape Evolution in Iron Formations in Brazil. **Geomorphology**, v. 398, n. 1, p. 1-15, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X21004761>. Acesso em: 26 fev. 2023.

BEISIEGEL, V.R.; BERNARDELLI, A.L.; DRUMMOND, N.F.; RUFF, A.W.; TREMAINE, J.W. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.3 n.4, p. 215-242, 1973.

BERBERT-BORN, M. Instrução Normativa MMA 2/09 - Método de classificação do grau relevância de cavernas aplicado ao licenciamento ambiental: uma prática possível?. **EspeleoTema**, v.21, n.1, p.67-103, 2010.

BRAGA, A.A.J; FIORI, A.P.; GONÇALVES, D.F.; COSTA, F.R. Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas, Carajás-PA. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 25 n. 1, p. 24-39, 2017.

BRANDT. **Projeto Bloco 8 – Estudo de Relevância de Cavidades – Barragem do Rio Vacaria**. Nova Lima: Brandt, 2020.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidente da República, 1988.

BRASIL. **Decreto Federal nº 6.640 de 7 de novembro de 2008**. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF: Presidente da República, 2008.

BRASIL. **Decreto Federal nº 10.935 de 12 de janeiro de 2022**. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília, DF: Presidente da República, 2022.

BUCKLEY, S.J.; HOWELL, J.A.; ENGE, H.D.; KURZ, T.H. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. **Journal of the Geological Society**, v.165, p. 625- 638, 2008. DOI: 10.1144/0016-76492007-10

CALUX, A.S. **Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em rochas ferríferas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 2013. 220p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CALUX, A.; CRUZ, J.; ARAÚJO, R.; LOTT, F.; BRANDI, I. O cálculo do volume de cavernas no contexto do licenciamento ambiental: estudo comparativo. In: III Simpósio Mineiro do Carste, 2017, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, 2017. p. 47. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1ZJmYQN7N_A6Jw_mxUez60G5n1YxVUdsp/view>. Acesso em: 02 jul. 2023.

CAMPOS, J.F.; CASTILHO, A.F. Uma visão geográfica da região da Flona de Carajás. In: Martins, F.D.; Castilho, A.F.; Campos, J.; Hatano, F.M.; Rolim, S.G. (Org.). **Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres**. São Paulo: Nitro Imagens, 2012. p.16-27.

CARSTE. **Espeleologia do S11D Serra Sul, Região de Carajás – PA**. Belo Horizonte: Carste, 2010.

CECAV. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>>. Acesso em: 26 fev. 2023.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 005, de 6 de agosto de 1987, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA**. Aprova o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1987.

CORVI, M. **DistoX and TopoDroid Calibration, precision, accuracy - Version 2020.10.10**. 2020. Disponível em: <<https://ia802904.us.archive.org/27/items/distoxandtopodroid/DistoXAndTopoDroid.pdf> >. Acesso em: 03 jun. 2022.

CVRD. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 26, 1972, Belém. **Anais[...]** Belém: SBG, 1972. p. 78-80.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 35, 1988, Belém. **Anais[...]** Belém: SBG, 1988. p. 11- 54.

FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Review of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1-33, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005RG000183> Acesso em: 21 mar. 2023.

FERNANDES, A.B.; BORBA, R.P.; BRANDI, I.V.; ARAÚJO, R.N.; SCHERER, B.S.; CORRÊA, T.R.; BOULHOSA, G.S. Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.24, n.3, p. 1-15, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i3.2315

FERREIRA, G. L. B. A classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas como mecanismo de compatibilização. **Prisma Jurídico**, v. 16, n. 1, p. 123-149, 2017.

FIGUEIREDO, L.A.V. de. História da Espeleologia Brasileira: protagonismo e atualização cronológica. *In*: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 31., 2011, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE), p.379-395.

FREIRE, L.; LIMA, J.; VERÍSSIMO, C.; SILVA, E. Estudo Geomorfológico em Cavernas de Arenito da Amazônia Paraense. **Revista de Geografia (Recife)**, Recife, v. 35. n. 4, p. 14-31, 2018.

GALDEANO, M.G.; MUNIZ, F.G.; PETTERSEN, C.; SEBASTIÃO, C.; SOARES, L.M.; REZENDE, B. Aplicação do Laser *Scanner* 3D como Ferramenta de Interpretação de Dados Litoestruturais em Caverna Natural localizada na Serra do Curral-MG. *In*: Congresso Brasileiro de Geologia, 48., 2016, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia. 2016. p.1.

GALLAY, M.; KANUK, J.; HOCHMUTH, Z.; MENEELY, J.D.; HOFIERKA, J.; SEDLAK, V. Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. **International Journal of Speleology**, v. 44, p. 277-291, 2015. DOI: 10.5038/1827-806X.44.3.6

GEOSLAM. **ZEB REVO RT – Scan, process and track your process as you go**. Nottingham: Geoslam, 2023.

GROHMANN, C.H.; ZACHARIAS, G.; GARCIA, G.P.B.; BARALE, F.; ALMEIDA, F.V.; ARNONE, I.S. Mapeamento e modelagem 3D do setor turístico da Caverna do Diabo (SP) com laser *scanner*: resultados preliminares. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Campinas. **Anais...** Campinas: SBE. 2019. p.201-206. Disponível em:<<http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe201-206.pdf>>. Acesso em: 03 jun 2022.

GUNN, J. **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. 1ª Ed. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. 902 p.

HEBB, B. **Paperless Caving Surveying**. 2010. Disponível em: <<http://paperless.bheeb.ch/>>. Acesso em: 02 jun 2022.

HELLER, M.; NEUMANN, A. **Inner-Mountain Cartography-From Surveying Towards Information Systems**. Disponível em: <https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2001/icc2001/file/f28008.pdf>. 2001. Acesso em: 15 mai 2022.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Plano de Manejo para Uso Múltiplo da Floresta Nacional de Carajás**. Brasília: MMA, 2004.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Downloads Geociências**. 2021. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-doterritorio/malhasterritoriais/15774malhas.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 23 mar 2022.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. 2011. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Apostila%20Curso%20de%20Espeleologia%20e%20Licenciamento%20Ambiental.pdf>>. Acesso em: 21 out 2022.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-esquisa/cecav/publicacoes/espeleologia_e_licenciamento_ambiental.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.

ICMBio - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2020**. 2021. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/cecav/publicacoes/107-anuario-do-patrimonio-espeleologico.html>>. Acesso em: 27 fev 2022.

JUSTO, A.P.; LOPES, E.S. **Programa Geologia do Brasil-PGB. Serra dos Carajás**. Folha SB.22-Z-A-II. Estado do Pará. Carta Geológica. Belém: CPRM, 2014.

KLEMUN, M. Verwaltete Wissenschaft: Instruktionen und Forschungsreisen. In: HIPFINGER A.; LÖFFLER J.; NIEDERKORN J. (Ed.), **Ordnung durch Tinte und Feder? Genese und Wirkung von Instruktionen im zeitlichen Längsschnitt vom Mittelalter bis zum 20**. 1ª Ed. Wien: Böhlau & Oldenbourg, 2012. p. 391-412.

KÖPPEN, W. Classification of climates according to temperature, precipitation and annual run. **Petermanns Geographische Mitteilungen**, v. 64, p. 193-203, 1918.

KYRLE, G. **Grundriss der Theoretischen Speläologie**. 1ª Ed. Wien: Österreichische Staatsdruckerei, 1923. 353 p.

LEE, E.F. **Map of the Mammoth Cave: Accompanied with notes**. Cincinnati: Doolittle & Munson, 1835. Dimensões 52 x 61 cm. Escala 1:3000. Disponível em: <<https://www.loc.gov/item/2006626050/>>. Acesso em: 19 mai. 2022.

LERMA, J.; BIOSCA, J. **Teoria y practica del Escaneado Laser Terrestre**. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2008. 253p. Disponível em: <<http://www.jllerma.webs.upv.es/>>. Acesso em: 14 jun. 2022.

- LINO, C. F. **Cavernas: o fascinante Brasil subterrâneo**. 1ª Ed. São Paulo: Rios, 1989. 279p.
- LOBATO, L. ROSIÈRE, C.; FIGUEIREDO E SILVA, R.; ZUCCHETTI, M.; BAARS, F.; SEOANE, J. C.; RIOS, F.; PIMENTEL, M.; MENDES, G. E.; MONTEIRO, A. M. A mineralização hidrotermal de ferro da Província Mineral de Carajás, controle estrutural e contexto na evolução metalogenética da província. In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W. **Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia**. ed. 1. Brasília: ADIMB/DNPM, 2005. p. 21-92.
- LOTT, C. F. S. Cartografia espeleológica: dos mapas primitivos às experiências atuais em mapeamento de caverna. **Pedagogia em Ação**, v. 5, n. 1, p. 82-101, 2013.
- LÜDEMANN, K. Ein Universalinstrument für die Höhlenmessung. **Mitteilungen des Hauptverbands Deutscher Höhlenforscher**, v. 5, n. 2, p. 50-56, 1927.
- MACAMBIRA, M.J.B.; RAMOS, J.F.F.; ASSIS, J.F.P.; FIGUEIRAS, A.J.M. **Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca**. Belém: UFPA, 1990.
- MAGALHÃES, E. D.; LINHARES, J.C. **Curso Prático de Topografia - Espeleo Grupo de Brasília (EGB)**. 1ª Ed. Brasília: Espeleo Grupo de Brasília (EGB), 1997. 43p. Disponível em: <https://www.portalagrimensura.com/cloud/download/dXBsb2Fkcy9hcG9zdGlsYXMvdG9wb2dyYWZpYS1kZS1jYXZlc m5hLnBkZg==/h/653dea909cb6ff1b3091ede70f125d1c>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- MATTES, J. Underground fieldwork – A cultural and social history of cave cartography and surveying instruments in the 19th and at the beginning of the 20th century. **International Journal of Speleology**, v. 44, n. 3, p. 251-266, 2015. DOI: 10.5038/1827-806X.44.3.4
- MATTHEWS, N. A. **Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource documentation, Interpretation, and Preservation**. Colorado: U.S Department of Interior, 2008. 62p. Technical Note 428.
- MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Instrução Normativa nº 2 de 30 de agosto de 2017**. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, conforme previsto no art. 5o do Decreto no 99.556, de 1o de outubro de 1990. Brasília, 2017.

NAGEL, J.A. **Beschreibung deren auf allerhöchsten Befehl Ihro Röm. kaiserlichen königlichen Maytt. Francisci I untersuchten, in dem Herzogthume Crain befindlichen Seltenheiten der Natur.** Austrian National Library, manuscript- code: 7854. 1748.

OEDL, R. Auswertungsmöglichkeiten von Höhlenvermessungen. **Speläologisches Jahrbuch**, v. 3, p. 138-144, 1923.

PALMER, A.N. Origin and morphology of limestone caves. **Geological Society of America Bulletin**, v. 103, p. 1-21, 1991.

PALMER, A.N. Speleogenesis in carbonate rocks. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 1, p. 1-11, 2003.

PILÓ, L.B.; AULER, A.S. Cavernas em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. **O Carste**, v.17, n.3, p.92-105, 2005.

PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W.; HENRIQUES, A.L.; SILVEIRA, L.T.; MOREIRA, J.R.A.; LOPES, P.R.C.; SILVEIRA, O.T.; PAIVA, R.S.; LINS, A.L.F.A.; VERÍSSIMO, C.U.V.; PINHEIRO, S.H.S., HENRIQUES, R.V.L. **Considerações Preliminares sobre a Espeleologia da Serra dos Carajás (PA).** Grupo Espeleológico Paraense - GEP. Relatório inédito, 1985. 38p.

PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W. As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA) – Brasil. *In*: Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe, 1, 1988, Belo Horizonte. **Anais[...]** Belo Horizonte: SBE, 1988. p. 179-186.

PINHEIRO, R.V.L.; HOLDSWORTH, R.E. The structure of the Carajás N-4 ironstone deposit and associated rocks: relationship to the archaean strike-slip tectonics and basement reactivation in the Amazon region, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, n. 3-4, p. 305-319, 1997.

PROJETO RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais - Folha SA.22 Belém.** Rio de Janeiro: MME, 1974.

PUKANSKÁ, K.; BARTOŠ, K.; BELLA, P.; GAŠINEC, J.; BLISTAN, P.; KOVANIČ, L. Surveying and High-Resolution Topography of the Ochtiná Aragonite Cave Based on TLS and Digital Photogrammetry. **Applied Sciences**. v. 10, n. 13, p.1-19, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app10134633>>. Acesso em: 28 jul. 2022. (2020). DOI: 10.3390/app10134633

REISNER, H. Anleitung zur Aufnahme von Grundrißplänen, Längen- und Querprofilen in Höhlen. **Berichte der staatlichen Höhlenkommission**, v. 2, p. 10-24, 1921.

RUBBIOLI, E.; MOURA, V. **Mapeamento de Cavernas – Guia Prático**. 1ª Ed. Belo Horizonte: Redespeleo Brasil, 2005. 93p.

RUBBIOLI, E.; AULER, A. S.; MENIN, D.; BRANDI, R. **Cavernas: Atlas do Brasil Subterrâneo**. 1ª Ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. 340p.

SALUM, M. J. G. Cavidades Naturais Subterrâneas: Desafio para a Mineração de Ferro. In: 43º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas, 43., 2013, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABM. 2013. p. 146-158. DOI: 10.5151/2594-357X-23799SCHMIDL, A. Die Untersuchung einiger Höhlen im Karst. Jahrbuch der k. k. **Geologischen Reichsanstalt**, v. 1, p. 701- 705, 1850.

SCHAEFER, C.E.; CÂNDIDO, H.G.; CORRÊA, G.R.; SIMAS, F.; CAMPOS, J.F. Ecossistemas e Geoambientes de Canga Ferruginosa em Carajás: Paisagens Singulares em Risco de Extinção. In: MARTINS, F.F.; KAMINO, L.H.Y.; RIBEIRO, K.T. **Projeto Cenários Conservação de Campos Ferruginosos diante da Mineração em Carajás**. Tubarão: Copiart, 2018, p. 39-103.

SCHERER, B.S. **Morfologia e aspectos geométricos das cavidades de ambientes cársticos na Serra da Bocaina em Canaã dos Carajás-PA**. 68 p. Monografia (Bacharel em Geografia) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá-PA, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unifesspa.edu.br/handle/123456789/2085>. Acesso em: 21 mar. 2023.

SCHMIDL, A. **Zur Höhlenkunde des Karstes**. Die Grotten und Höhlen von Adelsberg, Lueg, Planina und Laas. Mit Beiträgen von Alois Pokorny, Johann Rudolf Schiner und Wilhelm Zippe. 1ª Ed. Wien: Wilhelm Braumüller, 1854. 317p.

SHAW, T.R. Adolf Schmidl (1802-1863). The father of modern speleology? **International Journal of Speleology**, v. 10, p. 253-267, 1978.

SHAW, T.R. **Foreign travellers in the Slovene karst 1486–1900**. 1ª Ed. Ljubljana: Karst Research Institute at ZRC SAZU, 2008. 338p.

SILVA, A.G.A. **Caracterização morfométrica de cavidades naturais subterrâneas: perspectivas para uma classificação morfológica e planimétrica das cavernas ferríferas no Brasil**. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - UFMG, Belo Horizonte - MG, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/41020>. Acesso em: 21 mar. 2023.

SILVA, M.M; SILVA, M.A.D.; MARTINS, G.D. Fotogrametria terrestre aplicada à espeleotopografia: Estudo de caso na Gruta do Urubu (Coromandel-MG). In: Simpósio de Ciências Agrárias e Ambientais, 8., 2020, Monte Carmelo. **Anais...** Monte Carmelo: UFU. 2020.

SIMÕES, P.R. Levantamento fotogramétrico e modelagem 3D aplicados à cartografia espeleológica e à espeleometria da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual de Ibitipoca – MG. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35., 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE. 2019 p.229-237. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_229-237.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2022.

SIMÕES, P.R.G.; VEIGA, L.A.K.; SCHMIDT, M.A.R. Automação de processos no mapeamento espeleológico 3D a partir de modelos fotogramétricos de cavidades subterrâneas em Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira e Espeleologia**, v.11, n. 1, p. 87–116, 2022. DOI: <https://doi.org/10.37002/rbsp.v1i11.2319>.

SUTTON, M. A History of map-making at Mammoth Cave. In: HOBBS III, H.H.; OLSON, R.A.; WINKLER, E.G.; CULVER, D.C. (Ed.). **Mammoth Cave: A Human and Natural History**. 1ª Ed. Cham: Springer, 2017. p. 77–95.

TETRA TECH. **Relatório Técnico – Estudos Espeleológicos para Licenciamento Ambiental – Validação Espeleométrica com Scanner 3D**. Belo Horizonte: Tetra Tech, 2018.

TME. **Telémetro Laser: como funciona e qual escolher?**. 2019. Disponível em: <<https://www.tme.com/br/pt/news/library-articles/page/21956/Telemetro-laser-como-funciona-e-qual-escolher/>>. Acesso em: 23 jun. 2022.

TOLBERT, G. E.; REMAINE J.W.; MELCHER, G.C.; GOMES, C.B. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, northern Brazil. **Economic Geology**, v. 66, n. 7, p. 985, 1971. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.7.985>. Acesso em: 21 mar. 2023.

VACCARI, E. The organized traveler. Scientific instructions for geological travels in Italy and Europe during the eighteenth and nineteenth century. In: WYSE JACKSON, P.N. (Ed.). **Four centuries of geological travel: The search for knowledge on foot, bicycle, sledge and camel**. 287^a Ed. London: Geological Society, 2007, p. 7-17. DOI: 10.1144/SP287

VALE S.A. **Estudos Ambientais para Mapeamento Topográfico de Cavidades Naturais Subterrâneas próximas a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM)**. Belo Horizonte: Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, 2009.

VALE S.A. **Resumo do Relatório Técnico de recursos e reservas minerais das minas do Complexo Serra Norte**. Parauapebas: Vale S.A., 2021a.

VALE S.A. **Workshop - Revisão dos atributos espeleométricos e atualização da relevância de nove cavidades**. Belo Horizonte: Gerência de Espeleologia e Tecnologia de Ferrosos, 2021b.

VALE S.A. **Banco de dados Espeleométrico de Cavernas da Província Espeleológica da Serra dos Carajás**. Parauapebas: Vale S.A., 2023.

VALENTIM, R.F.V.; OLIVITO, J.P.R. Unidade Espeleológica Carajás: Delimitação dos Enfoques Regional e Local, Conforme Metodologia da IN-02/2009 MMA. **EspeleoTema**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 41-60. 2011.

VIANA, P.L.; MOTA, N.F.O.; GIL, A.S.B.; SALINO, A.; ZAPPI, D.C.; HARLEY, R.M.; ILKIU-BORGES, A.L.; SECCO, R.S.; ALMEIDA, T.E.; WATANABE, M.T.C.; SANTOS, J.U.M.; TROVÓ, M.; MAURITY, C.; GIULIETTI, A.M. Flora of the cangas of the Serra dos Carajás, Pará, Brazil: history study area and methodology. **Rodriguésia** v. 67, n. 5, p. 1107-1124, 2016. DOI: 10.1590/2175-7860201667501

VILLASENÍN, S. P.; DOCAMPO, M.G.; SANZ, J.O. 3-D Modeling of Historic Façades Using SFM Photogrammetry Metric Documentation of Different Building Types of a Historic Center. **International Journal of Architectural Heritage**. v.11, n.6, p.871–890, 2017. DOI: 10.1080/15583058.2017.1317884

WESTOBY, M.J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N.F.; HAMBREY, M.J.; REYNOLDS, J.M. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300–314, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217?via%3Dihub>>. Acesso em: 25 jul. 2022. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021

WOOD, J.; TOOMEY, R. **Using Photogrammetry and 3D Models to Document Shark Fossils at Mammoth Cave National Park**. Kentucky: National Park Service. 2020. Disponível em: <<https://www.nps.gov/subjects/fossils/using-photogrammetry-and-3d-models-to-document-shark-fossils-at-mammoth-cave-national-park.htm>>. Acesso em: jul. 2022.

WOOKEY. Cave Surveying. In: GUNN, J. (Ed.). **Encyclopedia of caves and karst science**. 1ª Ed. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 714-717.

WYSE JACKSON, P.N. **Four centuries of geological travel: The search for knowledge on foot, bicycle, sledge and camel**. 287ª Ed. London: Geological Society, 2007. 415 p.

ZLOT, R.; BOSSE, M. Three-dimensional mobile mapping of caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 76, n. 3, p. 191–206, 2014. Disponível em: <<https://caves.org/pub/journal/PDF/v76/cave-76-03-191.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2022. DOI:10.4311/2012EX0287