



Universidade Federal
de São João del-Rei

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA - PPGEOG

PAULO GUERINO GARCIA ROSSI

APLICAÇÕES DE LASER *SCANNER* PORTÁTIL
TRIDIMENSIONAL EM ANÁLISES ESPELEOMÉTRICAS,
MORFOLÓGICAS, EVOLUTIVAS E DE MONITORAMENTO EM
CAVERNAS TROPICAIS DE DIFERENTES LITOLOGIAS

São João del-Rei

2025



Universidade Federal
de São João del-Rei

**APLICAÇÕES DE LASER SCANNER PORTÁTIL
TRIDIMENSIONAL EM ANÁLISES ESPELEOMÉTRICAS,
MORFOLÓGICAS, EVOLUTIVAS E DE MONITORAMENTO EM
CAVERNAS TROPICAIS DE DIFERENTES LITOLOGIAS**

Paulo Guerino Garcia Rossi

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Geografia da
Universidade Federal de São João del-
Rei, como requisito parcial à obtenção
do título de Mestre em Geografia.

**Área de concentração: Análise
Ambiental e Territorial**

**Linha de pesquisa: Dinâmica das
Paisagens Tropicais**

**Orientador: Leonardo Cristian
Rocha**

São João del-Rei
2025

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB)
e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R833a ROSSI, PAULO GUERINO GARCIA.
APLICAÇÕES DE LASER SCANNER PORTÁTIL
TRIDIMENSIONAL EM ANÁLISES ESPELEOMÉTRICAS,
MORFOLÓGICAS, EVOLUTIVAS E DE MONITORAMENTO EM
CAVERNAS TROPICAIS DE DIFERENTES LITOLOGIAS / PAULO
GUERINO GARCIA ROSSI ; orientador LEONARDO CRISTIAN
ROCHA. -- São João del-Rei, 2025.
168 p.

Dissertação (Mestrado - Geografia) -- Universidade
Federal de São João del-Rei, 2025.

1. Espeleologia. 2. Laser Scanner 3D Portátil. 3.
Aplicações. 4. Litologias. I. ROCHA, LEONARDO
CRISTIAN, orient. II. Título.



Universidade Federal
de São João del-Rei

Programa de Pós-Graduação em Geografia – PPGeog
Av. Visconde do Rio Preto, s/n (Km02) – Colônia do Bengo
São João del-Rei – MG – Cep. 36.301-360

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

CANDIDATO: 2024100130 - PAULO GUERINO GARCIA ROSSI

NÍVEL: Mestrado

DATA DA DEFESA: 03/12/2025

HORÁRIO DE INÍCIO: 09:00 horas

LOCAL: Dissertação Paulo Rossi - Versão para banca de defesa

Quarta-feira, 3 de dezembro de 2025 · 09:00 – 11:00

Link da videochamada: <https://meet.google.com/uav-ayie-yck>

MEMBROS DA BANCA		FUNÇÃO	TÍTULO	INSTITUIÇÃO DE ORIGEM
NOME COMPLETO	CPF			
LEONARDO CRISTIAN ROCHA	009.368.016-38	Presidente	Doutor	UFSJ
GABRIEL PEREIRA	041.441.029-71	Membro 1	Doutor	UFSJ
LUIZ EDUARDO PANISSET TRAVASSOS	028.197.816-67	Membro 2	Doutor	PUC-MINAS

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: APLICAÇÕES DE LASER SCANNER PORTÁTIL TRIDIMENSIONAL EM ANÁLISES ESPELEOMÉTRICAS, MORFOLÓGICAS, EVOLUTIVAS E DE MONITORAMENTO EM CAVERNAS TROPICAIS DE DIFERENTES LITOLOGIAS

Em sessão pública após apresentação oral do candidato, o mesmo foi arguido pela banca e este, à vista de todo o conteúdo apresentado julgou o candidato:

(x) Aprovado.

() Reprovado.

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é abaixo assinada pelos membros da banca, na ordem acima relacionada e pelo candidato.

São João del-Rei, 03 de dezembro de 2025.

Presidente: _____



Documento assinado digitalmente

LEONARDO CRISTIAN ROCHA
Data: 21/01/2026 17:37:23-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro1: _____



Documento assinado digitalmente

GABRIEL PEREIRA
Data: 21/01/2026 17:47:37-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Membro2: _____



Documento assinado digitalmente

PAULO GUERINO GARCIA ROSSI
Data: 22/01/2026 10:28:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado digitalmente

LUIZ EDUARDO PANISSET TRAVASSOS
Data: 21/01/2026 18:25:03-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Candidato: _____

Obs.: O aluno deverá encaminhar à coordenação do curso, no prazo máximo de 60 dias os exemplares definitivos da dissertação.

Campus Santo Antônio
Pça. Frei Orlando, 170
cep:36.307-352
Centro
São João del-Rei - MG

Campus Dom Bosco
Pça. Dom Helvécio, 74
cep:36.301-160
Fábricas
São João del-Rei - MG

Campus Tancredo Neves
(CTAN)
Rodovia BR 494, Km 02
cep:36.300-000
Colônia do Bengo
São João del-Rei - MG

Campus Alto Paraopeba
(em implantação)
Rodovia MG 443, Km 07
cep: 36.420-000
Fazenda do Cadete
Ouro Branco - MG

Campus Divinópolis
Av. Sebastião Gonçalves
Coelho, 400
Chanadour
Divinópolis - MG

Centro Cultural da UFSJ
Pça. Dr. Augusto das
Chagas Viegas, 17
cep:36.300-088
Centro
São João del-Rei - MG

“Uma pedra que rola não cria musgo”.

Creditado a Publilius Syrus (85–43 a.C.), data desconhecida (Livro Sententiae)

AGRADECIMENTOS

Lembrando das pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para execução desta dissertação, envolvidas em todas as etapas. Gostaria de agradecer sinceramente a:

- Professor Leonardo: pela disposição no aceite do desafio e nas contribuições metodológicas para melhoria das análises;
- Ao PPGEOG permitindo a constante pesquisa e busca por um país ideal;
- Aos membros da banca: pela atuação na contribuição para pesquisas de qualidade;
- Aos familiares, principalmente meus pais, sempre atentos, pacientes e dispostos a apoiar a pesquisa e educação, independente dos desafios;
- Alessandra: pela ampla amizade e aprendizagem conjunta, desde a graduação. Sempre compreensiva, madura e parceira nos mais diversos episódios;
- Bernardo/Paula: pelo apoio na cessão de abrigo, campos, fotos, auxílio sempre disponível. Sem suas contribuições essa dissertação é inviável;
- Elias: pela paciência e constância nas discussões ferrenhas, sempre numa visão técnico-científica-nacionalista.
- Lucas Vital: contribuição técnica permanente, nos mapeamentos e escaneamentos. Inevitável a existência desta dissertação sem sua ampla contribuição;
- Lucas Rabelo: pelo apoio, auxílio na seleção de equipamento e locação, além das discussões técnicas sempre pertinentes;

- Patrícia: pela paixão e amizade que dividiu etapas, cuja animação sempre incentivou vontade para o melhor;
- Paulo (hostel): pela recepção em hospedagens e apoio na execução dos campos e qualquer particularidade que surgisse;
- Giovanna: pela amizade e paixão, atenção e carinho, companhias e conversas sempre positivas e construtivas, além do apoio em atividades de campo;
- Jairo: pela curiosidade à espeleologia, acompanhando e permitindo continuidade das atividades em campo;
- Ana Clara: apoio nos mapeamentos convencionais e pela curiosidade no aprendizado espeleológico.
- Artur: pela amizade duradoura e recepção durante congresso, permitindo divulgação de pesquisas aqui realizadas;
- Ívia: pela longa amizade e discussões, facilitando soluções em todos os entraves;
- Francisco: pela amizade de longa data, atenção, preocupação e cumplicidade. Sempre pronto a criar uma piada das piores situações;
- Silvia: pelo interesse e disposição em permitir acesso à Gruta Casa da Pedra e acompanhamento do processo.

Mais sinceros agradecimentos a toda(o)s que de alguma forma, por simples atos de consideração, apoiam os projetos alheios, sem preconceitos.

RESUMO

No Brasil, cavernas são consideradas patrimônio espeleológico nacional por lei. Um dos aspectos para avaliar sua relevância são suas dimensões espeleométricas. Outro aspecto é a manutenção de sua integridade física e de sua área de influência. Nesta dissertação, o uso de um *scanner* a laser 3D móvel foi aplicado em quatro cavernas de diferentes litologias (crosta detrito-laterítica, granito, quartzito e calcário), em Minas Gerais, para avaliar a diferença nos valores espeleométricos dimensionais com método convencional. Além disso, suas características morfológicas e/ou geométricas foram avaliadas por nuvens de pontos e comparadas entre si no intuito de identificar particularidades conforme a rocha encaixante. Abordou-se contexto geomorfológico e evolutivo das cavernas. Por fim, a viabilidade de monitorar as integridades físicas através do sensor foi analisada comparando duas capturas diferentes, uma no final da estação seca tropical (Setembro de 2024) e outra no final da estação chuvosa (Abril de 2025). Como resultados, confirmaram-se variações entre métodos topográficos e valores espeleométricos obtidos, conforme litologia, morfologia e dimensão, com destaque para área e volume. As morfologias indicaram similaridades entre cavernas de granito e quartzito, seguidas pela de calcário, sendo a caverna ferrífera distinta das demais. As análises evolutivas demonstram que cavernas são unidades de análise do relevo importantes para a compreensão evolutiva local e regional, dentro de cada contexto de inserção. Em monitoramentos, o uso do laser *scanner* se mostrou como um avanço essencial face aos métodos atuais, com amplo aprofundamento dos detalhes e capacidades de análise. Entretanto, algumas ressalvas foram identificadas entre estações sazonais quanto a interferências de umidade, vegetação, ergonomia, acessibilidade (complexidade morfológica), alinhamento entre nuvens e magnetismo potencial. Disso, considera-se a recomendação por monitoramentos anuais ou comparativa apenas entre o mesmo tipo de estação climática.

Palavras-Chave: Espeleologia; Laser *Scanner* 3D Portátil; Aplicações; Litologias.

APPLICATIONS OF 3D PORTABLE LASER SCANNER IN SPELEOMETRIC, MORPHOLOGICAL, EVOLUTIONARY AND MONITORING ANALYSES IN TROPICAL CAVES OF DIFFERENT LITHOLOGIES

ABSTRACT

In Brazil, caves are considered national speleological heritage by law. One of the aspects to assess their relevance is their speleometric dimensions. Another aspect is the maintenance of their physical integrity and their area of influence. In this article, the use of a mobile 3D laser *scanner* was applied in four caves of different lithologies (lateritic crust, granite, quartzite and limestone), in Minas Gerais, to evaluate the difference in dimensional speleometric values with the conventional method. In addition, their morphological and/or geometric characteristics were evaluated by point clouds and compared with each other in order to identify particularities according to the host rock. The geomorphological and evolutionary context of the caves were evaluated. Finally, the feasibility of monitoring their physical integrity through the sensor was analyzed by comparing two different captures, one at the end of the tropical dry season (September 2024) and another at the end of the rainy season (April 2025). As a result, variations were confirmed between topographic methods and speleometric values, according to lithology, morphology, and size, with emphasis on area and volume. The morphologies indicated similarities between granite and quartzite caves, followed by limestone cave, with the lateritic cave standing out from the others. Evolutionary analyses demonstrate that caves are important units of relief analysis for understanding local and regional evolution within each context. In monitoring, the use of laser scanning proved to be an essential advancement compared to current methods, with a greater depth of detail and analytical capabilities. However, some differences were identified between seasonal variations regarding interference from humidity, vegetation, ergonomics, accessibility (morphological complexity), cloud alignment, and potential magnetism. Therefore, annual monitoring or comparative monitoring only between the same type of climatic station is recommended.

Keywords: Speleology; Mobile 3D Laser *Scanner*; Applications; Lithologies.

LISTA DE FIGURAS, FOTOS E MAPAS

	<u>Pág.</u>
FIGURA 1.1. NÚMERO ANUAL DE CADASTROS ESPELEOLÓGICOS BRASILEIROS DESDE 1898. FONTE: ADAPTADO DE ICMBIO/CECAV (2025).	2
FIGURA 2.1. FLUXOGRAMA DA ORGANIZAÇÃO DA PRESENTE DISSERTAÇÃO..	8
FIGURA 4.1. LOCALIZAÇÃO DAS CAVERNAS ANALISADAS E SEUS CONTEXTOS LOCAIS DE INSERÇÃO COM A DELIMITAÇÃO DE SEUS PERÍMETROS.....	14
FIGURA 4.2. FLUXOGRAMA DAS ETAPAS EXECUTADAS PARA APLICAÇÃO 1: ESPELEOMETRIA.....	17
MAPA 4.1. TOPOGRAFIA CONVENCIONAL DA CAVERNA JK FERRÍFERA, REDUZIDO DE SEU TAMANHO ORIGINAL A2.....	20
MAPA 4.2. TOPOGRAFIA CONVENCIONAL DA CAVERNA BURACO DO INFERNO EM GRANITO, ADEQUADA DE SEU TAMANHO ORIGINAL A1. FONTE: ROSSI <i>ET AL.</i> (2024).....	21
MAPA 4.3. TOPOGRAFIA CONVENCIONAL DA CAVERNA GRUTA DO LAJEDO EM QUARTZITO, REDUZIDO DE SEU TAMANHO ORIGINAL A1. FONTE: ROSSI <i>ET AL.</i> (2025B).....	22
MAPA 4.4. TOPOGRAFIA CONVENCIONAL HISTÓRICA UTILIZADA PARA CÁLCULOS ESPELEOMÉTRICOS DA CAVERNA CASA DA PEDRA (SILVEIRA, 1894 <i>APUD</i> IBGE, 1939).....	23
FIGURA 4.3. FLUXOGRAMA DAS ETAPAS EXECUTADAS PARA APLICAÇÃO 2: MORFOLOGIA.	24
FIGURA 4.4. EXEMPLOS DE RESULTADOS DOS PROCESSAMENTOS DOS ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS LINEARIDADE DA GRUTA DO LAJEDO (ACIMA) E PLANARIDADE DA JK (ABAIXO) EM NUENS DE SETEMBRO/2024, COM OS RESPECTIVOS HISTOGRAMAS GAUSSIANOS.....	25

FIGURA 4.5. FLUXOGRAMA DAS ETAPAS EXECUTADAS PARA APLICAÇÃO 3: MONITORAMENTO.....	27
FIGURA 4.6. EXEMPLO DE HISTOGRAMA GAUSSIANO DE PLANARIDADE RESULTANTE DA CAVERNA JK DO ESCANEAMENTO DE ABRIL/2025, COM INDICAÇÕES DA MÉDIA E DESVIO PADRÃO.....	28
FIGURA 4.7. EXEMPLO PARA A CAVERNA BURACO DO INFERNO DE LINHAS DE 16 SEÇÕES PADRONIZADAS EM NUVEM DE PONTOS 3D: SEÇÕES FIXAS EM LINHA EXTRAÍDAS EM CADA NUVEM SAZONAL (À ESQUERDA); NUENS DE PONTOS DE 50 CM DE LARGURA EXTRAÍDA EM CADA SEÇÃO PARA CADA NUVEM (À DIREITA), POSTERIORMENTE COMPARADAS EM VALORES DE PERÍMETRO, NÚMERO DE PONTOS E VOLUME. FONTE: ROSSI <i>ET AL.</i> (2025A).	31
FIGURA 4.8. FLUXOGRAMA DAS ETAPAS EXECUTADAS PARA APLICAÇÃO 4: ANÁLISE AMBIENTAL.....	32
FIGURA 4.9. VISUALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DA NUVEM DE PONTOS BRUTA INTEGRADA, ANTES DA ETAPA DE “LIMPEZA” (ACIMA) E PÓS PROCESSO DE LIMPEZA (ABAIXO).	33
FIGURA 4.10. MORFOLOGIA TRIDIMENSIONAL DA GRUTA CASA DA PEDRA COM EXEMPLOS DE ATRIBUTOS E FEIÇÕES MORFOLÓGICAS: (A) NUVEM DE PONTOS TRIDIMENSIONAL FILTRADA, TEMATIZADA PELA ESCALA DE ALTURAS A PARTIR DO ESCANEAMENTO 3D (18,09 M TOTAIS), COM INDICAÇÕES DE FEIÇÕES E DINÂMICA HÍDRICA PRINCIPAIS; (B) PANORAMA DO SALÃO DA DENOMINADA ENTRADA SUPERIOR; (C) DENOMINADA ENTRADA INFERIOR, COM DESTAQUE PARA FUNÇÃO ATUAL DE SUMIDOURO PARA FLUXO FLUVIAL, CONTROLADO AO NÍVEL LAMINAR; (D) SALÃO PRINCIPAL RESULTANTE DE COALESCÊNCIA DE CONDUTOS TRANSVERSAIS E TRÊS SAÍDAS, CUJOS ACÚMULOS DE MATAÇOS DEMONSTRAM O COLAPSO DE PALEODOLINA TRUNCANDO SUAS CONTINUIDADES; (E) LOCAL ABAIXO DA DENOMINADA DOLINA LESTE, A PARTIR DA QUAL SE DÁ A DESCARGA DE FLUXO FLUVIAL EM RESSURGÊNCIA LOGO ADIANTE.....	35
FIGURA 4.11. RESULTADOS VISUAIS DE VISADAS TRANSVERSAIS: NA ETAPA DE JUNÇÃO DAS NUENS DE PONTOS 3D (ACIMA); RESULTADO TRIDIMENSIONAL OBLÍQUO APÓS PROCESSO DE “LIMPEZA DA NUVEM”, COM	

INDICAÇÃO DAS ALTURAS A PARTIR DO INÍCIO DO ESCANEAMENTO (ABAIXO).	36
FIGURA 4.12. INSERÇÃO DA GRUTA DO LAJEDO SOBRE RELEVO E HIDROGRAFIA (IGAM, 2002) TRIDIMENSIONALIZADAS. ATENTAR PARA CONTEXTO DE INTERFLÚVIO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS NO FLANCO NORTE DA SERRA DO LENHEIRO. EXAGERO DE 1,5X.	37
FIGURA 4.13. AS PRINCIPAIS UNIDADES QUE COMPÕE A GEOLOGIA DA BORDA MERIDIONAL DO CRÁTON SÃO FRANCISCO. I – COMPLEXOS ARQUEANOS; II – <i>GREENSTONE BELT</i> RIO DAS VELHAS; III – <i>GREENSTONE BELT</i> (NAZARENO, DORES DO CAMPO E RIO DAS MORTES); IV – CORPOS PLUTÔNICOS NEOARQUEANOS; V – SUPERGRUPO MINAS; VI – CORPOS PLUTÔNICOS PALEOPROTEROZÓICOS (ALVO DA CAVERNA ANALISADA, PELA SETA); VII – MEGASSEQUÊNCIAS SÃO JOÃO DEL REI, CARANDAÍ E ANDRELÂNDIA. FONTE: ÁVILA (2000) <i>APUD</i> COSTA (2010).....	40
FIGURA 4.14. LOCALIZAÇÃO APROXIMADA DA ÁREA DE ESTUDOS, EM QUADRANTE PRETO, MOSTRANDO A GEOLOGIA E MEGAESTRUTURAS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, INCLUINDO CONDIÇÃO DE INSERÇÃO DA CAVERNA JK NO PERFIL DE DETALHE (MODIFICADO DE CALUX, 2013).....	42
FIGURA 5.1. NUVEM DE PONTOS POR CAVERNA PROCESSADA PARA CÁLCULO ESPELEOMÉTRICO. EM ORDEM: 1-BURACO DO INFERNO; 2- JK; 3-LAJEDO; 4-CASA DE PEDRA. ESCALA EM METROS.	44
FIGURA 5.2. PRANCHA 1 DE EXEMPLOS DE RESULTADOS DE ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS DE NUENS DE CAVERNAS E SEUS RESPECTIVOS HISTOGRAMAS GAUSSIANOS.	48
FIGURA 5.3. PRANCHA 2 DE EXEMPLOS DE RESULTADOS DE ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS DE NUENS DE CAVERNAS E SEUS RESPECTIVOS HISTOGRAMAS GAUSSIANOS.	49
FIGURA 5.4. NUVEM DE PONTOS 3D DA CAVERNA JK (1); CINCO EXEMPLOS DE PERÍMETROS DE SEÇÕES (2); CENA SUBJACENTE (3) E CENA TRANSVERSAL SUPERIOR DE CORTE (4), DEMONSTRAM PLANARIDADE EM DIREÇÃO AO AZUL E, EM VERMELHO, AS PORÇÕES DE RUGOSIDADE ACIMA DA MÉDIA.....	53

FIGURA 5.5. NUVEM DE PONTOS 3D COMPLETA DA GRUTA DO BURACO DO INFERNO (1) E NUENS DE PONTOS DOS PERÍMETROS EM VERDE (2). ABAIXO, AS CENAS 3 E 4 DESTACAM, EM VERMELHO, AS PORÇÕES ACIMA DA MÉDIA EM TERMOS DE VERTICALIDADE E TAXA DE VARIAÇÃO NORMAL, RESPECTIVAMENTE. 54

FIGURA 5.6. NUVEM DE PONTOS 3D COMPLETA DA GRUTA DO LAJEDO (1) E PERÍMETROS DAS SEÇÕES INDICADAS (2). ABAIXO, AS CENAS 3 E 4 MOSTRAM A PORÇÃO PROXIMAL COM CONSIDERÁVEIS DEPÓSITOS CLÁSTICOS (PAREADAS PELA SETA) QUE INTERFEREM NA CARACTERÍSTICA DE VARIAÇÃO DA SUPERFÍCIE, DESTACADA ACIMA DA MÉDIA EM VERMELHO.. 54

FIGURA 5.7. NUVEM DE PONTOS 3D DA CASA DA PEDRA EM PLANTA (1), VISTA TRANSVERSAL E CORTE PRINCIPAL (A-B) NAS CENAS 2 E 3. ABAIXO, A CENA 4 APRESENTA PORÇÕES COM LINEARIDADE ACIMA DA MÉDIA, MOSTRADAS EM VERMELHO. 54

FIGURA 5.8. COMPARAÇÃO DE DISTÂNCIAS ABSOLUTAS ENTRE NUENS DE PONTOS 3D, EM METROS (C2C), DA CAMPANHA DE ABRIL/2025 A SETEMBRO/2024 PARA A BURACO DO INFERNO. CANTO SUPERIOR ESQUERDO APRESENTA RESULTADO BRUTO. OS DEMAIS QUADROS APRESENTAM GRÁFICO E VISADAS LATERAIS DE SELEÇÃO DOS 5% MAIS DISTANTES EM VERMELHO ENTRE AS NUENS. 58

FIGURA 5.9. COMPARAÇÃO DE DISTÂNCIAS ABSOLUTAS ENTRE NUENS DE PONTOS 3D, EM METROS (C2C), DA CAMPANHA DE ABRIL/2025 A SETEMBRO/2024 PARA A CAVERNA JK. CANTO SUPERIOR ESQUERDO APRESENTA RESULTADO BRUTO. OS DEMAIS QUADROS APRESENTAM GRÁFICO E VISADAS SUPERIOR (ESQ.) E INFERIOR (DIR.) DE SELEÇÃO DOS 5% MAIS DISTANTES EM VERMELHO ENTRE AS NUENS..... 59

FIGURA 5.10. COMPARAÇÃO DE DISTÂNCIAS ABSOLUTAS ENTRE NUENS DE PONTOS 3D, EM METROS (C2C), DA CAMPANHA DE ABRIL/2025 A SETEMBRO/2024 PARA A CASA DA PEDRA. CANTO SUPERIOR ESQUERDO APRESENTA RESULTADO BRUTO. OS DEMAIS QUADROS APRESENTAM GRÁFICO E VISADAS SUPERIOR (ESQ.) E INFERIOR (DIR.) DE SELEÇÃO DOS 5% MAIS DISTANTES EM VERMELHO ENTRE AS NUENS..... 60

FIGURA 5.11. COMPARAÇÃO DE DISTÂNCIAS ABSOLUTAS ENTRE NUVENS DE PONTOS 3D, EM METROS (C2C), DA CAMPANHA DE ABRIL/2025 A SETEMBRO/2024 PARA A GRUTA DO LAJEDO. CANTO SUPERIOR ESQUERDO APRESENTA RESULTADO BRUTO. OS DEMAIS QUADROS APRESENTAM GRÁFICO E VISADAS SUPERIOR (ESQ.) E INFERIOR (DIR.) DE SELEÇÃO DOS 5% MAIS DISTANTES EM VERMELHO ENTRE AS NUVENS..... 61

FIGURA 5.12. PRANCHA COM POSIÇÃO E GRÁFICO DAS SEÇÕES PADRONIZADAS PARA A CAVERNA JK, INCLUINDO GRÁFICOS COM AS VARIÁVEIS DE VALOR DO PERÍMETRO, NÚMERO DE PONTOS 3D E VOLUME. 67

FIGURA 5.13. PRANCHA COM POSIÇÃO E GRÁFICO DAS SEÇÕES PADRONIZADAS PARA A CAVERNA CASA DA PEDRA, INCLUINDO GRÁFICOS COM AS VARIÁVEIS DE VALOR DO PERÍMETRO, NÚMERO DE PONTOS 3D E VOLUME. 68

FIGURA 5.14. PRANCHA COM POSIÇÃO E GRÁFICO DAS SEÇÕES PADRONIZADAS PARA A CAVERNA DO LAJEDO, INCLUINDO GRÁFICOS COM AS VARIÁVEIS DE VALOR DO PERÍMETRO, NÚMERO DE PONTOS 3D E VOLUME. 69

FIGURA 5.15. PRANCHA COM POSIÇÃO E GRÁFICO DAS SEÇÕES PADRONIZADAS PARA A CAVERNA BURACO DO INFERNO, INCLUINDO GRÁFICOS COM AS VARIÁVEIS DE VALOR DO PERÍMETRO, NÚMERO DE PONTOS 3D E VOLUME..... 70

FIGURA 5.16. LIMITES AREAIS COMPARADOS ENTRE O MÉTODO TOPOGRÁFICO CONVENCIONAL E TRIDIMENSIONAL. NÃO SE CONSTATA DESLOCAMENTOS BRUSCOS OU NÍTIDOS SOB POTENCIAL INFLUÊNCIA MAGNÉTICA. A DIFERENÇA SE DÁ APENAS PELA ABRANGÊNCIA DOS MAPEAMENTOS..... 72

FIGURA 5.17. NUVENS 3D ALINHADAS DA CAVERNA FERRÍFERA JK, COM ALINHADAS AO NÍVEL DA SUPERFÍCIE, INDICANDO VARIAÇÃO NA INCLINAÇÃO DA CAVERNA EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE. INTERFERÊNCIA ESSA CONSIDERADA POR MAGNETISMO LOCAL..... 73

FIGURA 5.18. SEÇÕES MANUAIS APROXIMADAS APLICADAS NAS NUVENS DE TRECHO DA CAVERNA CASA DA PEDRA COM TETO DE INCLINAÇÃO EXPRESSIVA E PAREDES COM SCALLOPS. DISTÂNCIAS EM METROS. A DISTÂNCIA NO PONTO É DE 55,98 CM..... 76

FIGURA 5.19. EXEMPLO DE ANÁLISES DE PERÍMETROS E NUVENS 3D SAZONAIS DE SEÇÃO COM COMPARATIVO DE DISTÂNCIAS ABSOLUTAS DE LARGURA PARA A CAVERNA BURACO DO INFERNO, TOTALMENTE ADERENTES ENTRE SI. UNIDADES EM METROS..... 76

FIGURA 5.20. SIMULAÇÃO DE DANO EM TETO DA CAVERNA JK, COM INDICAÇÃO DA IDENTIFICAÇÃO NA FORMA E DO LOCAL DA DEPOSIÇÃO POR DISTÂNCIA ABSOLUTA ENTRE NUVENS 3D SAZONAIS, COM DISTÂNCIAS ENTRE 20 E 40 CM. 77

FIGURA 5.21. ENCARTES COM LOCALIZAÇÃO DA GRUTA CASA DA PEDRA E PLANÍCIE DO RIO DAS MORTES NA SEGUINTE SEQUÊNCIA: (1) SOBRE A GEOLOGIA; (2) SOBRE IMAGEM; (3) DETALHE DO PERÍMETRO DA GRUTA SOBRE IMAGEM. 81

FIGURA 5.22. MORFOLOGIA TRIDIMENSIONAL DA GRUTA CASA DA PEDRA, FILTRADA PELAS FEIÇÕES NAS MAIORES ALTURAS: (A) NUVEM DE PONTOS TRIDIMENSIONAL FILTRADA, TEMATIZADA PELO TERÇO SUPERIOR DAS ALTURAS NA ESCALA A PARTIR DO ESCANEAMENTO 3D (SUPERIOR A 4,81 M), COM INDICAÇÕES DE FEIÇÕES PRINCIPAIS IDENTIFICADAS; (B) EXEMPLO DE DOLINA, VERTICALIZADA, COM PREDOMÍNIO DE GÊNESE DISSOLUTIVA NO LIMITE LESTE DA GRUTA; (C) CONDUTO DESENVOLVIDO AO LONGO DE FENDA VERTICAL LINEAR, COM SEQUÊNCIA DE CLARABOIAS. 82

FIGURA 5.23. MORFOLOGIA TRIDIMENSIONAL DA GRUTA CASA DA PEDRA, FILTRADA PELAS FEIÇÕES EM ALTURAS INTERMEDIÁRIAS: (A) NUVEM DE PONTOS TRIDIMENSIONAL FILTRADA, TEMATIZADA PELO TERÇO MÉDIO DAS ALTURAS NA ESCALA A PARTIR DO ESCANEAMENTO 3D (ENTRE -1,22 M E 4,81 M), COM INDICAÇÕES DE FEIÇÕES PRINCIPAIS IDENTIFICADAS; (B) CONDUTO SUPERIOR PRINCIPAL COM PISO EM DECLIVE COBERTO FINA CAMADA DE SEIXOS ESBRANQUIÇADOS E, NAS PAREDES E TETO, AMPLAS CROSTAS DE PALEOPREENCHIMENTO; (C) CLARABOIA EM FENDA TRANSVERSAL AO SALÃO PRINCIPAL, EM CUJO LIMITE OESTE, FORMA-SE TERRAÇO SEDIMENTAR TERRÍGENO, ADJACENTE À DOLINA OESTE; (D) LOGO

AO LADO, PAREDE COM CONTINUAÇÃO DE SEDIMENTOS TERRÍGENOS ALÓCTONES, SOTOPOSTO A CAMADA DE PALEOPISO CALCÍTICO SUPERIOR NA ALTURA DE -1,58 M, ABAIXO DE PENDENTES DE TETO INDICATIVOS DE PERÍODO PARAGENÉTICO; (E) CONDUTO TRANSVERSAL COM TRECHO DE PALEOPREENCHIMENTO TERRÍGENO ALÓCTONE COMPLETO NA SEÇÃO (TOTAL SOTERRAMENTO) E NÍVEL DE PALEOPISO PARCIALMENTE CALCÍTICO NA ALTURA DE -1,17 M DIVIDIDO EM PASSAGEM SUPERIOR E INFERIOR. 84

FIGURA 5.24. MORFOLOGIA TRIDIMENSIONAL DA GRUTA CASA DA PEDRA, FILTRADA PELAS FEIÇÕES EM ALTURAS INFERIORES: (A) NUVEM DE PONTOS TRIDIMENSIONAL FILTRADA, TEMATIZADA PELO TERÇO INFERIOR DAS ALTURAS NA ESCALA A PARTIR DO ESCANEAMENTO 3D (ABAIXO DE -1,22 M), COM INDICAÇÕES DE FEIÇÕES PRINCIPAIS IDENTIFICADAS; (B) FEIÇÃO RESIDUAL, DENOMINADA “PÚLPITO”, ESCULPIDA EM PALEOPREENCHIMENTO, EM NÍVEL INFERIOR NA ALTURA DE -2,36 M, NOTANDO-SE AO FINAL ABERTURA DE PAREDE ONDE HÁ UM DOS CANAIS DE RESSURGÊNCIA HÍDRICA; (C) PALEOPISO DOMINANTEMENTE CALCÍTICO NA ALTURA -2,78 M, COM INDÍCIOS DE PARAGENIA NAS MEIAS CÚPULAS DE TETO, LOCALIZADO EM CONDUTO INFERIOR ABANDONADO POR COLMATAÇÃO SEDIMENTAR; (D) VISTA PARA SEÇÃO SEMIELÍPTICA INTERNA DE SALÃO PRINCIPAL, DEMONSTRANDO FASE DE ALARGAMENTO NA ALTURA DE -2,10 M, COALESCÊNCIA DOS PALEOCONDUTOS DE DIREITA E ESQUERDA, SEPARADOS PELO PENDENTE DE TETO CENTRAL, COM POSTERIOR FASE DE INCISÃO; (E) ENTRADA DE CONDUTO MEANDRANTE, COM PRINCIPAL VAZÃO DE DESCARGA DRENANTE PRA ÁREA CENTRAL DE PALEODOLINA SOLAPADA, DEMONSTRANDO NOVA FASE DE INCISÃO EROSIVA EM NOVOS CONDUTOS. 85

FIGURA 5.25. EXEMPLOS DE ESPELEOTEMAS DESENVOLVIDOS EM ÚLTIMA FASE DA CAVERNA, SEM INTERFERÊNCIA SEDIMENTAR EXTERNA, QUE DEMONSTRAM ÚLTIMA FASE DE DESENVOLVIMENTO DA CAVERNA, A SABER: (A) ESTALAGMITE COM TRAVERTINOS E PÉROLAS IMATURAS NO SALÃO DE ENTRADA SUPERIOR; (B) COLUNA DESENVOLVIDA NO SALÃO DE ENTRADA ATUAL SOBRE DRENAGEM SEM INTERFERÊNCIA SEDIMENTAR; (C) ESCORRIMENTOS TEXTURIZADOS, SOBRE PAREDE COBERTA POR PALEOPREENCHIMENTO AO FUNDO DE ENTRADA PRINCIPAL SUPERIOR, DEMONSTRANDO ÚLTIMA FASE DE DESENVOLVIMENTO DA CAVERNA. 86

FIGURA 5.26. INSERÇÃO DESTACADA DA ÁREA ESTUDADA, EM RELAÇÃO À ORGANIZAÇÃO ESPACIAL DO <i>RIFT</i> CENOZOICO DE SÃO JOÃO DEL-REI. FONTE: ADAPTADO DE SAADI (1990).	87
FIGURA 5.27. LOCAL SOBRE O DOMO DE SÃO SEBASTIÃO DA VITÓRIA, EM CONTATO DE SEDIMENTOS ARENO-ARGILOSOS LATERIZADOS (À DIREITA) COM O EMBASAMENTO PRÉ-CAMBRIANO METASSEDIMENTAR VOÇOROCADO. FONTE: AUTOR (2010).	87
FIGURA 5.28. TALUDES DE CORTE DA RODOVIA BR-265, EM CONTATO DE SEDIMENTOS ARENOSOS SOB MATRIZ SILTO-ARGILOSA ROXA A LATERIZADOS (INDICAÇÃO PELA SETA) COM O EMBASAMENTO PRÉ-CAMBRIANO METASSEDIMENTAR BEGE. FONTE: AUTOR (2010).	87
FIGURA 5.29. VISTA FRONTAL DE TERRAÇO ALUVIAL DEFORMADO E BASCULADO DO <i>GRÁBEN</i> DO BAIXO RIO CARANDAÍ, NA AVENIDA DE ENTRADA À SÃO JOÃO DEL-REI, SOBRE CONTATO (ASSINALADO EM AMARELO) COM O EMBASAMENTO PRÉ-CAMBRIANO METASSEDIMENTAR DE COLORAÇÃO CLARA. FONTE: AUTOR (2010).	88
FIGURA 5.30. FOTOS DE DETALHE DO TERRAÇO ALUVIAL SUPRACITADO, PARA CAMADA INFERIOR CONGLOMERÁTICA DE SEIXOS ARREDONDADOS COM CIMENTAÇÃO SILICOSA À ESQUERDA. AO CENTRO, CONTATO ENTRE CAMADAS ARGILOSA LATERIZADA (SUPERIOR) E ARENO-ARGILOSA BEGE (INTERMEDIÁRIA), ASSIM COMO, À DIREITA TRECHO BASCULADO DO TERRAÇO COM CAMADA LATERIZADA ARGILOSA SUPERIOR E DE CONGLOMERADO ALUVIAL INFERIOR. FONTE: LEONARDO ROCHA (2019/2025).	88
FIGURA 5.31. DEMONSTRAÇÃO DAS ALTIMETRIAS ENTRE PLANÍCIE ATUAL DO RIO DAS MORTES E GRUTA CASA DA PEDRA, INDICANDO O PROCESSO DE COLMATAÇÃO E TENDÊNCIA DE MIGRAÇÃO DO PALEOCANAL FLUVIAL PARA A PAISAGEM CONTEMPORÂNEA.	89
FIGURA 5.32. LOCALIZAÇÃO DA GRUTA DO LAJEDO EM RELAÇÃO AO CENTRO URBANO DE SÃO JOÃO DEL-REI E PERFIS GEOLÓGICOS. DATUM UTM SIRGAS2000 – FUSO 23K. FONTE: PERFIS GEOLÓGICOS ADAPTADOS DE ARUZZO (2016).	95

FIGURA 5.33. VISADA TRIDIMENSIONAL ESQUEMÁTICA COM INDICAÇÕES DE ASPECTOS MORFOLÓGICOS PRINCIPAIS DA GRUTA DO LAJEDO. ESCALA DE ALTURAS, EM METROS, NA NUVEM A PARTIR DO INÍCIO DO ESCANEAMENTO.

..... 97

FIGURA 5.34. FOTOS EXTERNAS DA GRUTA: (A) VISADA DE MONTANTE PARA O FRONTE DE ENTRADA TRUNCANDO O TALVEGUE SOB DEPÓSITO DE TÁLUS; (B) DETALHE PARA ZONA DE ACESSO À ENTRADA PRINCIPAL EM MEIO A BLOCOS, COM INDICAÇÃO DE ARCO ROCHOSO (PALEOCONDUTO); (C) INDICAÇÃO DA PORÇÃO DE ENTRADA EM DECLIVE PARA INTERIOR. 98

FIGURA 5.35. FOTOS DA PORÇÃO DE ENTRADA E CÂMARA SUL DA GRUTA: (A) A PARTIR DE LINHA D'ÁGUA, VISADA PARA CÂMARA SUL, DEMONSTRANDO TETO EM ACAMAMENTO MERGULHANTE E INTENSO ACÚMULO DE BLOCOS AUTÓCTONES COMPONDO PISO IRREGULAR; (B) VISTA DE FUNDO PARA ENTRADA, DEMONSTRANDO INTENSO PROCESSO DE SOLAPAMENTOS E CANAL DE ESCOAMENTO DISTAL À DIREITA; (C) VISTA PARA ENTRADA, EM ACLIVE, CONDICIONADA POR BLOCOS NO PISO E AMPLA CÂMARA DE ASPECTO ABRIGADO; (D) ACESSO À CÂMARA NORTE, COM PREDOMÍNIO DE SEÇÕES LENTICULARES COM PASSAGENS DE TETOS BAIXOS...... 99

FIGURA 5.36. FOTOS DAS CÂMARAS DE NORTE: (A) A PARTIR DA CLARABOIA (POR DOLINA DE ABATIMENTO) VISTA PARA ENTRADA ALTERNATIVA DA GRUTA; (B) CONDUTO DO LIMITE NORTE, FORMADO POR ESVAZIAMENTO DE CAMADA DO MACIÇO, MANTENDO SEÇÕES LENTICULARES ATÉ TETO DE MEIA ALTURA; (C) ZONA DISTAL LESTE, EM MEIO A BANCO DE SEDIMENTOS BANDADOS EM PROCESSO DE DESMONTE EROSIVO ATUAL; (D) SUMIDOURO DISTAL EM CANALÍCULO ATIVO, APÓS BANCO DE SEDIMENTOS ERODIDOS.

..... 100

FIGURA 5.37. INSERÇÃO DA GRUTA DO LAJEDO SOBRE OS INTERFLÚVIOS DE OTTOBACIAS DE CABECEIRAS (IGAM, 2002), COM INCLUSÃO DA ATUAL BACIA DE INFLUÊNCIA HÍDRICA ATUAL DA GRUTA, CAPTURANDO OS ESCOAMENTOS DAS ÁREAS INDICADAS NAS OTTOBACIAS 1 (NORTE) E 2 (OESTE), PARA VERTER À OTTOBACIA 3 (LESTE). 102

FIGURA 5.38. DELIMITAÇÃO DAS ZONAS DE COMPORTAMENTO HÍDRICO CÁRSTICO NÃO-TRADICIONAL DA GRUTA DO LAJEDO, ACOMPANHADO DE PERFIL TOPOGRÁFICO ESQUEMÁTICO INTERPRETATIVO. 103

FIGURA 5.39. ESQUEMA INTERPRETATIVO EM FOTO DE VISADA NW, DA DINÂMICA DE DRENAGEM HÍDRICA ENTRE ZONA DE DRENAGEM CAPTURADA E EXUTÓRIO NA PORÇÃO OPOSTA DA GRUTA DO LAJEDO. 106

FIGURA 5.40. INSERÇÃO DA GRUTA BURACO DO INFERNO EM RELAÇÃO A RESENDE COSTA E BELO HORIZONTE. 109

FIGURA 5.41. 1-PERFIL DE CAVERNA TIPO JUNTA ABERTA (HARDT, 2003); 2-VISTA DA FACE DO BATÓLITO A MONTANTE DA CAVERNA; 3-DEPRESSÃO EM JUNTA NA ZONA DE ENTRADA; 4-VISTA PARA ENTRADAS AO LONGO DE FENDAS VERTICAIS EM MEIO A MATAÇÕES; 5-ASPECTO GERAL DO CONDUTO PRINCIPAL, ACOMPANHANDO FACE DO MACIÇO À DIREITA; 6-FENDAS ORTOGONAIS DE PASSAGENS ESTREITAS, EM VISADA PARA CIMA, ADJACENTES AO CONDUTO PRINCIPAL. 110

FIGURA 5.42. 1- VISADA DO PÓRTICO DE ENTRADA DO CONDUTO PRINCIPAL, COM ALTURA DE 6,87 M; 2- PORÇÃO DISTAL DE CONDUTO PRINCIPAL, ONDE NOTA-SE O AFASTAMENTO PARALELO DAS PAREDES E INFLEXÃO DO CONDUTO AO LONGO DA FACE DO BATÓLITO NA PAREDE DIREITA; 3- FACE DE PAREDE CORROÍDA OU INTEMPERIZADA, EXPOSTA A EFLUENTES DE MONTANTE DA CAVERNA; 4- PLAQUETA SILICIFICADA ESTRIADA EM CAMADA CORROÍDA DE PAREDE; 5- FRENTE DE CORROSÃO COM FORMAÇÃO DE RUGOSIDADE, AVANÇANDO SOBRE PICHANÇA; 6- PLAQUETA RESIDUAL EM ZONA DE CORROSÃO COM COBERTURA DE CORALOIDES E CROSTAS ESCURAS. CONTINUA 112

FIGURA 5.43. 7- ZONA EM TETO COM CAMADAS INTEMPÉRICAS DE ACEBOLAMENTO, COMUNS EM ROCHAS CRISTALINAS; 8- TRECHO EM FENDA PARALELA, DE DESCIDA ATÉ CÂMARA INFERIOR DA CAVERNA, ONDE NOTA-SE INTENSA ACOMODAÇÃO DE MATAÇOS DIVERSOS; 9- CÂMARA INFERIOR COM AMPLA COBERTURA DE DEPÓSITOS DE GUANO HEMATÓFAGO; 10- EXEMPLARES COM FILHOTES NOTADOS EM TETO DO CONDUTO PRINCIPAL. 113

FIGURA 5.45. PERFIL ESQUEMÁTICO DO CONTEXTO DE INSERÇÃO DA CAVERNA BURACO DO INFERNO. 114

FIGURA 5.44. MAPA DE ZONAS SISMOGÊNICAS DO SUDESTE DO BRASIL, COM DESTAQUE PARA FOCO NA ZONA 10 DE BOM SUCESSO. FONTE: ADAPTADO DE MIOTO (1990).	115
FIGURA 5.46. SEÇÕES DINÂMICAS NA NUVEM 3D DA BURACO DO INFERNO, ILUSTRANDO A MORFOLOGIA AO LONGO DE SEU DESENVOLVIMENTO, CARACTERÍSTICA DO TIPO DE JUNTA ABERTA PREENCHIDA COM DETRITOS, DECORRENTES DE EVOLUÇÃO MORFODINÂMICA EM BORDA DE BATÓLITO GRANÍTICO.	116
FIGURA 5.47. VISADAS LATERAL (N-S) ACIMA, SUPERIOR À ESQUERDA E INFERIOR À DIREITA, DEMONSTRANDO AS ALTIMETRIAS DA CAVERNA A PARTIR DO ESCANEAMENTO TRIDIMENSIONAL.	117
FIGURA 5.48. PERFIL EM CORTE SOB CERCA (ABRIL/2025), PRÓXIMO À CAVERNA JK, ONDE SE NOTA PROFUNDIDADE DE APROXIMADAMENTE TRÊS METROS DA COBERTURA DETRITO-LATERÍTICA COM SOBREPOSIÇÃO DE CAMADAS HORIZONTAIS SOBRE ROCHA, APARENTEMENTE DOLOMÍTICA. À DIREITA, PANORAMA DO RELEVO DE INSERÇÃO SOBRE A CAVERNA.	121
FIGURA 5.49. ESQUEMA DOS MECANISMOS DE FORMAÇÃO DE <i>DURICRUST</i> (LATERITA) ATRAVÉS DE ACUMULAÇÃO ABSOLUTA DE FE E AL (ALÓCTONE) EM SOPÉ DE VERTENTE PELO MODELO PLUVIAL/FLUVIAL (A, B) E DETRÍTICO (C). FONTE: AUGUSTIN <i>ET AL.</i> (2013) <i>APUD</i> CÂMELO (2017).	122
FIGURA 5.50. PROXIMIDADE DA CAVERNA COM A RODOVIA BR-040, COM SUA ENTRADA ESTREITA, EM DECLIVE EM MEIO A BLOCOS SOLAPADOS.	123
FIGURA 5.51. PANORAMAS DO SALÃO PRINCIPAL DA CAVERNA (À ESQ.) E DA BIFURCAÇÃO DISTAL EM CÂMARAS GLOBULARES (À DIR.).	123
FIGURA 5.52. IMAGENS SUPERIORES APRESENTAM ASPECTO PADRÃO NAS PAREDES, ONDE O TERÇO SUPERIOR SECO APRESENTA CROSTAS BRANCAS FÚNGICAS. TERÇO MÉDIO APRESENTA COLORAÇÃO LARANJA-AVERMELHADA, CUJA PERCOLAÇÃO HÍDRICA FORMAM LOGO ABAIXO PATAMAR COBERTO POR CROSTA RÍGIDA DE ARGILOMINERAIS ATÉ PISO EM TRECHO DE CANAL DE ESCOAMENTO. IMAGENS INFERIORES SÃO EXEMPLOS DE CANALÍCULOS EM PAREDE E PISO COM APORTE HÍDRICO E SEDIMENTAR ALÓCTONE.	124

FIGURA 5.53. ESPELEOTEMAS TIPO ESTALACTITES CENTI A DECIMÉTRICOS, DE COMPOSIÇÃO ARGILOMINERAL, ENCONTRADOS EM VÁRIAS LINHAS DO TETO, COM HIDROLOGIA ATIVA MESMO EM PERÍODO SECO (SETEMBRO/2024).	125
FIGURA 5.54. PROCESSO GENÉTICO-EVOLUTIVO DA CAVERNA JK, CONFORME PROPOSIÇÃO DE CALUX (2013).	126
FIGURA 5.55. NUVEM 3D BRUTA, COM INSERÇÃO DA CAVERNA JK PRÓXIMA À SUPERFÍCIE E ADJACENTE À RODOVIA BR-040.	127

LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

	<u>Pág.</u>
TABELA 4.1 - PRINCIPAIS ATRIBUTOS DOS ESCANEAMENTOS EXECUTADOS.	15
TABELA 4.2 – ATRIBUTOS DO MAPEAMENTO TOPOGRÁFICO USADOS PARA CÁLCULOS ESPELEOMÉTRICOS A SEREM COMPARADOS.....	19
TABELA 4.3 – ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS MÉDIOS (μ) E DE DESVIO-PADRÃO (Σ) DAS NUENS UTILIZADAS NA APLICAÇÃO MORFOLÓGICA.....	26
TABELA 4.4 – ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS MÉDIOS (μ) E DE DESVIO-PADRÃO (Σ) DAS NUENS, POR CAPTAÇÃO SAZONAL E CAVERNA.	29
TABELA 4.5 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO SHAPIRO-WILK, AVALIANDO TIPO DE DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES GEOMÉTRICOS ENTRE AS NUENS SAZONAIS POR CAVERNA.....	30
GRÁFICO 5.1. COMPARATIVOS DOS RESULTADOS DE VALORES ESPELEOMÉTRICOS POR ATRIBUTO, ENTRE OS MÉTODOS DE MAPEAMENTO.	45
TABELA 5.1 – DIFERENÇAS, SUAS MÉDIAS, SOMAS E PORCENTAGEM DE DIFERENÇA ENTRE ESPELEOMETRIA TRIDIMENSIONAL E CONVENCIONAL..	46
GRÁFICO 5.2. COMPARAÇÃO DA VARIÂNCIA DAS MÉDIAS E DOS DESVIOS- PADRÃO DOS ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS POR NUVEM 3D DE CAVERNA.	49
GRÁFICO 5.3. HIERARQUIA DE PARTICIPAÇÃO DAS MÉDIAS SOMADAS POR ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS NA AMOSTRA.	51
GRÁFICO 5.4. VALORES PERCENTUAIS INTEIROS DOS ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS DAS NUENS DE PONTOS 3D POR CAVERNA.	51

GRÁFICO 5.5. BILOT DE COMPONENTES PRINCIPAIS PELAS VARIÁVEIS COMO ATRIBUTOS GEOMÉTRICOS POR MÉDIA (μ) E DESVIO-PADRÃO (Σ), RELACIONADAS A CADA CAVERNA.	52
GRÁFICO 5.6. DENDROGRAMA DE DISSIMILARIDADE POR AGLOMERAÇÕES DAS QUATRO CAVERNAS ANALISADAS.	55
TABELA 5.2 – DISTÂNCIAS MÉTRICAS DA COMPARAÇÃO DE NUVENS DE PONTOS 3D ENTRE AS DUAS CAMPANHAS DE ESCANEAMENTO REALIZADAS (<i>C2C ABSOLUTE DISTANCES</i>).	57
TABELA 5.3 – RESULTADO DO TESTE ESTATÍSTICO <i>WILCOXON</i> , AVALIANDO A SEMELHANTE DAS MEDIANAS ENTRE OS VALORES GEOMÉTRICOS SAZONAIS DAS NUVENS.	63
GRÁFICO 5.7. <i>BOX PLOTS</i> COMPARATIVOS DAS NUVENS DE PONTOS 3D SAZONAIS POR CAVERNA (SECA: <i>DRY</i> ; ÚMIDA: <i>WET</i>).	64
TABELA 5.4 – COMPARAÇÃO PERCENTUAL DA DIFERENÇA DAS VARIÁVEIS ENTRE A ESTAÇÃO SECA E ÚMIDA DAS SEÇÕES PADRONIZADAS POR CAVERNA.	66
GRÁFICO 5.8. REGRESSÕES LINEARES ENTRE ESTAÇÕES PARA AS VARIÁVEIS (PERÍMETROS, NÚMERO DE PONTOS 3D E VOLUME) CONSIDERADAS DAS SEÇÕES PADRONIZADAS NAS CAVERNAS.	75
TABELA 5.5 – ATRIBUTOS ESPELEOMÉTRICOS CALCULADOS PARA A GRUTA CASA DA PEDRA.	79
TABELA 5.6 – COMPARAÇÃO ENTRE BIBLIOGRAFIA E AS FASES IDENTIFICADAS NA PRESENTE ANÁLISE, DE DESENVOLVIMENTO REGIONAL E GRUTA CASA DA PEDRA.	90
TABELA 5.7 – CAVERNAS PUBLICADAS NAS SERRAS PRÓXIMAS DAS CAVERNAS ANALISADAS.	101

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AHC	<i>Agglomerative hierarchical clustering</i> – análise estatística
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i> ou Análise de Variância
ASF	<i>Australian Speleological Federation</i>
BCRA	<i>Britich Cave Research Association</i>
C2C	<i>Cloud to cloud</i> , referindo a comparações entre nuvens de pontos tridimensionais
CANIE	Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (Brasil)
CECAV	Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (Brasil)
CNS	Cavidade Natural Subterrânea
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DL	Desenvolvimento Linear cavernícola
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i> (unidade de medição inercial)
IN	Instrução Normativa legal
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i> (sensor de detecção e alcance de luz)
MMA	Ministério do Meio Ambiente (Brasil)
MLS	<i>Mobile Laser Scanner</i> (sensor móvel/portátil)
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> – análise estatística
PH	Projeção Horizontal cavernícola
PME	Plano de Manejo Espeleológico
PPGEOG	Programa de Pós-Graduação em Geografia
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TLS	<i>Terrestrial Laser Scanner</i> (sensor estático)
UFSJ	Universidade Federal de São João del-Rei
UIS	<i>Union Internationale de Spéleologie</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Média da distribuição normal de uma população
σ	Desvio-padrão de uma população
$^{\circ}$	Graus angulares ou azimutais ou ordinais, conforme contexto
$^{\circ}\text{C}$	Graus celsius de temperatura
%	Porcentagem
cm	Centímetros
E	Coordenada métrica de longitude leste em grade plana
ka	Mil anos
Km	Quilômetros
m	Metros
m^2	Metros quadrados
m^3	Metros cúbicos
cm/m	Centímetros por metros, em termos de declive
Ma	Milhão de anos
$\text{m}.\text{Ma}^{-1}$	Metros por milhão de anos
mm	Milímetros
$\text{mm}.\text{ka}^{-1}$	Milímetros por mil anos
N	Coordenada métrica de latitude norte em grade plana
UTM	Sistema de grades de coordenadas cartesianas métricas planas - Universal Transversa de Mercator
X	Coordenada métrica de longitude
Y	Coordenada métrica de latitude
Z	Altitude ou altura em metros

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVAS, OBJETIVOS E ESTRUTURA DA PESQUISA.....	6
3 REFERENCIAL AO TEMA.....	9
4 METODOLOGIA	13
4.1. Cavernas e litologias selecionadas	13
4.2. Equipamentos, escaneamentos a laser e <i>softwares</i>	15
4.3. Método da APLICAÇÃO 1 – ESPELEOMETRIA: Comparação dos valores espeleométricos entre topografias convencional e tridimensional	17
4.4. Método da APLICAÇÃO 2 – MORFOLOGIA: Comparação entre cavernas, por seus atributos geométricos tridimensionais.....	24
4.5. Método da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO: Aplicação em monitoramento de integridade física (testes 1, 2 e 3).....	27
4.6. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL: Estudos de caso nas cavernas (I) Casa da Pedra, (II) Gruta do Lajedo, (III) Buraco do Inferno e (IV) JK	32
4.6.1. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Estudo de caso I: Interpretação evolutiva da planície do Rio das Mortes e Gruta Casa da Pedra, a partir do uso de escaneamento a laser tridimensional.....	32
4.6.2. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Estudo de caso II: Exemplo de captura de drenagem de cabeceira serrana por desenvolvimento de carste não-tradicional. O caso da Gruta do Lajedo no topo da Serra do Lenheiro em São João del-Rei – MG.....	36
4.6.3. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Estudo de caso III: Buraco do Inferno: registro de caverna em granito no centro urbano de Resende Costa-MG, como indício dos eventos de evolução do relevo regional	39
4.6.4. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Estudo de caso IV: Caverna JK, caso de caverna em crosta detrito-laterítica em lateral de rodovia. Características e aspectos genético-evolutivos	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5.1. Resultados da APLICAÇÃO 1 – ESPELEOMETRIA: Comparação dos valores espeleométricos entre topografias convencional e tridimensional	44
5.2. Resultados da APLICAÇÃO 2 – MORFOLOGIA: Comparação entre cavernas, por seus atributos geométricos tridimensionais.....	47

5.3. Resultados da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO: Aplicação em monitoramento de integridade física (testes 1, 2 e 3).....	56
5.3.1. Resultado da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO – Teste 1: Monitoramento de integridade física pela distância absoluta entre as nuvens 3D sazonais por caverna.....	56
5.3.2. Resultado da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO – Teste 2: Monitoramento de integridade física pela comparação estatística das geometrias sazonais das nuvens 3D por caverna.....	63
5.3.3. Resultado da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO – Teste 3: Monitoramento de integridade física pela comparação de seções padronizadas para cada caverna e estação.....	65
5.4. Resultados da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL: composição de cenários de evolução qualitativos e comportamento ambiental atual dos casos analisados	78
5.4.1. Resultado da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Caso I: Interpretação evolutiva da planície do Rio das Mortes e Gruta Casa da Pedra, a partir do uso de escaneamento tridimensional a laser	78
5.4.1.1. Introdução	78
5.4.1.2. Área de estudo.....	78
5.4.1.3. Análise da Gruta Casa da Pedra	82
5.4.1.4. Análise de inserção na paisagem do entorno	86
5.4.1.5. Integração das interpretações para proposta de evolução morfodinâmica da caverna Casa da Pedra e entorno.....	89
5.4.1.6. Discussão	91
5.4.1.7. Conclusão.....	93
5.4.2. Resultado da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Caso II: Exemplo de captura de drenagem de cabeceira serrana por desenvolvimento de carste não-tradicional. O caso da Gruta do Lajedo no topo da Serra do Lenheiro em São João del-Rei – MG.....	94
5.4.2.1. Área de estudo.....	94
5.4.2.2. Caracterização cavernícola e comparação espeleométrica.....	96
5.4.2.3. Ajuste de bacia de contribuição hídrica, captura de drenagem e zonas cársticas não-tradicionais.....	102
5.4.2.4. Avaliação das macroetapas de evolução do relevo	104
5.4.2.5. Considerações.....	107
5.4.3. Resultado da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Caso III: Buraco do Inferno, registro de caverna em granito no centro urbano de Resende Costa-MG	108
5.4.3.1. Interpretação geoespeleológica da caverna	109
5.4.3.2. Correlação com eventos de evolução do relevo regional.....	113
5.4.4. Resultado da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Caso IV: Caverna JK, caso de caverna em crosta detrito-laterítica em lateral de rodovia. Características e aspectos genético-evolutivos	118
5.4.4.1. Aspectos evolutivos em rochas ferríferas	118
5.4.4.2. Interpretações a partir dos registros na caverna JK.	121
6 CONCLUSÕES.....	128
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	132

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos poucos países que possui legislação específica para a proteção do denominado patrimônio espeleológico. Ela surgiu com a Constituição Federal de 1988, em seu artigo 20º, inciso X, o qual estabelece as cavidades naturais subterrâneas e os sítios arqueológicos e pré-históricos como bens da União (BRASIL, 1988). Nesse período, o patrimônio espeleológico encontrava-se em contexto de preservação, ou impeditivo a sofrimento de impactos / alterações.

Em seguida, o artigo 1º do Decreto Federal nº 99.556/1990, modificado pelo Decreto nº 6.640/2008, dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no Território Nacional, considerando que:

Art. 1º As cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional deverão ser protegidas, de modo a permitir estudos e pesquisas de ordem técnico-científica, bem como atividades de cunho espeleológico, étnico-cultural, turístico, recreativo e educativo.

Parágrafo único. 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.

Logo após surgiu a Instrução Normativa nº 02/2009 do MMA, posteriormente substituída pela IN MMA nº 02/2017, as quais estabeleceram método para a definição de graus de relevância de cavidade natural subterrânea (CNS), classificados em: máximo, alto, médio e baixo. Somente o grau máximo se mantém impeditivo (conforme decisão do Superior Tribunal Federal à ADPF 935, pela suspensão arts. 4º, I, II, III e IV, e 6º do Decreto Federal 10.935/2022, em

26/04/2024), enquanto as demais são restritivas, passíveis de supressão após compensação ao longo do processo de licenciamento ambiental, válido para empreendimentos extrativos, industriais e comerciais conforme seu porte.

Simultaneamente, cavernas com potencial turístico passaram a ser obrigadas a seguir um Plano de Manejo Espeleológico - PME (ICMBio/CECAV, 2022a). Ele é definido pela Resolução CONAMA nº 347/2004 (artigo 2º, inciso V) como:

V - plano de manejo espeleológico: documento técnico mediante o qual, com fundamento nos objetivos gerais da área, se estabelece o seu zoneamento e as normas que devem presidir o uso da área e o manejo dos recursos naturais, inclusive a implantação das estruturas físicas necessárias à gestão da cavidade natural subterrânea; (...)

Em decorrência destas demandas legais, a partir dos anos de destaque 2004 e 2009, há contínuo aumento do cadastro de CNS's no território nacional, o qual mais que triplicou em 15 anos, conforme demonstra a **Figura 1.1**.

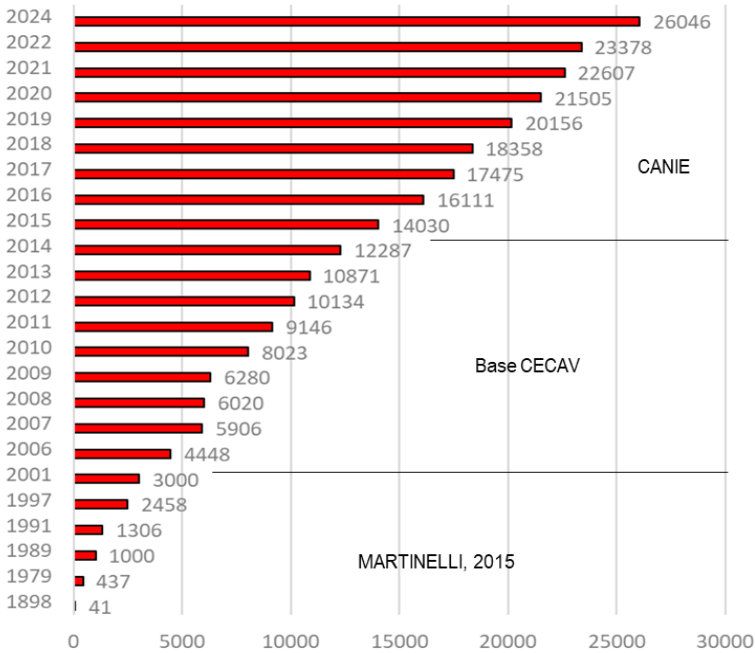


Figura 1.1. Número anual de cadastros espeleológicos brasileiros desde 1898. Fonte: adaptado de ICMBio/CECAV (2025).

Em muitos casos, por decorrência do elevado custo e tempo para a conclusão de estudos de relevância e compensação espeleológica, a incerteza dos resultados, em função das obras e dos empreendimentos esperados e dinâmicos, muitos empreendedores têm buscado a alternativa da não intervenção em áreas de influência e no patrimônio espeleológico. Como contrapartida, tornam-se demandadas as condicionantes de monitoramento acompanhando a integridade do patrimônio espeleológico face às intervenções almejadas. Por termos abióticos, a possibilidade de danos é entendida como sendo de aspectos relacionados à alteração cavernícola em sua morfologia original, suas formações secundárias (espeleotemas, ou sedimentos clásticos), bem como ainda piso, paredes e tetos (Santos Junior, 2017 *apud* Rezende *et al.*, 2019), englobados como alteração da integridade física.

Como resultado, surgiu ampla demanda por três tipos de estudos principais:

- (i) mapeamentos topográficos com dimensionamento espeleométrico;
- (ii) entendimento dos atributos de cavernas, de sua inserção e evolução, subsidiando delimitação de áreas de influência cavernícolas;
- (iii) ações de monitoramento para preservação e conservação do patrimônio espeleológico.

Do ponto de vista do mapeamento, as cavernas representam um grande desafio devido à complexidade das formas da superfície, aos espaços confinados, à falta de luz e à abundância de água, lama ou mesmo gelo (Gallay *et al.*, 2016). Conforme Fernandes *et al.* (2023), 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.

Como informação base para a gestão, métodos diversos de mapeamento espeleotopográfico existem, em função do detalhamento possível conforme equipamentos utilizados, a exemplo dos níveis de detalhe estabelecidos pela BCRA e UIS. Tais níveis de detalhe já são defasados em considerar os métodos de mapeamentos mais modernos, como o de *laser scanners* (Fernandes *et al.*, 2023; Lima, 2025). Ressalta-se que os valores dimensionais de uma CNS possuem amplo peso na determinação de seu grau de relevância espeleológica.

A partir deles, analisa-se a morfologia cavernícola para reconhecer seus processos genéticos, evolutivos e zonas de ampliação em consonância com o entorno, ou seja, seus atributos morfodinâmicos ambientais. Propostas destes como as de vários autores em função das diversas litologias. Citam-se: Finlayson (1983) para rochas graníticas; Palmer (1991, 2003) e Rodet *et al.* (2017) para rochas carbonáticas; Ford & Williams (2007) para rochas variadas; Wiegand *et al.* (2004), Fabri (2011, 2018) para rochas siliciclásticas; Auler & Piló (2007) e Calux (2013) para rochas ferríferas. Diversos atributos são considerados com base na morfologia para determinar uma área mínima de gestão de uma caverna, ou sua área de influência cavernícola, pela denominação legal brasileira (Resolução CONAMA 347/2004), seguindo diretrizes de ICMBio/CECAV (2022b). A definição conceitual conforme Resolução CONAMA nº 347/2004 (artigo 2º, inciso IV) é:

IV - área de influência sobre o patrimônio espeleológico: área que compreende os elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola; (...)

Por fim, as ações de monitoramento são realizadas amplamente por amostragens registradas, coletas ou medições parametrizadas, definidas a partir de seleção de pontos chave conforme o alvo do monitoramento. O monitoramento fotográfico de estruturas e feições geológico-geotécnicas e

geoespeleológicas tem sido proposto como medida de controle para o acompanhamento das condições de integridade física das cavidades naturais subterrâneas situadas em áreas de influência direta de empreendimentos (Perez, 1997 *apud* Dias *et al.*, 2013). Outros exemplos podem ser citados como: monitoramento geoestrutural, sísmico e sedimentar. O controle das condições da integridade física de cavidades através do monitoramento fotográfico tem por base um banco de imagens tomadas em estações fixas que podem ser repetidas de forma acurada ao longo do tempo (Hildreth-Werker, 2006).

Mesmo considerando a importância dos métodos usualmente implementados, suas fragilidades se relacionam aos níveis de generalização, fragmentação, interpretação e subjetividade obtidos nos resultados. Fabbri *et al.* (2017) apontam os métodos tradicionais de levantamento de cavernas - utilizando fita métrica, bússola e clinômetro - como trabalhosos e produzem dados de menor densidade, além de que a falta de luz em cavernas complica a aplicação de técnicas de fotogrametria.

Em oposição, há demanda cada vez maior pela exatidão, quantificação, detalhamento e acurácia das análises ambientais de modo a subsidiar gestão sustentável face à expansão da ocupação e atividades econômicas antrópicas. Nesse sentido, o advento de tecnologias tridimensionais, via aparelhos com sensores a laser, computadores com capacidade de processamento e *softwares* / aplicativos se apresentam como alternativa essencial. Atualmente suas utilizações predominam em fase experimental, tornando seus métodos e processamento exploratórios.

2 JUSTIFICATIVAS, OBJETIVOS E ESTRUTURA DA PESQUISA

A partir do contexto acima descrito, as justificativas desta dissertação são:

- (i) a demanda por análises ambientais cada vez mais detalhadas;
- (ii) a demanda legal brasileira de proteção ao patrimônio espeleológico;
- (iii) o surgimento da nova tecnologia dos MLS (Laser Scanner Móvel / portátil), como melhor condição de aplicação em ambientes cavernícolas;
- (iv) ampliação da capacidade computacional de processamento do imenso volume de dados captados em escaneamentos, somando a novos cálculos e produtos secundários pelos *softwares*, mesmo aqueles de livre acesso (Cosso *et al.*, 2014);
- (v) abordagem atual de estudos com uma única caverna, única litologia, atributos específicos, muitas vezes em testes de único levantamento.

Consequentemente, o objetivo principal desta dissertação é:

“testar aplicações de laser scanner móvel/portátil em análises espeleológicas tridimensionais (espeleométricas, geométricas, ambientais e de monitoramento) em cavernas tropicais de diferentes litologias.”

Para tanto os objetivos específicos são:

- (i) aplicar escaneamento tridimensional por laser *scanner* móvel (MLS) em cavernas de quatro litologias diferentes, por estação anual tropical brasileira (uma chuvosa – novembro a abril - e outra seca – maio a outubro, seguindo INMET);

- (ii) comparar espeleometrias entre métodos topográficos tradicional e tridimensional;
- (iii) testar análises morfológicas tridimensionais nas nuvens nas cavernas, avaliando se é possível reconhecer particularidades por litologia;
- (iv) testar viabilidade de uso do laser *scanner* móvel (MLS) como método de monitoramento de integridade física de cavidades naturais subterrâneas;
- (v) analisar contextos ambientais cavernícolas, a partir de dados tridimensionais, em estudos de caso;
- (vi) cadastrar as novas cavernas analisadas no ICMBio/CECAV - CANIE.

Por conseguinte, a organização de etapas executivas da dissertação foi sintetizada em fluxograma, apresentado a seguir na **Figura 2.1**.

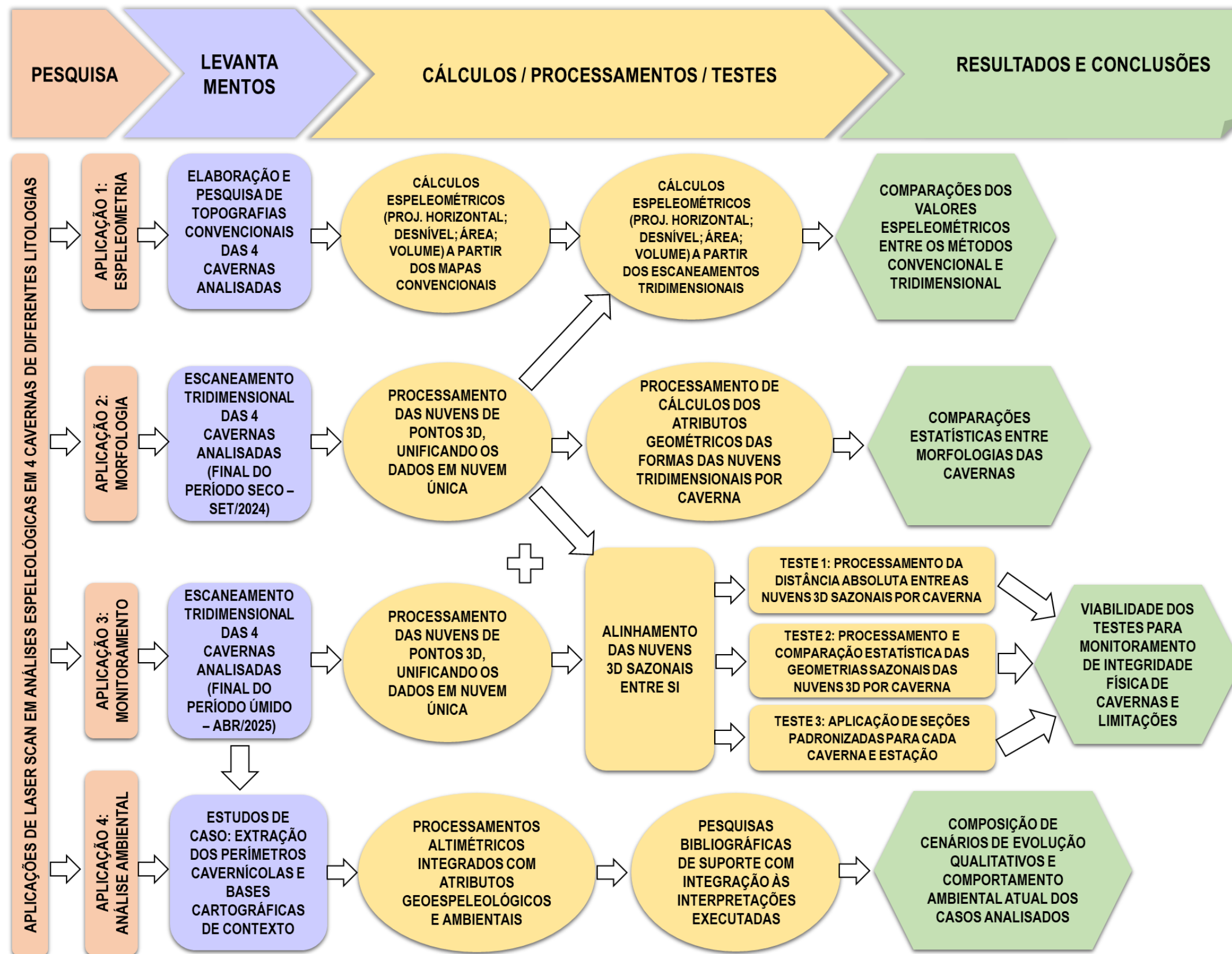


Figura 2.1. Fluxograma da organização da presente dissertação.

3 REFERENCIAL AO TEMA

Kaňuk *et al.* (2023) remontam as primeiras iniciativas do uso de *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) às décadas de 80 e 90, como em Altamira (Espanha, desde 1988) e caverna Cosquer (França, 1994). Descrevem que o TLS opera a partir de plataformas terrestres estáticas, geralmente colocadas em um tripé, com um *scanner* a laser girando em torno de seu eixo, denominado de sensor LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Ele registra o ângulo horizontal e vertical do feixe de laser emitido, o tempo que esse feixe leva para retornar de uma superfície ao *scanner*, além da quantidade desse feixe emitido que retornou, e pode fazer isso milhões de vezes por segundo.

A partir disso, os mesmos autores afirmam que ele pode calcular uma coordenada x, y, z, em relação ao *scanner* e atribuir um valor de tempo, intensidade, ângulo a cada ponto calculado a partir do retorno do laser de uma superfície. Conforme alcance, o equipamento tem de ser movido para próximo local, com sobreposição, reiniciando a captação para completar escaneamento completo de um alvo. Seus dados são transferidos por tecnologia “sem fio” para aparelhos de processamento (exemplo: computadores, *laptop's*, *tablet's*, celulares). Apesar da maior acurácia e densidade dos dados, há limitações de mobilidade, tempo e processamento como apontam Gallay *et al.* (2016).

Kaňuk *et al.* (2023) fazem distinção entre TLS e varredura a laser móvel (MLS – *Mobile Laser Scanner*), também denominado de portátil, o qual surgiu a partir da década de 2010. O princípio do MLS baseia-se nos registros de dois dispositivos sincronizados: a unidade de medição inercial (IMU - *Inertial Measurement Unit*) e o *scanner* a laser. A IMU registra os ângulos de orientação ao longo dos eixos x, y e z no espaço tridimensional para determinar a trajetória do sensor, cuja variação de mobilidade pode afetar a acurácia locacional resultante. As coordenadas dos pontos individuais registrados pelo *scanner* a laser são então calculadas com base na triangulação do laser (ângulo de emissão do pulso e distância) em relação à posição do *scanner*.

O principal benefício do MLS está na velocidade do mapeamento e na redução de sombras de dados devido ao movimento contínuo do *scanner* no espaço, proporcionando a oportunidade de escanear ao redor de qualquer objeto (Kaňuk *et al.*, 2023). Citam-se outras vantagens significativas, como na otimização do esforço necessário em campo, redução de exposição a riscos pela equipe, possibilidade de levantamentos segmentados (mais de uma campanha) e menor impacto ambiental causado pela redução da permanência da equipe no espaço subterrâneo (Araújo *et al.*, 2015 & 2016; Fernandes *et al.*, 2023; Sales *et al.*, 2025).

Os mesmos autores obtiveram maior velocidade na extração de volumes, área, geração de perfis. No método tradicional os cálculos são feitos manualmente, oferecendo risco de erro humano, enquanto nesse método o processo é semi-automatizado, cujos cálculos são realizados com maior precisão através de algoritmos contidos em *softwares*. Nesta linha, Cosso *et al.* (2014) acrescentam o fator crucial da ampliação da capacidade computacional de processamento do imenso volume de dados captados em escaneamentos, somando a novos cálculos e produtos secundários pelos *softwares*, mesmo aqueles de livre acesso.

Algumas ressalvas são apontadas em publicações quanto à utilização de laser *scanners* e seu processamento. Uma delas são as dificuldades de acessibilidade no interior de cavernas que podem limitar a forma de nuvens de ponto em relação à realidade (Araújo *et al.*, 2015; Fernandes *et al.*, 2023; Kaňuk *et al.*, 2023).

Segunda delas, corresponde à necessidade de inter-relação entre equipe de campo e escritório para interpretação das formas tridimensionais durante as análises no processamento. Conforme Sales *et al.* (2025), em função da necessidade de espacialização e compreensão de elementos cavernícolas, como desníveis, blocos, espeleotemas e outros mais sutis, seu registro complementar em campo revela limitações inerentes à resolução dos equipamentos.

Outra ressalva refere-se a interferências ambientais durante a captação, como temperatura e a presença de drenagens subterrâneas, umidade e aerossóis, as quais interagem na propagação dos sinais infravermelhos do laser, ocasionando divergência nas nuvens tridimensionais. Tal “efeito de atenuação atmosférica” ou *atmospheric attenuation effect*, é denominado por Nováková *et al.* (2022), assim como abordado por Nocerino *et al.* (2019).

Por fim, durante o processamento há o desafio do alinhamento de diversas nuvens captadas em uma só, podendo gerar duplas superfícies. Em soma, há questões referentes a capacidades computacionais de processamento, assim como para cálculos areais e volumétricos. Estas variáveis são bem demonstradas por Gallay *et al.* (2016), pois conforme a densidade ou simplificação da nuvem de pontos e o nível de detalhamento de processamento, variam-se o tempo necessário de processamento computacional e diferentes resultados são obtidos.

Em termos de aplicações, Idrees & Pradham (2016) apontam aplicação de sensores a laser em pesquisas de mapeamento e zoneamento espeleológicos com foco em topografias, arqueologia, paleoclima, geomorfologia, ecologia, educacional avaliação de riscos de estabilidade geotécnica, monitoramento de formas e movimentação de gelo, como Berenguer-Sempere *et al.* (2014) aplicaram na caverna com gelo de Peña Castil no norte da Espanha e Pfeiffer *et al.* (2023) na caverna com gelo Handsalm (Áustria).

Araújo *et al.* (2016) aplicaram em zoneamento geomecânico de caverna ferrífera em Carajás – PA, assim como Cardia *et al.* (2024) aplicaram avaliação geoestrutural na caverna San Michele (Itália) para monitoramento. Gallay *et al.* (2016), com foco em monitoramento, realizaram por seções padronizadas medições de tetos altos, volumes e isolamento de canais de teto na caverna Domica (Eslováquia).

Comparações entre diferentes equipamentos e intervalos temporais de escaneamento são realizadas por Grasso *et al.* (2023), através das distâncias de pontos entre as nuvens captadas da caverna Bossea (NW da Itália). O mesmo é aplicado por Dora *et al.* (2025) em seções padronizadas para a caverna Agios Georgios (NE da Grécia), sendo que em ambos os casos não houve aderência completa das distâncias absolutas entre as nuvens de pontos tridimensionais. Este fator aponta para a inerente obtenção de erros admissíveis em sensores a laser. Weinmann *et al.* (2017) testam as características geométricas de nuvens de pontos 3D (linearidade, planaridade e esfericidade) para classificar diferentes objetos contíguos.

Ressalta-se que apesar de amplas aplicações do LIDAR 3D na área de mapeamentos topográficos (Fernandes *et al.*, 2023; Almeida *et al.*, 2025; Dora *et al.*, 2025; Lima, 2025; Sales *et al.*, 2025), turísticos (Grohmann *et al.*, 2019; Tometzová *et al.*, 2020) e análises geotécnicas (Bordehore *et al.*, 2024 e 2025), pouco vem sendo explorado em análises ambientais e morfodinâmicas integrando a caverna ao seu entorno.

Paralelamente, testes de monitoramento morfológico / integridade física, incluindo sazonalidade tropical são inexistentes. O mesmo se aplica em análises comparativas entre diferentes litologias. Todas estas vertentes demandam avanço de aplicação em abordagens espeleológicas tridimensionais.

4 METODOLOGIA

4.1. Cavernas e litologias selecionadas

As cavernas foram selecionadas, em função da acessibilidade, para representar um exemplar de quatro litotipos representativos da porção central de Minas Gerais (Campo das Vertentes e Quadrilátero Ferrífero). Outras características foram consideradas como: (a) proximidade de potenciais impactos humanos, (b) morfologias e; (c) inserção na paisagem. Todas estas características que podem influenciar nas atividades de monitoramento cavernícola. A **Figura 4.1** apresenta suas localizações.

Quatro cavernas foram selecionadas para este estudo:

- (i) caverna JK (28,65 m de projeção horizontal - PH), em crosta detrítico-laterítica ferrífera paleogênica em Itabirito (Minas Gerais), adjacente a uma rodovia movimentada (BR-040);
- (ii) caverna Buraco do Inferno (64,84 m de PH), em suíte granítica paleoproterozoica em Resende Costa (Minas Gerais), lindeira ao centro urbano;
- (iii) caverna Gruta do Lajedo (194,78 m de PH), em quartzito mesoproterozoico (Formação São José) localizada em condição natural preservada no topo da Serra do Lenheiro, São João del-Rei (Minas Gerais). Entretanto, há impactos decorrentes de queimadas anuais em seu entorno;
- (iv) caverna Casa da Pedra (527,34 m de PH), em calcário proterozoico (Formação Barroso) próxima a atividade de mineração, em São João del-Rei.

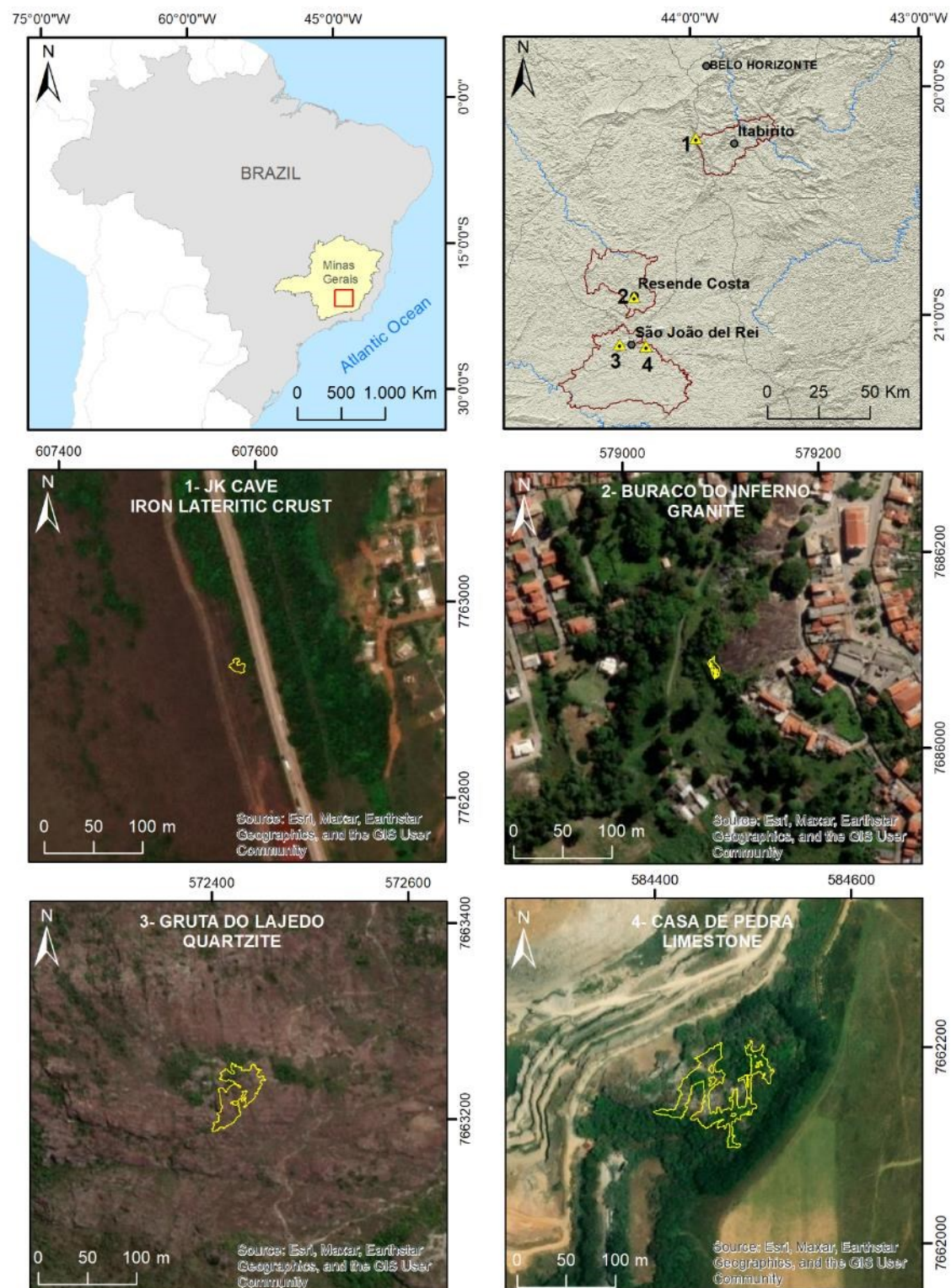


Figura 4.1. Localização das cavernas analisadas e seus contextos locais de inserção com a delimitação de seus perímetros.

4.2. Equipamentos, escaneamentos a laser e softwares

O equipamento portátil FJD Trion S1 foi utilizado como sensor LIDAR, composto por 16 sensores, capturando 320.000 pontos por segundo com alcance de 120 m e precisão de 2 cm. A **Tabela 4.1** apresenta os principais atributos dos escaneamentos sazonais realizados nas cavernas. As principais análises foram realizadas utilizando o *software* livre *CloudCompare* (versão 2.14.alpha – 12/09/2024). A topografia espeleométrica convencional e os cálculos foram realizados com os *softwares* Speleoliti© e AutoCAD®; além do uso de ArcGIS 10.8© para mapas. As análises estatísticas foram executadas através da extensão Microsoft Excel – XLSTAT 2025.

Tabela 4.1 - Principais atributos dos escaneamentos executados.

CAVERNA	BURACO DO INFERNO		JK		CASA DA PEDRA		LAJEDO	
LITOLOGIA	Granito		Crosta detrito laterítica		Calcário		Quartzito	
ESTAÇÃO	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida	Seca	Úmida
DATA DE CAPTURA	24/09/2024	08/04/2025	27/09/2024	11/04/2025	26/09/2024	10/04/2025	25/09/2024	09/04/2025
INTERVALO HORÁRIO DE CAPTURA	10:00 - 12:00	10:45 - 11:30	14:30 - 15:20	11:55 - 12:30	10:00 - 13:00	09:55 - 11:30	11:45 - 17:00	10:05 - 12:00
TEMPERATURA (C°)	20,4 - 22,1	15,6 - 18,0	29,7 - 32,4	22,4 - 23,4	16,3 - 25,1	17,2 - 19,2	21,8 - 30,6	15,7 - 19,9
NUVENS PARA TOTAL CAPTURA	2	2	1	1	7*	6*	12*	6*
TOTAL DE PONTOS 3D POR CAPTURA	10.179.224	8.938.498	3.996.516	3.512.442	85.039.473	76.613.450	30.129.856	31.085.880

*Variações nas quantidades de nuvens de pontos escaneadas para completar cavernas referem-se à otimização do percurso e entendimento da melhor acessibilidade entre as campanhas.

Para usos cartográficos e de interpretação ambiental, todos os limites das cavernas foram percorridos, sendo o georreferenciado efetuado a partir de GPS convencional GARMIN ETREX HCX *Legends*. Seguiu-se conforme etapa usual apontada por Sales *et al.* (2025), com definição de base GPS e ponto de visada para base definida na forma da caverna, determinando seu azimuth.

Em seguida, o processamento foi realizado em ambiente do *software* livre *Cloud Compare* (versão 2.14.alpha – 09/12/2024). As nuvens de pontos foram georreferenciadas entre si por pontos similares identificados em suas nuvens escaneadas por sobreposição de bordas (Grohmann *et al.*, 2019), integrando aquelas com várias nuvens 3D totais em uma só, compondo a morfologia da respectiva caverna.

Posteriormente, nuvens de pontos integradas foram "limpas", sendo excluídos os excessos (e/ou "ruídos") de pontos, referentes à vegetação das entradas, pontos captados externos aos limites da caverna (porventura captados por claraboias, dolinas e fendas), falsas superfícies ou pontos à esmo. Com a informação base pronta, as interpretações e análises na nuvem tridimensional integrada foram realizadas. No *software*, gerou-se o perímetro em planta da caverna para uso interpretativo com outras bases cartográficas em ambiente de sistema de informações geográficas pelo ArcGIS 10.8©.

4.3. Método da APLICAÇÃO 1 – ESPELEOMETRIA: Comparação dos valores espeleométricos entre topografias convencional e tridimensional

Esta aplicação segue o fluxograma da **Figura 4.2** abaixo.

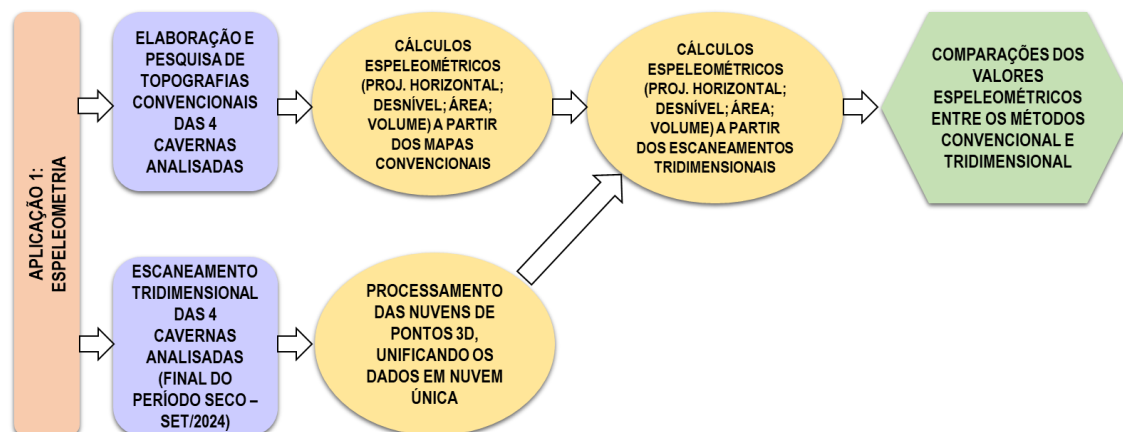


FIGURA 4.2. Fluxograma das etapas executadas para Aplicação 1: Espeleometria.

Os valores dimensionais espeleométricos executados seguiram o método tradicional, conforme explicado por Rubbioli (2019):

1. **Projeção Horizontal:** consiste em medir o somatório de comprimento das galerias projetadas em um plano horizontal;
2. **Desnível:** diferença de nível entre o piso mais alto da caverna e o piso mais baixo;
3. **Área:** corresponde ao cálculo areal interno ao perímetro em planta de uma caverna, mas desconsiderando pilares e recortes rochosos sobre ele pela maciço rochoso encaixante;
4. **Volume:** calcula-se pela multiplicação entre área em planta pela altura média da caverna. A altura média pode ser extraída por conjunto de medições verticais nas seções e perfis topografados, ou pelo cálculo médio das áreas verticais dos cortes e perfis, divididos por suas respectivas larguras.

Os resultados espeleométricos foram comparados entre o método por escaneamento 3D e o convencional, considerando-se os valores das diferenças, a porcentagem de ocorrências, a média das diferenças e a soma das diferenças. A **Tabela 4.2** apresenta as topografias consideradas para comparação dos métodos. Menciona-se que em termos de detalhe os níveis de detalhe correspondem ao a seguir:

- BCRA-3C: Levantamento magnético de baixa precisão. Ângulos horizontal e vertical medidos com precisão $\pm 2,5^\circ$ e distâncias medidas com precisão $\pm 50\text{cm}$; erro de posição da base menor que 50cm. Medidas de detalhe realizadas apenas nas bases topográficas.
- BCRA-4C: Levantamento magnético. Ângulos horizontal e vertical medidos com precisão entre $\pm 1^\circ$ e $2,5^\circ$, distâncias medidas com precisão de 1 cm e erro de posição da base menor que 10 a 25 cm. Medidas de detalhe realizadas apenas nas bases topográficas.
- BCRA-XD: Levantamento topográfico utilizando-se teodolito ou Estação Total em vez de bússola. Uma topografia de Grau X deve incluir notas descritivas dos instrumentos e das técnicas utilizadas, além de uma estimativa da provável precisão da topografia quando comparada com as demais topografias. Medidas de detalhe realizadas nas bases topográficas e entre elas, de modo a representar mudanças morfológicas na galeria.

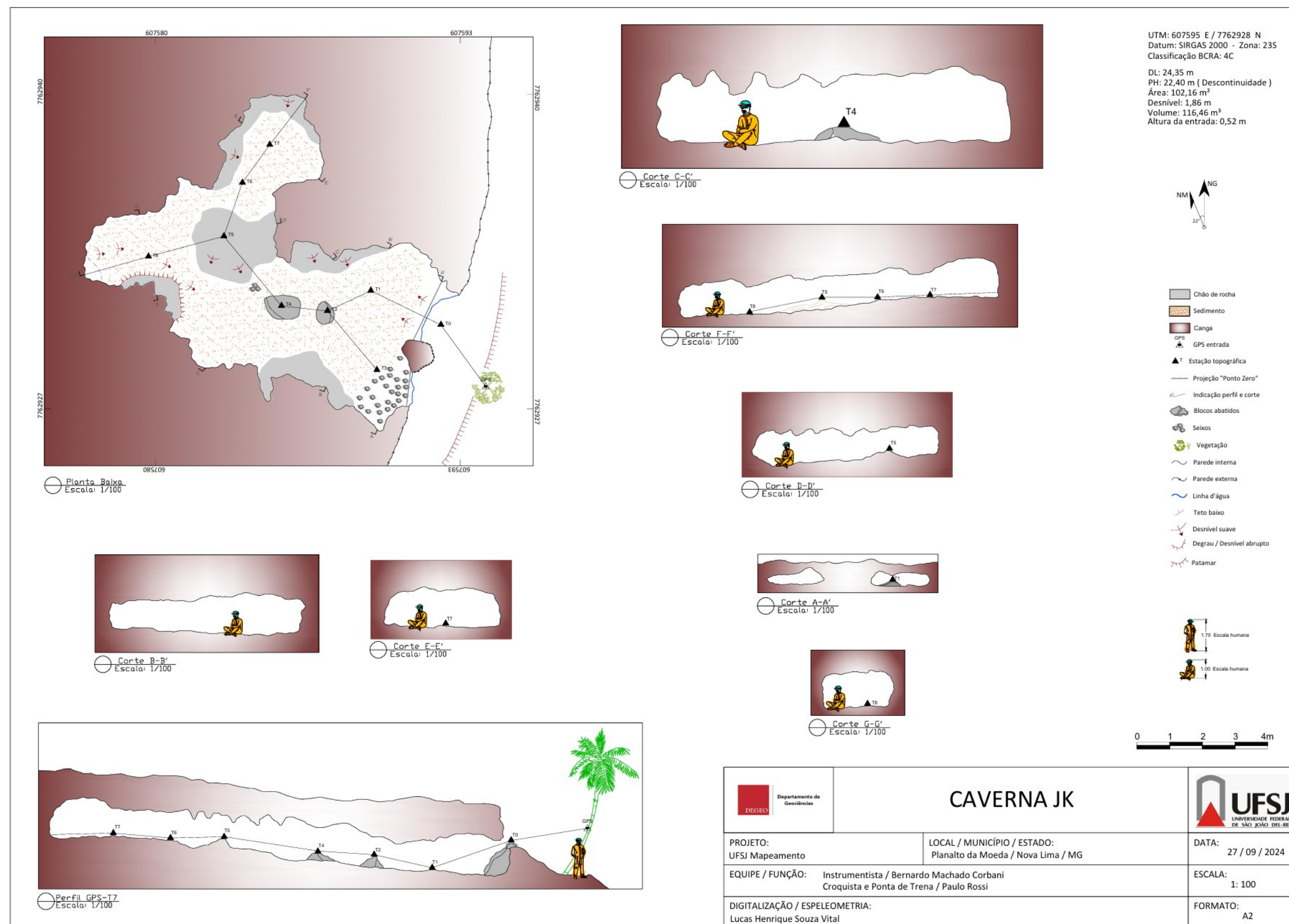
Tabela 4.2 – Atributos do mapeamento topográfico usados para cálculos espeleométricos a serem comparados.

ID	CAVERNA	MÉTODO TOPOGRÁFICO	NÍVEL DE DETALHE	ALTITUDE (m)	SIRGAS 2000 UTM - FUSO 23K - X	SIRGAS 2000 UTM - FUSO 23K - Y	DATA DE MAPEAMENTO
1	Buraco do Inferno	Convencional	BCRA-4C	1122	579097	7686068	23/04/2024
2	Buraco do Inferno	Tridimensional	BCRA-XD	1122	579097	7686068	24/09/2024
3	JK	Convencional	BCRA-4C	1366	607592	7762929	27/09/2024
4	JK	Tridimensional	BCRA-XD	1366	607592	7762929	27/09/2024
5	Casa de Pedra	Convencional	BCRA-3C**	920	584407	7662127	**Calculado de Silveira (1894) em IBGE (1939)
6	Casa de Pedra	Tridimensional	BCRA-XD	920	584407	7662127	26/09/2024
7	Lajedo	Convencional	BCRA-4C	1187	572404	7663217	13/06/2024
8	Lajedo	Tridimensional	BCRA-XD	1187	572404	7663217	25/09/2024

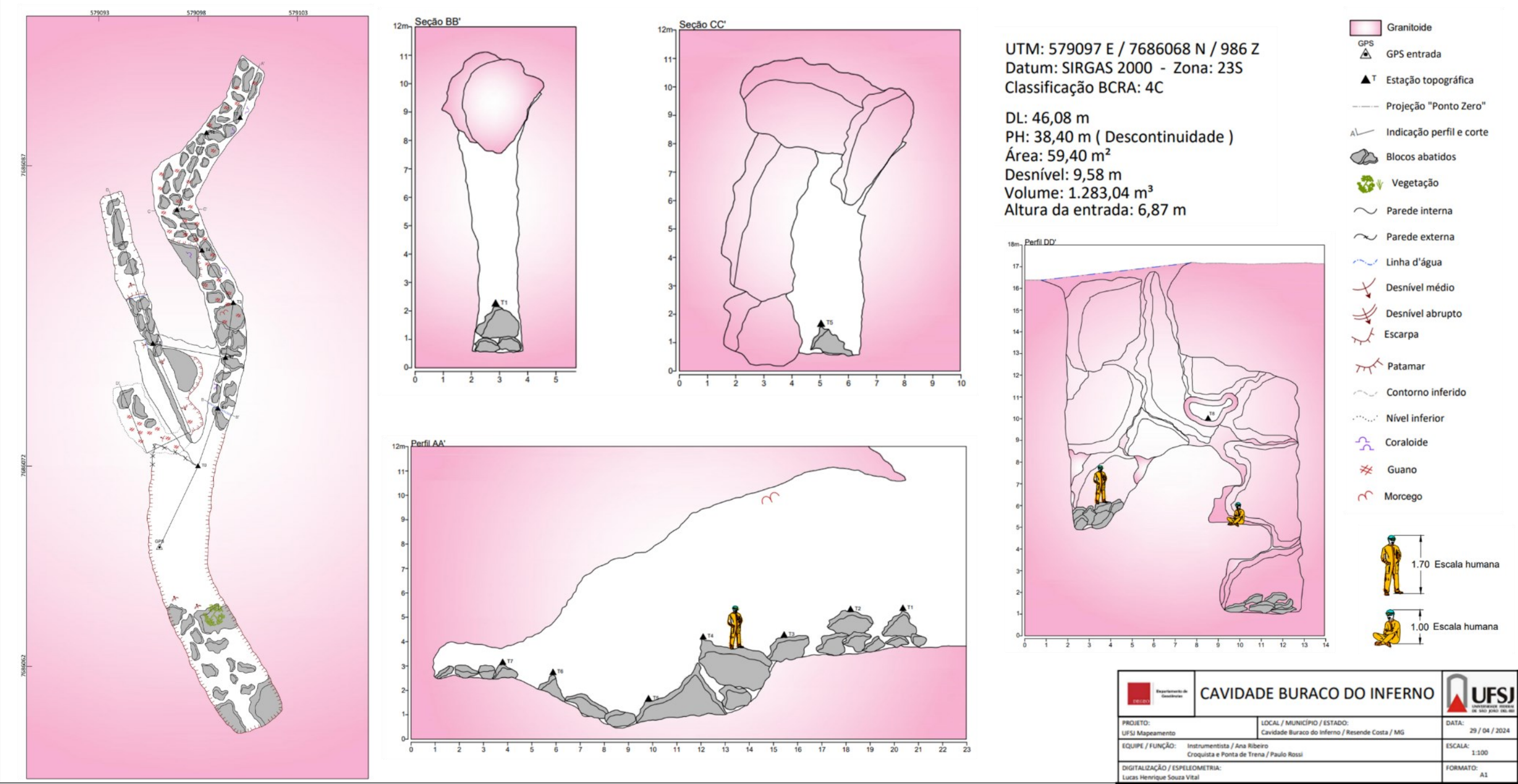
*Níveis de detalhe em acordo com o sistema BCRA: *British Cave Research Association*.

**Estabelecido com base na descrição bibliográfica de IBGE (1939).

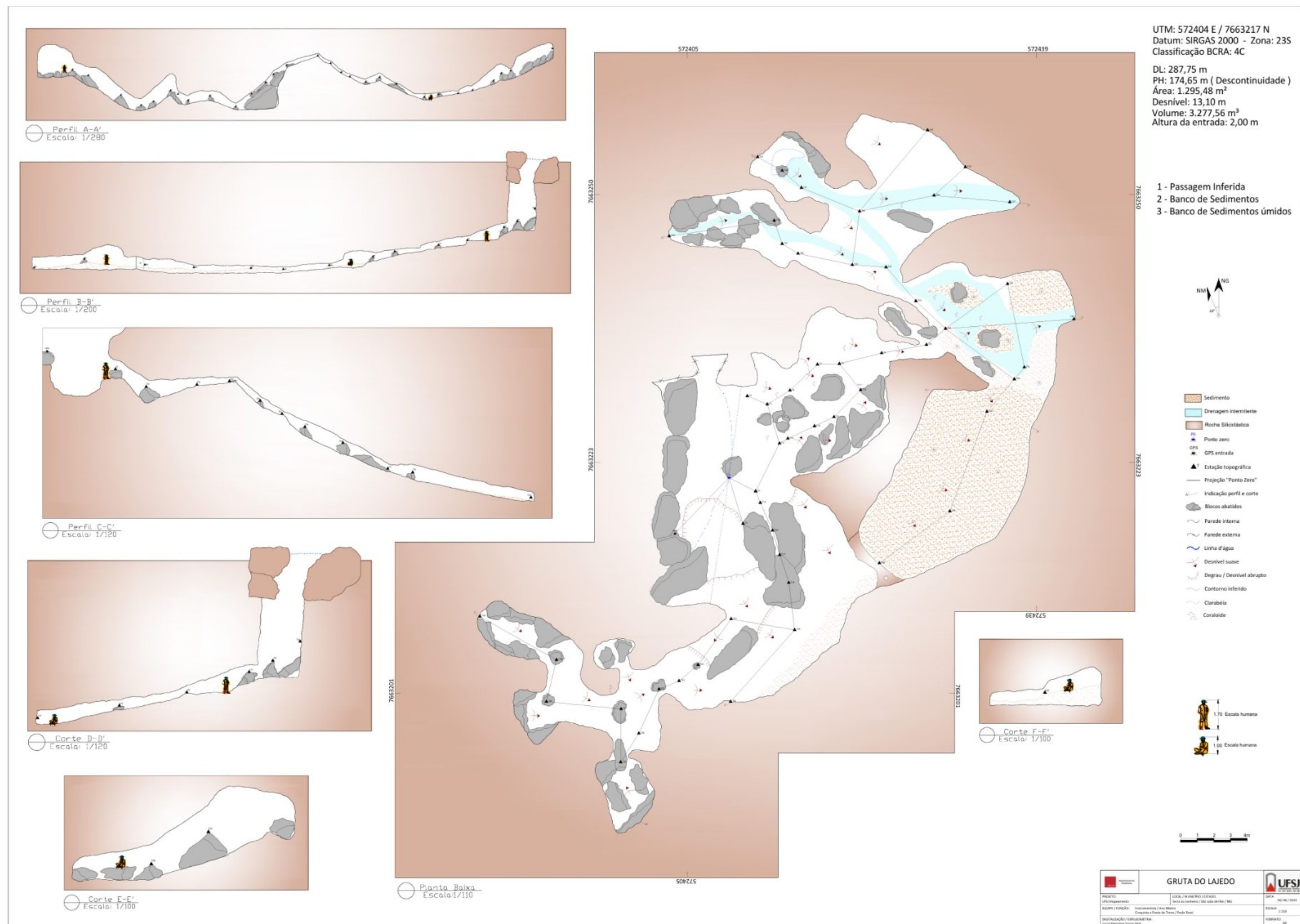
Os mapas topográficos convencionais resultantes para cálculos espeleométricos são apresentados na sequência pelos **Mapas 4.1; 4.2; 4.3; 4.4.**

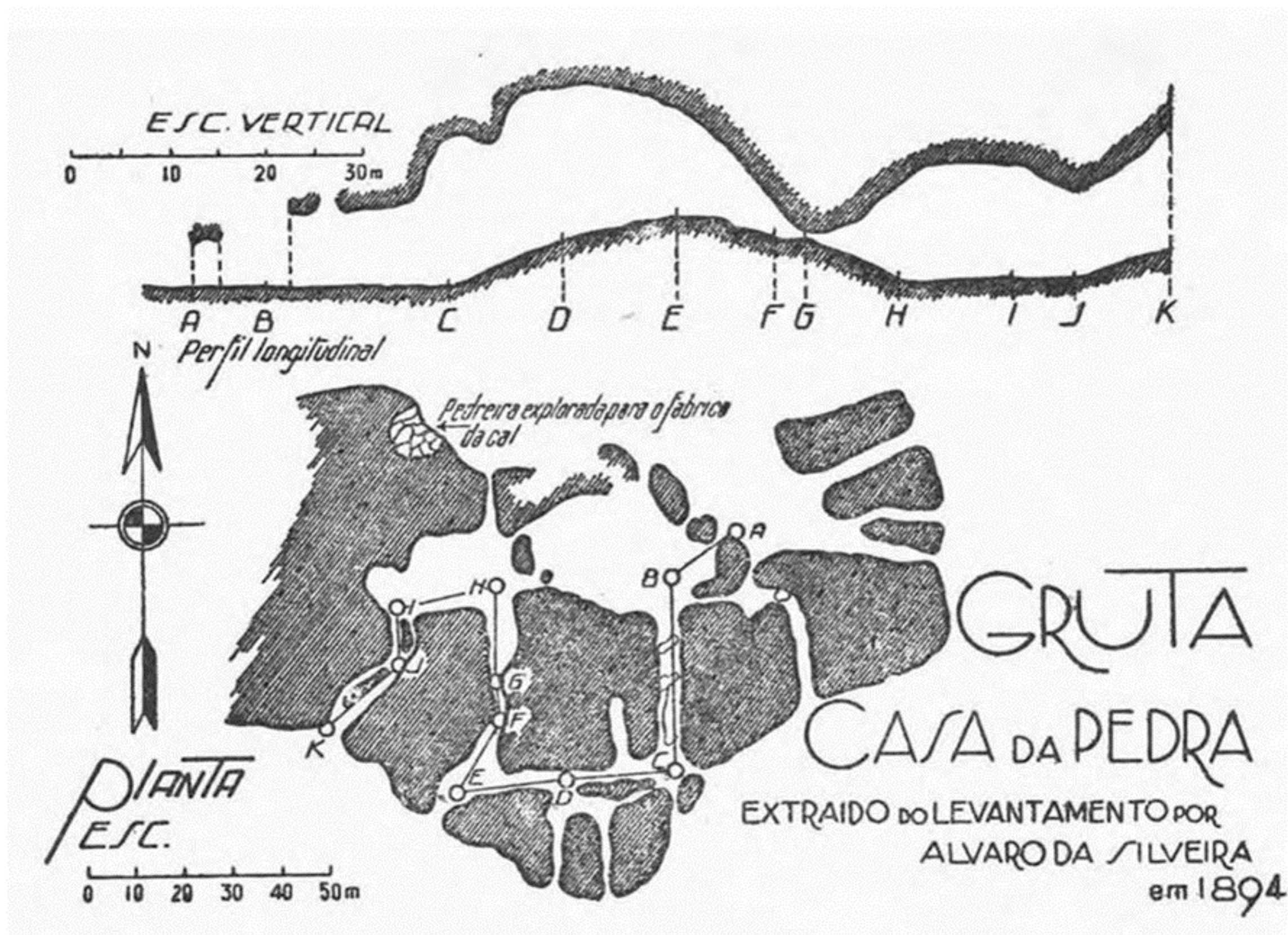


Mapa 4.1. Topografia convencional da caverna JK ferrífera, reduzido de seu tamanho original A2.



Mapa 4.2. Topografia convencional da caverna Buraco do Inferno em granito, adequada de seu tamanho original A1. Fonte: Rossi *et al.* (2024).





Mapa 4.4. Topografia convencional histórica utilizada para cálculos espeleométricos da caverna Casa da Pedra (Silveira, 1894 *apud* IBGE, 1939).

4.4. Método da APLICAÇÃO 2 – MORFOLOGIA: Comparação entre cavernas, por seus atributos geométricos tridimensionais

Esta aplicação segue o fluxograma da **Figura 4.3** abaixo.

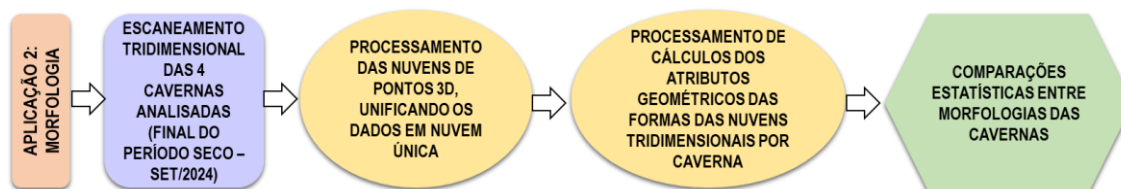


FIGURA 4.3. Fluxograma das etapas executadas para Aplicação 2: Morfologia.

Os dados, atributos 3D, resultam de uma característica geométrica específica da distribuição global ou local dos pontos. Os atributos 3D descritivos do comportamento geométrico local de uma nuvem de pontos derivam da matriz de covariância das coordenadas 3D em uma determinada vizinhança (Grilli *et al.*, 2019).

Para cada ponto da nuvem, uma matriz de covariância local por meio de análise de componentes principais é calculada usando raios específicos. Os autovalores (λ_1 , λ_2 , λ_3) são combinados para calcular um conjunto de características locais (normalmente com intervalo [0, 1]), como verticalidade, planaridade, variação de superfície (Verdi *et al.*, 2024).

No *software Cloud Compare*, para uma nuvem de pontos 3D de cada caverna, foram aplicados cálculos de covariância geométrica, com raio de cobertura de 50 cm, sendo: (i) taxa normal de variação da curvatura; (ii) linearidade e (iii) planaridade – exemplos na **Figura 4.4**; (iv) verticalidade; (v) esfericidade; (vi) variação da superfície; e (vii) rugosidade.

O raio de vizinhança de 50 cm foi definido com base em amostragem perceptível por humanos, cobertura consistente com as dimensões de todas as cavernas, capacidade de processamento computacional e indiferença dos resultados para

raios maiores. Além disso, é a dimensão recomendada mínima para acessibilidade, instalação e captação de um *laser scan* (condutos de 50 X 50 cm), conforme Araújo *et al.* (2015) seguido por Fernandes *et al.* (2023).

Os atributos geométricos foram selecionados pela semelhança aos usualmente observados em uma caracterização morfológica convencional de cavernas (muito usual a classificação de Palmer, 1991, 2003), além daqueles cujas variações pudessem individualizar o formato de uma caverna excepcional. Para cada fator geométrico, histogramas gaussianos foram gerados pelo *software*, dos quais a média e o desvio padrão foram listados, como na **Figura 4.4**.

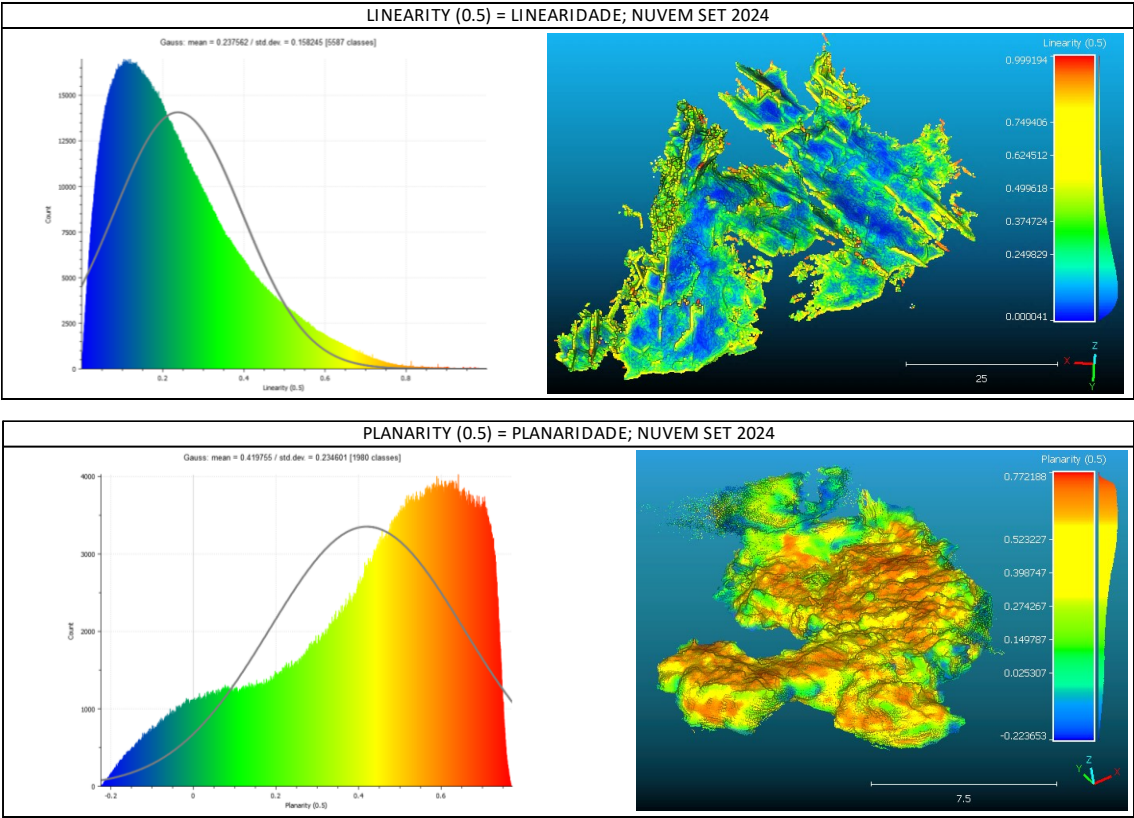


FIGURA 4.4. Exemplos de resultados dos processamentos dos atributos geométricos linearidade da Gruta do Lajedo (acima) e planaridade da JK (abaixo) em nuvens de setembro/2024, com os respectivos histogramas gaussianos.

Os dados utilizados foram dos escaneamentos realizados ao final da estação seca de 2024, conforme a **Tabela 4.3**.

Tabela 4.3 – Atributos geométricos médios (μ) e de desvio-padrão (σ) das nuvens utilizadas na aplicação morfológica.

CAVE	Buraco do Inferno	JK	Casa da Pedra	Lajedo
SCAN DATE	24/09/2024	27/09/2024	26/09/2024	25/09/2024
INTERVAL TIME FOR SCANNING	10:00 - 12:00	14:30 - 15:20	10:00 - 13:00	11:45 - 17:00
TEMPERATURE RANGE (C°)	20.4 - 22.1	29.7 - 32.4	16.3 - 25.1	21.8 - 30.6
NUMBER OF POINTS	10.179.224	3.996.516	85.039.473	30.129.856
NUMBER OF CLASSES	3,191	2,000	9,222	5,587
ROUGHNESS (0.5); GAUSS (μ)	0.055000	0.062402	0.053034	0.055882
ROUGHNESS (0.5); GAUSS (σ)	0.046900	0.050824	0.045675	0.047084
NORMAL CHANGE RATE CURVATURE (0.5); GAUSS (μ)	0.093200	0.070416	0.067154	0.091164
NORMAL CHANGE RATE CURVATURE (0.5); GAUSS (σ)	0.071500	0.049713	0.064088	0.069775
PLANARITY (0.5); GAUSS (μ)	0.573300	0.699142	0.653033	0.576972
PLANARITY (0.5); GAUSS (σ)	0.256500	0.192561	0.260694	0.236841
LINEARITY (0.5); GAUSS (μ)	0.238000	0.159088	0.214861	0.237562
LINEARITY (0.5); GAUSS (σ)	0.173800	0.125717	0.180759	0.158245
SURFACE VARIATION (0.5); GAUSS (μ)	0.093250	0.070416	0.067151	0.091164
SURFACE VARIATION (0.5); GAUSS (σ)	0.071500	0.049713	0.064088	0.069775
SPHERICITY (0.5); GAUSS (μ)	0.188500	0.141771	0.132107	0.185466
SPHERICITY (0.5); GAUSS (σ)	0.157900	0.106243	0.136255	0.155926
VERTICALITY (0.5); GAUSS (μ)	0.588300	0.214344	0.450642	0.324960
VERTICALITY (0.5); GAUSS (σ)	0.321100	0.273281	0.328020	0.266089

Posteriormente, foram verificadas as maiores e menores taxas médias para a amostra e caverna/atributo. Aplicou-se o método estatístico de PCA (*Principal Component Analysis*) no intuito de refinar e rastrear atributos geométricos mais relevantes por caverna/litologia, englobando o universo dos dados. Seu resultado é apresentado em formato gráfico de Biplot, associado cavernas aos atributos geométricos médios e de desvio-padrão.

Em seguida, aplicou-se outro método estatístico, o Agrupamento Hierárquico Aglomerativo (AHC - *Agglomerative Hierarchical Clustering*) de dissimilaridade pela distância euclidiana acompanhado de dendrograma, visando graficamente ao reconhecimento de comportamentos morfolitológicos aproximados entre si (cavernas de morfologias semelhantes). Ele indicará quais cavernas são mais semelhantes entre si, por agrupamentos.

4.5. Método da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO: Aplicação em monitoramento de integridade física (testes 1, 2 e 3)

Esta aplicação segue o fluxograma da **Figura 4.5** abaixo.

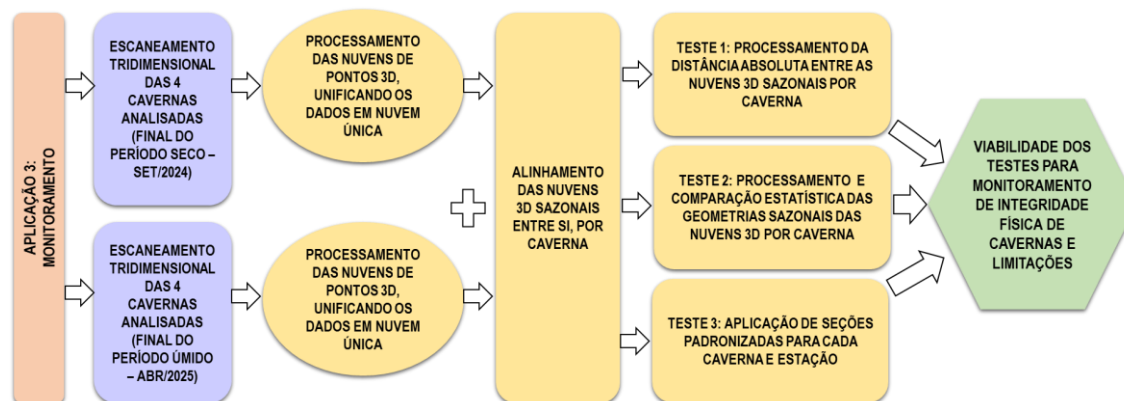


FIGURA 4.5. Fluxograma das etapas executadas para Aplicação 3: Monitoramento.

O monitoramento da integridade física envolve o processo de alinhamento das nuvens de pontos entre si no *software Cloud Compare*. Destaca-se que no período monitorado, houve ausência de mudanças físicas nas cavernas, ou seja, qualquer variação significativa nas nuvens partirá do princípio de outros tipos de interferência ambiental ou de análise.

As comparações para o monitoramento foram feitas utilizando três testes de métodos. Primeiro teste, por meio da comparação total das distâncias absolutas entre as nuvens de pontos apresentadas na **Tabela 4.1**, através da ferramenta *C2C Absolute Distance*, permitindo reconhecer locais de distanciamento entre nuvens ao longo do tempo intersazonal, ou seja, potenciais alterações da integridade física da caverna. O alinhamento das nuvens foi analisado levando em consideração o RMSE (*“Root Mean Square Error”*) ou Erro Quadrático Médio (EQM), indicativa da precisão de uma transformação ou ajuste de dados, medindo quão bem os pontos georreferenciados se alinham, no caso entre as nuvens sazonais. Aponta um nível de distorção morfológica entre os levantamentos sazonais.

Segundo teste, foram avaliados histogramas gaussianos com médias e desvios-padrão dos atributos geométricos entre as nuvens sazonais (exemplo na **Figura 4.6**) processados conforme supracitado na Aplicação 2 - MORFOLOGIA: (i) taxa normal de variação da curvatura (*normal change rate curvature*); (ii) linearidade (*linearity*); (iii) planaridade (*planarity*); (iv) verticalidade (*verticality*); (v) esfericidade (*sphericity*); (vi) variação da superfície (*surface variation*); e (vii) rugosidade (*roughness*).

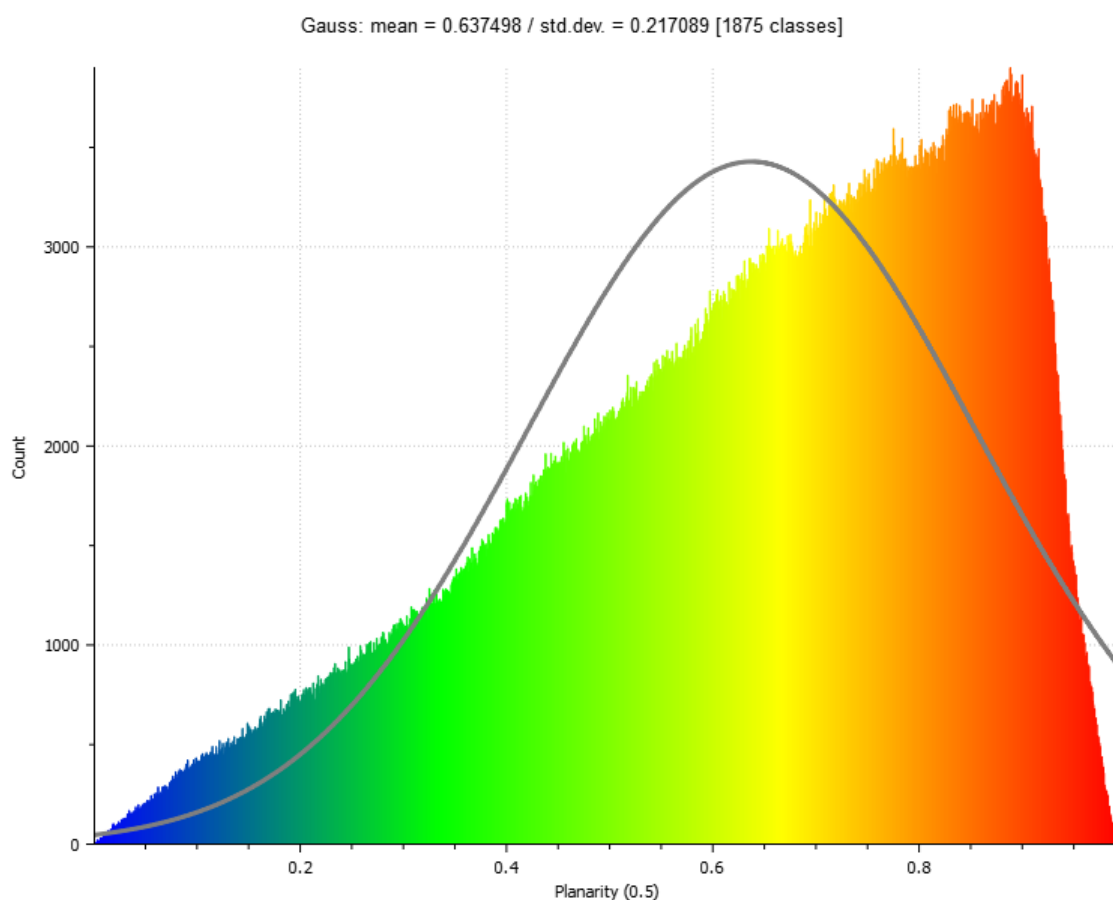


FIGURA 4.6. Exemplo de histograma gaussiano de planaridade resultante da caverna JK do escaneamento de abril/2025, com indicações da média e desvio padrão.

Tais valores foram tabulados, aplicou-se o teste de *Shapiro-Wilk* para verificar se há distribuição normal dos valores. Estes dados e avaliação estão apresentados na **Tabela 4.4** e **Tabela 4.5** a seguir, respectivamente.

Tabela 4.4 – Atributos geométricos médios (μ) e de desvio-padrão (σ) das nuvens, por captação sazonal e caverna.

CAVE	Buraco do Inferno		JK		Casa da Pedra		Lajedo	
SCAN DATE	24/09/2024	08/04/2025	27/09/2024	11/04/2025	26/09/2024	10/04/2025	25/09/2024	09/04/2025
INTERVAL TIME FOR SCANNING	10:00 - 12:00	10:45 - 11:30	14:30 - 15:20	11:55 - 12:30	10:00 - 13:00	09:55 - 11:30	11:45 - 17:00	10:05 - 12:00
TEMPERATURE RANGE (C°)	20.4 - 22.1	15.6 - 18.0	29.7 - 32.4	22.4 - 23.4	16.3 - 25.1	17.2 - 19.2	21.8 - 30.6	15.7 - 19.9
NUMBER OF POINTS	10.179.224	8.938.498	3.996.516	3.512.442	85.039.473	76.613.450	30.129.856	31.085.880
NUMBER OF CLASSES	3,191	2,990	2,000	1,875	9,222	8,753	5,587	5,576
ROUGHNESS (0.5); GAUSS (μ)	0.055000	0.0597	0.062402	0.066984	0.053034	0.055959	0.055882	0.058599
ROUGHNESS (0.5); GAUSS (σ)	0.046900	0.0490	0.050824	0.053554	0.045675	0.047291	0.047084	0.048102
NORMAL CHANGE RATE CURVATURE (0.5); GAUSS (μ)	0.093200	0.1036	0.070416	0.087817	0.067154	0.082383	0.091164	0.101841
NORMAL CHANGE RATE CURVATURE (0.5); GAUSS (σ)	0.071500	0.0715	0.049713	0.063105	0.064088	0.071919	0.069775	0.071382
PLANARITY (0.5); GAUSS (μ)	0.573300	0.552467	0.699142	0.637498	0.653033	0.619178	0.576972	0.557863
PLANARITY (0.5); GAUSS (σ)	0.256500	0.252208	0.192561	0.217089	0.260694	0.265051	0.236841	0.239411
LINEARITY (0.5); GAUSS (μ)	0.238000	0.2344	0.159088	0.181121	0.214861	0.213215	0.237562	0.231938
LINEARITY (0.5); GAUSS (σ)	0.173800	0.1750	0.125717	0.129854	0.180759	0.170844	0.158245	0.157320
SURFACE VARIATION (0.5); GAUSS (μ)	0.093250	0.1036	0.070416	0.087817	0.067151	0.082374	0.091164	0.101841
SURFACE VARIATION (0.5); GAUSS (σ)	0.071500	0.0715	0.049713	0.063105	0.064088	0.071920	0.069775	0.071382
SPHERICITY (0.5); GAUSS (μ)	0.188500	0.2132	0.141771	0.181381	0.132107	0.167607	0.185466	0.210199
SPHERICITY (0.5); GAUSS (σ)	0.157900	0.1626	0.106243	0.142690	0.136255	0.161700	0.155926	0.163161
VERTICALITY (0.5); GAUSS (μ)	0.588300	0.5929	0.214344	0.237500	0.450642	0.465760	0.324960	0.325913
VERTICALITY (0.5); GAUSS (σ)	0.321100	0.3198	0.273281	0.281448	0.328020	0.329587	0.266089	0.269943

Tabela 4.5 – Resultado do teste estatístico Shapiro-Wilk, avaliando tipo de distribuição dos valores geométricos entre as nuvens sazonais por caverna.

Shapiro-Wilk test	p-value (Two-tailed)	Interpretação da distribuição dos valores (seco/úmido)
Buraco do Inferno	0,006	Anormal
JK	0,000	Anormal
Casa da Pedra	0,006	Anormal
Lajedo	0,025	Anormal

Como em todos os quatro casos não há normalidade de distribuição, comum em dados espeleológicos comparativos (Nicacio *et al.*, 2017), aplicou-se o teste estatístico de *Wilcoxon*, com base em Goldstein-Greenwood (2022). Trata-se de teste não paramétrico utilizado para comparar duas amostras relacionadas (emparelhadas) ou medidas repetidas que não seguem uma distribuição normal, frequentemente usado como alternativa ao teste *T de Student*. Ele avalia se há diferenças significativas entre as medianas das duas amostras iguais ao longo de um intervalo de tempo. O intuito é verificar, se pela mediana dos atributos geométricos no período seco, comparados ao úmido, as nuvens tridimensionais apresentam diferenças significativas. Resumindo, seguiram-se os passos:

1-Extração de médias e desvios-padrão dos sete atributos geométricos de cada caverna pela sazonalidade de escaneamento; > 2-Aplicação do teste estatístico Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos dados; > 3-Em função da anormalidade, aplicação do teste estatístico Wilcoxon, verificando diferenças significativas nas medianas dos dados sazonais.

Terceiro teste, pela definição de seções padronizadas para ambas as nuvens sazonais, com espessuras de 50 cm cada (com base em Araújo *et al.*; 2015 Fernandes *et al.*; 2023), seguindo as mesmas diretrizes anteriores de raio de análise, que foram posteriormente comparadas entre si. As comparações foram feitas visualmente e pelos valores do perímetro, número de pontos e volume de cada seção, como no exemplo da **Figura 4.7** à frente.

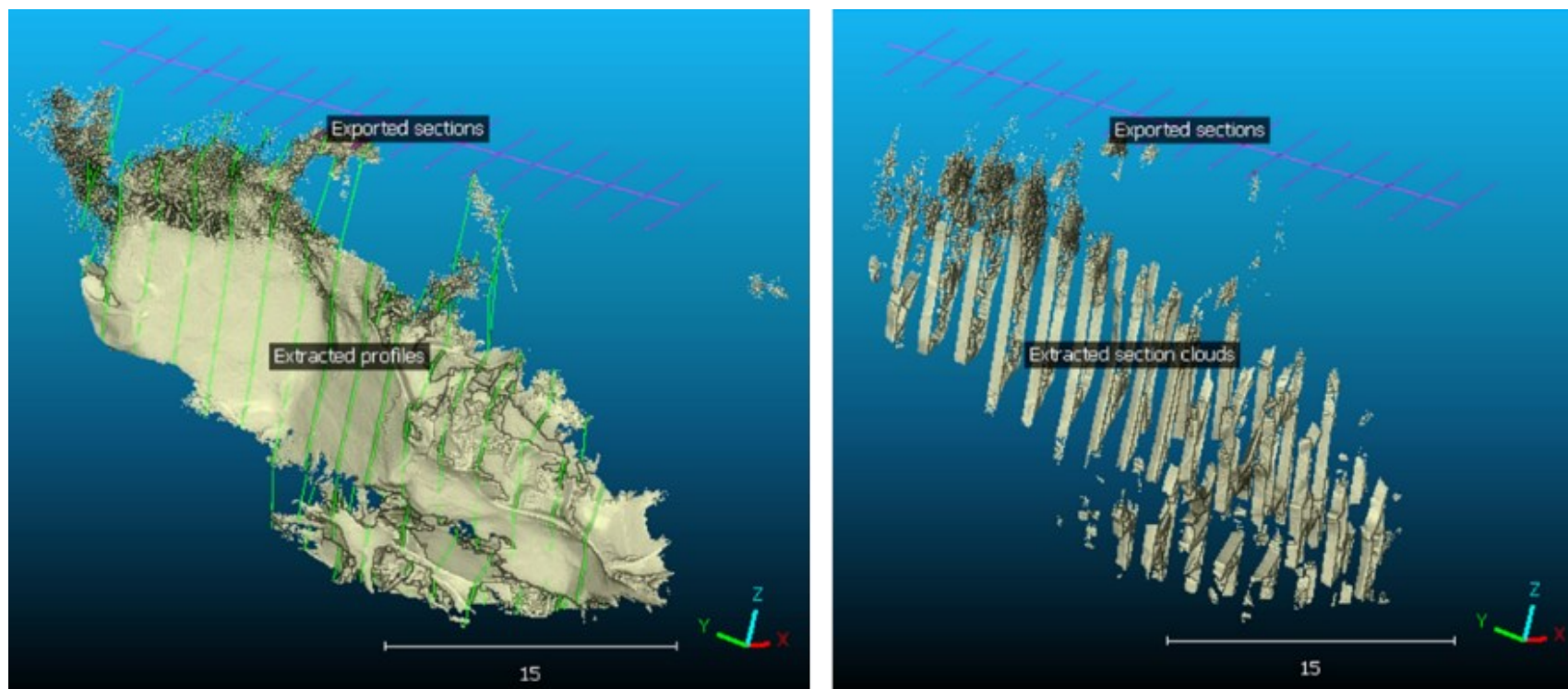


Figura 4.7. Exemplo para a caverna Buraco do Inferno de linhas de 16 seções padronizadas em nuvem de pontos 3D: seções fixas em linha extraídas em cada nuvem sazonal (à esquerda); nuvens de pontos de 50 cm de largura extraída em cada seção para cada nuvem (à direita), posteriormente comparadas em valores de perímetro, número de pontos e volume. Fonte: Rossi *et al.* (2025a).

4.6. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL: Estudos de caso nas cavernas (I) Casa da Pedra, (II) Gruta do Lajedo, (III) Buraco do Inferno e (IV) JK

Esta aplicação segue o fluxograma da **Figura 4.8** abaixo.



FIGURA 4.8. Fluxograma das etapas executadas para Aplicação 4: Análise Ambiental.

4.6.1. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Estudo de caso I: Interpretação evolutiva da planície do Rio das Mortes e Gruta Casa da Pedra, a partir do uso de escaneamento a laser tridimensional

Como equipamento laser *scanner* tridimensional portátil utilizou-se o modelo FJD Trion S1. Os *escaneamentos* foram executados em duas etapas: (I) uma em 26/09/2024 com seis nuvens setorizadas ao longo da caverna; (II) uma em 10/04/2025 com uma nuvem extra, cobrindo área complementar. Seguiram-se as etapas seguintes descritas no item 4.2.

Com a informação base pronta, as interpretações e análises altimétricas na nuvem tridimensional integrada foram realizadas. O total de pontos da nuvem é 58.526.583, com o intervalo total de altura de 18,09 metros. A **Figura 4.9** demonstra os cenários bruto e processado da nuvem 3D da Casa da Pedra.

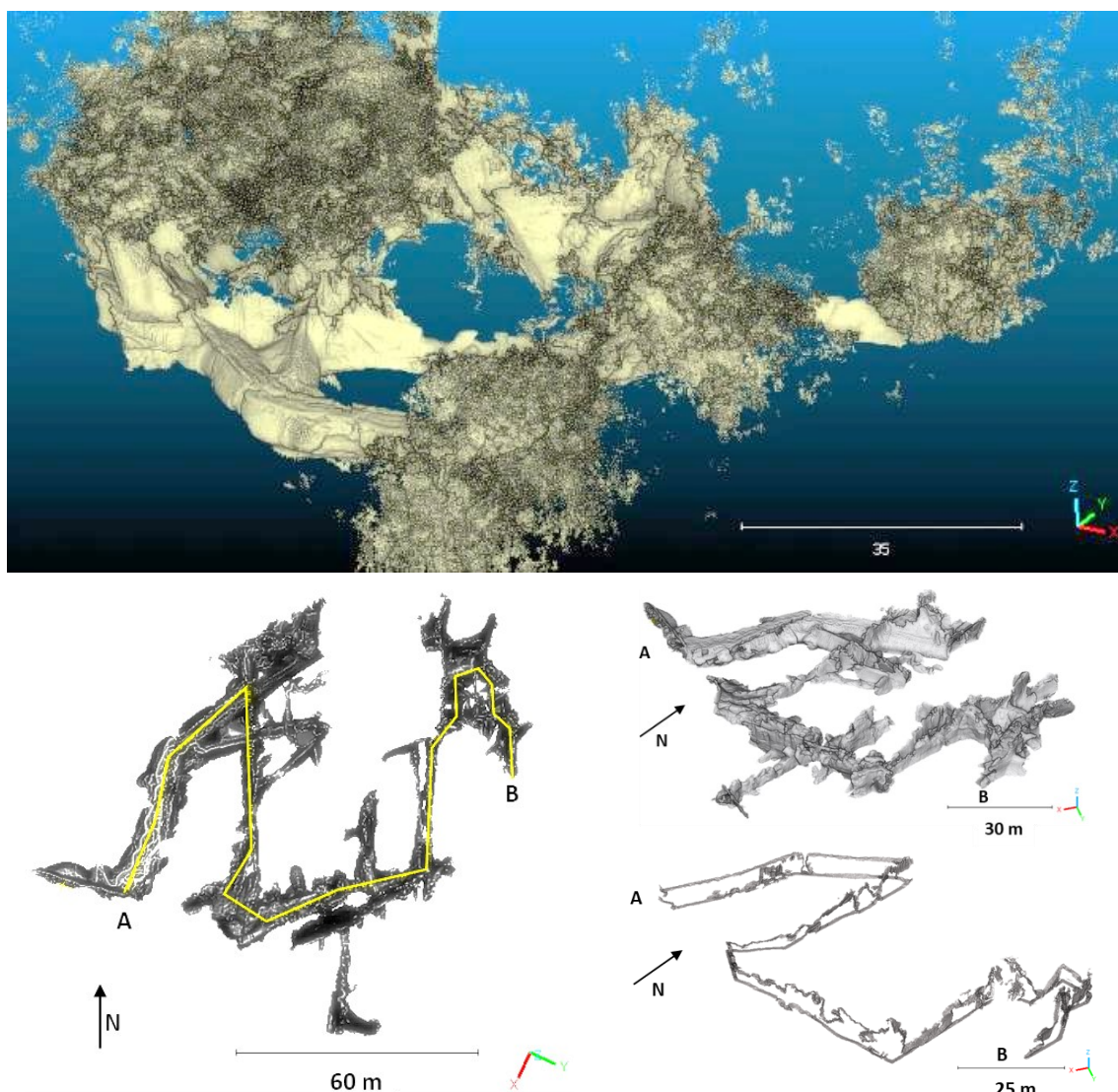


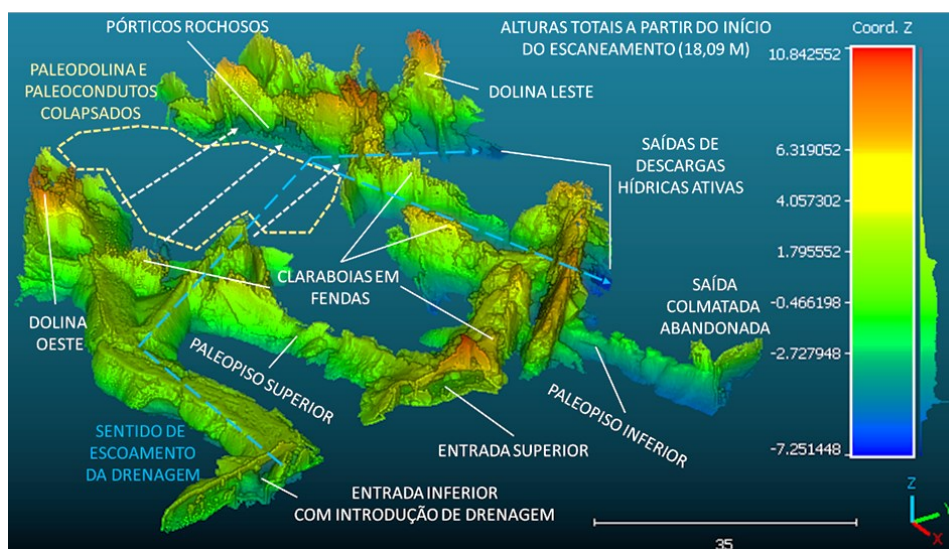
Figura 4.9. Visualização tridimensional da nuvem de pontos bruta integrada, antes da etapa de “limpeza” (acima) e pós processo de limpeza (abaixo).

Em ambiente de sistema de informações geográficas, pelo *software* ArcGIS 10.8 (ESRI®, 2019), foram integradas as bases de IGAM (2002), sendo: (I) modelo digital de elevação (MDE) com pixels de 25 metros da bacia hidrográfica regional do Rio Grande; (II) ottobacias geradas a partir do MDE anterior; (III) rede hidrográfica gerada com o processamento do MDE anterior.

Além disso, sua sobreposição com a base geológica de carta de São João del-Rei (Ribeiro *et al.*, 2002) e imagens de bancos online disponíveis. Geraram-se perfis altimétricos entre caverna e redes hidrográficas locais, entendendo as variações altimétricas entre o perímetro da gruta, incisões fluviais e limites de suas planícies.

As principais formas de carstificação e sedimentação para as correlações altimétricas foram: lineares; dolinares; canais de teto; paleopisos; marcas residuais de sedimentos; paleocondutos; seções de condutos alargados; pilares em pórticos rochosos; espeleotemas puros ou impuros; tendência de ajuste dos fluxos hídricos subterrâneos. Alguns exemplos são expostos na **Figura 4.10**.

Integrando o conjunto dos resultados com as feições identificadas, variações altimétricas, unidades geomorfológicas e datações relativas existentes na bibliografia, interpretaram-se fases de cenário evolutivo da caverna Casa da Pedra e seu entorno.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.10. Morfologia tridimensional da gruta Casa da Pedra com exemplos de atributos e feições morfológicas: (a) nuvem de pontos tridimensional filtrada, tematizada pela escala de alturas a partir do escaneamento 3D (18,09 m totais), com indicações de feições e dinâmica hídrica principais; (b) panorama do salão da denominada entrada superior; (c) denominada entrada inferior, com destaque para função atual de sumidouro para fluxo fluvial, controlado ao nível laminar; (d) salão principal resultante de coalescência de condutos transversais e três saídas, cujos acúmulos de maticos demonstram o colapso de paleodolina truncando suas continuidades; (e) Local abaixo da denominada dolina leste, a partir da qual se dá a descarga de fluxo fluvial em ressurgência logo adiante.

4.6.2. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Estudo de caso II: Exemplo de captura de drenagem de cabeceira serrana por desenvolvimento de carste não-tradicional. O caso da Gruta do Lajedo no topo da Serra do Lenheiro em São João del-Rei – MG.

A topografia tridimensional com sensor LIDAR (*Light Detection And Ranging*) se deu pelo equipamento laser *scanner* tridimensional móvel ou portátil (*Mobile Laser Scanner – MLS*) modelo FJD Trion S1. Seguiram-se as etapas seguintes descritas no item 4.2. Com a informação base pronta, as interpretações na nuvem tridimensional integrada foram realizadas. O total de pontos da nuvem é 31.085.880, com o intervalo total de altura de 28,83 metros. No *software*, gerou-se o perímetro em planta da caverna para uso interpretativo com outras bases cartográficas. A **Figura 4.11** demonstra os diferentes resultados de topografia obtidos.

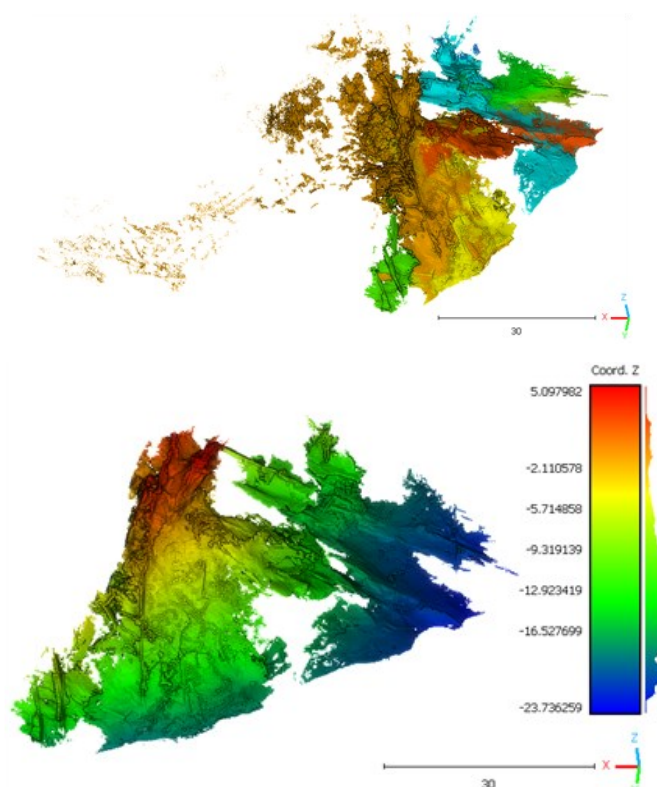


Figura 4.11. Resultados visuais de visadas transversais: na etapa de junção das nuvens de pontos 3D (acima); resultado tridimensional oblíquo após processo de “limpeza da nuvem”, com indicação das alturas a partir do início do escaneamento (abaixo).

O método atingiu o nível de detalhe BCRA-XD, conforme *British Cave Research Association*. Este nível, por descrição padrão, corresponde a levantamento topográfico utilizando-se teodolito ou Estação Total, ou equipamento equivalente, em vez de bússola com medidas de detalhe realizadas nas bases topográficas e entre elas, de modo a representar mudanças morfológicas na galeria.

Em ambiente de sistema de informações geográficas, pelo *software* ArcGIS Desktop 10.8 (ESRI®, 2019), foram integradas as bases de IGAM (2002), sendo: (I) modelo digital de elevação (MDE) com pixels de 25 metros da bacia hidrográfica regional do Rio Grande; (II) otobacias geradas a partir do MDE anterior; (III) rede hidrográfica gerada com o processamento do MDE anterior, conforme demonstrada na **Figura 4.12**.

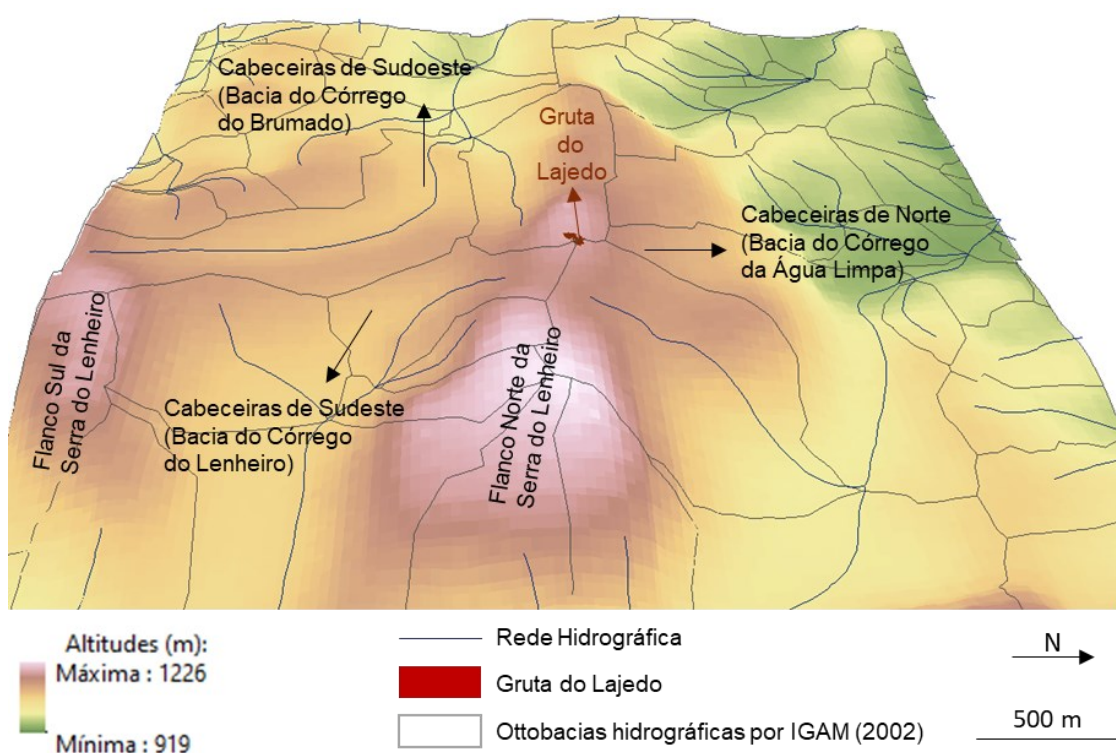


Figura 4.12. Inserção da Gruta do Lajedo sobre relevo e hidrografia (IGAM, 2002) tridimensionalizadas. Atentar para contexto de interflúvio de bacias hidrográficas no flanco norte da Serra do Lenheiro. Exagero de 1,5X.

A partir destas, atualizou-se as interpretações de campo e das topografias para ajuste do limite de bacia de contribuição hídrica, considerando a influência cavernícola. Somada a essa, caracterizou-se a inserção da caverna por meio das zonas hídricas do sistema, delimitadas em termos de: recarga, introdução, circulação e descarga, identificando fatores morfológicos que corroborem sua evolução.

Em termos de sistema cárstico são consideradas ao mínimo quatro zonas hídricas. Existem zonas de recarga, que funcionam como áreas superficiais pelas quais as águas pluviais são captadas para o sistema. Há as zonas de infiltração ou de introdução, pelas quais os fluxos hídricos drenantes adentram as porções subterrâneas do sistema. As zonas de circulação se referem àquelas subterrâneas por onde há o trânsito subterrâneo e/ou cavernícola de escoamentos hídricos. Por fim, as zonas de descarga são os exutórios pelos quais os escoamentos hídricos são expelidos para o ambiente exocárstico, em cursos fluviais ou terrenos sem influência cárstica. Entretanto vale ressaltar que, conforme a escala de análise, estas zonas ocorrem de modo simultâneo e cada uma implica em geoformas correlatas (Travassos, 2019; Ford & Williams, 2007).

4.6.3. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Estudo de caso III: Buraco do Inferno: registro de caverna em granito no centro urbano de Resende Costa-MG, como indício dos eventos de evolução do relevo regional

Através dos mapeamentos topográficos convencional e tridimensional, cujos métodos estão apresentados nos Itens 4.2 e 0, seus resultados foram aliados a duas escalas de análise:

- 1- Escala local na caverna: reconhecimento e interpretação de aspectos geoespeleológicos nas dimensões observáveis locais, entendendo o comportamento erosivo e intempérico que a caverna granítica demonstra. Foram avaliados aspectos de morfologia; depósitos químicos, clásticos e orgânicos; influência hídrica; comportamentos estruturais e genéticos.
- 2- Escala regional do entorno: através da interpretação de aspectos físicos regionais, com base em consulta a bibliografias pertinentes, traçou-se indícios que corroborem cenários da evolução morfodinâmica do relevo.

Este estudo é possível pelo contexto já há muito abordado na literatura, os efeitos morfotectônicos sofridos pela borda sul do Cráton São Francisco, a partir do evento de abertura do Oceano Atlântico e principalmente por pulsos isostáticos de soerguimento a partir do Mioceno (Mioto, 1990; Saadi, 1991; & Valadão, 2009).

Tais eventos teriam provocado o surgimento de bacias sedimentares neotectônicas no entorno de São João del-Rei, além dos soerguimentos de corpos plutônicos paleoproterozoicos sob a forma de pães-de-açúcar, como no caso em questão pela legenda VI nas redondezas de Ritópolis da **Figura 4.13**.

Antigas estruturas proterozoicas e arqueanas teriam sido reativadas no reajuste do relevo regional, criando novas formas de relevo locais. Um desses exemplos

corresponde ao batólito subjacente ao centro da cidade de Resende Costa, em cuja borda localiza-se a caverna Buraco do Inferno.

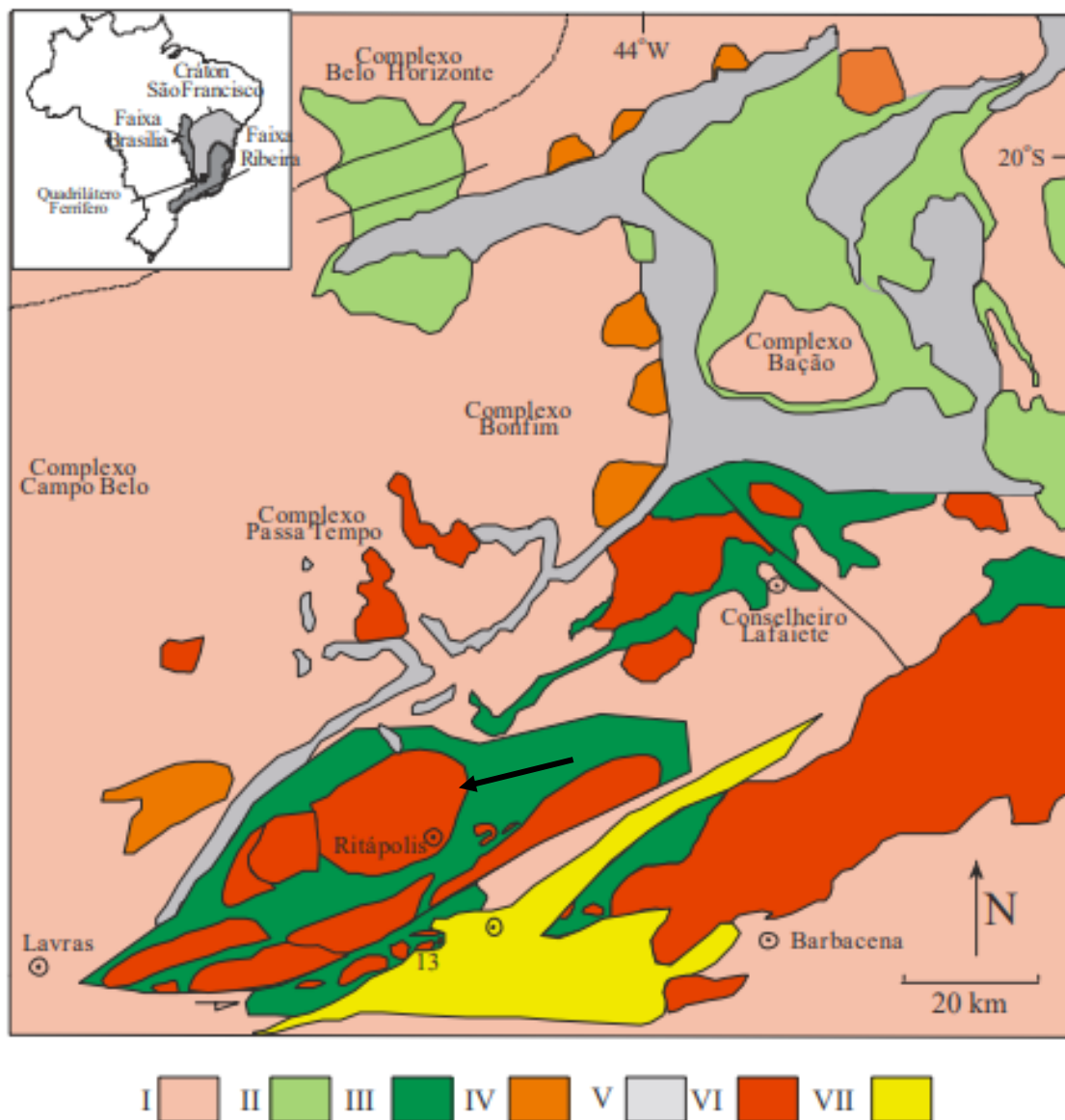


Figura 4.13. As principais unidades que compõe a geologia da borda meridional do cráton São Francisco. I – Complexos arqueanos; II – *Greenstone belt* Rio das Velhas; III – *Greenstone belt* (Nazareno, Dores do Campo e Rio das Mortes); IV – Corpos plutônicos neoarqueanos; V – Supergrupo Minas; VI – Corpos plutônicos paleoproterozóicos (alvo da caverna analisada, pela seta); VII – Megassequências São João del Rei, Carandaí e Andrelândia. Fonte: Ávila (2000) *apud* Costa (2010).

4.6.4. Método da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Estudo de caso IV: Caverna JK, caso de caverna em crosta detrítico-laterítica em lateral de rodovia. Características e aspectos genético-evolutivos

A posição adjacente à rodovia de principal ligação à Belo Horizonte foi fator para escolha de interpretação das condições evolutivas CNS. A caverna se encontra a cerca de 10 metros da rodovia BR-040. Entretanto, demonstra muitas características evolutivas de cavidades em crostas detrítico-lateríticas.

Sua condição permite, com avaliação associada de bibliografia, a determinação de cenários evolutivos naturais, assim como influências de intervenções antrópicas, no caso da implantação da rodovia BR-040. Dessa maneira, em função de interpretações qualitativas, subsidiadas pelo escaneamento 3D, cujos métodos estão apresentados nos Itens 4.2 e 0, aplicaram-se as seguintes escalas de análise:

- 1- Escala local na caverna: reconhecimento e interpretação de aspectos geoespeleológicos nas dimensões observáveis locais, entendendo o comportamento erosivo e intempérico que a caverna ferrífera demonstra. Foram avaliados aspectos de morfologia; depósitos químicos, clásticos e orgânicos; influência hídrica; comportamentos estruturais e genéticos.
- 2- Escala regional do entorno: através da interpretação de aspectos físicos regionais, com base em consulta a bibliografias pertinentes, traçou-se indícios que corroborem cenários da evolução morfodinâmica do relevo.

A caracterização geomorfológica regional, referente ao Sinclinal Moeda (**Figura 4.14**) consiste numa subdivisão das unidades que o compõem, sendo elas as abas externas e o seu platô interno em relação à inserção da caverna.

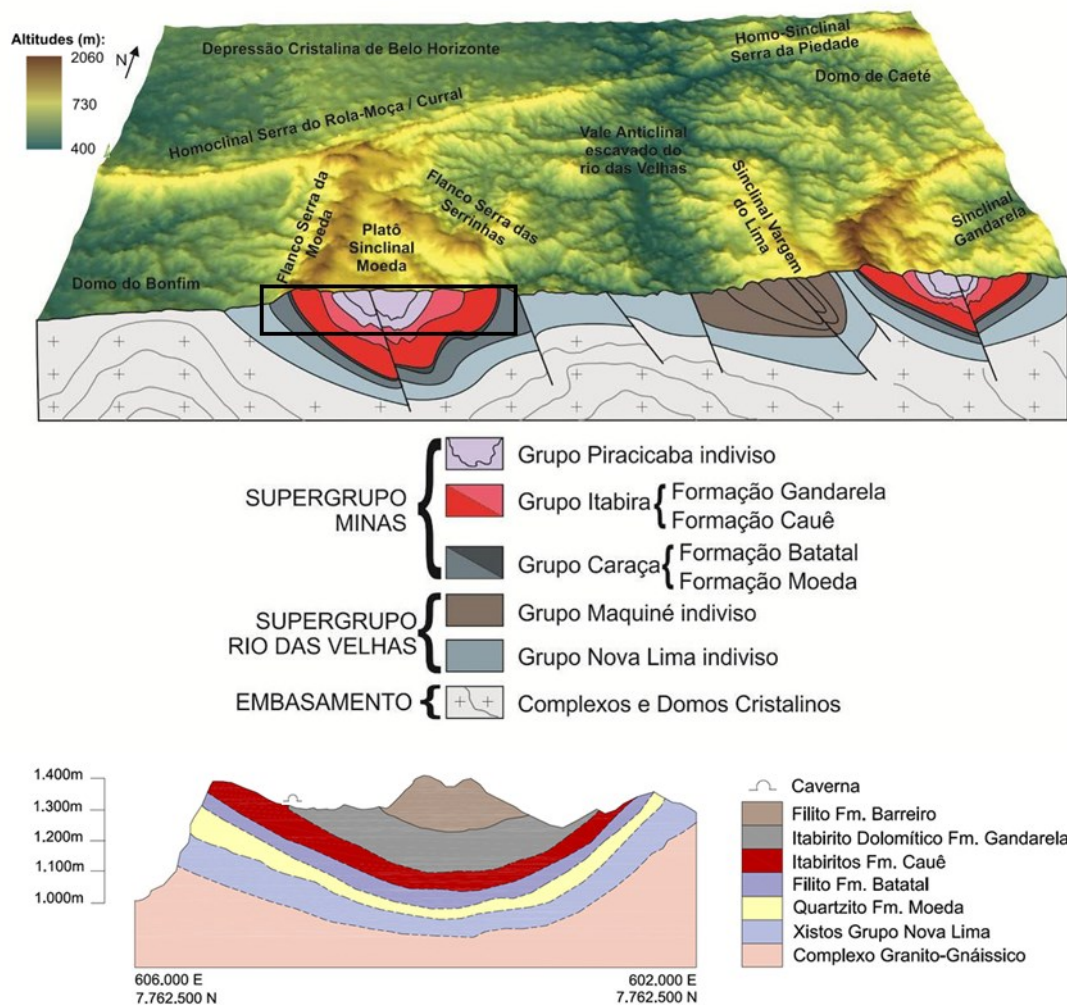


Figura 4.14. Localização aproximada da área de estudos, em quadrante preto, mostrando a geologia e megaestruturas do Quadrilátero Ferrífero, incluindo condição de inserção da caverna JK no perfil de detalhe (modificado de Calux, 2013).

Externamente, o sinclinal é composto por rochas extremamente resistentes, ou seja, por quartzitos da Formação Moeda (Grupo Caraça) e itabiritos da Formação Cauê (Grupo Itabira), formando flanco leste na Serra das Serrinhas (mapeamento IBGE, 1977) e o flanco leste da Serra da Moeda, em cuja vertente interna insere-se a caverna.

As vertentes internas sobre os itabiritos são formadas pelo plano de foliação, que por rampas encouraçadas detrito-lateríticas e rampas de colúvio se unem às

camadas de deposição com solos mais profundos e com ocorrência disseminada de voçorocas. Trata-se do interior preenchido por rochas menos resistentes às intempéries (xistos, filitos e dolomitos dos grupos Itabira e Piracicaba).

Consequentemente, suas cristas do tipo “*hogbacks*”, muitas vezes cobertas por canga, atingem altitudes entre 1500 e 1600 metros e, por erosão diferencial, adquirem escarpamentos íngremes e exumação rochosa que ultrapassam 400 metros. Em sua condição de elevada altimetria, o platô adquire uma importante influência sobre a drenagem regional, como se observa na borda ocidental da unidade correspondente ao divisor de águas entre as bacias do Rio Paraopeba a Oeste e do Rio das Velhas a Leste (CPRM, 2004).

Entre os limites externos e o platô interno há um degrau de cerca de 100 a 150 metros com declividades em torno de 30° a 50°. Neste ponto ocorre formação de rampas encouraçadas ou de colúvio, onde insere-se a caverna JK, que adentra a composição colinosa do platô, com morfologia côncava-convexa de arredondada a aplainada com faixas de altitude de 1200 a 1300 metros. Suas declividades giram em torno de 5° a 15° com diferenciações de 40 a 80 metros e abrigam uma rede de drenagem mediana de padrão dendrítico (CPRM, 2004).

Esse quadro estrutural indica um antigo padrão endorréico recentemente aberto através dos entalhes dos ribeirões Mata-Porcos, Capitão da Mata e córrego dos Fechos que geraram grandes deposições coluviais em área de relevo agitado, esvaziamento da drenagem e disseminação dos processos de deslizamento e voçorocamento nas zonas de cabeceiras (CPRM, 2004).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados da APLICAÇÃO 1 – ESPELEOMETRIA: Comparação dos valores espeleométricos entre topografias convencional e tridimensional

Primeiramente, apresentam-se os resultados tridimensionais das nuvens de pontos integradas por caverna, apresentados na **Figura 5.1**. A partir delas, foram calculadas as espeleometrias tridimensionais, a serem comparadas com o método tradicional, cujos mapas estão apresentados no capítulo de metodologia.

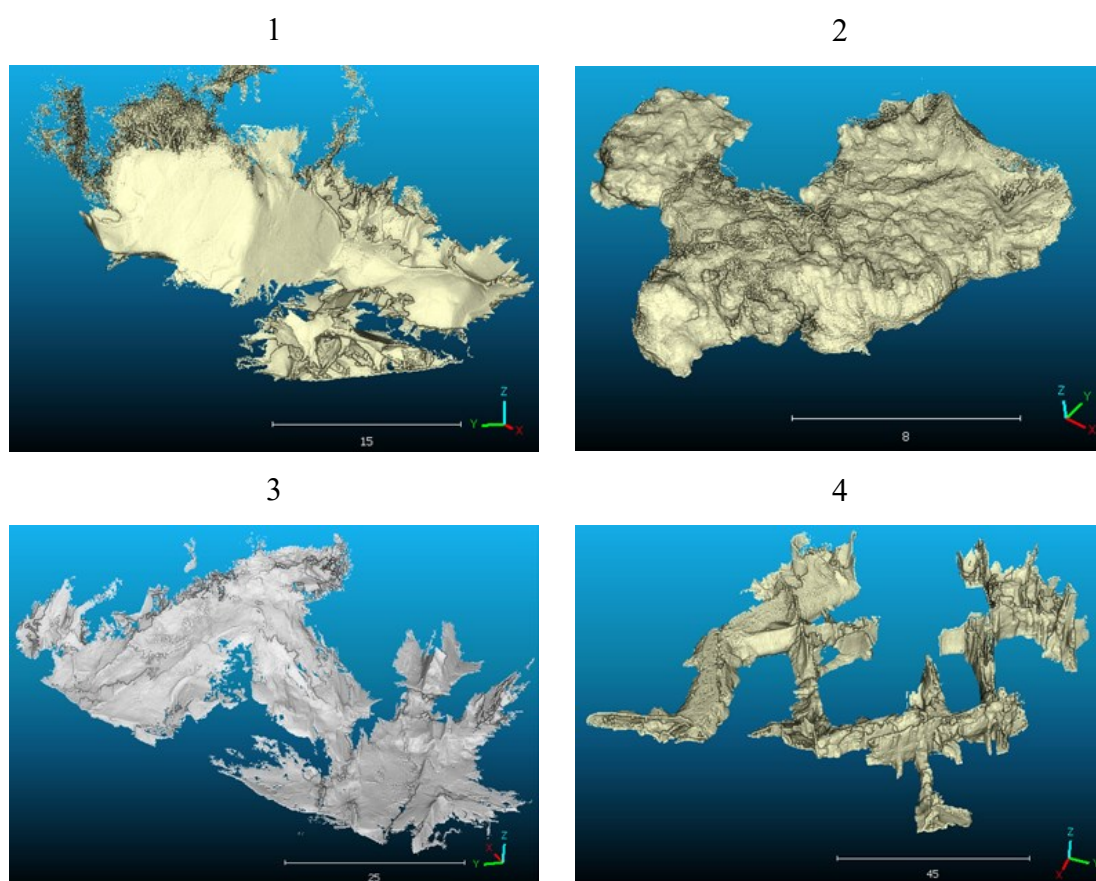


Figura 5.1. Nuvem de pontos por caverna processada para cálculo espeleométrico. Em ordem: 1-Buraco do Inferno; 2- JK; 3-Lajedo; 4- Casa de Pedra. Escala em metros.

Em sequência, apresentam-se pelo **Gráfico 5.1** os valores espeleométricos conforme o método aplicado de modo comparativo.

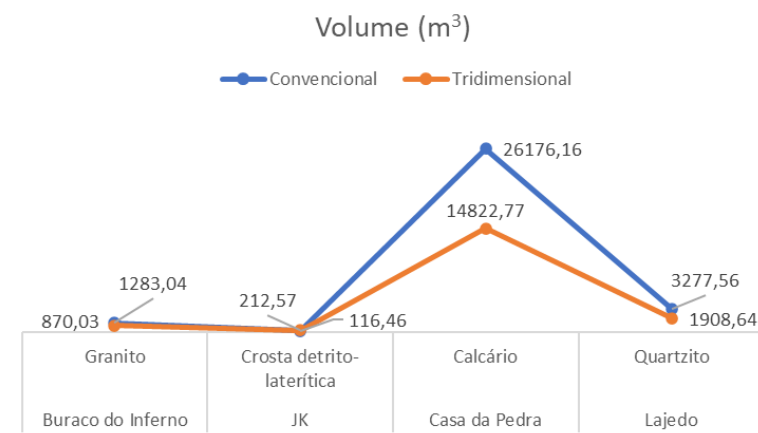
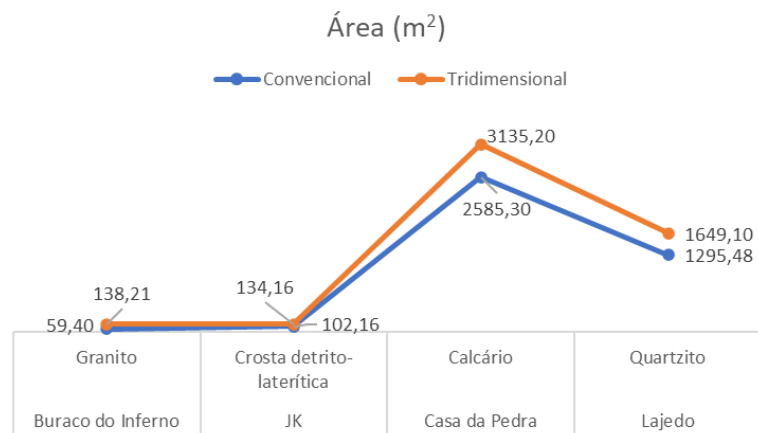
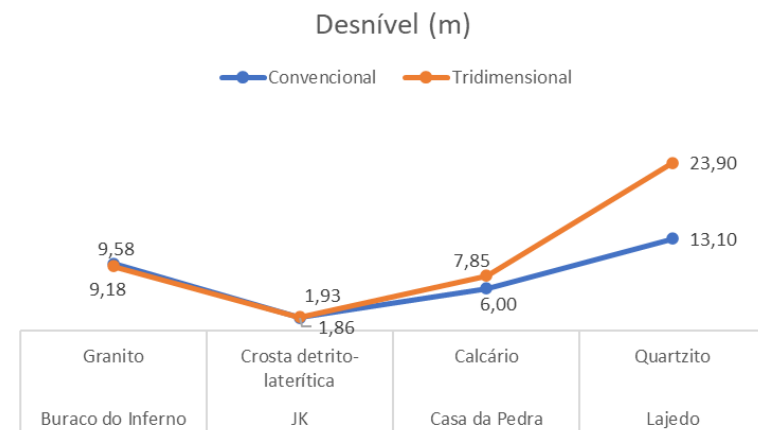
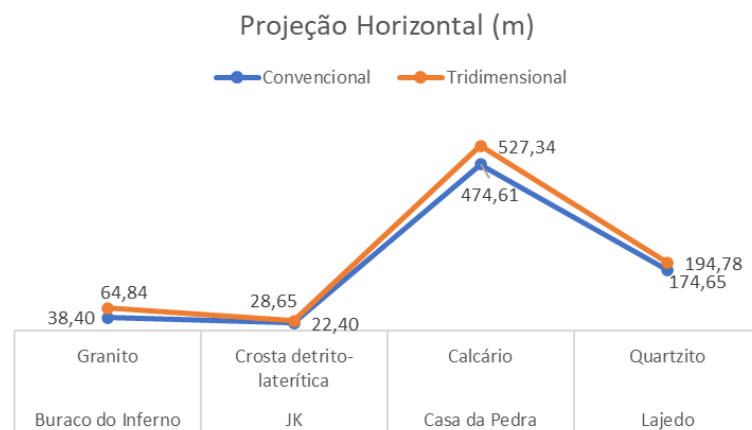


Gráfico 5.1. Comparativos dos resultados de valores espeleométricos por atributo, entre os métodos de mapeamento.

A projeção horizontal e a área aumentaram em todos os casos, o desnível em 75% e a redução do volume ocorreu em três quartos das cavernas. As médias e somas das diferenças acompanharam os níveis de magnitude de cada tipo de dimensão, cuja sequência crescente de valor em cavernas horizontais, no geral, seguem de desnível, por projeção horizontal e área a volume.

Especificamente para a soma total das diferenças, no desnível foi de 12,32 m e a projeção horizontal foi de 105,55 m. A soma das diferenças na área foi de 1.014,33 m² e o volume apresentou redução total de -13.039,21 m³. Valores estes apresentados na **Tabela 5.1**.

Tabela 5.1 – Diferenças, suas médias, somas e porcentagem de diferença entre espeleometria tridimensional e convencional.

CAVERNA	DIFERENÇA ENTRE MÉTODOS	DIFERENÇA ENTRE PROJEÇÕES HORIZONTAIS (m)	DIFERENÇA ENTRE DESNÍVEIS (m)	DIFERENÇA ENTRE ÁREAS (m ²)	DIFERENÇA ENTRE VOLUMES (m ³)
Buraco do Inferno	3D - Convencional	26,44	-0,4	78,81	-413,01
JK	3D - Convencional	6,25	0,07	32,00	96,11
Casa da Pedra	3D - Convencional	52,73	1,85	549,90	-11.353,39
Lajedo	3D - Convencional	20,13	10,8	353,62	-1.368,92
	PORCENTAGEM DE CASOS COM AUMENTO DO VALOR	100% >	75% >	100% >	25% >
	MÉDIA	26,39	3,08	253,58	-3.259,80
	SOMATÓRIO	105,55	12,32	1.014,33	-13.039,21

As diferenças encontradas para área e volume, assim como fatores de interferência nos cálculos, como pilares, inclinação do piso e generalização em planta, acompanharam as tendências apontadas por Fernandes *et al.* (2024) e Lima (2025) em cavernas ferríferas, para níveis de detalhe entre o BCRA-4D e BCRA-5D (convencionais) para com o BCRA-XD (tridimensional ou maior nível de detalhe disponível atualmente).

Simultaneamente, ressalta-se que as diferenças também acompanharam a escala de dimensão das cavernas. A menor diferença ocorreu na caverna ferrífera JK, seguida pela granítica Buraco do Inferno e pela quartzítica Gruta do Lajedo, com as maiores diferenças na Casa da Pedra. Em outras palavras, maiores diferenças acompanharam as maiores cavernas.

5.2. Resultados da APLICAÇÃO 2 – MORFOLOGIA: Comparação entre cavernas, por seus atributos geométricos tridimensionais

Lembra-se que nas quatro cavernas, foram aplicadas análises geométricas de covariância em sua nuvem 3D, com raio de abrangência de 50 cm, referentes a:

- (i) taxa de mudança normal da curvatura (*curvature normal change rate*),
- (ii) linearidade (*linearity*),
- (iii) planaridade (*planarity*),
- (iv) verticalidade (*verticality*),
- (v) esfericidade (*sphericity*),
- (vi) variação de superfície (*surface variation*) e
- (vii) rugosidade (*roughness*).

Os resultados serão interpretados no sentido classificar a morfologia cavernícola. Em seguida, os resultados foram comparados estatisticamente a fim de verificar qual atributo geométrico pesa mais em qual caverna/litologia e quais cavernas apresentam maior semelhança morfológica.

A **Figura 5.2** e a **Figura 5.3** apresentam exemplos de resultados de média e desvio padrão dos atributos geométricos em histogramas e exemplos de nuvens tridimensionais. A análise dos atributos geométricos das nuvens por caverna permitiu comparar qual caverna apresentou a maior variância nos resultados, englobando as duas campanhas de varredura, mostradas no **Gráfico 5.2**.

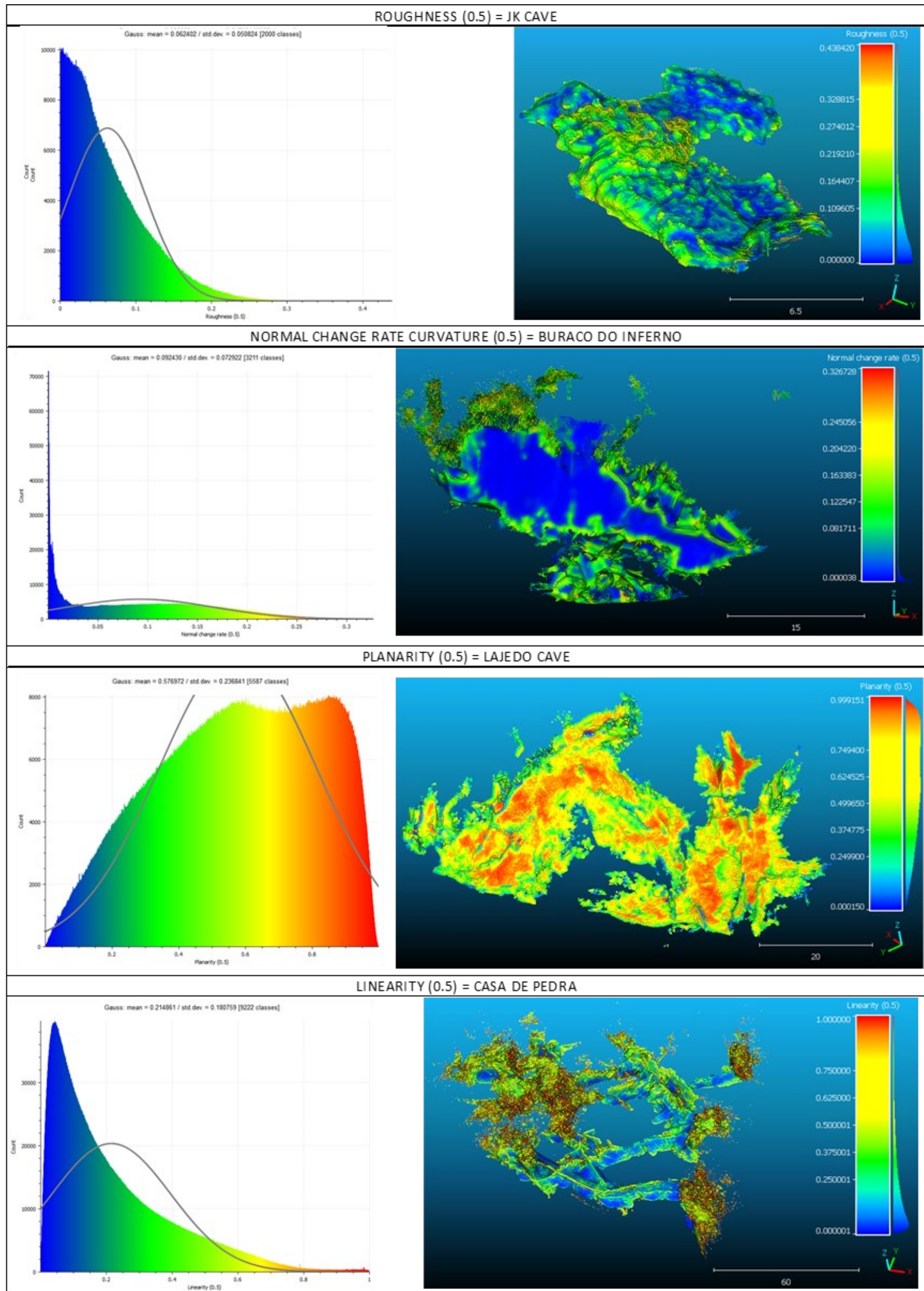


Figura 5.2. Prancha 1 de exemplos de resultados de atributos geométricos de nuvens de cavernas e seus respectivos histogramas gaussianos.

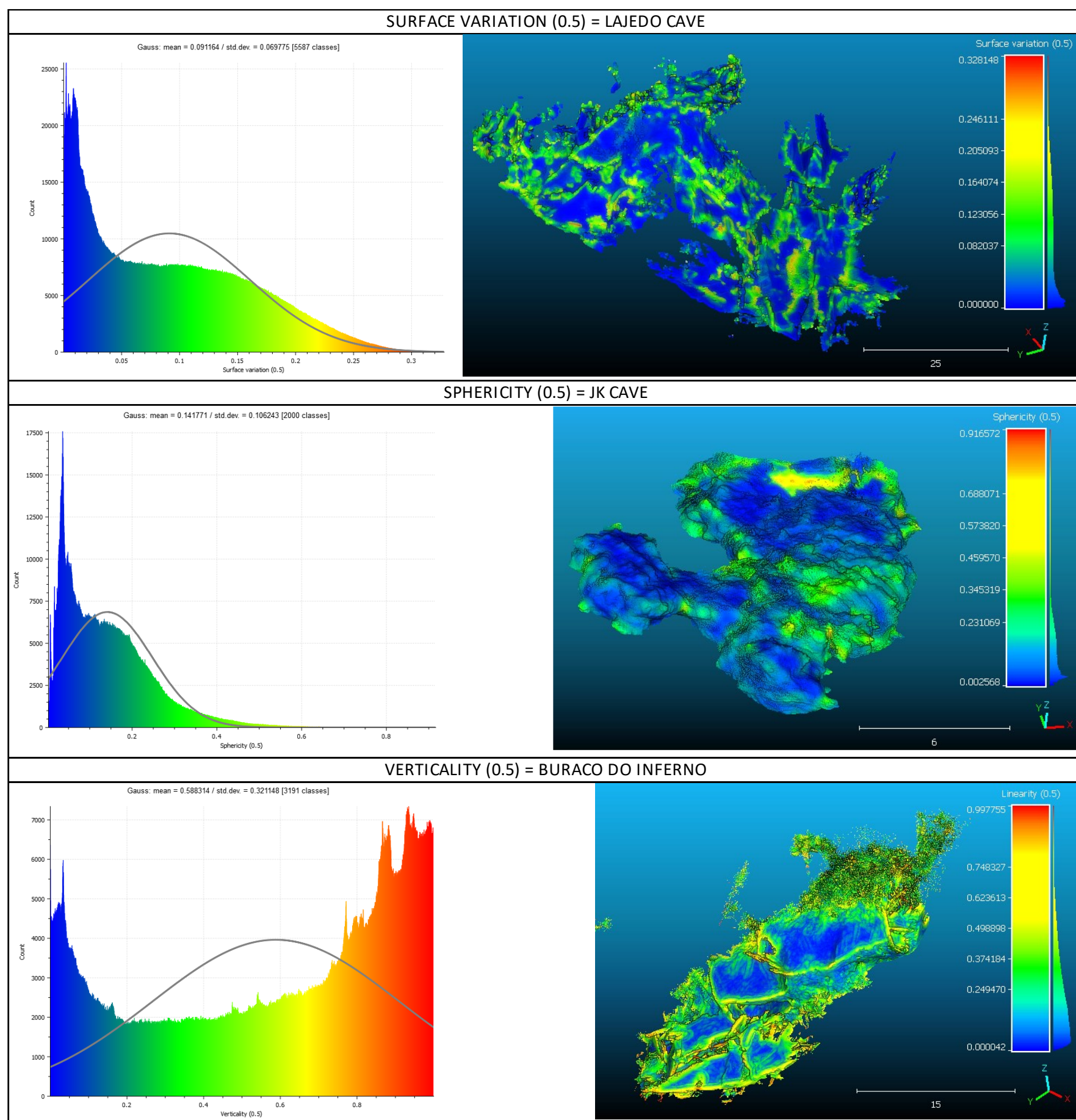


Figura 5.3. Prancha 2 de exemplos de resultados de atributos geométricos de nuvens de cavernas e seus respectivos histogramas gaussianos.

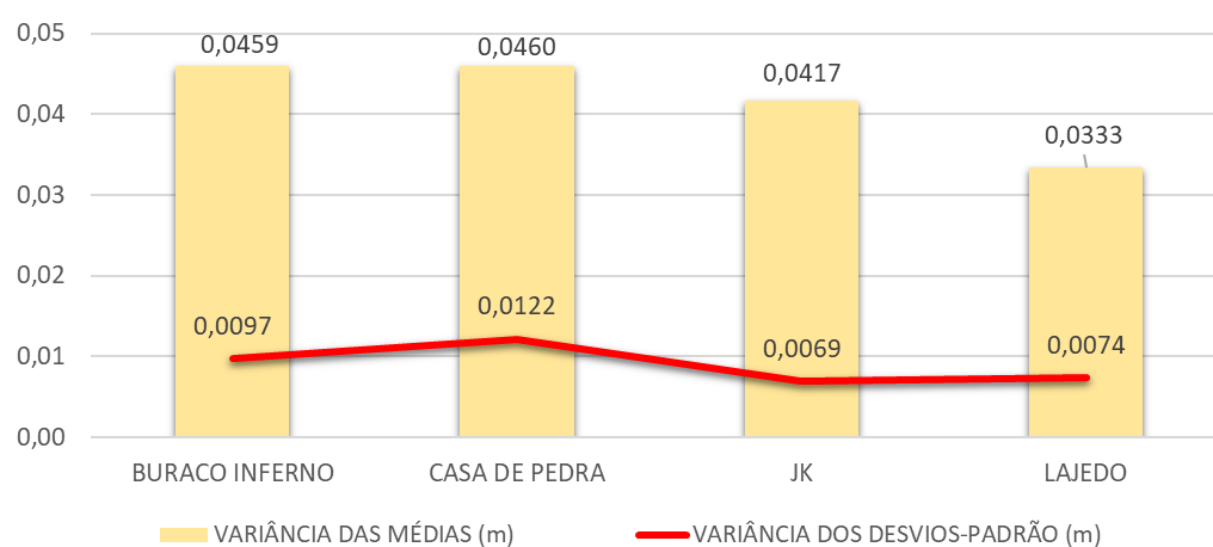


Gráfico 5.2. Comparação da variância das médias e dos desvios-padrão dos atributos geométricos por nuvem 3D de caverna.

A caverna do Lajedo apresentou a menor variação de médias (0,3333 m), com variação intermediária de desvios-padrão (0,0074 m). Foi seguida pela caverna JK, cuja variância de médias foi de 0,0417 m, com menor variação de desvios-padrão (0,0069 m).

A caverna do Buraco do Inferno apresentou os segundos maiores valores para a variância de médias e desvios-padrão, respectivamente 0,0459 m e 0,0097 m. Com os maiores resultados, a caverna Casa da Pedra apresentou variância das médias de 0,0460 m e variância dos desvios-padrão de 0,0122 m.

Entende-se que as cavernas com condutos mais verticalizados (quadrangulares a hexagonais) e com vegetação nas entradas e aberturas de teto apresentam as maiores variâncias, ou seja, mais heterogêneas. No oposto, cavernas com menor influência de vegetação e de seções horizontalizadas (largura superior à altura do teto), lenticulares a retangulares, apresentaram variâncias relativamente inferiores, mais homogêneas morfológicamente.

Ao avaliar o percentual da soma dos valores brutos das médias dos atributos geométricos da amostra de cavernas (apresentado no **Gráfico 5.3**), observa-se a predominância da planaridade, com 38,81%. O segundo atributo mais expressivo é a verticalidade (24,48%), seguida pela linearidade (13,17%). A esfericidade atinge 10,05%, enquanto os demais atributos apresentam valores inferiores a 5,00% cada.

Mantendo a tendência geral, a análise individual (conforme demonstrado no **Gráfico 5.4**) indica que a caverna JK (crosta detrito-laterítica ferrífera) apresentou o maior valor de planaridade (49%), ao passo que a caverna Buraco do Inferno (granito) exibiu a maior porcentagem de verticalidade (32%). A caverna do Lajedo (quartzito) registrou os maiores índices de linearidade (15%) e esfericidade (12%), além de 6% para variação de superfície e taxa de mudança da normal da curvatura.

A caverna Casa da Pedra (carbonática) constituiu uma exceção, apresentando valores percentuais intermediários em relação às demais cavidades. Os atributos de variação de superfície, taxa de mudança da normal da curvatura e rugosidade situaram-se entre 3% e 6% em todas as cavernas.

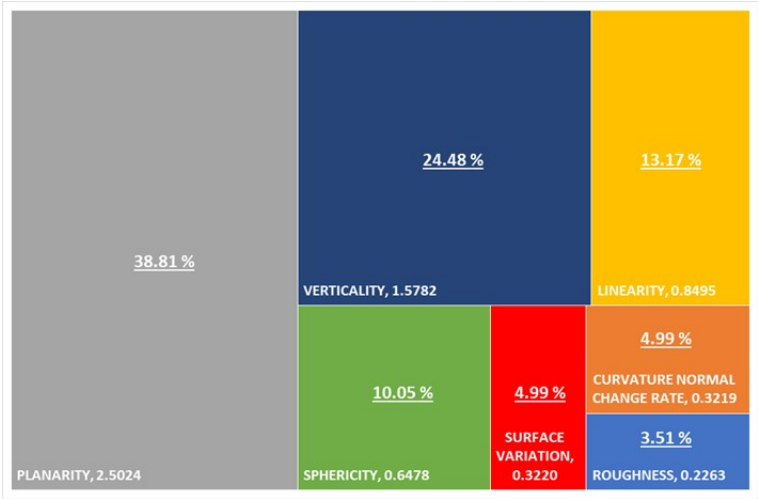


Gráfico 5.3. Hierarquia de participação das médias somadas por atributos geométricos na amostra.

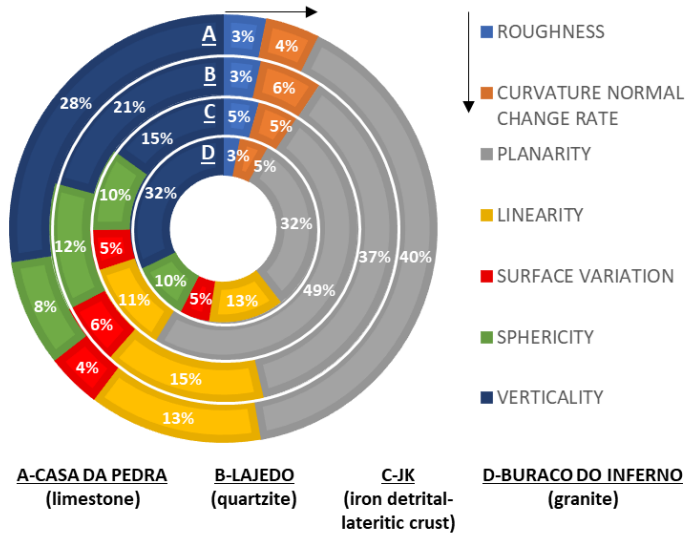


Gráfico 5.4. Valores percentuais inteiros dos atributos geométricos das nuvens de pontos 3D por caverna.

A análise de componentes principais (ACP ou PCA em inglês) trouxe resultados mais sutis, pelo **Gráfico 5.5**, indicando por quadrantes de correlação, quais atributos geométricos influenciam mais em cada nuvem de caverna comparativamente.

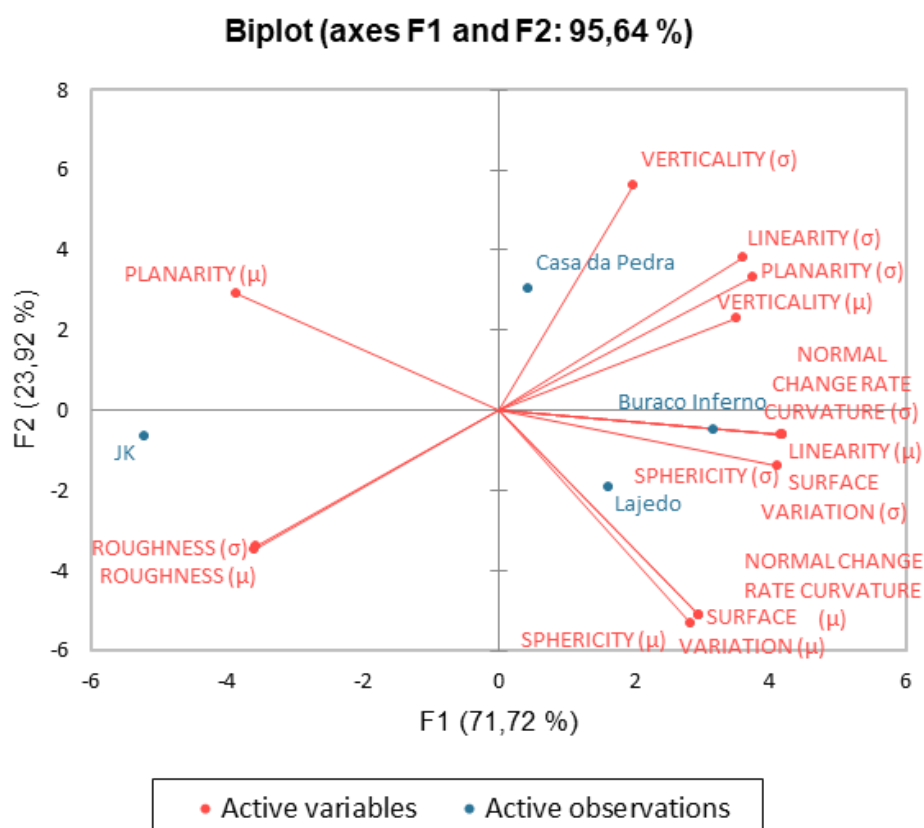


Gráfico 5.5. Biplot de componentes principais pelas variáveis como atributos geométricos por média (μ) e desvio-padrão (σ), relacionadas a cada caverna.

A seguir, listam-se algumas características específicas:

- Na caverna JK (ferrífera) predominam rugosidade e planaridade, cujas correlações são inversas ao restante das variáveis e cavernas. Ou seja, caverna formada por planos rugosos em teto e paredes. O piso é regularizado por colmatagem sedimentar, como na **Figura 5.4**;

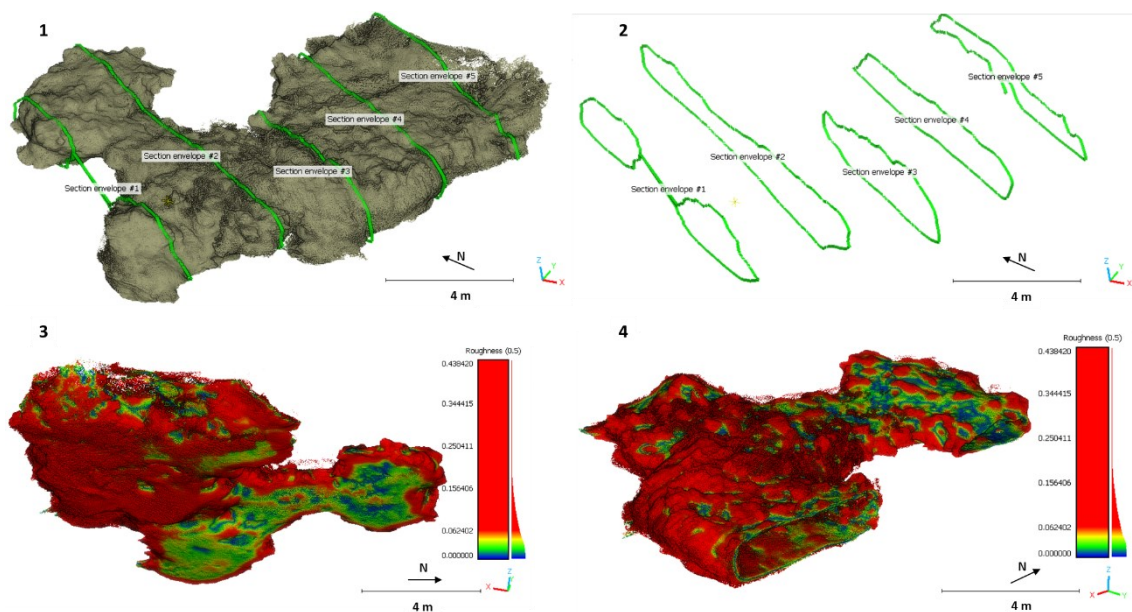


Figura 5.4. Nuvem de pontos 3D da caverna JK (1); cinco exemplos de perímetros de seções (2); cena subjacente (3) e cena transversal superior de corte (4), demonstram planaridade em direção ao azul e, em vermelho, as porções de rugosidade acima da média.

- Buraco do Inferno (granítica) e Lajedo (quartzítica) apresentam correlação positiva, com influências dos atributos de variação de superfície, esfericidade, linearidade e taxa de mudança normal da curvatura. Interpretam-se como cavernas de distribuição predominante vertical ou horizontal cujos contatos (paredes com piso ou teto) são bruscos, com boa influência de estruturas lineares (**Figura 5.5**), além de significativa presença de depósitos clásticos irregularizando porções de seu piso, paredes ou teto (**Figura 5.6**).
- Por fim, a Casa da Pedra (carbonática) apresentou correlações positivas, associadas à verticalidade, linearidade e planaridade. Em outras palavras, trata-se de uma gruta composta por amplas passagens lineares ou planas verticais, como na **Figura 5.7**, com muitas entradas (pelo menos 15 na porção escaneada).

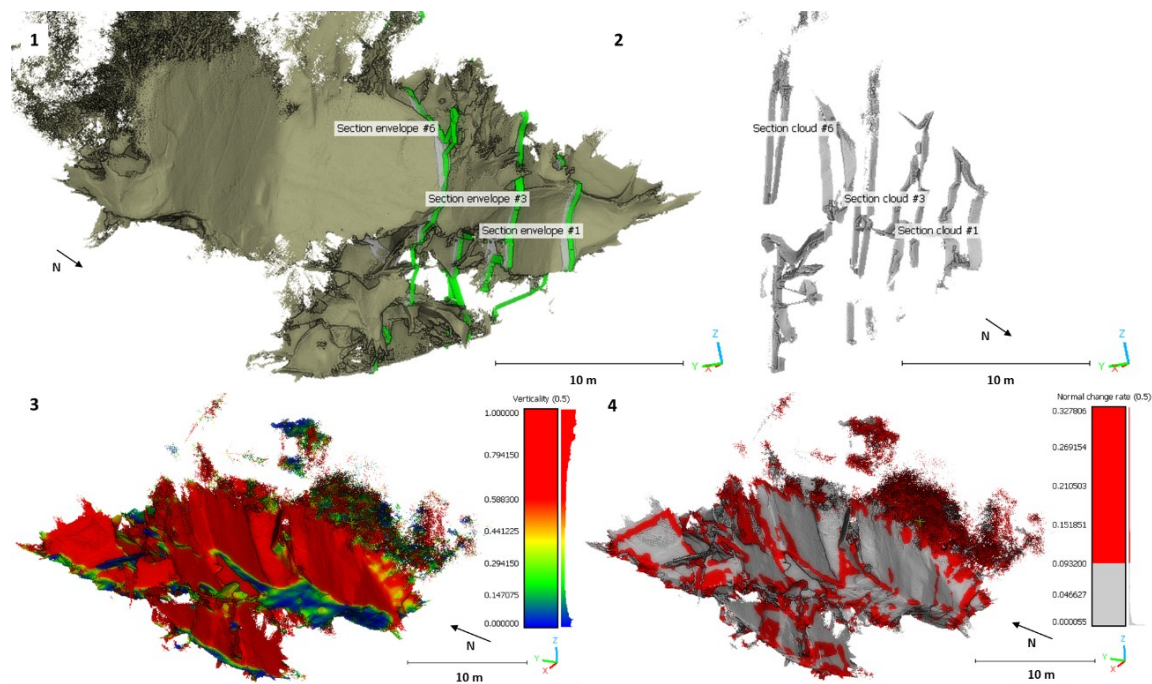


Figura 5.5. Nuvem de pontos 3D completa da gruta do Buraco do Inferno (1) e nuvens de pontos dos perímetros em verde (2). Abaixo, as cenas 3 e 4 destacam, em vermelho, as porções acima da média em termos de verticalidade e taxa de variação normal, respectivamente.

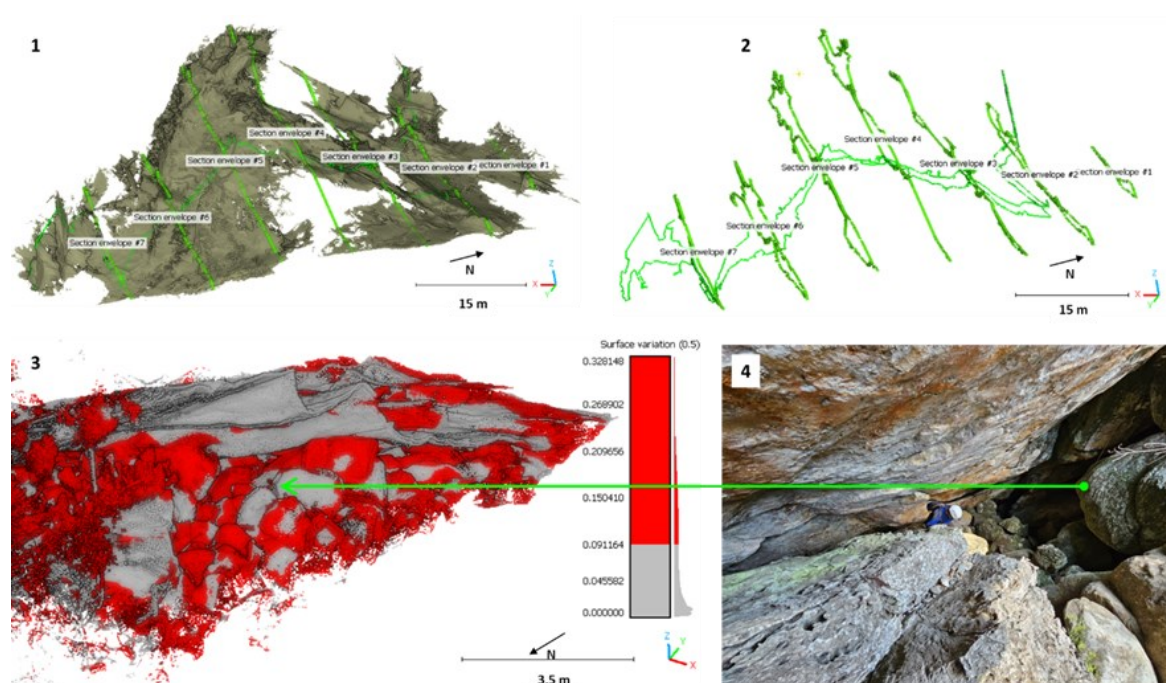


Figura 5.6. Nuvem de pontos 3D completa da gruta do Lajedo (1) e perímetros das seções indicadas (2). Abaixo, as cenas 3 e 4 mostram a porção proximal com consideráveis depósitos clásticos (pareadas pela seta) que interferem na característica de variação da superfície, destacada acima da média em vermelho.

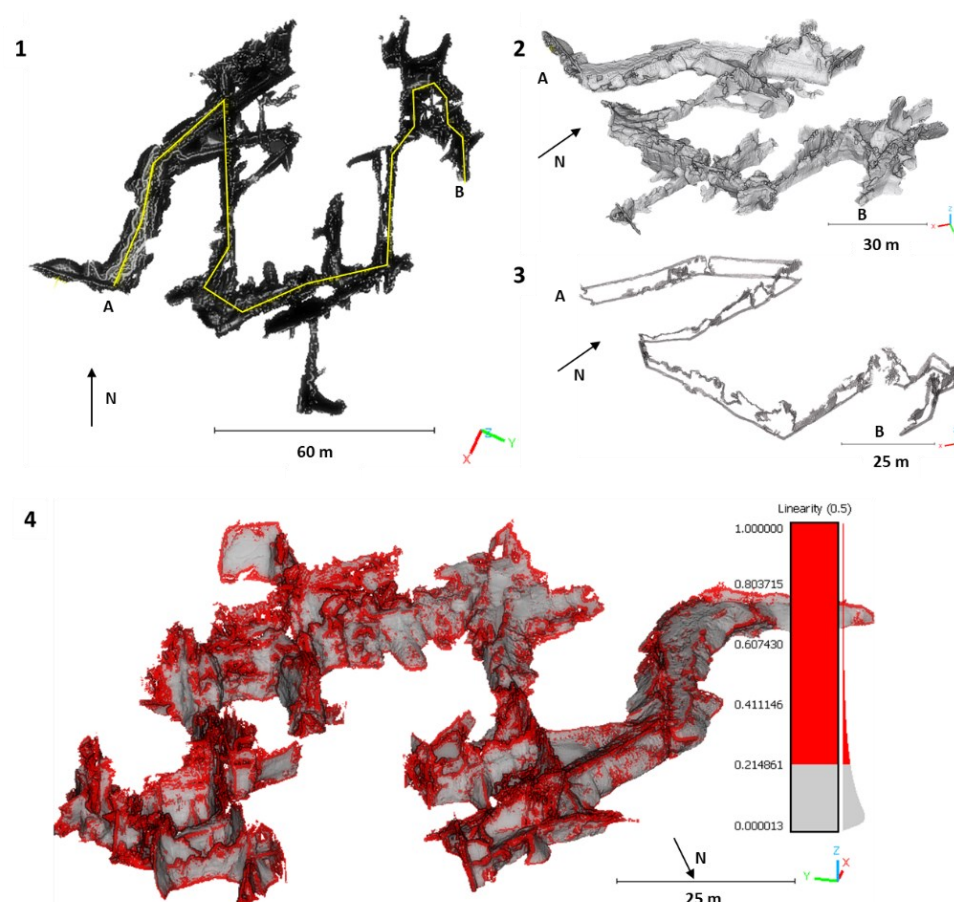


Figura 5.7. Nuvem de pontos 3D da Casa da Pedra em planta (1), vista transversal e corte principal (A-B) nas cenas 2 e 3. Abaixo, a cena 4 apresenta porções com linearidade acima da média, mostradas em vermelho.

Como consequência, forma-se o dendrograma pela análise de dissimilaridade de agrupamentos (AHC) no **Gráfico 5.6**. As características geométricas das nuvens 3D de comportamento mais similar são a Lajedo (quartzítica) e Buraco do Inferno (granítica), em 70,30%. Tal semelhança pode ser especulada como influenciada pelo paralelismo de suas paredes e/ou tetos, controlados por estruturas rochosas e afetados por bruscos contatos entre piso, paredes e teto, além de presença de depósitos clásticos que interferem na regularidade de sua forma.

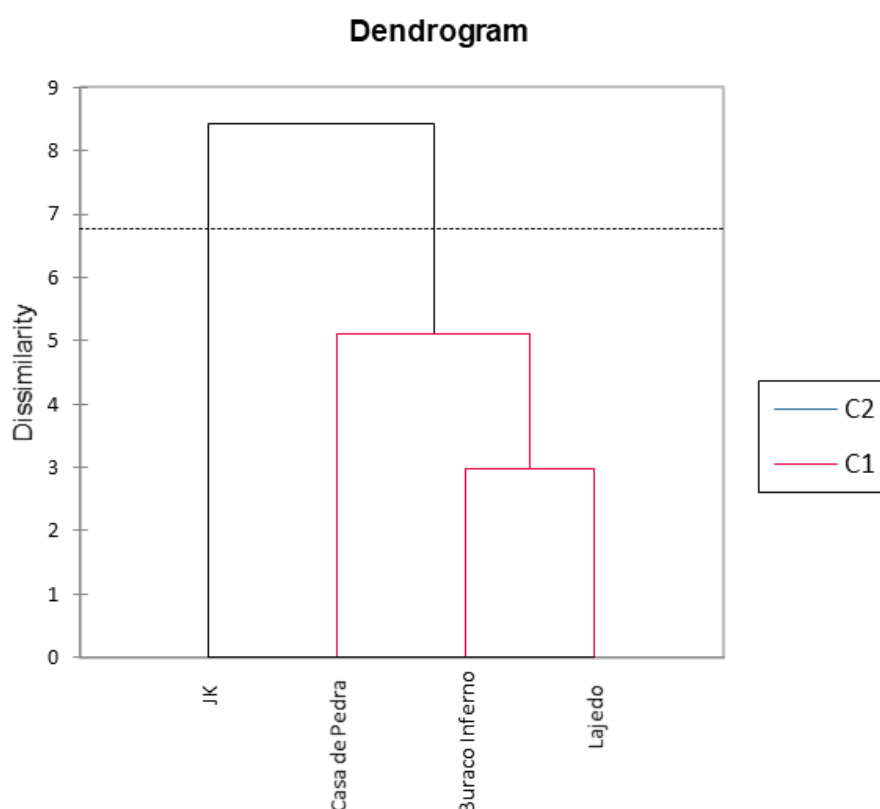


Gráfico 5.6. Dendrograma de dissimilaridade por aglomerações das quatro cavernas analisadas.

Em seguida, há semelhança de ambas com a Casa da Pedra em 49,00%, em posição intermediária com as demais, em função de seus longos e amplos condutos lineares de paredes, pisos e tetos planares trapezoidais e/ou verticais. Nesse caso, há reduzida influência de depósitos clásticos em seu interior e maior de depósitos químicos.

Por fim, com ampla diferença de 84,36% para as demais, há a caverna ferrífera JK, separada em linha individual. Seu comportamento geométrico pode ser considerado excepcional, pela elevada rugosidade de seus planos e regularidade de seu piso, sob câmaras globulares em bifurcação. Nos casos analisados, a caverna ferrífera torna-se a exceção de comportamento morfológico, como já vinha sendo chamada a atenção desde os primeiros estudos executados por Piló & Auler (2005).

5.3. Resultados da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO: Aplicação em monitoramento de integridade física (testes 1, 2 e 3)

5.3.1. Resultado da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO – Teste 1: Monitoramento de integridade física pela distância absoluta entre as nuvens 3D sazonais por caverna

Corresponde ao teste de rastrear ao longo de uma caverna alterações físicas/morfológicas em um intervalo de tempo através de diferentes captações tridimensionalmente representadas. O rastreamento se dá pelo cálculo de distância absoluta entre as nuvens 3D, onde maiores distâncias identificadas podem potencialmente indicar alterações na forma da caverna. A **Tabela 5.2** e a **Figura 5.8, 5.9, 5.10, 5.11** apresentam os resultados comparativos entre as nuvens 3D de cada caverna da campanha final do período chuvoso (abril/2025) com a da campanha final do período seco (setembro/2024).

Inicialmente, já se consideram os Erros Quadráticos Médios (EQM's) referentes aos alinhamentos entre as nuvens 3D sazonais, os quais minimamente atingiram 11,74 cm na JK e máximo de 66,41 cm na Gruta do Lajedo. Estes erros de alinhamento seguiram valores crescentes conforme a complexidade morfológica e acessível das cavernas e tendência a distorções durante integração das captações para composição de nuvem única.

Tabela 5.2 – Distâncias métricas da comparação de nuvens de pontos 3D entre as duas campanhas de escaneamento realizadas (*C2C absolute distances*).

CAVERNA	DATA DO ESCANEAMENTO	INTERVALO HORÁRIO EXECUTADO	INTERVALO DE TEMPERATURAS DURANTE EXECUÇÃO (C°)	NÚMERO DE PONTOS TOTAL	ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (EQM / RMSE) - m	MÉDIA DAS DISTÂNCIAS ABSOLUTAS (μ) - m	DESVIO PADRÃO DAS DISTÂNCIAS ABSOLUTAS (σ) - m	DISTÂNCIAS ABSOLUTAS MÍNIMAS - m	DISTÂNCIAS ABSOLUTAS MÁXIMAS - m
Buraco do Inferno	24/09/2024	10:00 - 12:00	20,4 - 22,1	10.179.224	0,18979	0,1366	0,1263	0,0001264	2,8079
	08/04/2025	10:45 - 11:30	15,6 - 18,0	8.938.498					
JK	27/09/2024	14:30 - 15:20	29,7 - 32,4	3.996.516	0,11738	0,0496	0,0580	0,0001069	1,4900
	11/04/2025	11:55 - 12:30	22,4 - 23,4	3.512.442					
Casa da Pedra	26/09/2024	10:00 - 13:00	16,3 - 25,1	85.039.473	0,58600	0,3448	0,4484	0,0000554	31,9042
	10/04/2025	09:55 - 11:30	17,2 - 19,2	76.613.450					
Lajedo	25/09/2024	11:45 - 17:00	21,8 - 30,6	30.129.856	0,66413	0,4801	0,5972	0,0000598	6,1847
	09/04/2025	10:05 - 12:00	15,7 - 19,9	31.085.880					

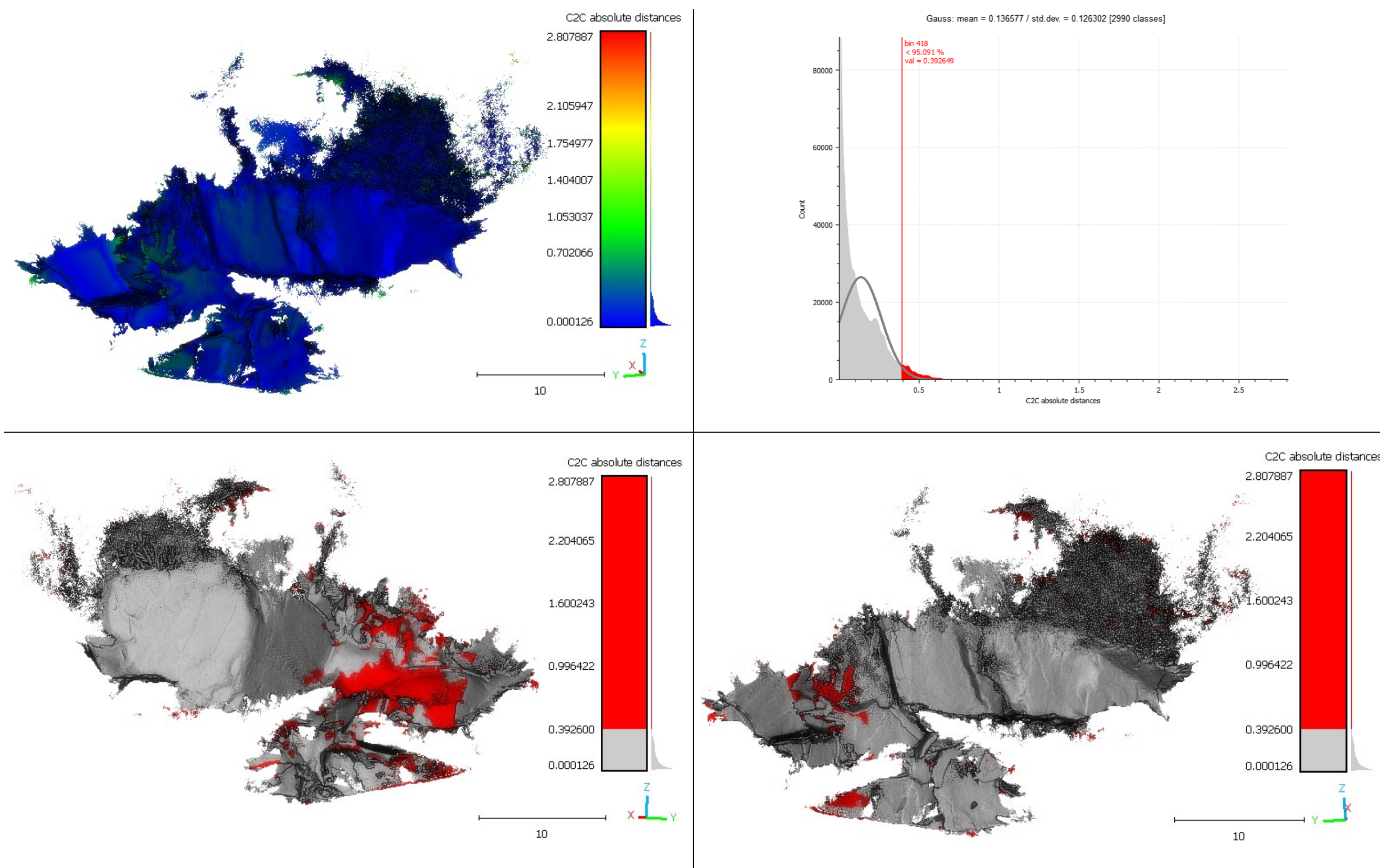


Figura 5.8. Comparação de distâncias absolutas entre nuvens de pontos 3D, em metros (C2C), da campanha de abril/2025 a setembro/2024 para a Buraco do Inferno. Canto superior esquerdo apresenta resultado bruto. Os demais quadros apresentam gráfico e visadas laterais de seleção dos 5% mais distantes em vermelho entre as nuvens.

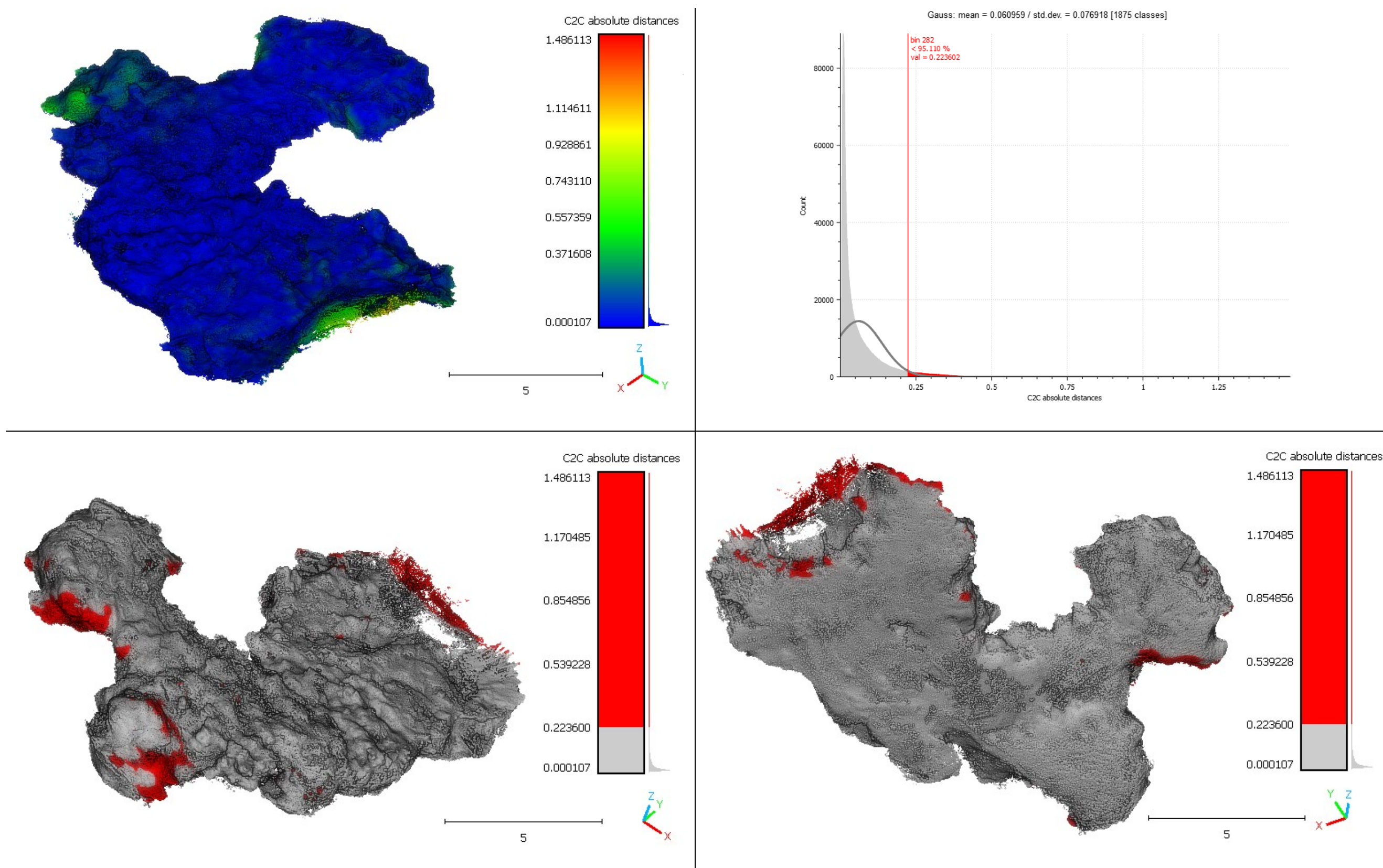


Figura 5.9. Comparação de distâncias absolutas entre nuvens de pontos 3D, em metros (C2C), da campanha de abril/2025 a setembro/2024 para a caverna JK. Canto superior esquerdo apresenta resultado bruto. Os demais quadros apresentam gráfico e visadas superior (esq.) e inferior (dir.) de seleção dos 5% mais distantes em vermelho entre as nuvens.

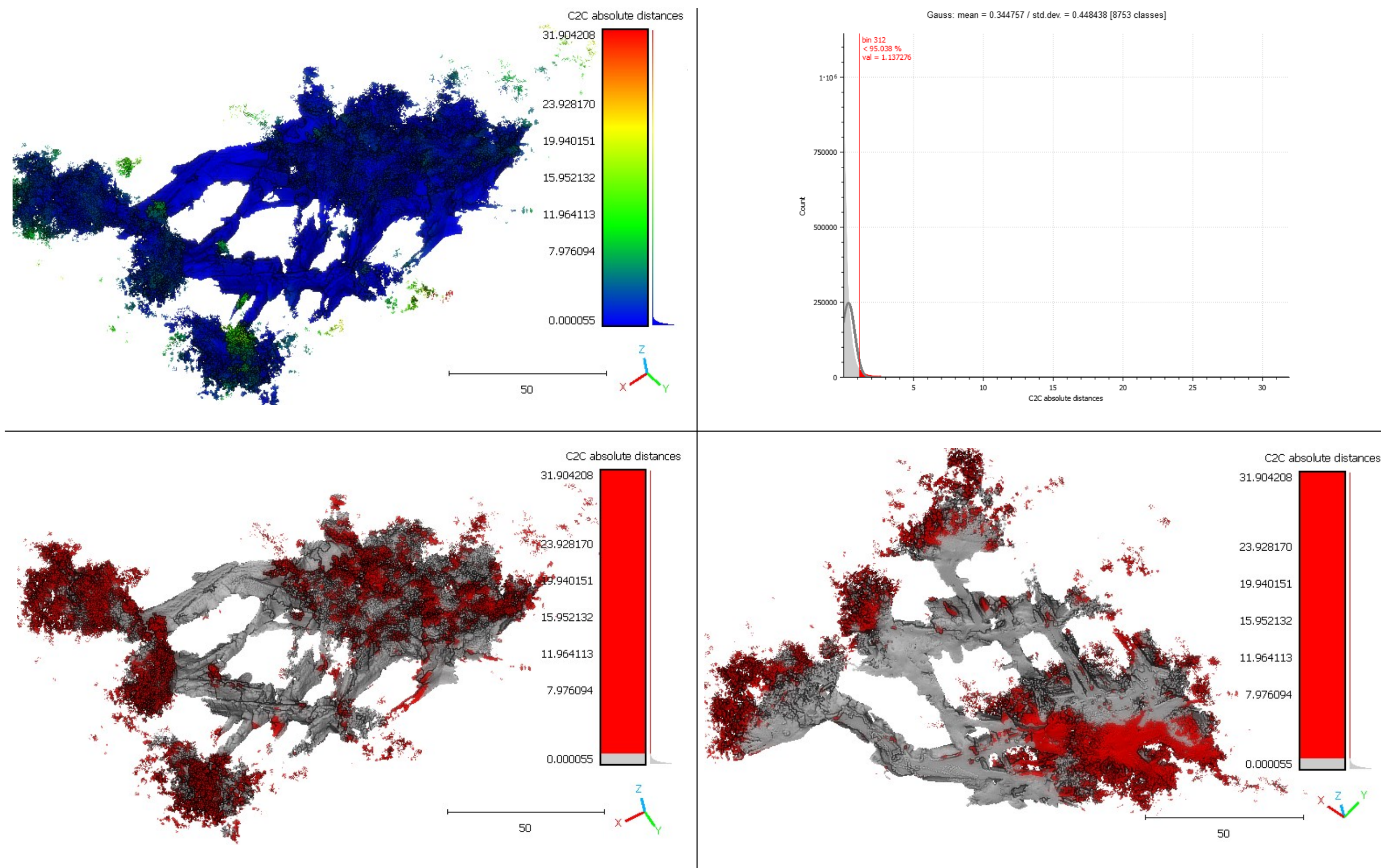


Figura 5.10. Comparação de distâncias absolutas entre nuvens de pontos 3D, em metros (C2C), da campanha de abril/2025 a setembro/2024 para a Casa da Pedra. Canto superior esquerdo apresenta resultado bruto. Os demais quadros apresentam gráfico e visadas superior (esq.) e inferior (dir.) de seleção dos 5% mais distantes em vermelho entre as nuvens.

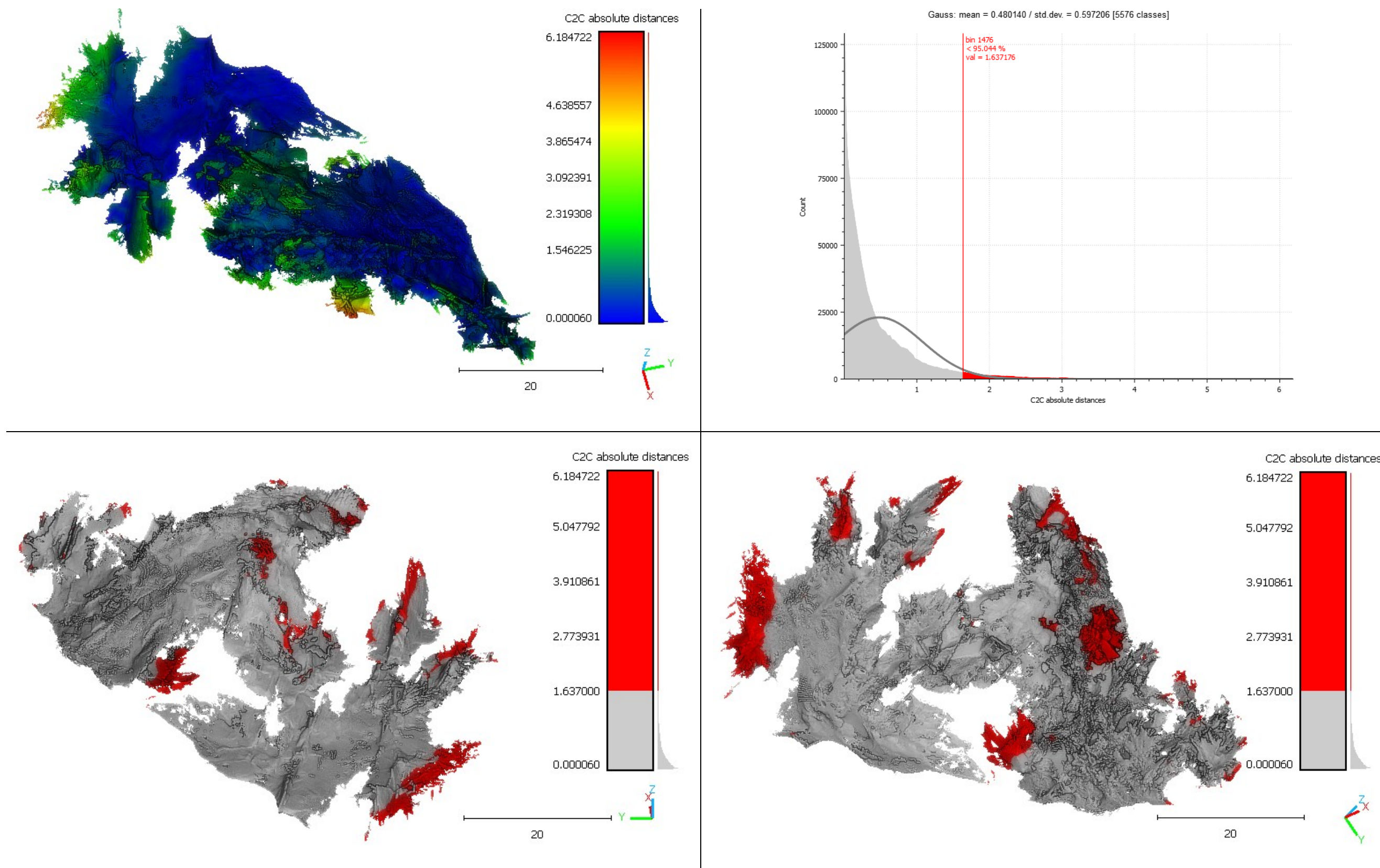


Figura 5.11. Comparação de distâncias absolutas entre nuvens de pontos 3D, em metros (C2C), da campanha de abril/2025 a setembro/2024 para a gruta do Lajedo. Canto superior esquerdo apresenta resultado bruto. Os demais quadros apresentam gráfico e visadas superior (esq.) e inferior (dir.) de seleção dos 5% mais distantes em vermelho entre as nuvens.

Em todos os casos, as distâncias absolutas mínimas foram próximas ou menores que 1 milímetro. As distâncias máximas variaram entre 1,49 m e 31,90 m, porém, essas distâncias foram determinadas pela variação no detalhe do caminho de varredura (JK e Lajedo) e pela influência da vegetação (Buraco do Inferno e Casa da Pedra).

Além disso, há a condição de interferência da umidade ou do fluxo de água dentro das feições, gerando superfícies duplas ou falsas, além de pontos extras em meio aos dutos da caverna, mais na estação chuvosa, entre as nuvens, especialmente no caso da Casa da Pedra e JK.

A menor distância média entre nuvens de pontos 3D foi para JK (4,96 cm), seguida por Buraco do Inferno (13,66 cm), Casa da Pedra (34,48 cm) e Lajedo (48,01 cm). Os valores médios, mais os de desvios-padrão, de distâncias absolutas acompanharam a complexidade morfológica das cavernas, assim como os erros quadráticos médios de alinhamento.

Não foram identificadas alterações que pudessem ser reconhecidas na integridade física de nenhuma das cavernas. Corresponderam a outros fatores. Reconhece-se que o processo de capturas, vegetação, acessibilidade/ergonomia, magnetismo (potencialmente) e umidade podem interferir na forma e ideal alinhamento de nuvens tridimensionais sazonais.

Dessa maneira, conclui-se que para cavidades extensas e de morfologia complexa, o monitoramento deve ser comparado através de seções pareadas para filtrar trechos e permitir maior exatidão nos alinhamentos e visibilidade de alterações.

5.3.2. Resultado da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO – Teste 2: Monitoramento de integridade física pela comparação estatística das geometrias sazonais das nuvens 3D por caverna

Este teste visa comparar a semelhança dos atributos geométricos (sete selecionados) das nuvens 3D de cada caverna da estação seca, com a estação úmida. Se é possível obter resultados iguais ou similares ao longo do ano, passíveis de comparação para monitoramento em cavernas variadas. Comparando a semelhança estatística entre as nuvens, seguem os resultados pela **Tabela 5.3**. O teste de *Wilcoxon* demonstrou que apenas para a caverna JK (ferrífera) a comparação sazonal apresentou divergência significativa.

Tabela 5.3 – Resultado do teste estatístico *Wilcoxon*, avaliando a semelhança das medianas entre os valores geométricos sazonais das nuvens.

Wilcoxon signed-rank test	p-value (Two-tailed)	Interpretação da comparação dos valores (seco/úmido)
Buraco do Inferno	0,182	Semelhança fraca
JK	0,016	Divergente
Casa da Pedra	0,078	Semelhança mínima
Lajedo	0,064	Semelhança mínima

Casa da Pedra (carbonática) e Lajedo (quartzítica) apresentaram resultados próximo ao limite de corte, apontando a semelhança mínima. A Buraco do Inferno apresentou resultado geral superior de semelhança, de 0,182, mas fraca ainda. Este quadro pode ser avaliado pela menor influência de umidade e magnetismo na caverna granítica, gerando mais pontos de reflectância aderentes. Outro fator é maior cobertura (total de pontos captados) e otimização dos escaneamentos de pontos (menos nuvens demandadas nos escaneamentos) nas captações da segunda campanha (úmida/2025), elevando as medianas em todos os casos.

Esse aumento nas medianas na campanha úmida pode ser verificada pelo **Gráfico 5.7** de *box plots*.

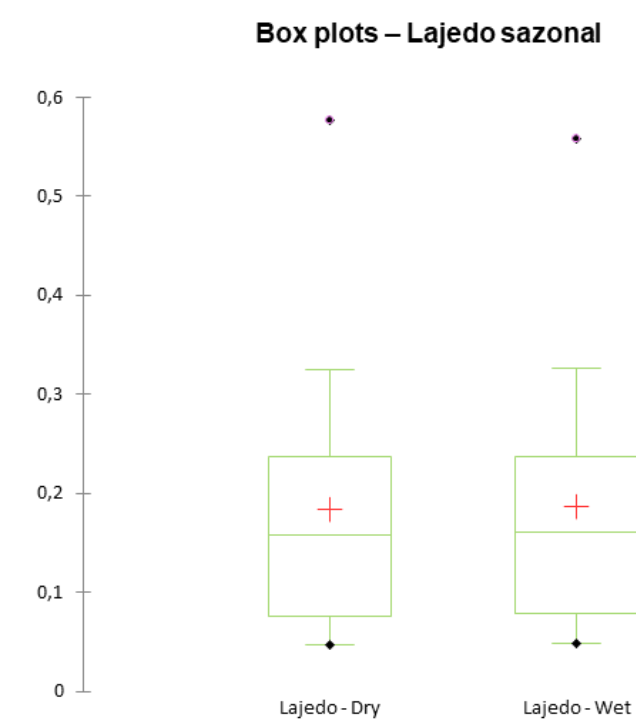
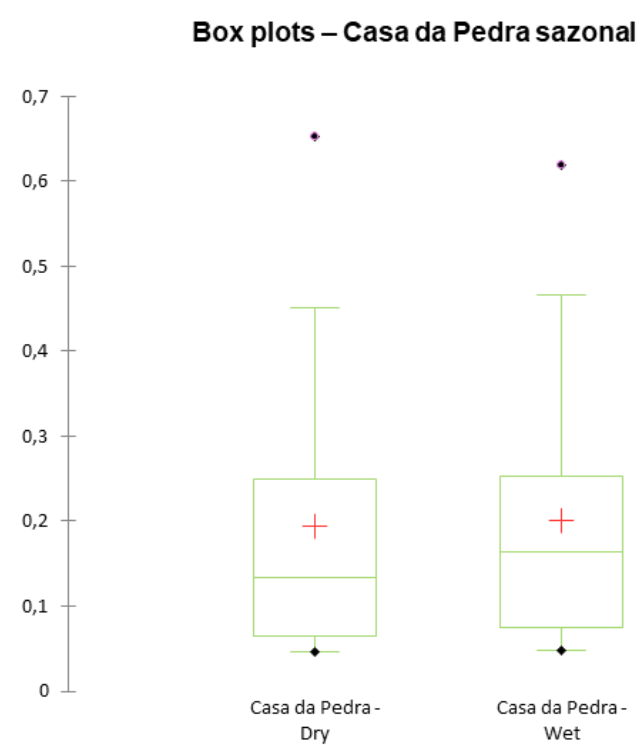
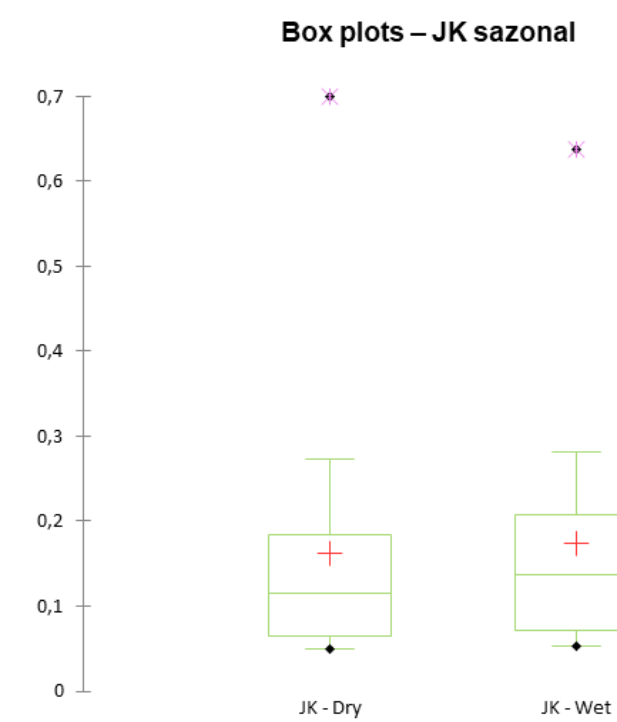
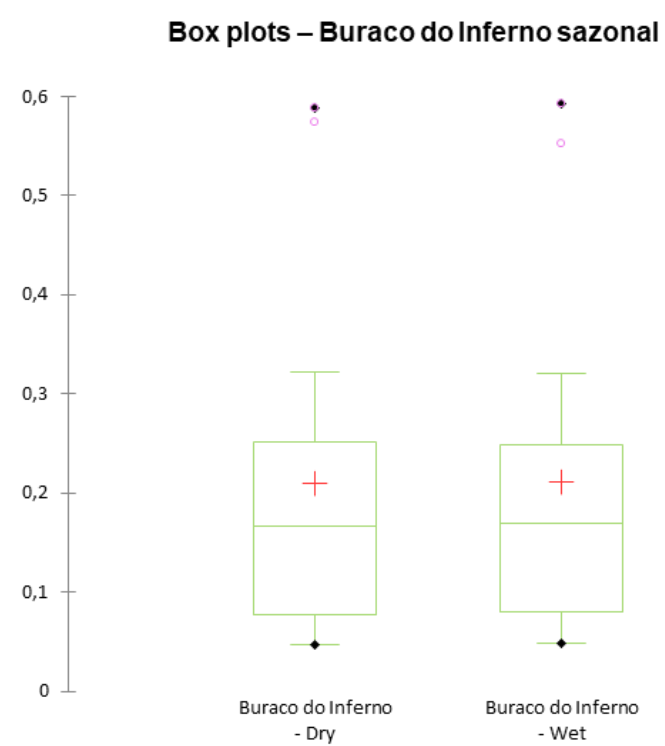


Gráfico 5.7. *Box plots* comparativos das nuvens de pontos 3D sazonais por caverna (seca: *dry*; úmida: *wet*).

Como conclusão, pode-se interpretar que variações meteorológicas sazonais interferem significativamente na resposta geométrica de escaneamentos tridimensionais espeleológicas subterrâneas. Consequentemente, é reconhecido que para monitoramento de integridade física de cavernas, comparar nuvens 3D de diferentes estações climáticas entre si não são as mais recomendadas. Caso seja uma decisão, que seja levado em conta um aumento do erro e variações potenciais.

No mínimo, contorna-se esta condição sugerindo que ou os monitoramentos tenham intervalo anual (comparando campanhas de mesma estação anual, indicando-se a seca), ou que as campanhas semestrais sejam comparadas apenas pela mesma sazonalidade (úmida/úmida e seca/seca).

Outro fator potencial a ser indicado é a padronização das rotas de captação, fixando a quantidade de escaneamentos necessários para a cobertura de uma caverna. Entretanto, ressalta-se que esse fator não determinou a ideal aderência das nuvens da caverna JK, a qual demanda apenas uma captação para seu total escaneamento. Nesse caso, a relação pode estar voltada ao magnetismo (rocha encaixante ferrífera), mais a umidade sazonal.

5.3.3. Resultado da APLICAÇÃO 3 – MONITORAMENTO – Teste 3: Monitoramento de integridade física pela comparação de seções padronizadas para cada caverna e estação

Testes com seções fixas para as nuvens de pontos 3D sazonais foram realizados para verificar a viabilidade de suas comparações. As seguintes influências nos resultados foram:

- Vegetação: Casa da Pedra e Buraco do Inferno;
- Complexidade morfológica: Lajedo e Casa da Pedra;

- Variação de alinhamento (deformação na composição da nuvem): Lajedo e Casa da Pedra;
- Umidade e magnetismo (potencial): JK;
- Drenagem subterrânea: Casa da Pedra;
- Variação na superfície escaneada (ampliação): Lajedo e Casa da Pedra.

Da **Figura 5.12** à **Figura 5.15** mostram-se os resultados comparativos, assim como na **Tabela 5.4**.

Tabela 5.4 – Comparação percentual da diferença das variáveis entre a estação seca e úmida das seções padronizadas por caverna.

% DE DIFERENÇA SAZONAL NAS SEÇÕES (SECA - ÚMIDA)	PERÍMETRO DAS SEÇÕES	NÚMERO DE PONTOS 3D DAS SEÇÕES	VOLUME DAS SEÇÕES	TOTAL
JK	-22,88%	-50,24%	-58,09%	-131,21%
CASA DA PEDRA	269,95%	-81,22%	21,70%	210,43%
LAJEDO	-23,89%	183,14%	622,94%	782,20%
BURACO DO INFERNO	564,55%	-190,51%	-155,11%	218,92%
TOTAL	787,73%	-138,83%	431,44%	1080,34%

O resultado visual demonstra alguns deslocamentos entre nuvens, superfícies duplicadas e variação da vegetação, mas que permitem potenciais alterações morfológicas. Os gráficos seguem essa tendência, mas sempre indicando cruzamento de valores entre as estações.

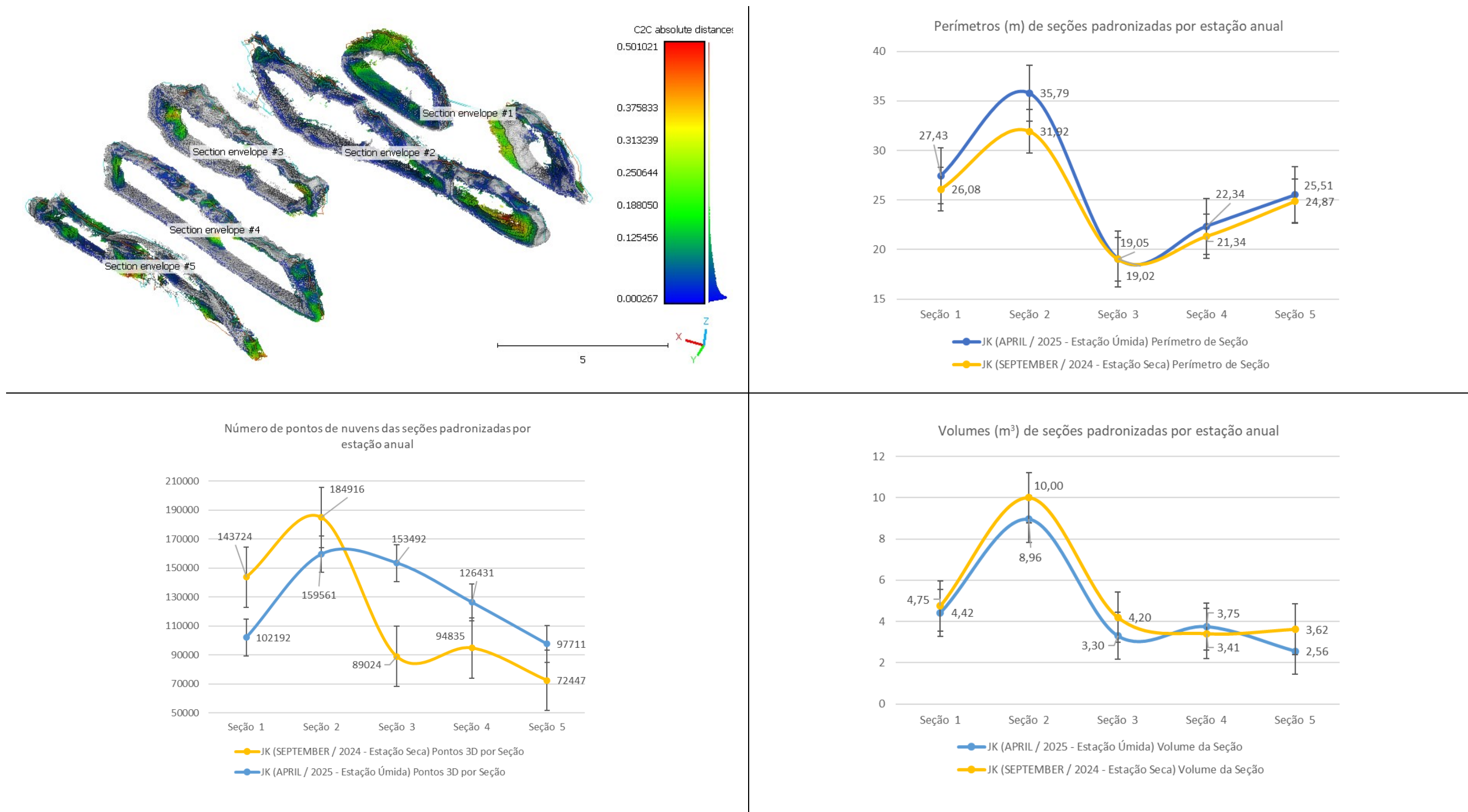


Figura 5.12. Prancha com posição e gráfico das seções padronizadas para a caverna JK, incluindo gráficos com as variáveis de valor do perímetro, número de pontos 3D e volume.

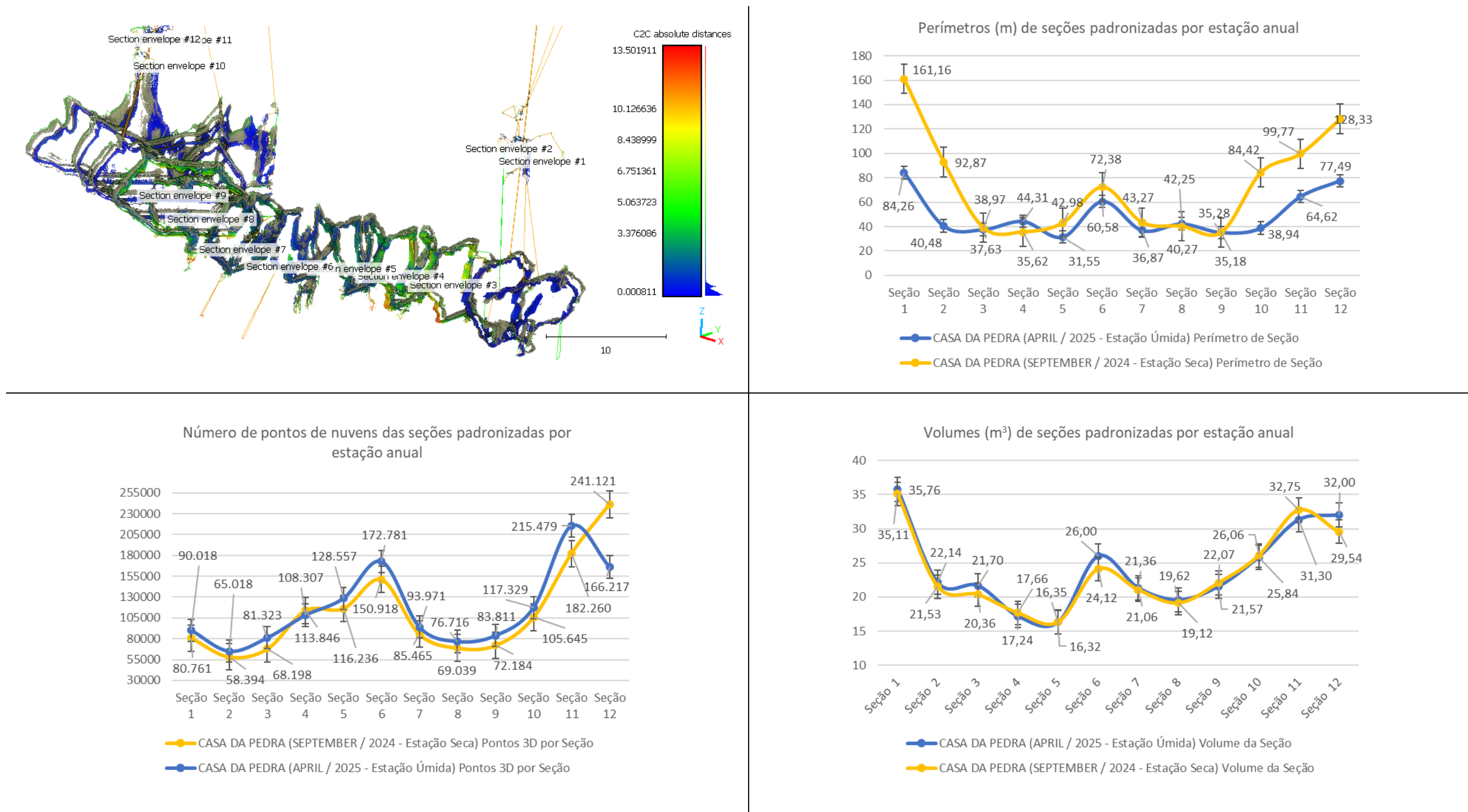


Figura 5.13. Prancha com posição e gráfico das seções padronizadas para a caverna Casa da Pedra, incluindo gráficos com as variáveis de valor do perímetro, número de pontos 3D e volume.

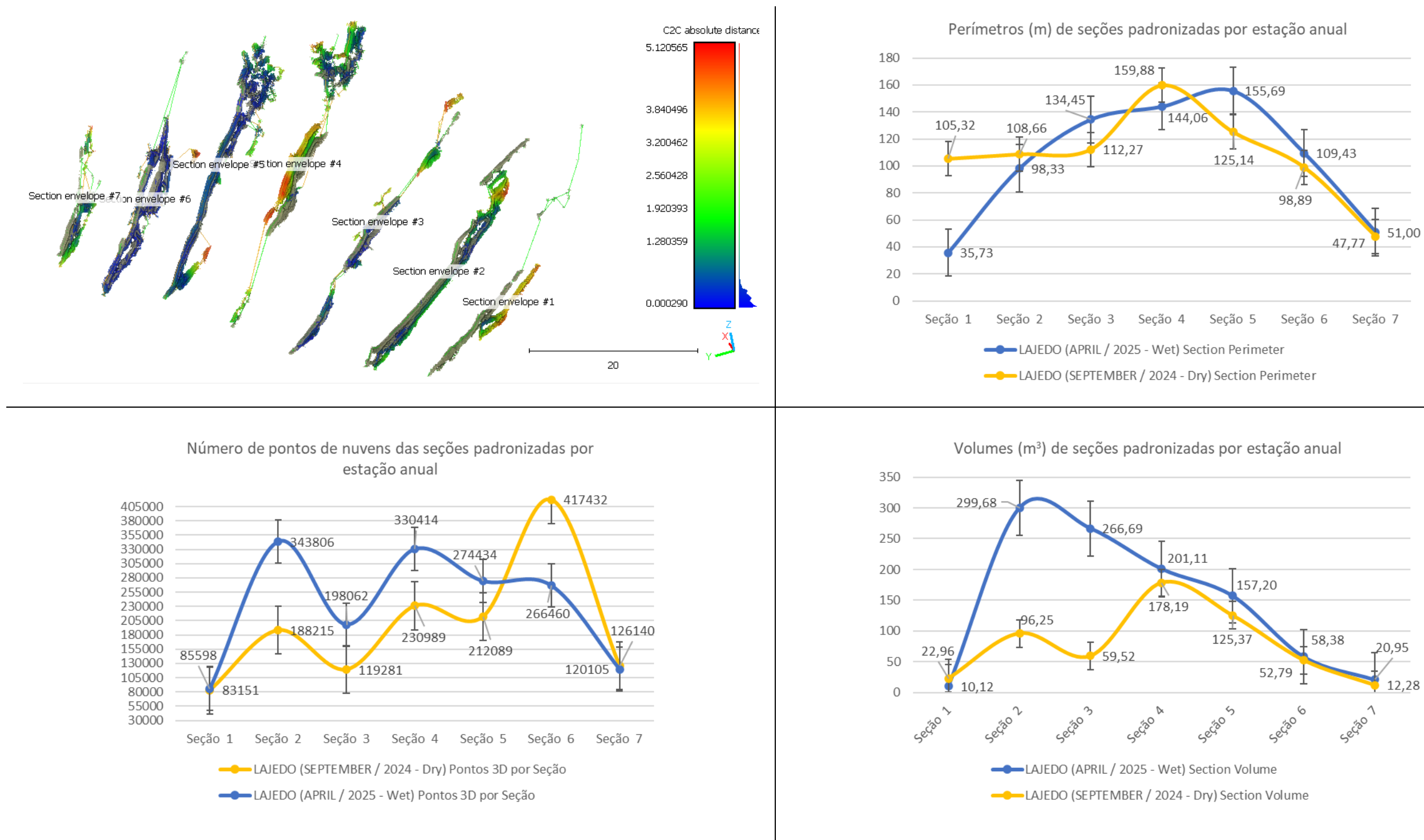


Figura 5.14. Prancha com posição e gráfico das seções padronizadas para a caverna do Lajedo, incluindo gráficos com as variáveis de valor do perímetro, número de pontos 3D e volume.

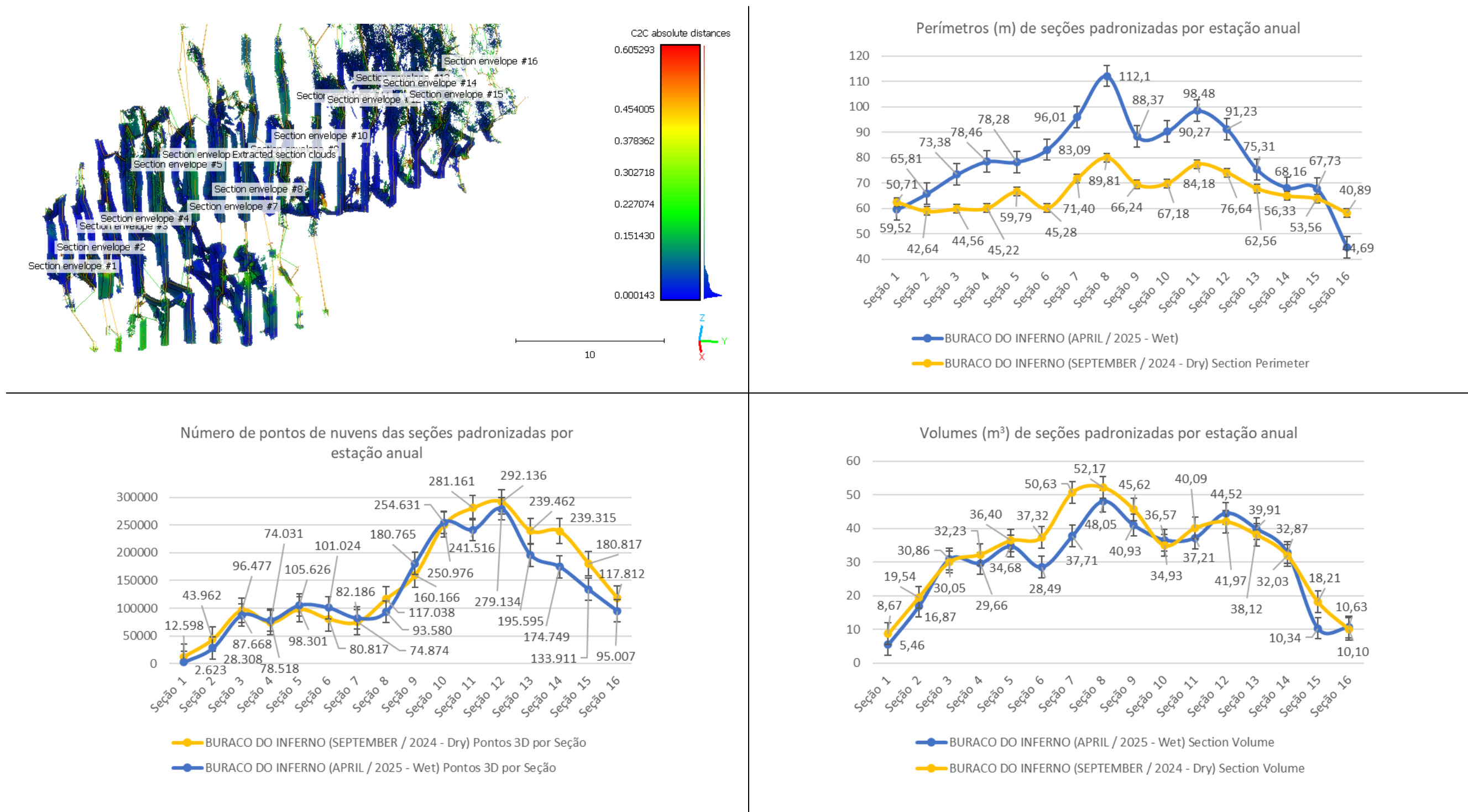


Figura 5.15. Prancha com posição e gráfico das seções padronizadas para a caverna Buraco do Inferno, incluindo gráficos com as variáveis de valor do perímetro, número de pontos 3D e volume.

De modo geral, a caverna JK foi a única com redução percentual dos valores para a estação úmida, de -131,21%, potencialmente influenciada pela influência de umidade interna. Ela interferiu na formação de falsas superfícies internas, reduzindo os valores das variáveis nas seções.

Destaque do aumento foi para a Lajedo, de 782,20%. Principais influências foram a deformação de uma nuvem para a outra, deslocando o posicionamento ideal das seções entre estações. Isto em função da diferença do caminhamento com o laser *scanner* entre campanhas e otimização da quantidade necessária de nuvens de pontos 3D para a cobertura total da caverna. O comportamento demonstrou aumento dos volumes e pontos 3D, reduzindo os perímetros.

Casa da Pedra e Buraco do Inferno apresentaram valores intermediários similares de aumento, de 210,43% e 218,92% respectivamente. Reconhece-se a influência da vegetação, ampliando os perímetros e otimização do escaneamento com redução dos pontos 3D e dos volumes. Essa otimização do escaneamento na segunda campanha é verificada pela redução geral dos valores de número de pontos 3D nas seções. Os perímetros e volumes demonstraram aumento geral consideráveis, entre 400 e 800%.

Tais diferenças substanciais podem ser justificadas por interferências da vegetação e da umidade/drenagem subterrânea nas morfologias das seções entre as varreduras. Os efeitos do ambiente úmido e/ou com poeira (em forma de aerossóis) são denominados de “efeito de atenuação atmosférica” ou *atmospheric attenuation effect*, por Nováková *et al.* (2022). Representa a diminuição ou desvio do pulso do laser durante sua propagação pela atmosfera, relacionada às condições atmosféricas médias durante a varredura, por exemplo, umidade, temperatura ambiente e concentração de aerossol.

O mesmo desafio ocorre em cavernas com drenagem profunda ou submersas, como aborda Nocerino *et al.* (2019). Tais efeitos foram notados nas cavernas com umidade aparente, a JK, Casa da Pedra e Lajedo.

Magnetismo, associado a cavernas ferríferas, potencialmente pode ser apontado como fator de interferência em escaneamentos. Tal fator já reconhecido nos processos topográficos convencionais, demandando leituras manuais dos ângulos, mantendo a única leitura direcional com bússola, aquela que parte da amarração inicial do ponto GPS para início da linha de trena. Comparando mapas topográficos convencional com o tridimensional, foi reconhecida esta divergência locacional entre os perímetros mapeados em estudo de Lima (2025).

No caso da caverna JK, considerando a visada em planta, não se constataram diferenças notórias, apenas variações de abrangência dos mapeamentos entre os métodos topográficos convencional e tridimensional. A **Figura 5.16** demonstra esse comparativo entre as áreas em planta.

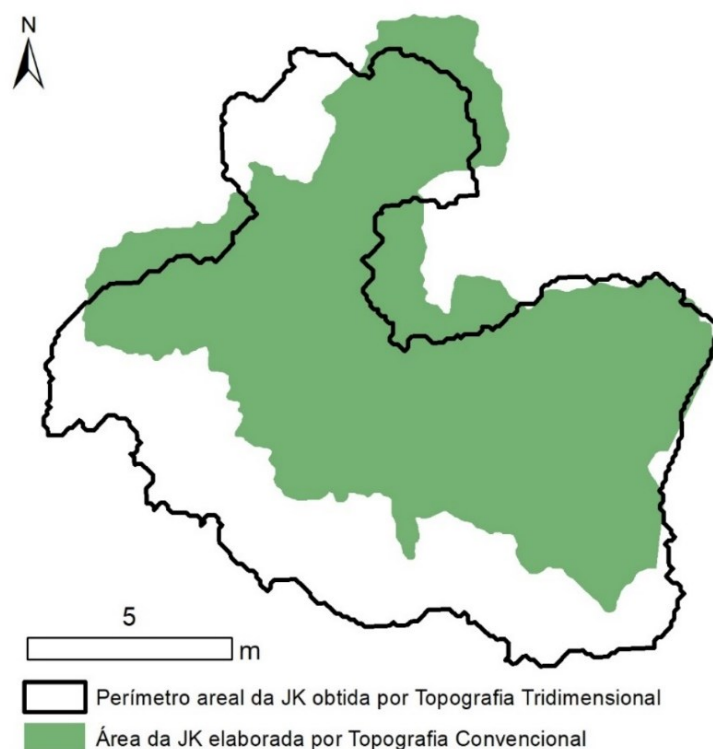


Figura 5.16. Limites areais comparados entre o método topográfico convencional e tridimensional. Não se constata deslocamentos bruscos ou nítidos sob potencial influência magnética. A diferença se dá apenas pela abrangência dos mapeamentos.

No caso do método tridimensional visualizado em perfil, para a caverna ferrífera JK, comparando o alinhamento de nuvens 3D obtidas em mesma semana (escaneamento 1 em 23/09/2024 e escaneamento 2 em 27/09/2024) pela superfície de crosta detrito-laterítica, foi reconhecida variação de ângulo da caverna.

Desta maneira, considera-se potencial interferência do magnetismo em equipamentos eletrônicos de *laser scan* como causa principal, pois não havia outro fator ambiental que pudesse gerar tal incidência, demonstrada na **Figura 5.17**. Recomenda-se cautela, pouca velocidade e conferência durante escaneamentos em cavernas ferríferas.

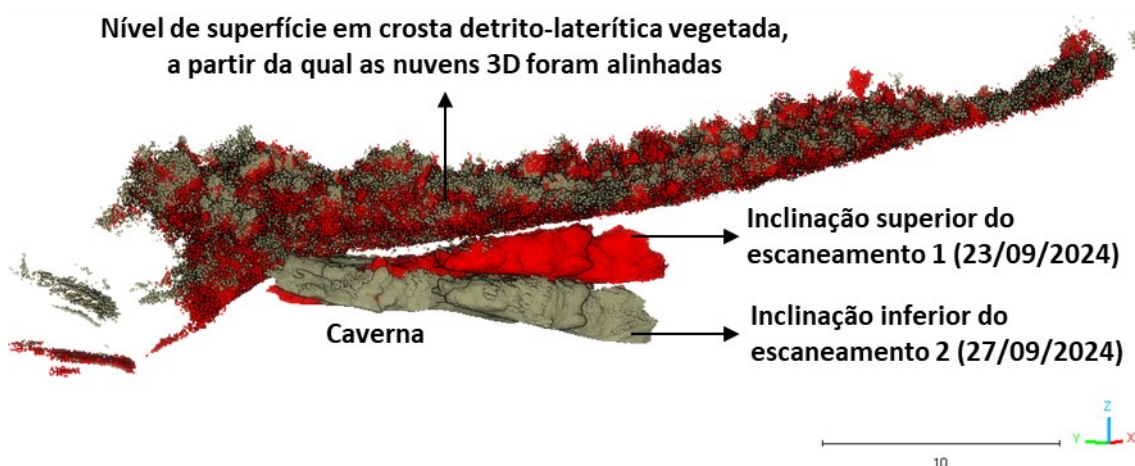


Figura 5.17. Nuvens 3D alinhadas da caverna ferrífera JK, com alinhadas ao nível da superfície, indicando variação na inclinação da caverna em relação à superfície. Interferência essa considerada por magnetismo local.

Soma-se a isso o fator de distorção nas nuvens compostas (com mais de uma captura para sua cobertura) ou entre as capturas devido à interação do sensor com fatores locais com acessibilidade limitada. Há ainda a limitação do georreferenciamento entre as nuvens, a partir da qual algumas localizações acabam sendo potencialmente deslocadas.

Ambos casos foram constatados por Grasso *et al.* (2023), em mais de um sensor, no mapeamento da caverna Bossea (NW da Itália), onde distâncias entre nuvens e seções 3D comparadas chegaram a até dois metros em mais de um sensor (BLK2GO e Stencil-2). Conforme estes autores, o desempenho dos resultados, a precisão das trajetórias é fortemente influenciada pelas condições de aquisição (tipo de ambiente, variações de luz, variações de altitude, umidade) e pelo operador.

Simultaneamente, caso similar foi constatado por Dora *et al.* (2025), em uma área da caverna Agios Georgios (NE da Grécia) ao comparar um sensor estático (TLS) FARO com o iPhone LIDAR móvel, cujas distâncias absolutas máxima e média entre nuvens 3D foram 92,9 cm e 5,7 cm respectivamente. Dessa maneira, um alinhamento perfeito entre nuvens 3D de mesmo sensor ou similares não são atingidas atualmente.

Ao avaliar as variáveis por regressão linear entre as estações seca e úmida e cavernas, chegou-se na prancha do **Gráfico 5.8**. Interessante notar que a JK foi a única com coeficiente diferente e inferior, de 0,86. As três demais adquiriram coeficiente de 0,94.

Este quadro reforça eventual excepcionalidade morfológica das cavernas ferríferas, mesmo pela análise de seções padronizadas, assim como potenciais influências hídricas e magnéticas afetando significativamente nos escaneamentos. As cavernas carbonática, granítica e quartzítica indicaram um coeficiente distante de 1,0, de 0,06 nas nuvens 3D, enquanto a ferrífera foi de 0,14, superior ao dobro.

A continuidade dos monitoramentos permitiria refinar um comportamento anual da morfologia 3D das cavernas, estabelecendo limites de corte para alterações de integridade física hipotéticas.

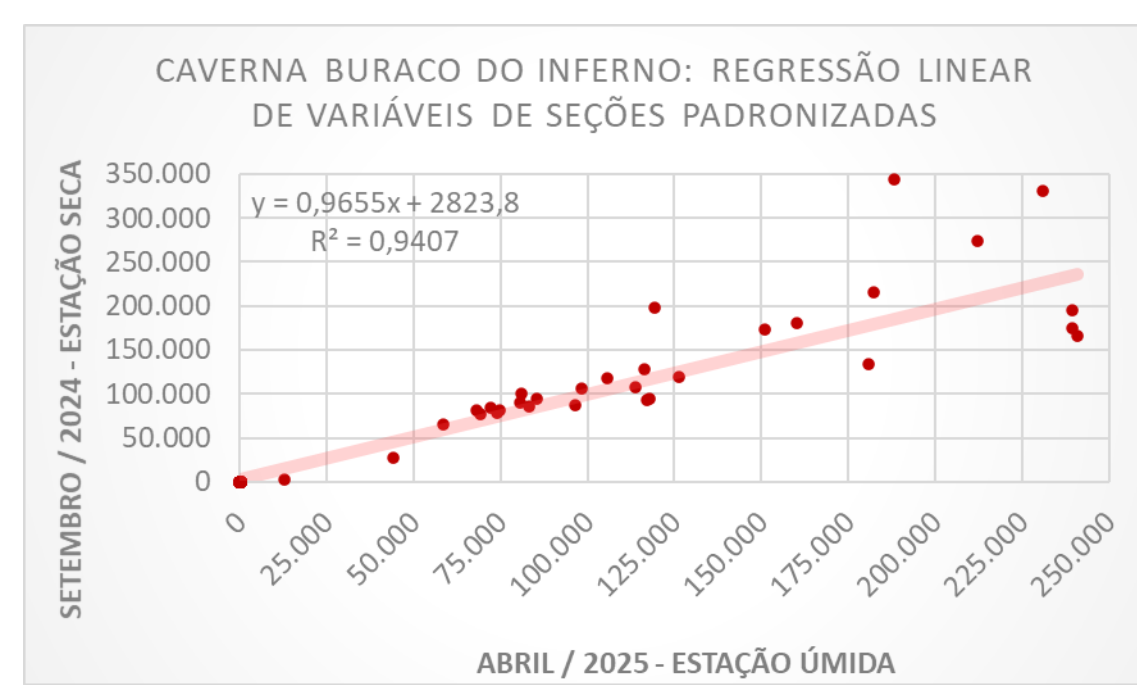
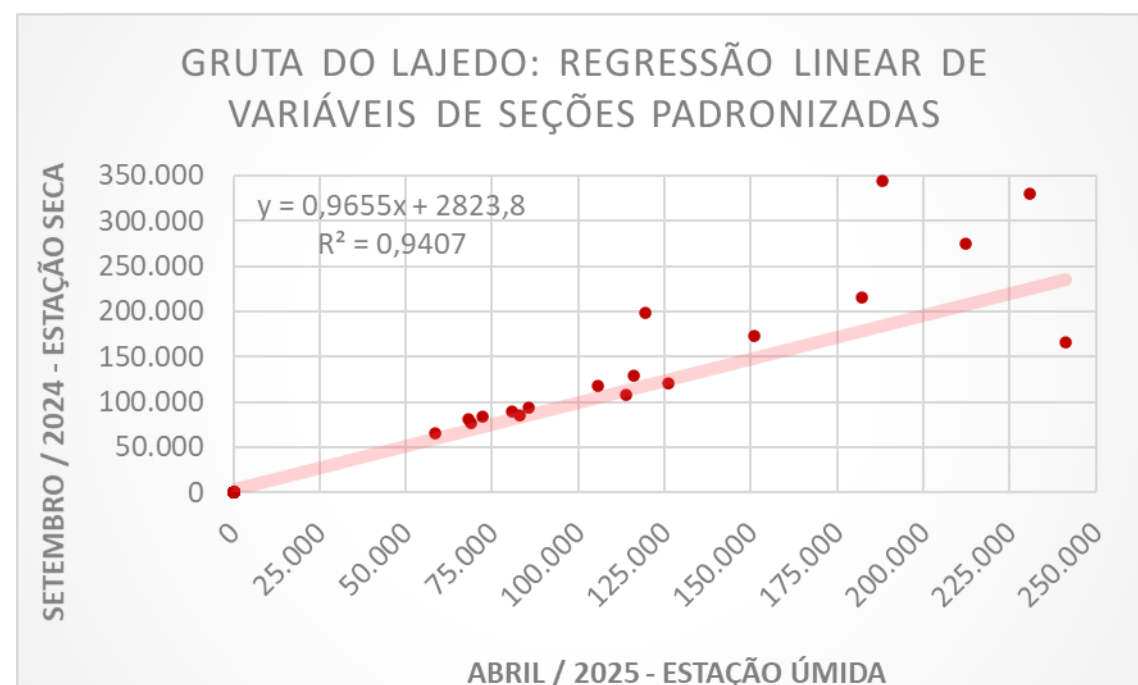
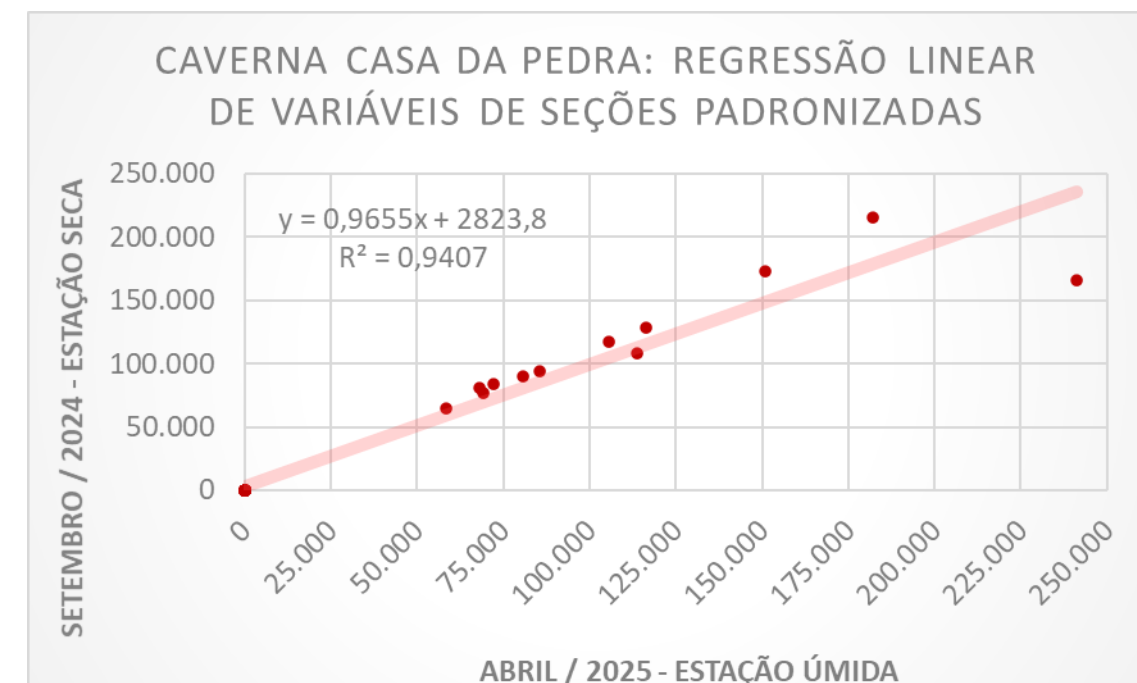
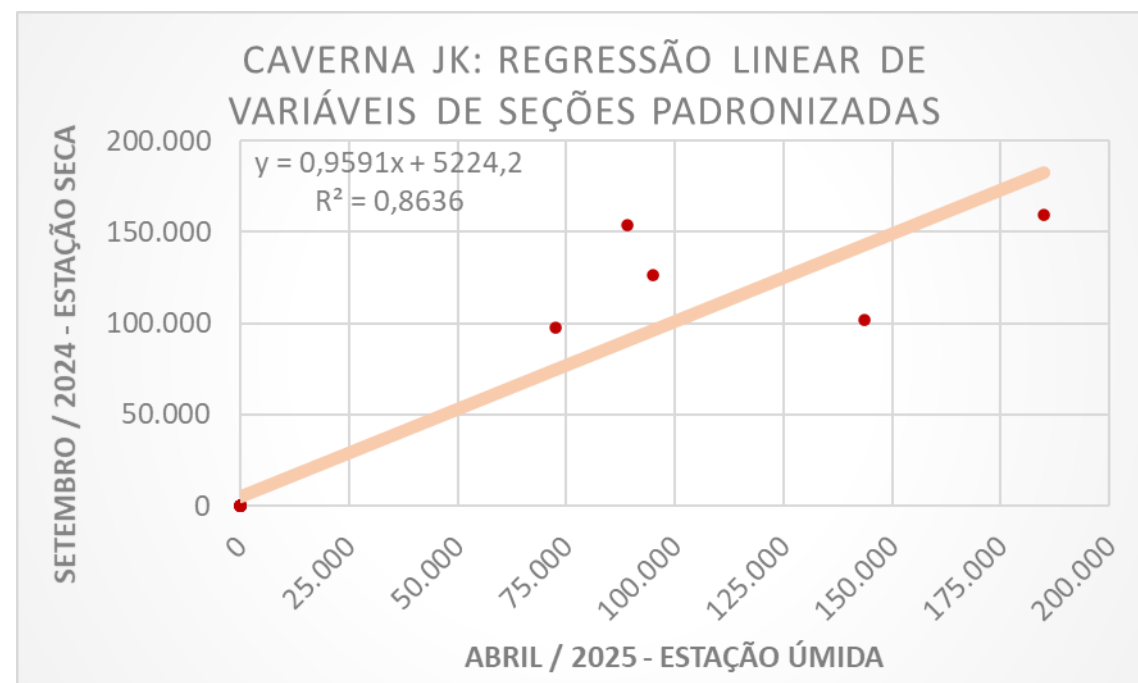


Gráfico 5.8. Regressões lineares entre estações para as variáveis (perímetros, número de pontos 3D e volume) consideradas das seções padronizadas nas cavernas.

Alternativamente, é possível realizar manualmente secções correlacionadas em cada nuvem, ou secções móveis disponíveis no *software*, permitindo a verificação visual das alterações morfológicas, nas cavernas. Um exemplo é mostrado na **Figura 5.18**, em cortes manuais aproximados na caverna Casa de Pedra, com a presença de uma declividade significativa do teto. Esse tipo de conferência traz segurança a possíveis alterações identificadas nas análises quantitativas estatísticas. Ao passo, que a **Figura 5.19** exemplo de caso em que as nuvens sazonais da caverna Buraco do Inferno apresentam distâncias totalmente aderentes entre si.

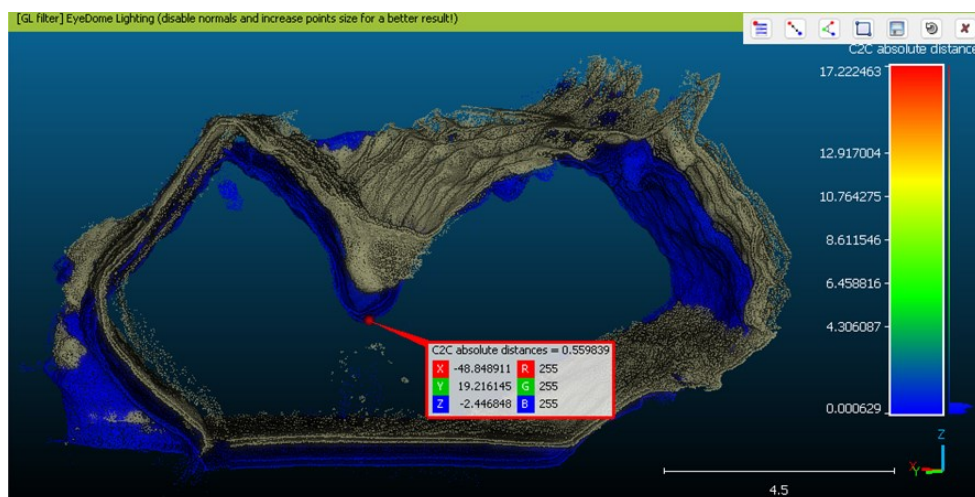


Figura 5.18. Seções manuais aproximadas aplicadas nas nuvens de trecho da caverna Casa da Pedra com teto de inclinação expressiva e paredes com *scallops*. Distâncias em metros. A distância no ponto é de 55,98 cm.

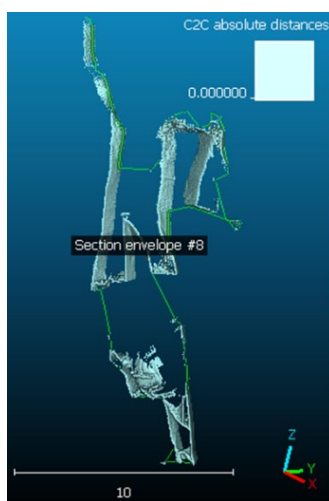


Figura 5.19. Exemplo de análises de perímetros e nuvens 3D sazonais de seção com comparativo de distâncias absolutas de largura para a caverna Buraco do Inferno, totalmente aderentes entre si. Unidades em metros.

Simulação de dano, por queda parcial de teto, foi aplicada na caverna JK. Porção de seu teto distal foi recortada da nuvem 3D e alocada logo abaixo no piso. Importante salientar que em função de uma alteração dessa, não somente a área afetada apresentará uma variação da distância/forma, mas também o local de deposição. Ao aplicar a análise de distâncias absolutas entre nuvens sazonais, incluindo esta alteração hipotética, foi possível rastrear a mudança através de seção dinâmica, indicada na **Figura 5.20**.

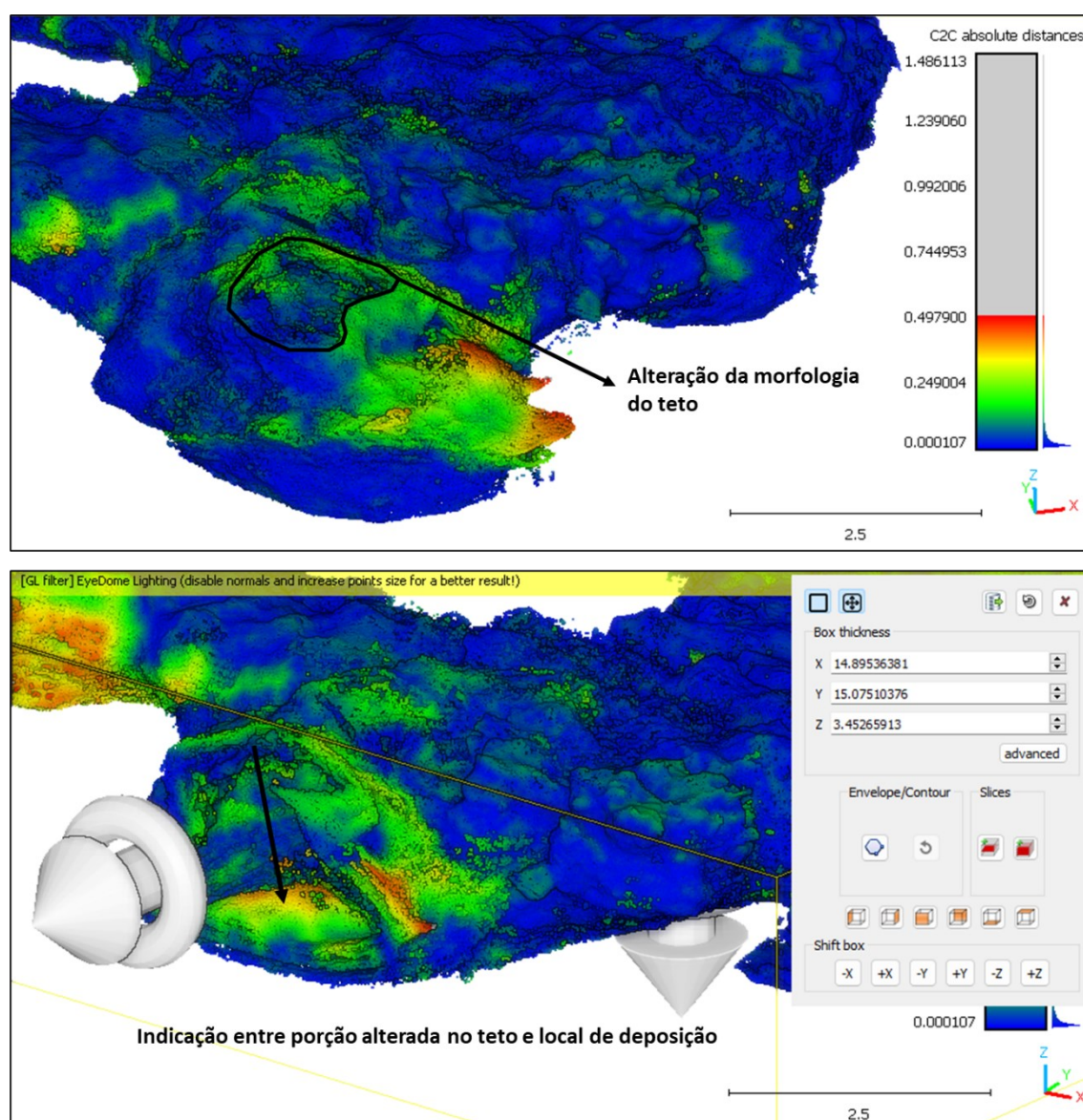


Figura 5.20. Simulação de dano em teto da caverna JK, com indicação da identificação na forma e do local da deposição por distância absoluta entre nuvens 3D sazonais, com distâncias entre 20 e 40 cm.

5.4. Resultados da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL: composição de cenários de evolução qualitativos e comportamento ambiental atual dos casos analisados

5.4.1. Resultado da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Caso I: Interpretação evolutiva da planície do Rio das Mortes e Gruta Casa da Pedra, a partir do uso de escaneamento tridimensional a laser

5.4.1.1. Introdução

A Gruta Casa da Pedra corresponde a uma feição de caverna historicamente conhecida desde a ocupação e formação dos municípios de São João del-Rei e Tiradentes - MG. Lendas locais do período colonial, envolvendo índios e os portugueses emboabas, além de expedições históricas, como a do Cônsul Geral do Império Russo no Brasil, Georg Heinrich von Langsdorff (1822-1829) e do Imperador Dom Pedro II e sua comitiva em 1881 (Sena *et al.*, 2011), indicam o vasto período de reconhecimento da gruta e sua visitação.

Seu primeiro mapeamento topográfico técnico conhecido foi realizado por Álvaro da Silveira em 1894 (IBGE, 1939), quando se aponta pedreira próxima como atividade extrativa existente, expandida por atividade mineradora atual. Desde então, ou em 131 anos, não houve atualização técnica de sua topografia e da interpretação de seus indicadores evolutivos.

5.4.1.2. Área de estudo

A Gruta Casa da Pedra localiza-se a aproximadamente 11 Km a partir do trevo de São João del-Rei - MG, sentido leste pela rodovia BR-265 a Tiradentes até trevo, do qual desloca-se um quilômetro para norte. Salienta-se que a mesma se encontra a 1,35 Km ao sul, em linha reta, da calha do Rio das Mortes.

O estudo apresenta duas escalas em função das abordagens realizadas, sendo:

- 1- Análise nos limites da Gruta Casa da Pedra. Seus principais atributos são apresentados na **Tabela 5.5**;
- 2- Correlações geomorfológicas com a planície e rede hidrográfica do entorno, desde a confluência entre o Rio Elvas (de leste), com Córrego da Pedra (de sul), com o Rio das Mortes (de norte para oeste; nível de base local).

Tabela 5.5 – Atributos espeleométricos calculados para a gruta Casa da Pedra.

NOME	LITOLOGIA	MÉTODO TOPOGRÁFICO	DETALHE DE MAPEAMENTO*	PROJEÇÃO HORIZONTAL (m)	DESNÍVEL(m)	ÁREA (m ²)	VOLUME (m ³)
Casa da Pedra	Calcário (Sequência Barroso)	3D	BCRA-XD	527,34	7,85	3.135,20	14.822,77

*Nível de detalhe de mapeamento seguindo a BCRA: *British Cave Research Association*.

A Geologia envolvida é composta por três sequências deposicionais sobre o embasamento, conforme Ribeiro *et al.* (2003) a seguir:

- Embasamento paleoproterozoico (Psvs): Metafelsitos, Metabasitos e Metassedimentos. Há menor proporção de filitos carbonosos e manganesíferos e sericita filitos cinzentos, escassos quartzitos finos, gonditos, metawackes e metadiamicititos ricos em seixos de felsitos. Pequenos *stocks* e diques de granitóides finos cortam a unidade;
- Sequência mesoproterozoica Barroso > Unidade Metacalcários e Calci-filitos (Mcb2) encaixante da Gruta Casa da Pedra: formada por metacalcários que

afloram em porções semicirculares em regiões já erodidas dos pelitos da sequência Prados. Aparecem em discordância sobre o embasamento, enquanto os pelitos Prados recobrem, em discordância, o embasamento, os calcários Barroso e os quartzitos de São João Del-Rei, e são cobertos por filitos Andreilândia. Os metacalcários encontram-se cobertos com espessos mantos de alteração, amarelo-avermelhados. Os calcários da sequência Barroso apresentam-se em formas lenticulares, intercalados em meio às rochas filíticas. São rochas fundamentalmente calcíticas, bastante homogêneas, com variações litológicas em função do teor e do tipo de impurezas;

- Sequência mesoproterozoica Prados > Unidade metapelitos filíticos (Mcp): é dominada por metapelitos cinzentos com textura de ardósia ou filito mais ou menos desenvolvida. Estas rochas aparecem em lâminas planas e camadas tabulares delgadas maciças, gradadas ou laminadas, formando sucessões espessas, em geral descritas como filitos laminados;

- Depósitos sedimentares fluviais quaternários (Q): são depósitos fluviais cascalhosos, arenosos e lamosos, expressivos nos principais rios da região, como os rios das Mortes e Elvas, além de afluentes importantes. Ocorrem fácies de canal incluindo barras cascalhosas e arenosas, geralmente longitudinais ou em pontal; fácies de planície de inundação, via de regra sedimentos arenosos finos e lamosos, maciços ou com estratificação delgada; e fácies de lago de meandro abandonado com sedimentos lamosos, geralmente cinzentos e maciços gerados por decantação. Sua distribuição é apresentada na **Figura 5.21**.

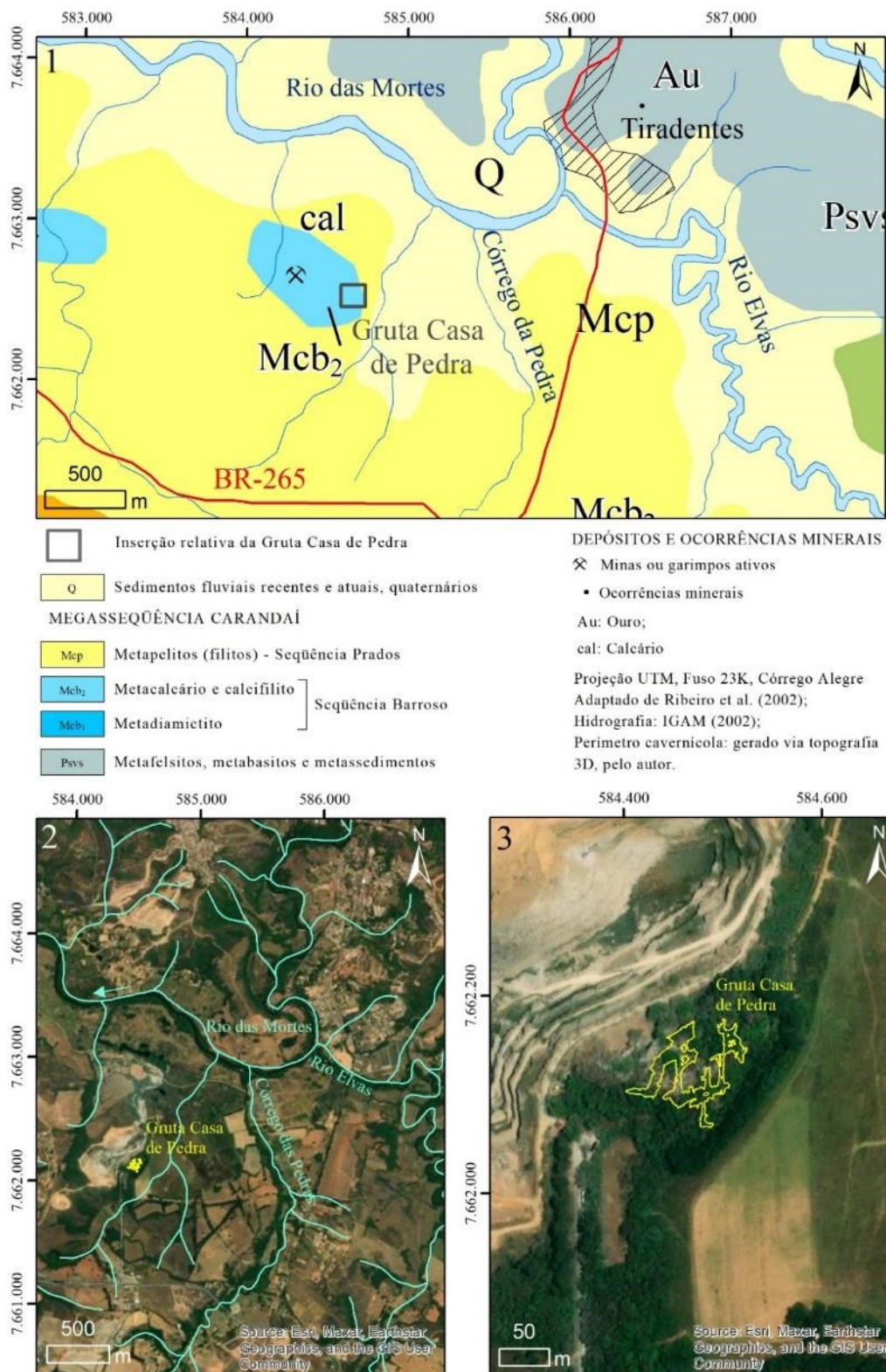


Figura 5.21. Encartes com localização da gruta Casa da Pedra e planície do Rio das Mortes na seguinte sequência: (1) sobre a Geologia; (2) sobre imagem; (3) detalhe do perímetro da gruta sobre imagem.

5.4.1.3. Análise da Gruta Casa da Pedra

A altimetria total obtida na nuvem de pontos filtrada foi de 18,09 m. O terço superior das altimetrias da caverna demonstra que as feições inicialmente desenvolvidas e/ou mais elevadas foram: (I) dolinas; (II) claraboias em fendas; (III) conduto linear; (IV) escarpas residuais; representadas na **Figura 5.22**.

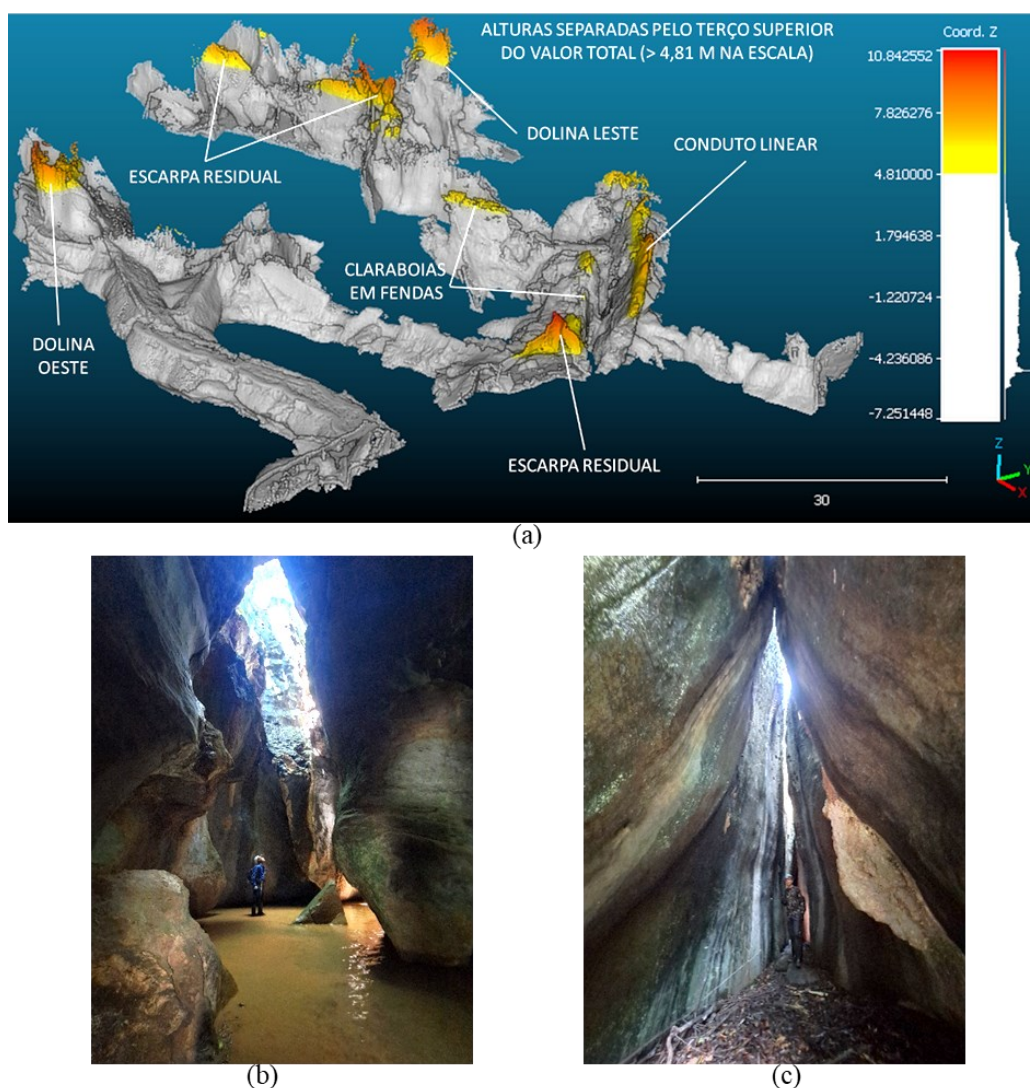
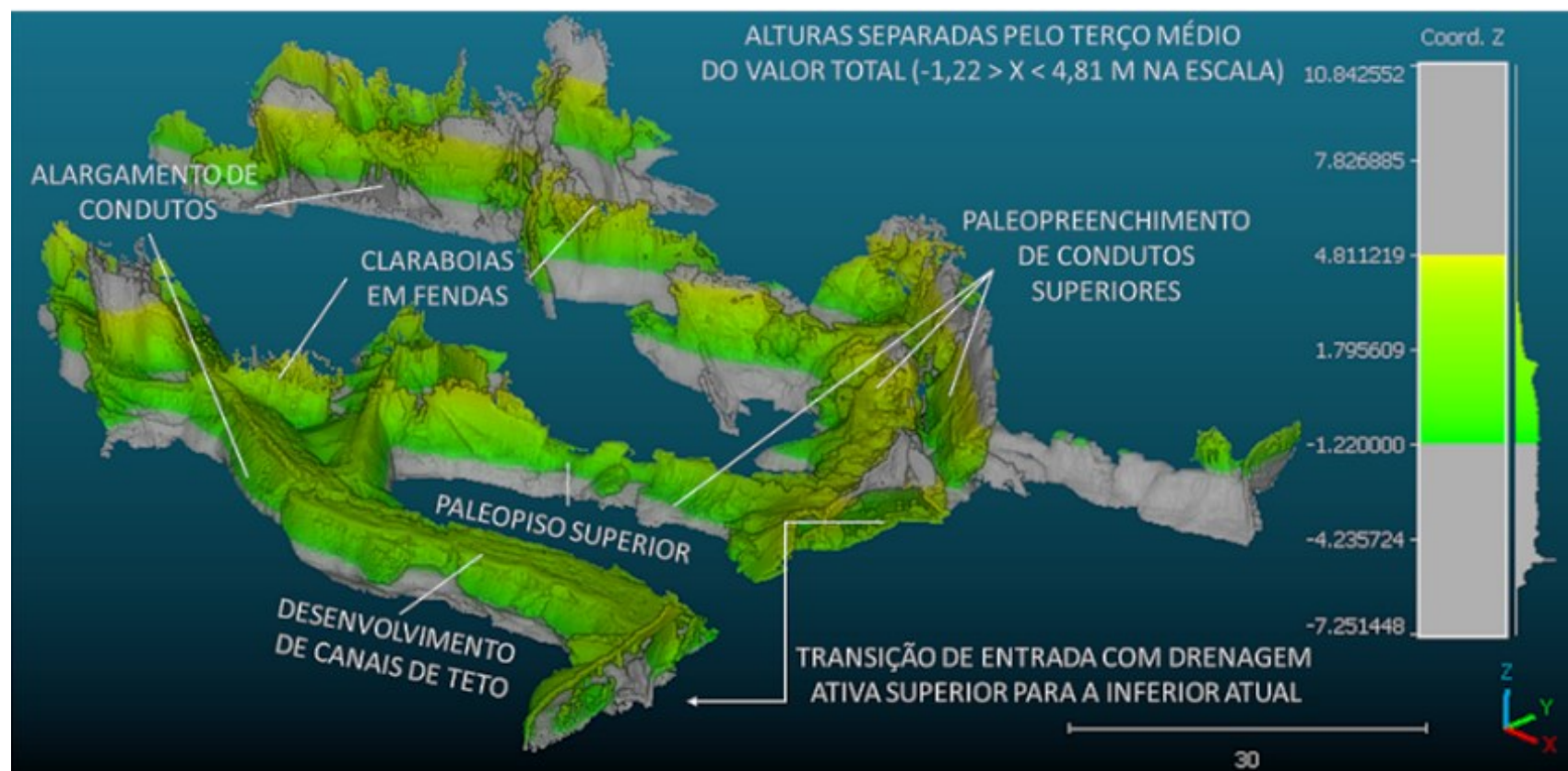


Figura 5.22. Morfologia tridimensional da gruta Casa da Pedra, filtrada pelas feições nas maiores alturas: (a) nuvem de pontos tridimensional filtrada, tematizada pelo terço superior das alturas na escala a partir do escaneamento 3D (superior a 4,81 m), com indicações de feições principais identificadas; (b) exemplo de dolina, verticalizada, com predomínio de gênese dissolutiva no limite leste da gruta; (c) conduto desenvolvido ao longo de fenda vertical linear, com sequência de claraboias.

Altimetrias de terço intermediário da caverna englobam feições modeladas de: (I) transição entre entradas principais e condutos de fluxos subterrâneos; (II) formação de canais de teto no conduto hidrologicamente ativo atual; (III) abertura de novas claraboias em fendas; (IV) nível de paleopiso em conduto até entrada superior; (V) marcas de paleopreenchimento em interligação de condutos a partir da entrada superior. Esse conjunto é representado na **Figura 5.23**.

Altimetrias de terço inferior da caverna têm feições indicativas de: (I) alargamento e coalescência de condutos; (II) solapamento de condutos; (III) novo nível (inferior) de paleopreenchimento com paleopiso; (IV) abertura de novos condutos inferiores de atalho ao escoamento; (V) seções de condutos com nova incisão energética hídrica; (VI) desenvolvimento de espeleotemas. A **Figura 5.24** e **Figura 5.25** apresentam estas feições.



(a)



(b)



(c)

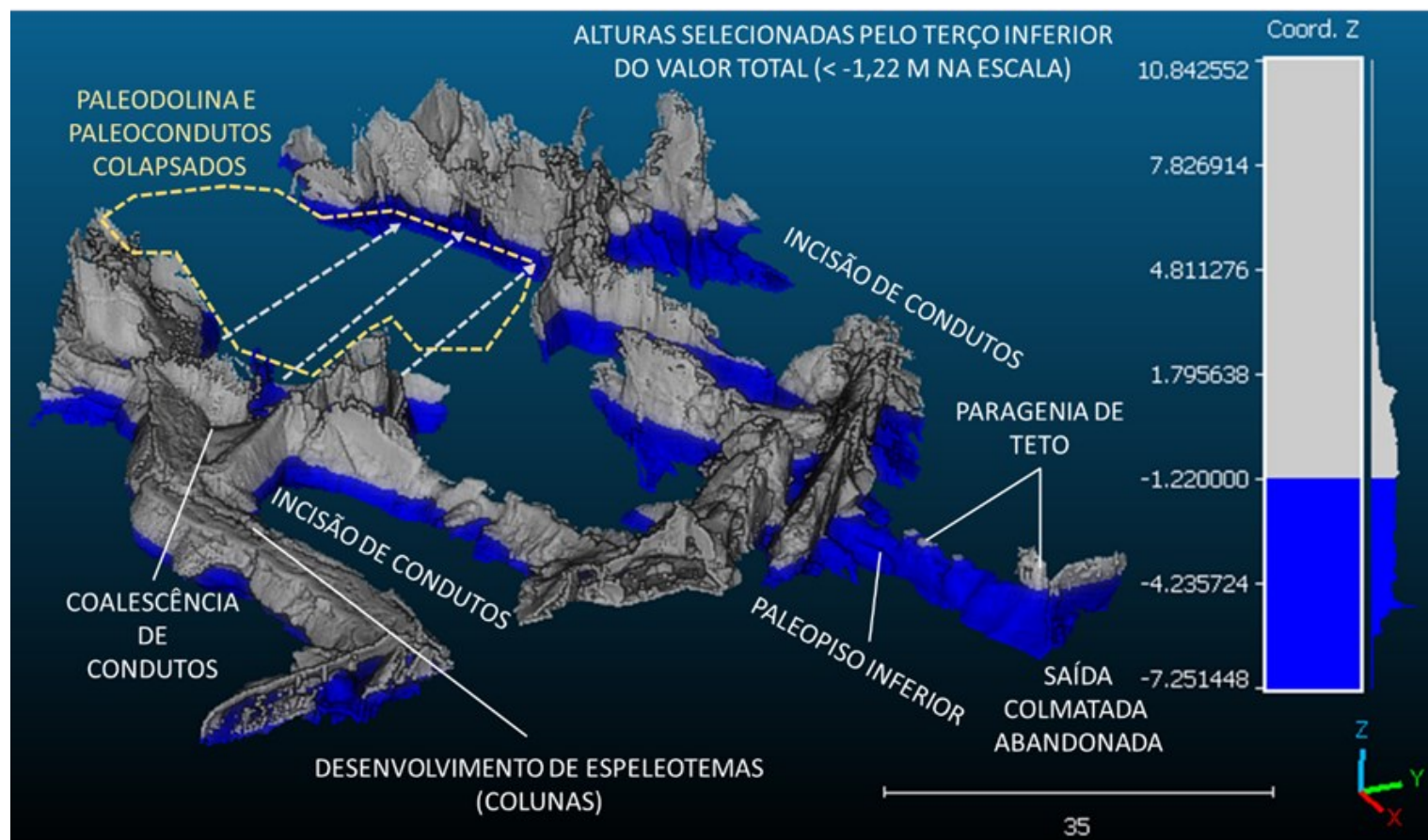


(d)



(e)

Figura 5.23. Morfologia tridimensional da gruta Casa da Pedra, filtrada pelas feições em alturas intermediárias: (a) nuvem de pontos tridimensional filtrada, tematizada pelo terço médio das alturas na escala a partir do escaneamento 3D (entre -1,22 m e 4,81 m), com indicações de feições principais identificadas; (b) conduto superior principal com piso em declive coberto fina camada de seixos esbranquiçados e, nas paredes e teto, amplas crostas de paleopreenchimento; (c) claraboia em fenda transversal ao salão principal, em cujo limite oeste, forma-se terraço sedimentar terrígeno, adjacente à dolina oeste; (d) logo ao lado, parede com continuação de sedimentos terrígenos alóctones, sotoposto a camada de paleopiso calcítico superior na altura de -1,58 m, abaixo de pendentes de teto indicativos de período paragenético; (e) conduto transversal com trecho de paleopreenchimento terrígeno alóctone completo na seção (total soterramento) e nível de paleopiso parcialmente calcítico na altura de -1,17 m dividido em passagem superior e inferior.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.24. Morfologia tridimensional da gruta Casa da Pedra, filtrada pelas feições em alturas inferiores: (a) nuvem de pontos tridimensional filtrada, tematizada pelo terço inferior das alturas na escala a partir do escaneamento 3D (abaixo de -1,22 m), com indicações de feições principais identificadas; (b) feição residual, denominada “pulpito”, esculpida em paleopreenchimento, em nível inferior na altura de -2,36 m, notando-se ao final abertura de parede onde há um dos canais de ressurgência hídrica; (c) paleopiso predominantemente calcítico na altura -2,78 m, com indícios de paragenia nas meias cúpulas de teto, localizado em conduto inferior abandonado por colmatagem sedimentar; (d) vista para seção semi-elíptica interna de salão principal, demonstrando fase de alargamento na altura de -2,10 m, coalescência dos paleocondutos de direita e esquerda, separados pelo pendente de teto central, com posterior fase de incisão; (e) entrada de conduto meandrante, com principal vazão de descarga drenante pra área central de paleodolina solapada, demonstrando nova fase de incisão erosiva em novos condutos.

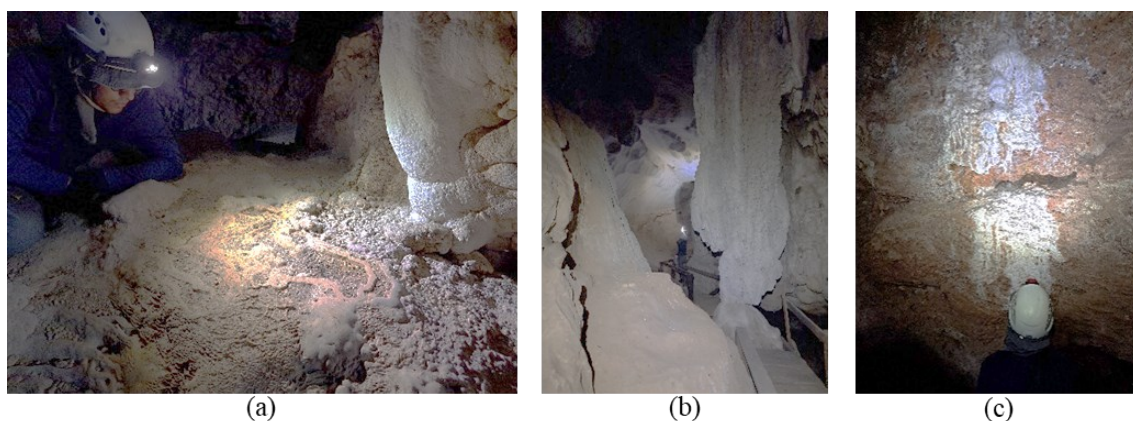


Figura 5.25. Exemplos de espeleotemas desenvolvidos em última fase da caverna, sem interferência sedimentar externa, que demonstram última fase de desenvolvimento da caverna, a saber: (a) estalagmite com travertinos e pérolas imaturas no salão de entrada superior; (b) coluna desenvolvida no salão de entrada atual sobre drenagem sem interferência sedimentar; (c) escorrimentos texturizados, sobre parede coberta por paleopreenchimento ao fundo de entrada principal superior, demonstrando última fase de desenvolvimento da caverna.

5.4.1.4. Análise de inserção na paisagem do entorno

A área de estudo localiza-se em contexto geomorfológico transicional entre a depressão do Rio das Mortes-São João Del-Rei, em cotas altimétricas de 880 a 900 m basais às serras do Lenheiro e de São José, com o planalto de Madre Deus de Minas a cotas superiores em sentido ao sul. Nesta depressão, além de sequência de vales colmatados em planícies sedimentares alagadiças é apontado pelos autores Saadi & Valadão (1990) a existência de um *rift* cenozoico com bacias transtensionais alinhadas de SSW a ENE. Corresponde a uma sequência de *grábens* preenchidos por depósitos aluviais deformados, a partir da cidade de Prados a leste, até bacia tectonicamente alçada em domo com inversão de relevo nos arredores de São Sebastião da Vitória a oeste.

A interpretação de datação pelos autores seria desde o Plioceno a todo o Quaternário. A disposição das feições é demonstrada pela **Figura 5.26**. As **Figuras 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30** ilustram exemplos de locais onde há exposição sedimentar destas bacias.

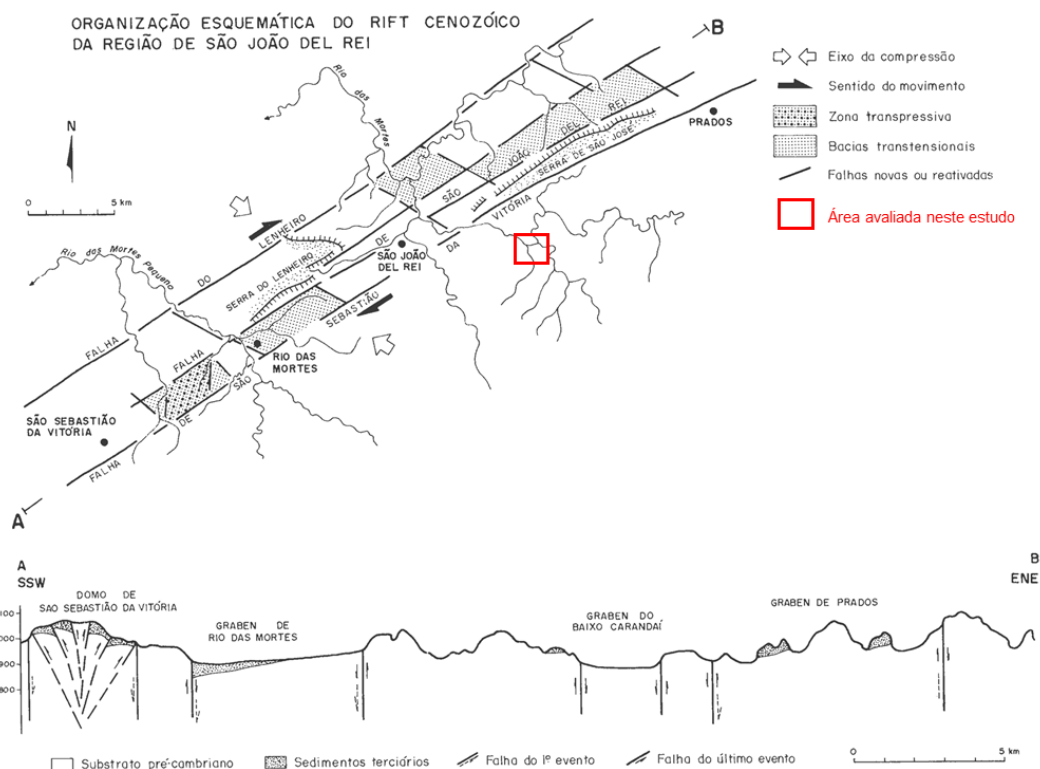




Figura 5.29. Vista frontal de terraço aluvial deformado e basculado do *gráben* do Baixo Rio Carandaí, na avenida de entrada à São João del-Rei, sobre contato (assinalado em amarelo) com o embasamento pré-cambriano metassedimentar de coloração clara. Fonte: Autor (2010).



Figura 5.30. Fotos de detalhe do terraço aluvial supracitado, para camada inferior conglomerática de seixos arredondados com cimentação silicosa à esquerda. Ao centro, contato entre camadas argilosa laterizada (superior) e areno-argilosa bege (intermediária), assim como, à direita trecho basculado do terraço com camada laterizada argilosa superior e de conglomerado aluvial inferior. Fonte: Leonardo Rocha (2019/2025).

A partir do modelo digital de terreno disponível, existem os seguintes níveis altimétricos (acompanhados da **Figura 5.31** à frente):

- (I) caverna Casa da Pedra seu topo aos 913 m;
- (II) comparativamente com o intervalo total de altitude da nuvem de pontos da caverna, de 18,09 m, sua descarga se dá aos 894,91 m;
- (III) calha do Rio das Mortes em 889 m;
- (IV) a variação altimétrica entre Casa da Pedra e calha do Rio das Mortes é de 24 m;
- (V) o gradiente de declividade total é de 1,85 cm/m;

(VI) o gradiente de declividade após a Casa da Pedra, ou planície sedimentar do Rio das Mortes, é de 4,55 mm/m, com recorrência de lagoas marginais e concentrações de umidade.

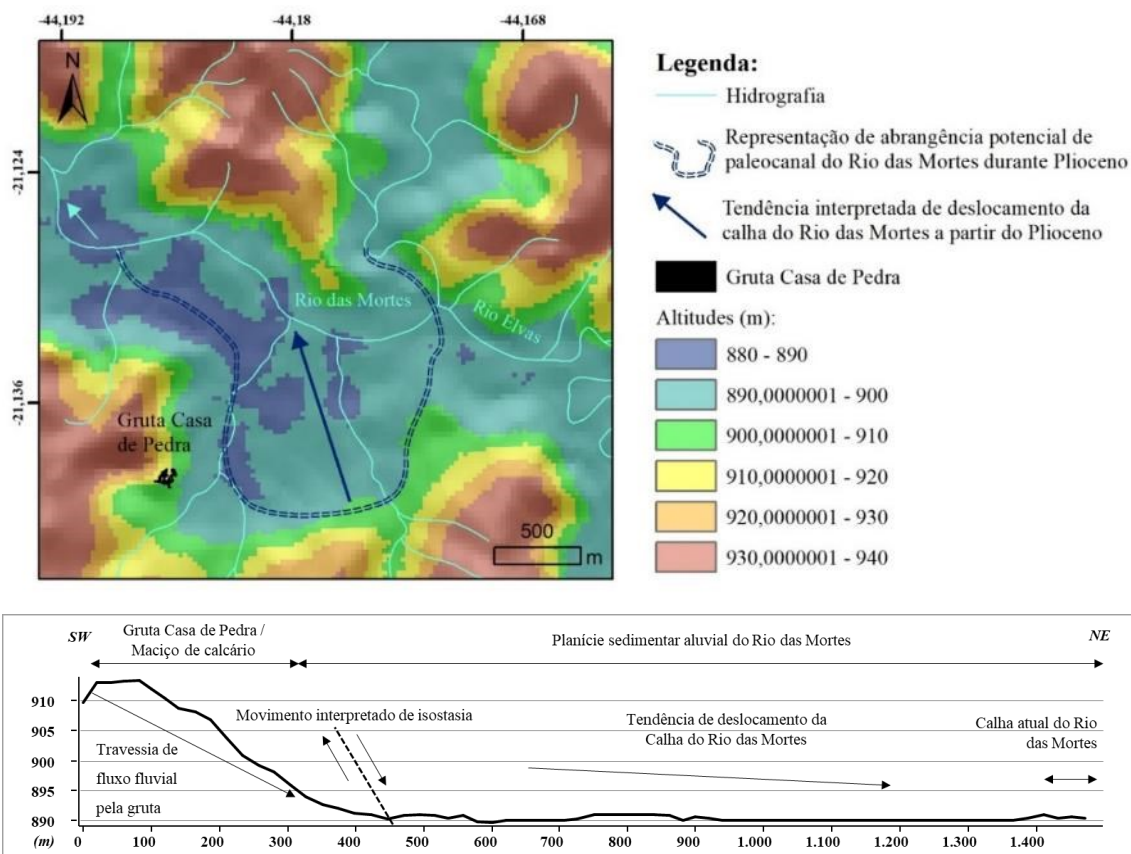


Figura 5.31. Demonstração das altimetrias entre planície atual do Rio das Mortes e gruta Casa da Pedra, indicando o processo de colmatção e tendência de migração do paleocanal fluvial para a paisagem contemporânea.

5.4.1.5. Integração das interpretações para proposta de evolução morfodinâmica da caverna Casa da Pedra e entorno

Neste item, de modo sintetizado, apresenta-se a **Tabela 5.6**, demonstrando a relação interpretativa entre a bibliografia pertinente e a análise realizada. Reconhece-se ao menos seis fases evolutivas para a caverna e quatro para a planície adjacente.

Tabela 5.6 – Comparação entre bibliografia e as fases identificadas na presente análise, de desenvolvimento regional e gruta Casa da Pedra.

GRÁBEN DE RIO DAS MORTES (SAADI, 1991)					SUPERFÍCIES DE APLANAMENTO REGIONAIS (VALADÃO, 2009)	CORRELAÇÃO COM PRESENTE ESTUDO	
FASE	ÉPOCA GEOLÓGICA	IDADES	TIPO CLIMÁTICO INTERPRETADO	DESCRIÇÃO	DESCRIÇÃO	COMPARAÇÃO COM EVOLUÇÃO INTERPRETADA DA GRUTA CASA DA PEDRA	COMPARAÇÃO COM EVOLUÇÃO DA PLANÍCIE DO RIO DAS MORTES
1	MIOCENO (?)	23,03 a 5,33 Ma	TROPICAL ÚMIDO	Superfície de erosão do Planalto de Madre de Deus de Minas junto ao topo aplainado da atual Serra do Lenheiro / Serra de São José.	A partir de 11 Ma há impute de soerguimento regional, chegando a 550 m no entorno do Cráton São Francisco, fragmentando a Superfície Sul-Americana primordial, dando início ao modelamento da Superfície Sul-Americana I.	(I) Fase freática com potencial gatilho inicial da carstificação subterrânea no maciço da Gruta Casa da Pedra.	Início de formação de planície fluvial, com extensos alagamentos e baixa incisão, se desenvolvendo.
2	PLIOCENO (?)	5,33 a 2,58 Ma	MAIS SECO QUE O ATUAL	Evento tectônico, localmente com caráter transcorrente extensional com formação meio-gráben.	Novo episódio de soerguimento a 3 Ma, de até 600 m na faixa atlântica. Abertura de gargantes epigênicas; depressões interplanálticas e sublitorâneas. Inicia-se a modelagem da Superfície Sul-Americana II.	(II) Fase de formação do meio-gráben elevando relativamente o bloco do Planalto de Madre Deus de Minas, com substrato parcialmente carbonático da Fm. Barroso e matepelítica da Fm. Prados. Em consequência, potencialmente inicia-se a exumação do maciço rochoso da Casa da Pedra; passagem para ambiente vadoso. Incisão por dolinas e fraturas.	Incisão fluvial acentuada, com amplos meandros atingindo os arredores da Casa da Pedra, com truncamento por preenchimentos sedimentares da planície. Ramificação da rede hidrográfica com ampliação dos afluentes.
3	PLEISTOCENO INFERIOR (?)	2,58 a 0,780 Ma	TROPICAL ÚMIDO	Serra do Lenheiro / Serra de São José formadas com entulhamento da fossa de gráben por fluxos de lama e detritos com sequência fluvial formando planície de inundação.	Há continuação de eventos locais de isostasia com ajustes epirogenéticos.	(III) Fase de truncamento da incisão vertical dos condutos com soterramento sedimentar em nível superior; solapamentos de dolinas e fragmentação de paleocondutos cavernícolas. Redirecionamento da drenagem subterrânea para conduto principal atual.	Basculamento da calha do Rio das Mortes, em direção a São João del-Rei, dando sequência ao assoreamento da planície de inundação, acentuada pelo aporte de afluentes.
4	PLEISTOCENO MÉDIO / HOLOCENO (?)	780 a 130 ka; até ao atual	TRANSIÇÃO DE CLIMAS PARA O TIPO ATUAL	Compressão tectônica fragmentando relevo ao longo do gráben, verificadas por falhas normais, reversas e transcorrentes, estruturas duplex e em flor, além de dobras. Retomadas erosivas a montantes de afluentes com potencial retomadas de subsidência do gráben.	Continuação da modelagem da Superfície Sul-Americana II.	(IV) Retomada da erosão dos pacotes sedimentares de soterramento. Oscilações climáticas geram (V) nova fase de acumulação sedimentar, alargamento e coalescência de condutos. É seguida por (VI) nova fase erosiva, incisão e desmonte sedimentar, abertura de condutos secundários de escoamento até o nível atual, de escoamento subterrâneo laminar; desenvolvimento vertical de espeleotemas.	Abandono de antiga planície nos arredores da Casa da Pedra, aplainada, migrando a calha para norte e reduzindo os raios dos meandros.

5.4.1.6. Discussão

A aplicação dos métodos de escaneamento tridimensional com LIDAR 3D, do tipo móvel ou portátil (MLS), permitiu a cobertura completa da caverna em três horas totais. Mesmo com sete nuvens captadas no total foi possível concluir todas as etapas referenciadas em bibliografia, similar aos aplicados para os LIDAR's estáticos ou terrestres (TLS), de modo dinâmico e célere, sendo: (I) integração de nuvens em única; (II) georreferenciamento; (III) limpeza de excesso de pontos do tipo "ruído". Importante ressaltar, como Sales *et al.* (2025), que em função da necessidade de espacialização e compreensão de elementos cavernícolas, como desníveis, blocos, espeleotemas e outros mais sutis, seu registro complementar em campo revela limitações inerentes à resolução do equipamento.

O mesmo pode ser considerado em relação a bases cartográficas. Apesar da análise comparando bases de diferentes escalas, sendo elas altimétricas, hidrográficas e geológicas regionais com a tridimensional de detalhe, não se entende como uma limitação. Considera-se como nova fase para aprimoramento de estudos ambientais e geomorfológicos aos quais temos condição no Brasil. Este cenário serve de parâmetro para avanços tecnológicos e de levantamentos sistemáticos no âmbito regional e nacional.

O contexto de inserção da gruta Casa da Pedra demonstra um cenário ímpar e inter-relacionável com a evolução da planície do Rio das Mortes adjacente. A partir de propostas evolutivas do relevo existentes na literatura, é possível um entendimento paralelo de fases de desenvolvimento da caverna. Importante entender que a divisão em fases não impõe rupturas da carstificação, pois corresponde a um processo contínuo, ora acentuado e ora reduzido ao se considerar oscilações paleoclimáticas. Isso é bem demonstrado pelos níveis de sedimentação residuais e feições morfológicas remanescentes.

Destaca-se que neste processo é viável a inferência da idade da caverna, a partir do resultado obtido por Auler (1994), com taxas de desnudação para o carste de

Lagoa Santa (mesma zona climática) entre 70 a 150 mm.ka⁻¹.Aplicando-se a estas taxas, a variação altimétrica vertical da gruta Casa da Pedra (18,09 m), obtêm-se idade entre 2.713.500 e 1.266.300 anos, compatível com o intervalo evolutivo proposto, a partir do Plio-Pleistoceno. Mesmo período é indicado como início da formação das bacias sedimentares do *rift* de São João del-Rei por Saadi (1990).

A morfologia fluvial demonstra que a paleoplanície alagadiça do Rio das Mortes foi mais extensa, abrangendo a baixada de inserção da gruta Casa da Pedra de forma semicircular ou meândrica. Atualmente, manteve-se a superfície colmatada com alagamento parcial e deslocamento da calha para norte. Esse comportamento demonstra sedimentação, basculamento e variações da vazão erosiva fluvial. Ou seja, a evolução de ambas escalas demonstram fases correlatas de comportamentos neotectônicos epirogenéticos, marcantes na região (Saadi & Valadão, 1990).

Partindo do princípio que a caverna demonstra um processo local de exumação cárstica, este processo é demonstrado pela diferença altimétrica entre topo do maciço carbonático até a calha atual do Rio das Mortes de 24 m (consultado no modelo digital de terreno por IGAM, 2002). Este intervalo de altura é similar à maior seção descrita por Saadi (1991) para o *gráben* de Rio das Mortes, a seção II-C de 22 m. Associando-as à idade sugerida de primeiro impute de soerguimento no Mioceno por Valadão (2009), aos 11 Ma, é possível propor taxa máxima de soerguimento potencial para a área de estudo de 2,18 mm.ka⁻¹, cabendo o discernimento entre períodos de quiescência e de eventos abruptos.

Este cenário é reforçado pela proposta de Mito (1990) no zoneamento sismogênico do sudeste brasileiro. Conforme este autor, atualmente, as condições do relevo e tectônica parecem ser residuais, sendo os principais locais afetados durante o terciário serem irregulares, na qual a área em foco insere-se na Zona Sismogênica 10 – Bom Sucesso. Tal zona engloba eventos da borda sul do Cráton São Francisco, com epicentros em Formiga, Bom Sucesso, Lavras

e São João del-Rei, acompanhando a linha de contato do limite nordeste do Planalto do Alto Rio Grande com o Planalto de Belo Horizonte. Ele aponta que não há influência tectônica direta na formação do relevo, mas a sismicidade indica que ocorrem acomodações tectônicas sem precisar relações entre sismos e falhas. Dessa maneira, como teoria evolutiva é reconhecível que tal contexto impulsionou arranjos isostáticos na região de estudo, indo de encontro às demais propostas evolutivas para a gruta Casa da Pedra e planície do Rio das Mortes.

5.4.1.7. Conclusão

O escaneamento 3D da caverna Casa da Pedra, associado a métodos convencionais, permitiu detalhar o mapeamento, a morfologia de elementos não detectáveis ou delimitáveis a olho nu (canais de teto e rugosidades de paredes, por exemplo) e suas altimetrias no sentido de correlacionar com atributos da paisagem. Em outras palavras, viabilizou uma compreensão da morfodinâmica local, a partir da ampliação de formas e fenômenos interpretáveis em detalhe na caverna.

Torna-se mais uma ferramenta capaz de avançar nas escalas de análise. Citam-se outras vantagens significativas como na otimização do esforço necessário em campo, redução de exposição a riscos pela equipe, possibilidade de levantamentos segmentados (mais de uma campanha) e menor impacto ambiental causado pela redução da permanência da equipe no espaço subterrâneo (Araújo *et al.*, 2016; Fernandes *et al.*; 2023; Sales *et al.*, 2025).

A partir de detalhamento cavernícola, expandiu-se a interpretação para morfologias específicas dos arredores, demonstrando a importância entre detalhamento de mapeamento e escalas correlatas. Não se pretende que as taxas sugeridas sejam entendidas como absolutas, mas que contribuam para a compreensão relativa da dinâmica evolutiva geomorfológica do sudeste brasileiro. Neste sentido, as etapas futuras envolvem a comprovação por datações absolutas no contexto da área estudada, como também detalhamentos de bases cartográficas, a exemplo de topografias LIDAR superficiais e análises

compartimentadas de segmentos da caverna (canais de teto, estruturas geológicas, monitoramento de integridade física, entre outros).

Conclui-se que a caverna Casa da Pedra e a planície adjacente do Rio das Mortes apresentam marcos evolutivos correlacionáveis a partir do Plioceno. Na caverna foram detectadas seis fases enquanto a planície fluvial seguiu quatro fases principais acompanhando as épocas geológicas. O próprio curso fluvial que atravessa a caverna denota esta relação inerente, como forte indício de que paleocanal do Rio das Mortes tenha participado na evolução da Gruta Casa da Pedra.

5.4.2. Resultado da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Caso II: Exemplo de captura de drenagem de cabeceira serrana por desenvolvimento de carste não-tradicional. O caso da Gruta do Lajedo no topo da Serra do Lenheiro em São João del-Rei – MG.

5.4.2.1. Área de estudo

Passarelli (2023) apresentou em inventário patrimonial da Serra do Lenheiro a identificação da denominada Gruta do Lajedo. Sua localização está no topo do flanco norte do anticlinal da Serra do Lenheiro, a 1.187 m de altitude, sob a unidade geológica denominada Formação São José, conforme Aruzzi (2016), em posição inferior do Grupo São João del-Rei (composto pelas formações/sequências paleoproterozoicas Tiradentes, São José, Tejuco e Lenheiro).

Conforme este autor, a Formação São José apresenta espessuras entre 90 e 150 metros e em suas rochas predominam sucessões quartzíticas (metaquartzito-arenitos) bem litificadas e recristalizadas maciças. Estas sucessões se destacam também na paisagem pela frequente presença de camadas espessas (50-150

cm) geradas em paleoambiente interpretado como marinho raso. Esta localização é apresentada na **Figura 5.32**.

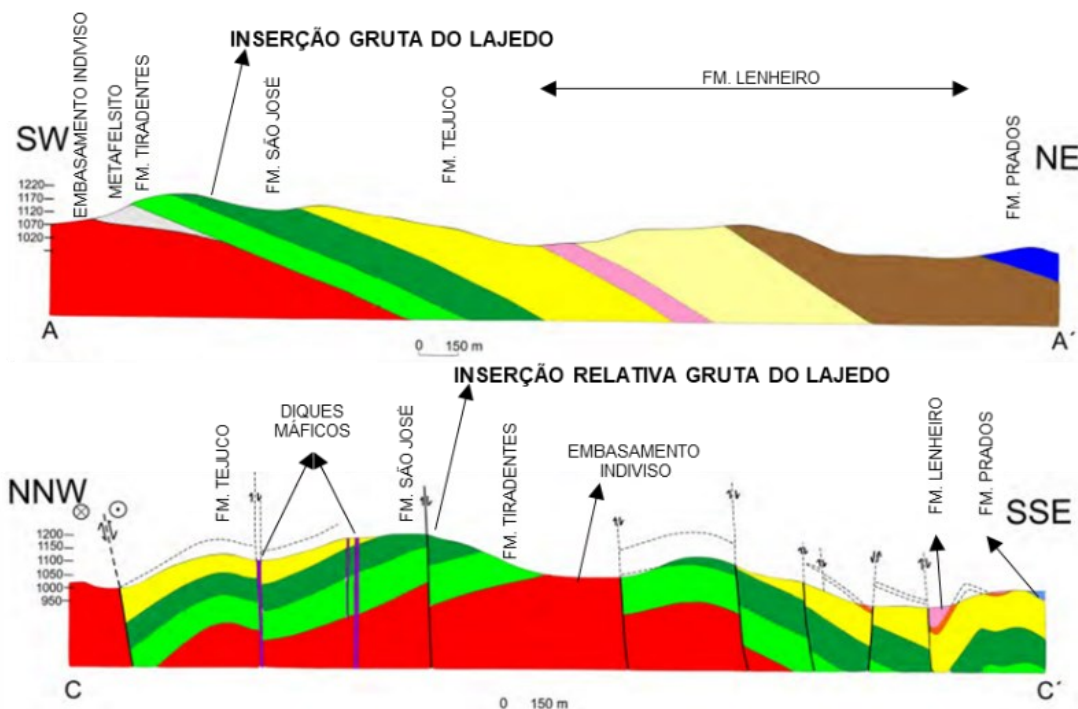
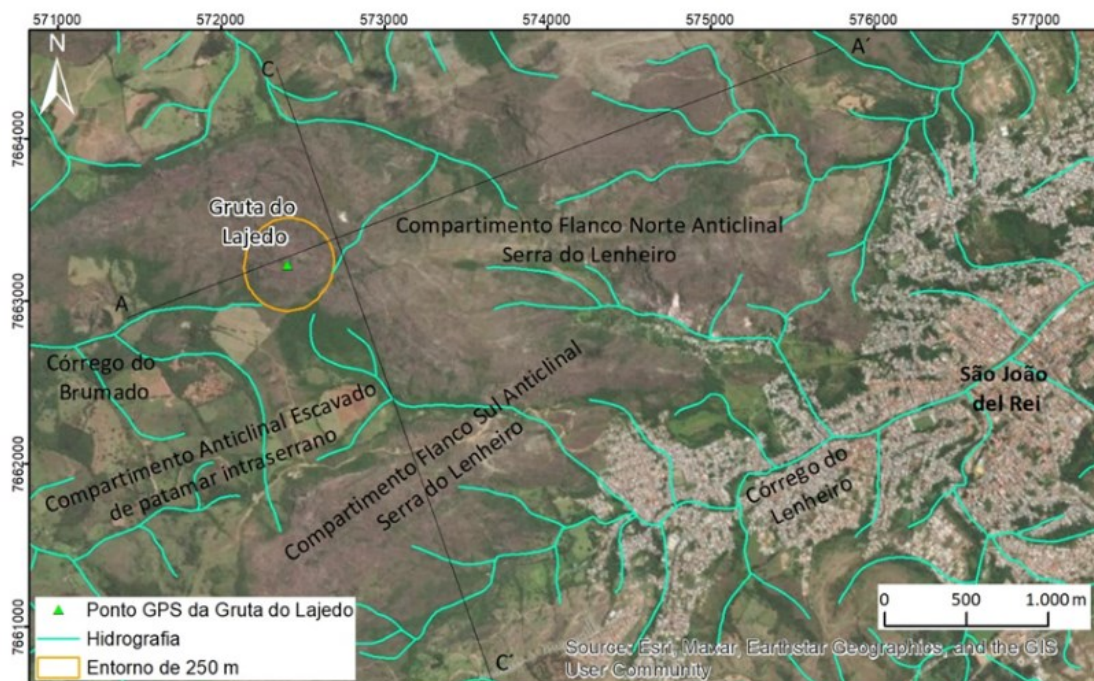


Figura 5.32. Localização da Gruta do Lajedo em relação ao centro urbano de São João del-Rei e perfis geológicos. Datum UTM SIRGAS2000 – Fuso 23K. Fonte: Perfis geológicos adaptados de Aruzzo (2016).

5.4.2.2. Caracterização cavernícola e comparação espeleométrica

A Gruta do Lajedo está posicionada em frente de acamamento quartzítico (voltado para oeste), exposto por processo de erosão hídrica em direção paralela à camada rochosa. A porção de entrada é amplamente coberta por depósitos de tálus, limitada a montante por arco rochoso indicativo de paleoconduto. Seu desenvolvimento é totalmente em declive para interior acompanhando o mergulho da camada rochosa, com detalhe para bifurcação em dois tipos de setores de câmaras, aparentemente seguindo o plunge de dobra da Fm. São José. Seu padrão planimétrico é considerado como curvilíneo esponjiforme.

Há o tipo da porção sul, proximal, onde os processos de solapamentos de blocos de teto predominam, com zonação de penumbra, e morfologia similar a abrigada, de amplo volume. No tipo da porção norte distal, os salões se desenvolvem no grau de inclinação da foliação quartzítica, mais especificamente em seu plunge, com seções lenticulares de baixa a meia altura, com sinais de forte energia hídrica limpando os condutos com acúmulo de banco de areia nas porções distais inferiores da caverna. Em locais de sumidouros para canalículos inacessíveis, esses bancos estão em processo de desmonte por retomada de erosão hídrica de escoamentos. Em destaque para o salão do limite norte, há claraboia formada por solapamento de dolina, permitindo ampla vazão de águas meteóricas sazonais. Estas características são demonstradas na **Figura 5.33**.

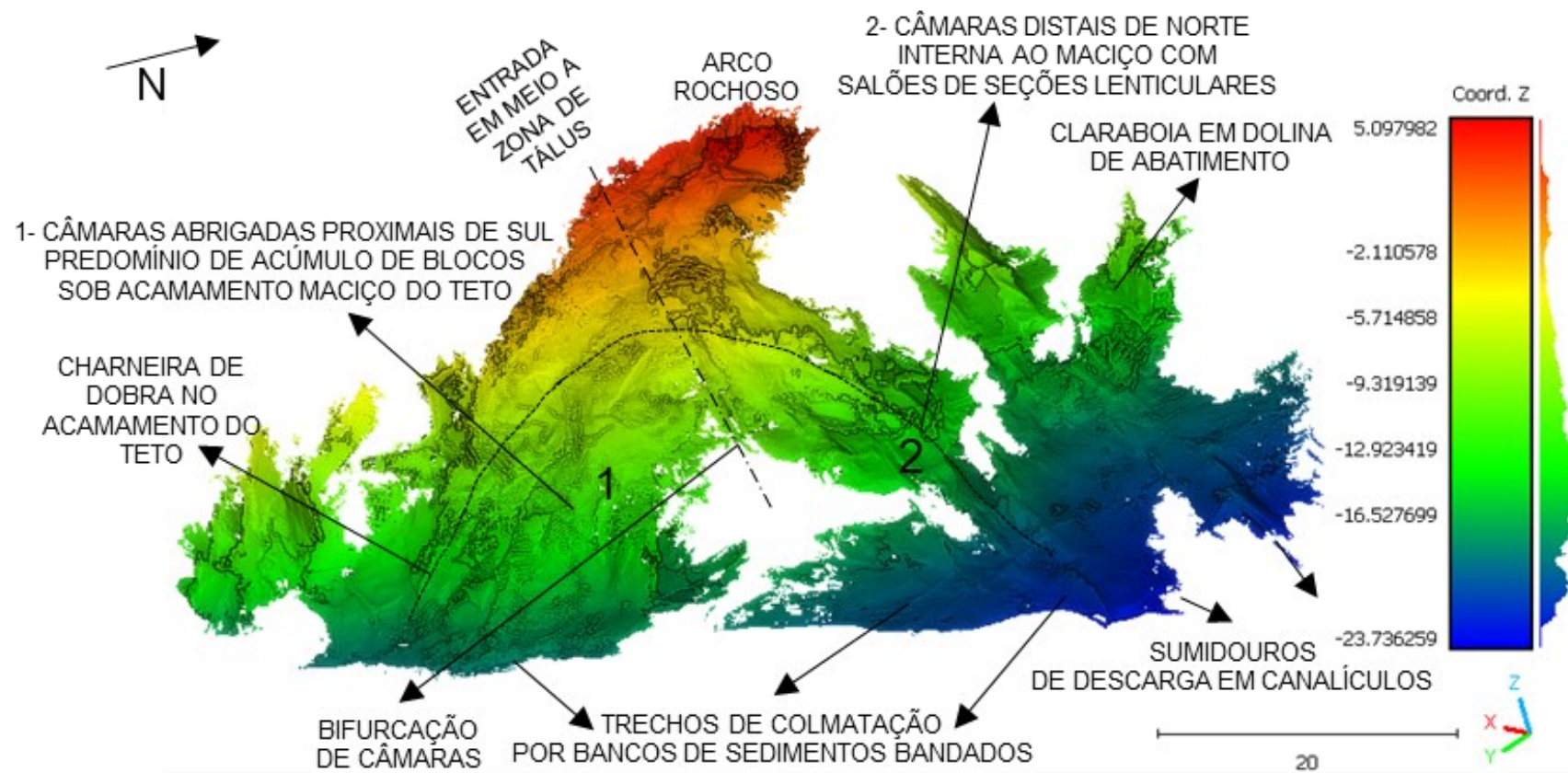


Figura 5.33. Visada tridimensional esquemática com indicações de aspectos morfológicos principais da Gruta do Lajedo. Escala de alturas, em metros, na nuvem a partir do início do escaneamento.

De modo sintético, os principais aspectos morfológicos da Gruta do Lajedo são apresentados nas **Figuras 5.34, 5.35 e 5.36**.



Figura 5.34. Fotos externas da gruta: (a) visada de montante para o fronte de entrada truncando o talvegue sob depósito de tálus; (b) detalhe para zona de acesso à entrada principal em meio a blocos, com indicação de arco rochoso (paleoconduto); (c) indicação da porção de entrada em declive para interior.



Figura 5.35. Fotos da porção de entrada e câmara sul da gruta: (a) a partir de linha d'água, visada para câmara sul, demonstrando teto em acamamento mergulhante e intenso acúmulo de blocos autóctones compondo piso irregular; (b) vista de fundo para entrada, demonstrando intenso processo de solapamentos e canal de escoamento distal à direita; (c) vista para entrada, em aclave, condicionada por blocos no piso e ampla câmara de aspecto abrigado; (d) Acesso à câmara norte, com predomínio de seções lenticulares com passagens de tetos baixos.



Figura 5.36. Fotos das câmaras de norte: (a) a partir da claraboia (por dolina de abatimento) vista para entrada alternativa da gruta; (b) conduto do limite norte, formado por esvaziamento de camada do maciço, mantendo seções lenticulares até teto de meia altura; (c) zona distal leste, em meio a banco de sedimentos bandados em processo de desmonte erosivo atual; (d) sumidouro distal em canalículo ativo, após banco de sedimentos erodidos.

A Gruta do Lajedo apresentou destaques dimensionais e geoespeleológicos. Sua espeleometria, em comparação com cavernas publicadas no entorno (serras de São José e Lenheiro), apresenta valores máximos, conforme a **Tabela 5.7**.

Sua correlação com ampla estrutura antiforme em topo serrano indica condições de potencial maturidade em contextos similares. Ou seja, locais próximos aos topos, cuja energia direta de águas meteóricas, junto a estruturas geológicas maiores, potencialmente geram cavernas maiores.

Tabela 5.7 – Cavernas publicadas nas serras próximas das cavernas analisadas.

NOME	GRUTA DO LAJEDO	GRUTA DO CAITITU	CAVERNA DO GALO	LAPA DO JAIR
LITOLOGIA	Quartzito	Quartzito	Quartzito	Quartzito
ALT. (m)	1.187,00	1.027,00	1.315,00	AUSENTE
PROJEÇÃO HORIAONTAL (m)	194,78	159,75	142,00	97,00
DESNÍVEL (m)	23,90	11,20	23,10	AUSENTE
ÁREA (m²)	1.649,10	AUSENTE	538,00	648,00
VOLUME (m³)	1908,64	AUSENTE	1.452,00	AUSENTE
DETALHE DE MAPEAMENTO*	BCRA-XD	BCRA-4C	BCRA-4C	BCRA-4C
INSERÇÃO NO RELEVO	Topo serrano	Vertente serrana	Vertente serrana	Vertente serrana
SERRA DE INSERÇÃO	LENHEIRO	LENHEIRO	SÃO JOSÉ	SÃO JOSÉ
FONTE	Presente Dissertação	BARBOSA <i>et al.</i> (2019)	BRANDÃO <i>et al.</i> (2022)	CARDOSO <i>et al.</i> (2015)

*Níveis de detalhe de mapeamento topográfico em acordo com a BCRA: *British Cave Research Association*.

5.4.2.3. Ajuste de bacia de contribuição hídrica, captura de drenagem e zonas cársticas não-tradicionais

A interpretação delimitada da bacia hídrica de influência da Gruta do Lajedo é apresentada na **Figura 5.37**. Ao todo, ela adquiriu 15.483,03 m² ou 1,55 ha. Nota-se primeiro, que a gruta se encontra no interflúvio de cabeceiras de drenagem, confirmada pela base de IGAM (2002), abrangendo três ottobacias numeradas em 1(norte), 2(oeste) e 3(leste). A partir desta referência, conclui-se que da área total delimitada, o escoamento hídrico de 8.063,41 m² ou 47,92% é capturado das ottobacias 1(norte) e 2(oeste), direcionando-o para a ottobacia 3(leste), a partir do desenvolvimento cavernícola da Gruta do Lajedo. Em decorrência, antigo talvegue de direção N-S, teve essa direção de paleoescoamento abandonada, contribuindo para a bacia hidrográfica do Córrego do Brumado. Assim, a contribuição passou a verter para a bacia hidrográfica do Córrego da Água Limpa em uma nascente de seu afluente.

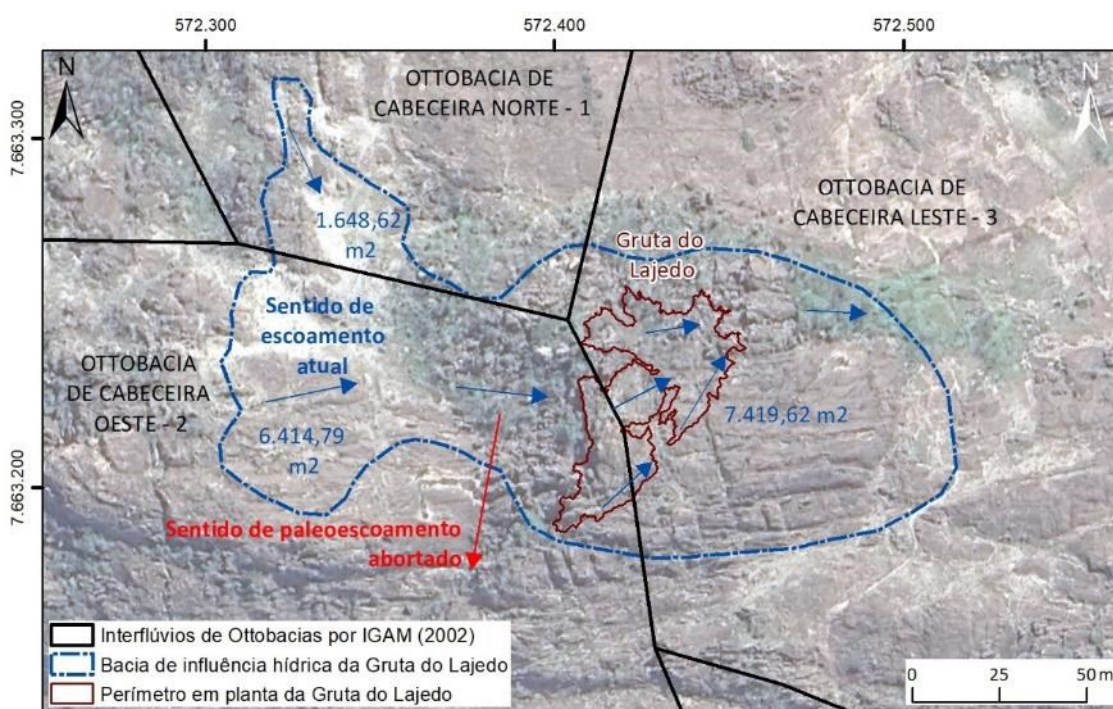


Figura 5.37. Inserção da Gruta do Lajedo sobre os interflúvios de ottobacias de cabeceiras (IGAM, 2002), com inclusão da atual bacia de influência hídrica atual da gruta, capturando os escoamentos das áreas indicadas nas ottobacias 1 (norte) e 2 (oeste), para verter à ottobacia 3 (leste).

Em sequência, sobre a bacia de influência hídrica da Gruta do Lajedo foram delimitadas as zonas hídricas cársticas não-tradicionais. Quatro zonas foram delimitadas, conforme a **Figura 5.38**. À montante, a primeira é a zona de recarga com 5.258,75 m² representada por zona de captação de águas meteóricas sazonais, intermitentes, desde os topos próximos, por microdrenagens e microvariações de declive. Abrangendo 33,97% da bacia, representa a maior área de contribuição ou volume potencial a escoar para a caverna.

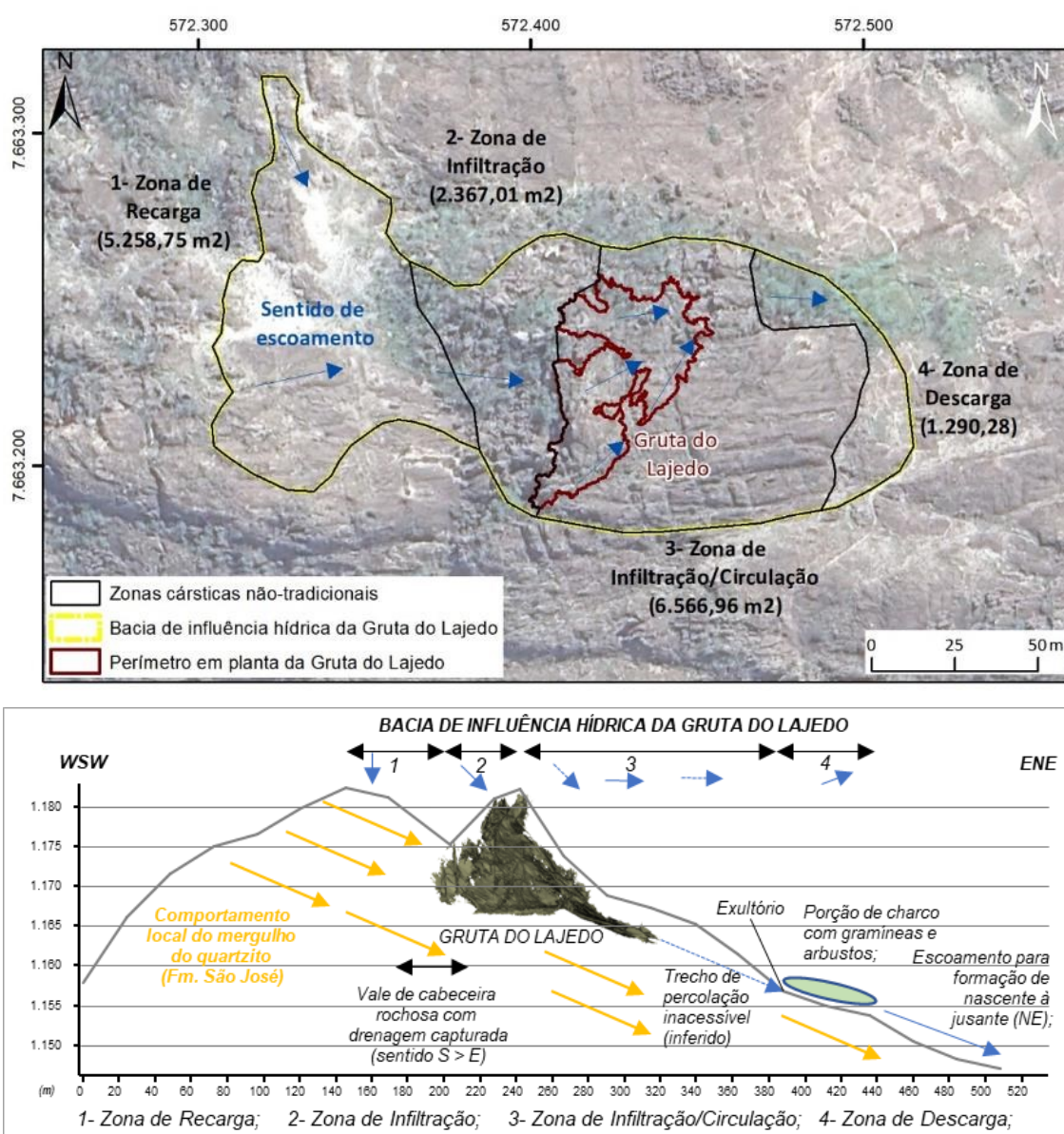


Figura 5.38. Delimitação das zonas de comportamento hídrico cárstico não-tradicional da Gruta do Lajedo, acompanhado de perfil topográfico esquemático interpretativo.

A zona de infiltração, segunda, é composta pelo conjunto de depósitos de tálus residual da erosão marginal do pico secundário no qual insere-se a Gruta do Lajedo. Este processo acabou por encobrir o paleotalvegue e paleointerflúvio pré-gênese cavernícola, agindo como um filtro e potencial redirecionador do sentido da drenagem para leste, adentrando o meio subterrâneo. Com 2.367,01 m², corresponde a 15,29% da bacia hídrica de influência.

A terceira zona é mista, de infiltração e circulação. Isto porque porosidades, fraturamentos e dolina permitem ainda aporte hídrico vertical para o meio subterrâneo, assim como fluxo horizontal ao longo da Gruta do Lajedo e para além dela por meio de microcanalículos inacessíveis até os limites de jusante do maciço rochoso. Esta zona abrange 6.566,96 m², ou 42,41% da bacia de influência hídrica da caverna.

Por fim, a quarta zona é a de descarga, correspondente a porção de terreno em que as águas subterrâneas são capazes de exumar-se à superfície. No caso, é perceptível pela formação de ambiente de platô local, com colmatção de sedimentos arenosos com retenção de umidade formando campo de gramíneas e arbustos homogêneos sazonalmente. Os pontos de extravasamento das águas subterrâneas não são visíveis, indicando o aporte por vias micro e porosidade rochosa. Com aumento da vazão, estas águas vertem para jusante complementando nascente intermitente sentido a leste/nordeste. Esta zona possui 1.290,28 m², ou 8,33% da bacia de influência hídrica.

5.4.2.4. Avaliação das macroetapas de evolução do relevo

Em consequência do conjunto de análises realizadas, propõem-se as seguintes macroetapas de evolução do relevo local, incluindo espeleogênese:

1. Relevo primordial do topo da Serra do Lenheiro apresenta curvaturas oscilantes conforme resistência diferencial da estrutura rochosa ao intemperismo em período predominantemente seco;

2. Zona de fraqueza, inclinação e contato de foliações do quartzito da Formação São José, em fase de umidade, permitiu acúmulos hídricos e incisão erosiva na porosidade primária, individualizando blocos, formando pináculos e arcos rochosos em meio vadoso nas bordas do pico de inserção da gruta, individualizando-o. Talvegue principal se forma no sentido N-S;
3. Com ampliação de vazios no maciço rochoso em paleoconduto cavernícola, o ataque erosivo passa a atuar horizontalmente para leste, adentrando o acamamento inclinado quartzítico. Dá-se início à modelagem atual resultante da gruta. A falta de suporte propicia incasão e desabamento de tálus autóctone sobre talvegue N-S, formando vale coberto;
4. Há continuidade dos processos de solapamento de teto intra-acamamento próximo ao talvegue N-S, assim como avanço do esvaziamento de acamamento de litificação menos resistente, potencialmente arenizado. O depósito de tálus forma tamponamento da porção oeste da gruta e seu avanço solapa teto de dolina, compondo claraboia atual;
5. Ampliação de vazões formam escoamentos de fundo, na base das câmaras. O fluxo hídrico principal deixa de verter para S e passa a verter para o carste não-tradicional siliciclástico a E. Há colmatação destas porções de fundo por fluxos laminares com sedimentos em forma de bandamentos intercalados de sílica (brancas) e matéria orgânica (pretas). Formam-se bancos de sedimentos com profundidade superior a um metro até estagnação por período seco;
6. Próxima fase, há abertura de canalículos à jusante da caverna. Pela resistência diferencial rochosa, vazões hídricas vertem para fundo das câmaras de norte até canalículos inacessíveis, mas que continuam percorrendo fraquezas pelo maciço rochoso;
7. Atualmente, há aumento do nível de umidade retomando vazões mais intensas e a erosão de desmonte destes bancos de sedimentos anteriores. Há redução de processos nas porções elevadas e de teto, atacadas apenas pela

infiltração e percolação, permitindo com a umidade o avanço do desenvolvimento de espeleotemas, representados por diversidade e abrangência de coraloides, cujas maturidades aumentam em gradiente para as câmaras distais. À jusante do maciço, continuidade lenta da descarga hídrico-sedimentar forma charco com campo de gramíneas e arbustos e platô local (Figura 5.39).



Figura 5.39. Esquema interpretativo em foto de visada NW, da dinâmica de drenagem hídrica entre zona de drenagem capturada e exutório na porção oposta da Gruta do Lajedo.

Ressalta-se que pelas condições ainda pouco conhecidas e datáveis dos elementos carstificáveis não-tradicionais em rocha siliciclástica e por falta de elementos correlacionáveis com etapas de evolução do relevo em topos serranos, não foram propostas datações, nem mesmo relativas para a evolução do relevo. Há limitações do entendimento entre taxas de formação de morfoescultura, morfoestrutura e morfoclimática. As etapas supralistadas ainda merecem estudos específicos de datações absolutas para refinamento do quadro de evolução geomorfológica local.

5.4.2.5. Considerações

A exploração, interpretação morfológica, mapeamento e recente tecnologia tridimensional permitiram amplas condições de entendimento do relevo e carste não-tradicional siliciclástico envolvendo a Gruta do Lajedo e o topo do flanco norte da Serra do Lenheiro. Principal aspecto foi o reconhecimento de um minissistema cárstico não-tradicional, atendendo às etapas de desenvolvimento propostas por Rodet (2017), que capturou porções de drenagens de cabeceira vertendo-as para bacia hidrográfica adjacente.

Estas bacias de drenagem foram delimitadas e correspondem a um dos atributos físicos básicos para determinação da área de influência cavernícola. A área de influência cavernícola é uma das etapas relevantes de gestão do patrimônio espeleológico, no Brasil estabelecida pela Resolução CONAMA 347/2004, Decreto Federal 6.640/2008 e Decreto Federal 10.935/2022, definida como *“área que compreende os elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola”*. Nesse sentido, é considerada uma diretriz para estudos dos elementos físicos do patrimônio espeleológico em termos de delimitação e caracterização de zonas de recarga autóctone e alóctone, circulação e descarga por ICMBio/CECAV (2022b).

Além disso, foi possível avaliar as dimensões da gruta, as quais apresentam valores de destaque para a escala local e regional. Ressalta-se que a mesma foi cadastrada no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, adquirindo código 035362.10735.31.62500. Por fim, recomenda-se a continuidade de pesquisas na Gruta do Lajedo voltadas para datações de sedimentos, avaliação de seus espeleotemas e de seus atributos bioespeleológicos, de forma a compor quadro amplo de sua relevância.

5.4.3. Resultado da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Caso III: Buraco do Inferno, registro de caverna em granito no centro urbano de Resende Costa-MG

As cavernas são formações geológicas subterrâneas, normalmente formadas pela ação intempérica de processos erosivos físicos, químicos e bioquímicos sobre rochas. O termo carste foi inicialmente utilizado para definir cavernas formadas em rochas calcárias, mas existem também cavidades originadas em arenitos, quartzitos, granitos, basaltos, formações ferríferas, entre outras. Com o avanço das descobertas espeleológicas, expandiram-se as pesquisas para além das rochas carbonáticas (Cruz & Piló, 2019). Dentre elas, há cavernas inseridas em rochas cristalinas, como granitos, gnaisses e granitoides, cujos registros brasileiros somam cerca de 626 ocorrências ou 2,53% do total (ICMBio/CECAV - CANIE, 2023).

Seu potencial, apesar de reduzido, apresenta importância em função da necessidade de ampliação do conhecimento e pesquisas em cavernas não-carbonáticas, principalmente quando de dimensões superiores. Uma delas é caverna Buraco do Inferno, adjacente ao centro urbano da cidade de Resende Costa (**Figura 5.40**), localizada a cerca de 185 km ao sul de Belo Horizonte, na região sul do Estado brasileiro de Minas Gerais.

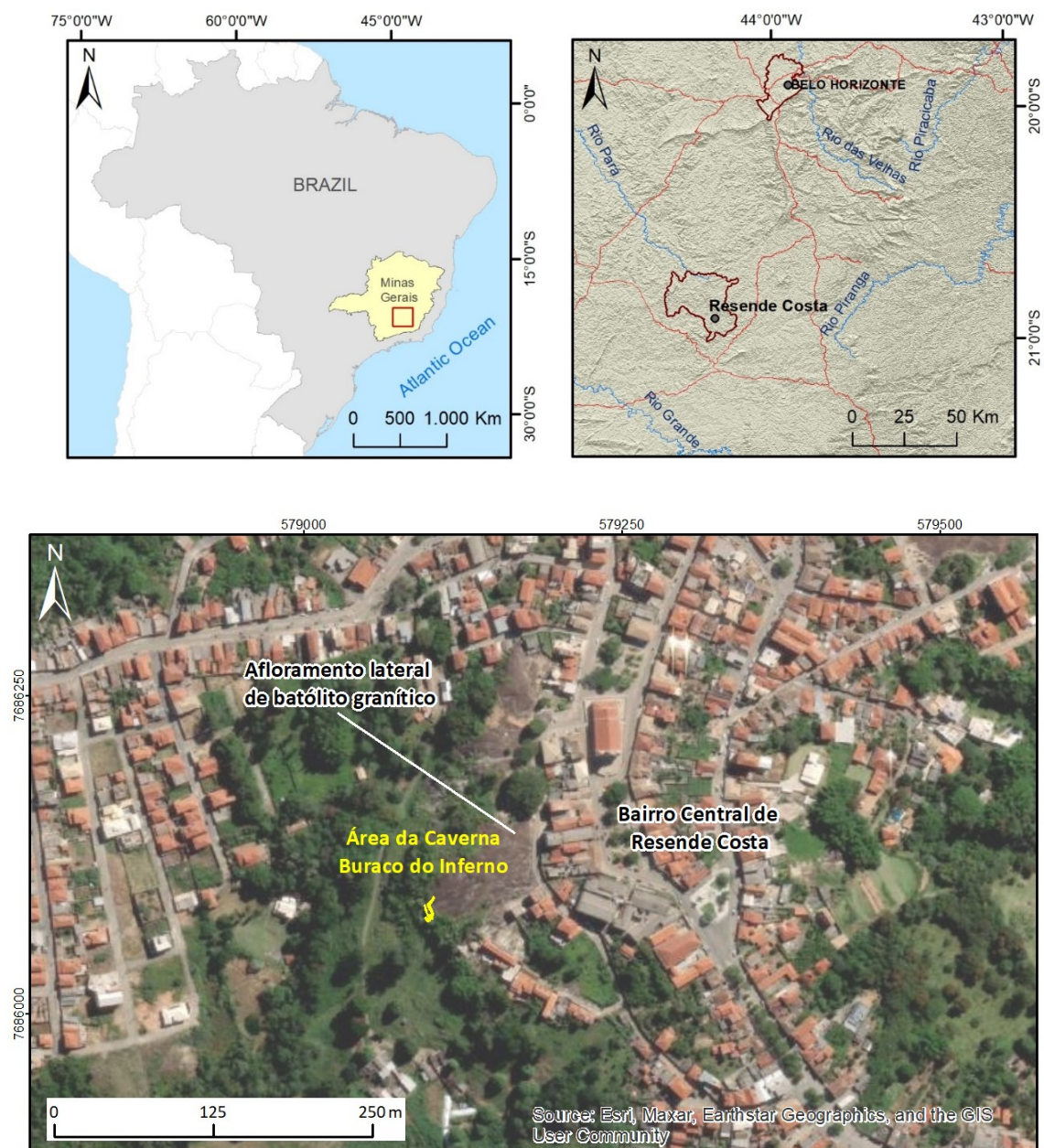


Figura 5.40. Inserção da Gruta Buraco do Inferno em relação a Resende Costa e Belo Horizonte.

5.4.3.1. Interpretação geoespeleológica da caverna

A Buraco do Inferno pode ser classificada como caverna granítica do tipo “junta aberta”, segundo proposta de Finlayson (1991 *apud* Hardt, 2003), formada em juntas com o topo aberto para o exterior, estando preenchido por detritos. No

caso, a Buraco do Inferno é reticulada em condutos semiparalelos e seções majoritariamente verticalizadas em níveis variados em borda de batólito granítico. Os detritos compõem teto e níveis de pisos, sendo as paredes divisórias entre fendas resultantes de matacos verticalizados acomodados, contendo estreitas passagens entre elas (**Figura 5.41**).

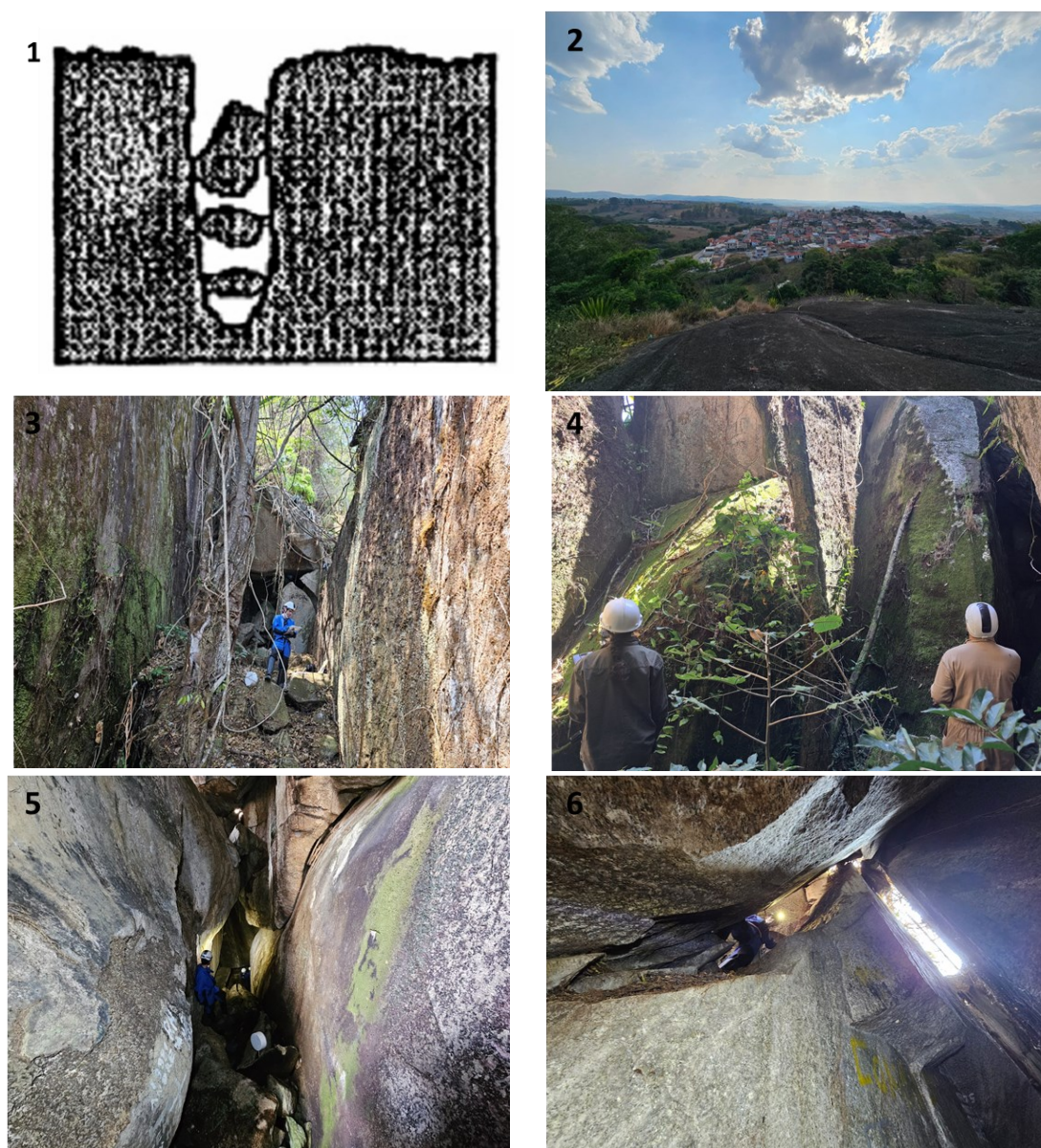


Figura 5.41. 1-Perfil de caverna tipo junta aberta (Hardt, 2003); 2-Vista da face do batólito a montante da caverna; 3-Depressão em junta na zona de entrada; 4-Vista para entradas ao longo de fendas verticais em meio a matacões; 5-Aspecto geral do conduto principal, acompanhando face do maciço à direita; 6-Fendas ortogonais de passagens estreitas, em visada para cima, adjacentes ao conduto principal.

A caverna se desenvolve pelos azimutes 30° (NNE) principalmente; e 340° (NNW) curvando-se ao longo da borda do batólito. As fraturas e veios de quartzo acompanham esses azimutes, mergulhando para SW e SE (52°; 59°; 64°). Há gradiente intempérico, devido a águas percolativas, sentido ao maciço, com frentes de corrosão na rocha. Como efluentes advindos da área urbana escoam pela superfície do maciço até a caverna, possível acidez acentuada deve estar acelerando a corrosão da parede leste da caverna e de sua depressão de entrada.

Nestas faces intemperizadas existem plaquetas silicificadas estriadas residuais. Indicam antigas camadas e/ou veios os quais podem ter composto zonas de fraqueza, assim como terem sofrido atrito no processo de deslocamento e formação da caverna. O mesmo ocorre com camadas de acebolamento no contato do teto e lascas rochosas em meio aos matacos de paredes. Os depósitos químicos são inexpressivos, correspondentes a somente coralloides mili a centimétricos e crostas escuras, os quais ocorrem principalmente nas superfícies corroídas.

Os depósitos biológicos correspondem principalmente há guanos amplamente espalhados nos pisos e câmara inferior, aparentemente hematófagos. Apesar da presença de alguns indivíduos durante a visita (pequena colônia), não se considera que tenham escala responsável pelos depósitos existentes. Cogita-se que mudanças no uso e ocupação do entorno, efluentes, resíduos e a visitação passada na caverna possam ter influenciado uma redução de colônia.

Espeleogênese é associada, conseqüentemente, aos processos de termoclastia, alívio de pressão com diaclasamento esferoidal, dissolução/corrosão e abatimento de blocos a partir dos planos de fratura de borda de batólito. A **Figura 5.42** e **Figura 5.43** demonstram a descrição geral.



Figura 5.42. 1- Visada do p3rtico de entrada do conduto principal, com altura de 6,87 m; 2- Porç3o distal de conduto principal, onde nota-se o afastamento paralelo das paredes e inflex3o do conduto ao longo da face do bat3lito na parede direita; 3- Face de parede corro3da ou intemperizada, exposta a efluentes de montante da caverna; 4- Plaqueta silicificada estriada em camada corro3da de parede; 5- frente de corros3o com formaç3o de rugosidade, avançando sobre pichaç3o; 6- Plaqueta residual em zona de corros3o com cobertura de coral3ides e crostas escuras. CONTINUA

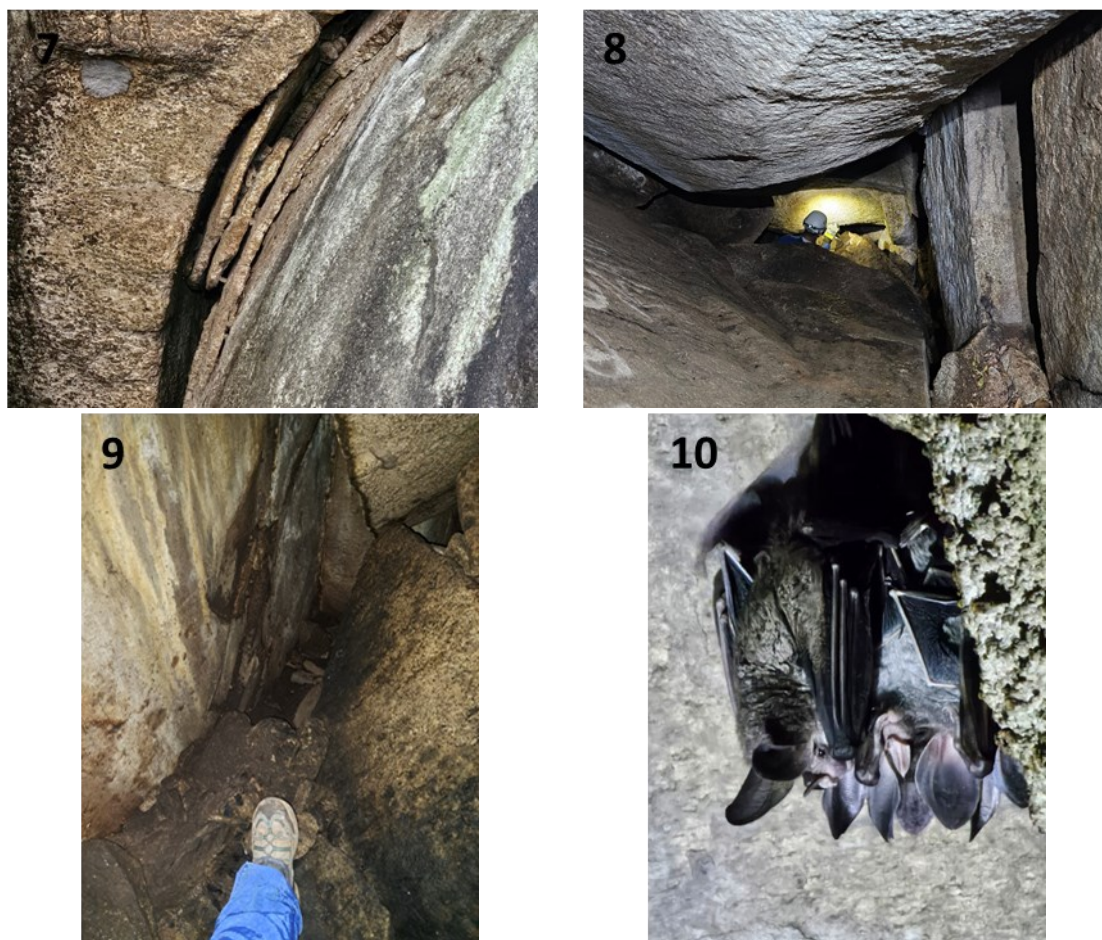


Figura 5.43. 7- Zona em teto com camadas intempéricas de acebolamento, comuns em rochas cristalinas; 8- Trecho em fenda paralela, de descida até câmara inferior da caverna, onde nota-se intensa acomodação de matacos diversos; 9- Câmara inferior com ampla cobertura de depósitos de guano hematófago; 10- Exemplares com filhotes notados em teto do conduto principal.

5.4.3.2. Correlação com eventos de evolução do relevo regional

A inserção da área urbana de Resende Costa se dá em região de antigo arco de ilha magmático paleoproterozoico de borda do paleocontinente do Cráton São Francisco. Ao sul, o entorno de São João del-Rei representa proposta de contato entre esta unidade cratônica com cinturões dobrados e faixas móveis Tocantins e Mantiqueira (Saadi, 1990).

O evento Sul-Atlântico (abertura oceânica) durante o mesozoico, desencadeou intensos soerguimentos dômicos do sudeste brasileiro. No intervalo até o

terciário, o deslocamento crustal induziu intensos eventos magmáticos básicos, ultrabásicos e alcalinos nas regiões das serras da Mantiqueira e do Mar principalmente. Atualmente, as condições do relevo e tectônica parecem ser residuais, sendo os principais locais afetados durante o terciário serem irregulares, conforme a proposta de zonas sismogênicas de Mito (1990), na qual a área em foco insere-se na Zona Sismogênica 10 – Bom Sucesso, pela **Figura 5.44**.

Conforme este autor, a Zona Sismogênica de Bom Sucesso (10) engloba eventos da borda sul do Cráton São Francisco, com epicentros em Formiga, Bom Sucesso, Lavras e São João del-Rei, acompanhando a linha de contato com limite nordeste do Planalto do Alto Rio Grande com o Planalto de Belo Horizonte. Ele aponta que não há influência tectônica direta na formação do relevo, mas a sismicidade indica que ocorrem acomodações tectônicas sem precisar relações entre sismos e falhas.

Dessa maneira, como teoria evolutiva é reconhecível que tal contexto impulsionou arranjos isostáticos na região de Resende Costa. Em consequência, potencialmente houve soerguimento do batólito sob forma de “pão-de-açúcar” com ativação de processos erosivos em suas bordas. A zona de contato do batólito, por efeitos de erosão, liberação de pressão, diaclasamentos com estriamentos e acomodação de blocos ocasionou a espeleogênese da caverna Buraco do Inferno, como esquematizado na **Figura 5.45**.

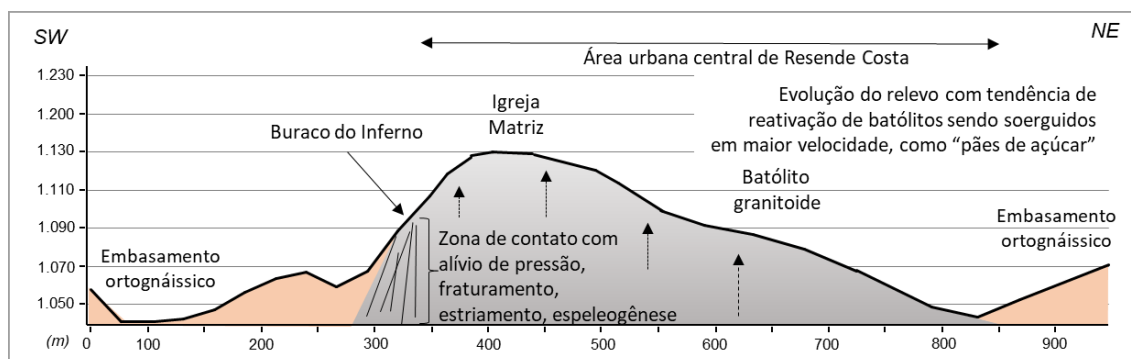


Figura 5.45. Perfil esquemático do contexto de inserção da caverna Buraco do Inferno.

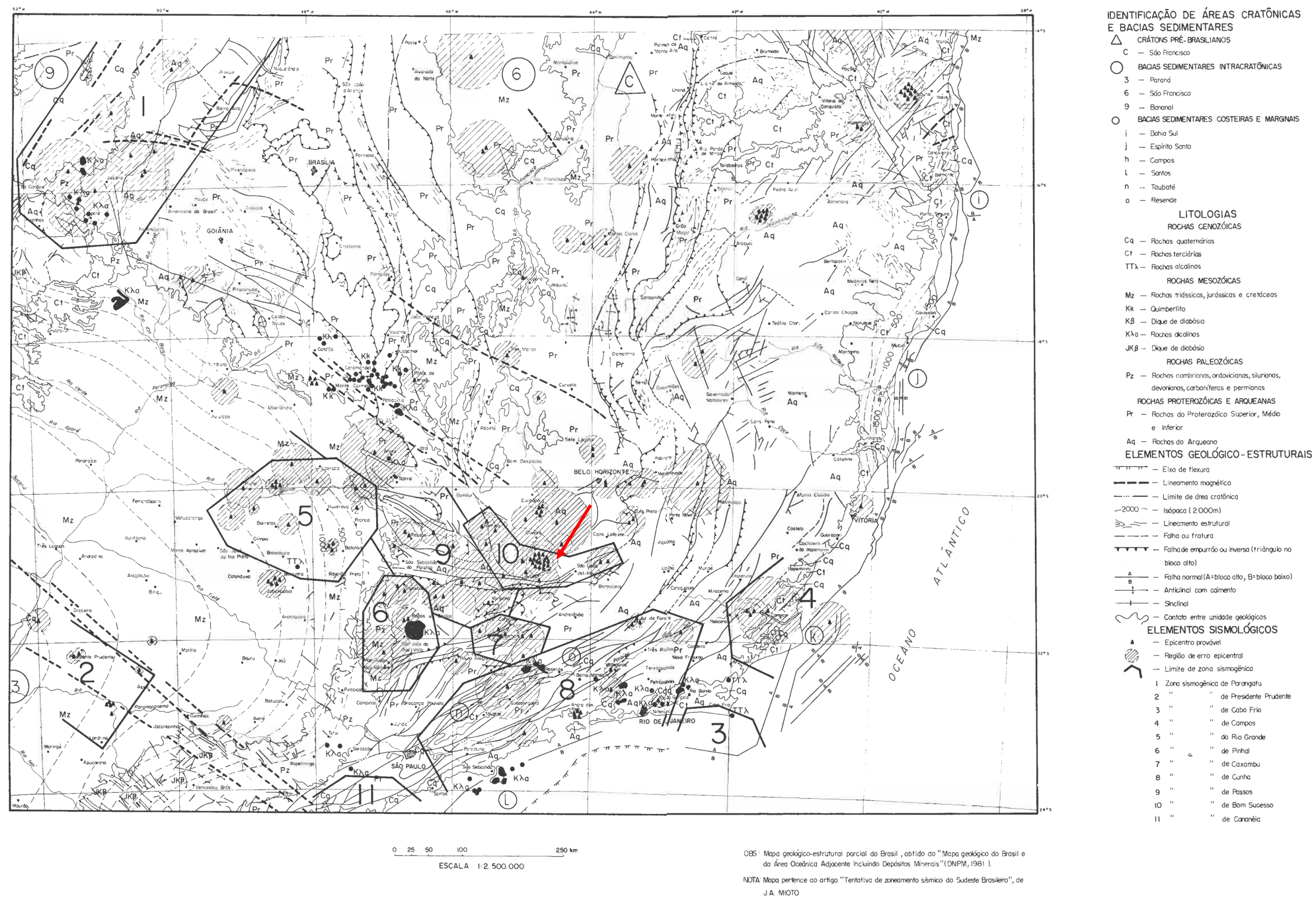


Figura 5.44. Mapa de zonas sísmogênicas do sudeste do Brasil, com destaque para foco na zona 10 de Bom Sucesso. Fonte: Adaptado de Mioto (1990).

As seções dinâmicas a seguir, pela **Figura 5.46**, demonstram a morfologia decorrente deste processo.

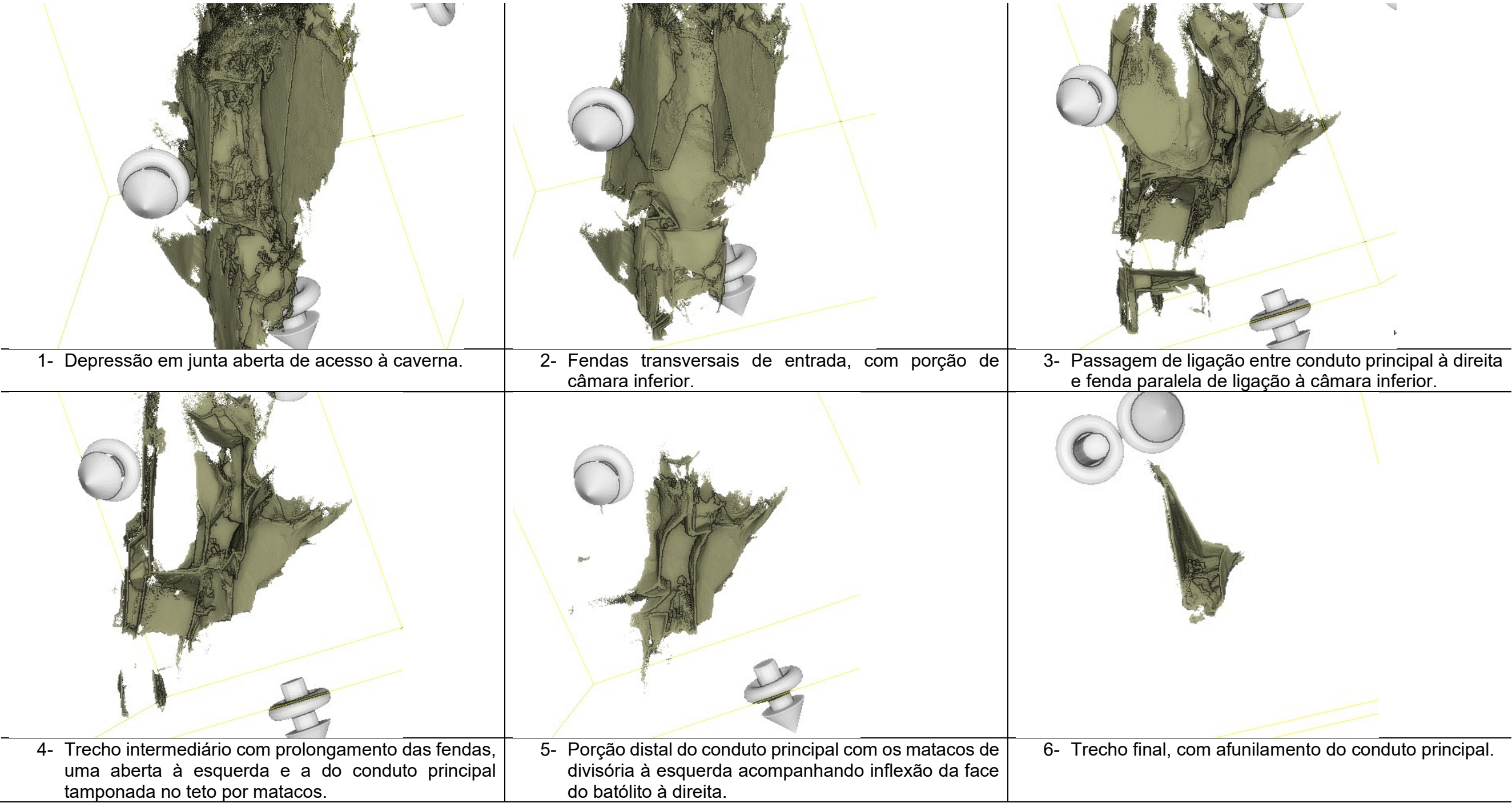


Figura 5.46. Seções dinâmicas na nuvem 3D da Buraco do Inferno, ilustrando a morfologia ao longo de seu desenvolvimento, característica do tipo de junta aberta preenchida com detritos, decorrentes de evolução morfodinâmica em borda de batólito granítico.

A **Figura 5.47** apresenta as altimetrias do escaneamento tridimensional nas visadas lateral (N-S), superior e inferior.

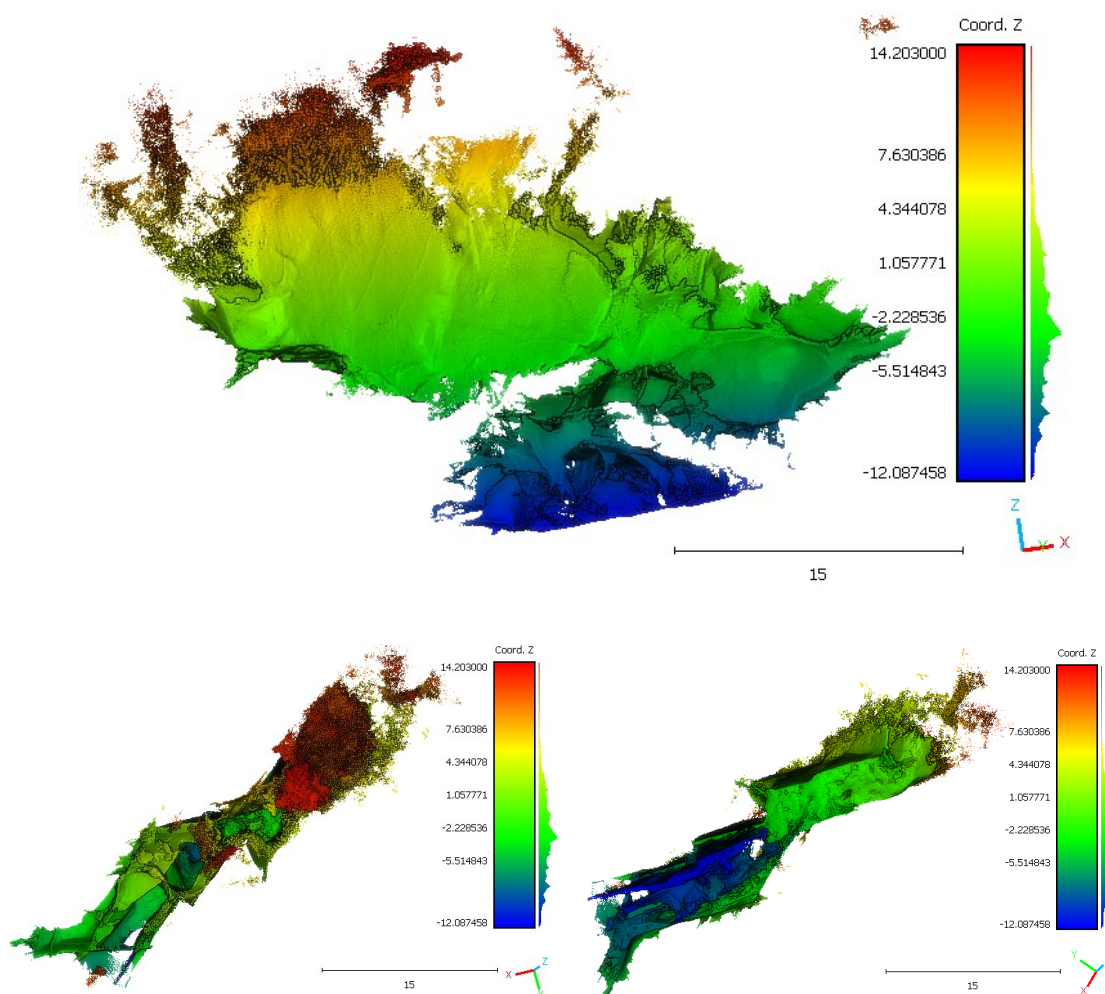


Figura 5.47. Visadas lateral (N-S) acima, superior à esquerda e inferior à direita, demonstrando as altimetrias da caverna a partir do escaneamento tridimensional.

Concluindo, a altimetria total da caverna de 20 metros (excluindo as copas arbóreas) permite compreender que seu desnível cobre toda a porção inferior exposta da borda do batólito granítico, entre aproximadamente as cotas 1.100 e 1.080 metros. Interpreta-se dessa maneira, que seu desenvolvimento se deu na última fase de exposição do batólito, ou seja, minimamente durante o plioceno, mais recente que 3 Ma, baseado em datação de Valadão (2009). A caverna foi cadastrada no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, adquirindo código 035361.10734.31.54200.

5.4.4. Resultado da APLICAÇÃO 4 – ANÁLISE AMBIENTAL – Caso IV: Caverna JK, caso de caverna em crosta detrito-laterítica em lateral de rodovia. Características e aspectos genético-evolutivos

5.4.4.1. Aspectos evolutivos em rochas ferríferas

Os estudos relacionados à evolução espeleogenética em rochas ferríferas (Simmons, 1963; Mcfarlane & Twidale, 1987; Pinheiro & Maurity, 1988; Ribeiro, 2003; Piló & Auler, 2005; Spier, 2005; Calux, 2013; Dutra, 2015) indicam que, de modo geral, a formação de cavidades passa por duas fases, de processos endógenos e exógenos.

Primordialmente, a condição apresentaria relação com os processos de enriquecimento das rochas ferríferas em seu processo evolutivo geológico. Conforme Rosière (2015), processos mineralizadores podem provocar enriquecimento em ferro nas formações ferríferas, de modo a atingir teores entre 60 e 68 % Fe. Mineralização das formações ferríferas envolve, principalmente, a remoção, lixiviação dos minerais que não contêm ferro, chamados minerais de ganga e também a oxidação de minerais ferrosos. O autor aponta os seguintes processos envolvidos:

- *Hipogênicos ou hidrotermais, quando a remoção se desenvolve em temperatura elevada pela ação de fluidos gerados durante o metamorfismo, ou mesmo provenientes de fontes magmáticas, ígneas;*
- *Supergênicos, que se desenvolvem pela ação do intemperismo, quando o principal agente que remove os minerais é a água superficial, do lençol freático, à temperatura ambiente.*

Os maiores e mais ricos corpos de minério de ferro foram sujeitos a ambos processos de forma recorrente, em idades geológicas diferentes (Rosière, 2015). Isto vai de encontro ao apontado por Dutra (2015), em que enriquecimento do minério de ferro por fluídos mineralizantes, no modelo hipogênico teria ocorrido

primeiramente a remoção da sílica por fluidos termais permanecendo um resíduo rico em óxidos de ferro, carbonatos, silicatos de magnésio e apatita. Futuramente, por processos supergênicos, ocorreria a dissolução do carbonato, fósforo e magnésio gerando o minério hematítico de alto teor.

Em outras palavras, inicialmente prevalecem os processos químicos dissolutivos dos minerais menos resistentes, relativamente (dolomita, sílica, além da própria hematita, entre outras). Trata-se de um fenômeno de lixiviação do qual resulta um enriquecimento supergênico do ferro no meio com alta porosidade e perda de 40 a 50% do volume da rocha. O próprio processo supergênico, em superfície, acaba por gerar a laterização de carapaças ferruginosas de canga.

Conforme Monteiro *et al.* (2014), trabalhando com geocronologia de cangas no Quadrilátero Ferrífero, concluiu que cangas e saprolitos teriam sua formação iniciada a mais de 55 ± 5.5 Ma. Entretanto, atividades bioquímicas próximas ao ambiente superficial promoveram persistente dissolução - reprecipitação de cimentos goethíticos até o presente. Em adição, características texturais e aumento progressivo nas razões Th / U do saprolito para a superfície sugere que as cangas são formadas por numerosos eventos de dissolução de oxihidróxido de ferro – reprecipitação e a lixiviação efetiva de elementos mais solúveis (Si, Ca, Mn, U, etc.) para fora do sistema. Quantidades significativas de ferro devem ser perdidas.

Calux (2013), ao analisar gênese de cavidades no Quadrilátero Ferrífero, conclui que as cavernas hospedadas em rochas ferríferas estão preferencialmente localizadas nas zonas de maior teor relativo de Fe. Simultaneamente, conforme o arranjo geomorfológico, reações químicas no interior da massa rochosa particularmente na zona freática, contribuiriam para zonas de alta porosidade. Posteriormente o material friável resultante será lixiviado para o exterior através de processos similares ao “*piping*”, descrito para cavidades em rochas siliciclásticas. Essa segunda etapa, iniciada na zona freática, pode ter

continuidade na zona vadosa, quando os processos de “*piping*” podem vir a ser favorecidos (Piló & Auler, 2005).

A evolução da lixiviação passaria pelos processos semelhantes ao “*piping*” que, a longo prazo, podem ou formar canalículos e condutos ou formar câmaras globulares. Algumas situações sugerem a ação freática de baixo gradiente. Posteriormente, estas feições passariam a se ligar ao exterior por processos erosivos físicos (abatimentos, ação fluvial, ampliação do canalículo, entre outros).

Locais de contato entre diferentes litotipos (cangas, itabiritos, jaspilitos, formações ferríferas bandadas, rochas máficas, filitos, quartzitos, xistos) com sua consequente resistência diferencial, favorecem a ação de percolação e lixiviação, as quais dependendo do ângulo de mergulho do contato podem gerar cavidades no sentido do meio epígeo para o hipógeo.

Evoluindo os ciclos erosivos, em altas e médias vertentes, áreas onde haja quebra de relevo, ou encostas íngremes, são locais em que o gradiente hidráulico do lençol vadoso (aquífero poroso livre da canga) será mais pronunciado, resultando em uma maior velocidade da água pluvial e concomitantemente maior capacidade erosiva da mesma (Piló & Coelho, 2014).

Segundo Parker *et al.* (2013), foi identificada intensa atividade microbiana e biofilmes pendentes (*snottites*) no interior de cavernas em Carajás, que incluiu reconhecidas espécies nos processos de oxidação e redução do ferro. Com a redução do ferro, o fluxo de águas subterrâneas poderia remover massa de Fe (II) aquoso, permitindo o alargamento de vazios e formação de cavernas.

Além dos processos apontados acima, as constatações de campo vão de encontro ao concluído por Calux (2013) que aponta para a gênese das cavidades em litotipo ferrífero:

- *A maior parte das cavernas teve sua iniciação em ambiente freático ou transicional (freático/vadoso);*
- *Todas as cavernas estudadas tiveram sua evolução associada a um ambiente vadoso, com desenvolvimento orientado segundo vetores gravitacionais. Sua “eclosão” se deu principalmente a partir de processos de interceptação em função da regressão a remontante das vertentes;*
- *Os principais fatores de controle da espeleogênese são: bandamento, fraturas tectônicas e atectônicas, eixos e flancos de dobras e o contato geológico erosivo entre a canga e a formação ferrífera bandada.*

5.4.4.2. Interpretações a partir dos registros na caverna JK.

A caverna JK localiza-se em porção inferior de vertente serrana interna da aba oeste do sinclinal Moeda (município de Itabirito-MG), em crosta detrito-laterítica de aproximadamente três metros que cobre toda a face do relevo nas redondezas (**Figura 5.48**). A inflexão de declive na vertente, logo à montante da caverna favorece o aporte hídrico percolante.

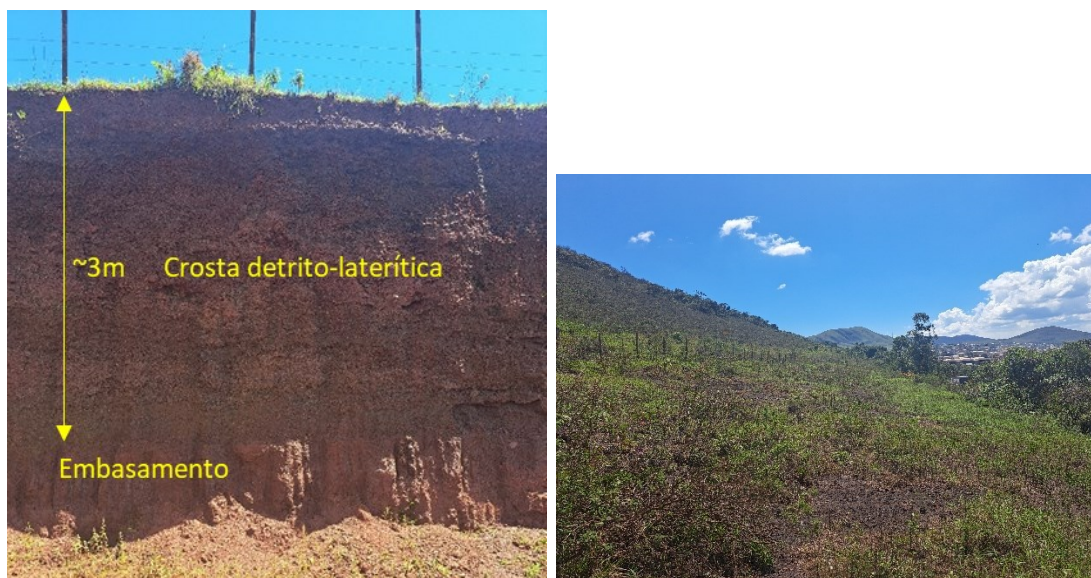


Figura 5.48. Perfil em corte sob cerca (abril/2025), próximo à caverna JK, onde se nota profundidade de aproximadamente três metros da cobertura detrito-laterítica com sobreposição de camadas horizontais sobre rocha, aparentemente dolomítica. À direita, panorama do relevo de inserção sobre a caverna.

Pela variação textural entre a crosta clasto-suportada de seixos angulosos a semi-arredondados, em relação ao embasamento intemperizado argiloso, há potencial para que a crosta detrito-laterítica seja alóctone.

As características indicam processos de remobilização de materiais intempéricos (colúvio) ao longo dos ciclos erosivos pelas vertentes (alóctones) até o nível de base atual. A **Figura 5.49** apresenta os modelos existentes na bibliografia para gênese deste tipo de crosta, também denominada laterita alóctone ou exolaterita, indicando processos possíveis de laterização por estes tipos de fenômenos ao longo da vertente analisada (Augustin *et al.*, 2013).

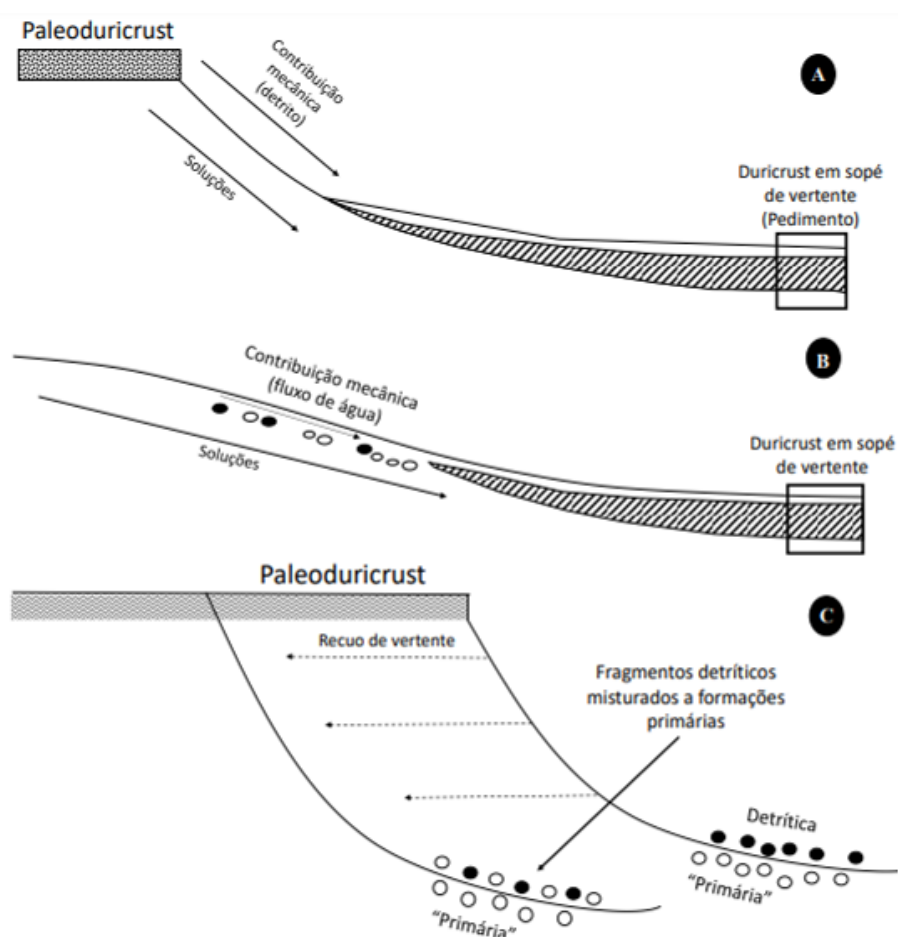


Figura 5.49. Esquema dos mecanismos de formação de *duricrust* (laterita) através de acumulação absoluta de Fe e Al (alóctone) em sopé de vertente pelo modelo pluvial/fluviial (A, B) e detritico (C). Fonte: Augustin *et al.* (2013) *apud* Câmelo (2017).

Apresenta entrada estreita lenticular, em meio a blocos abatidos do teto, a cerca de cinco metros de distância da margem da rodovia BR-040 (**Figura 5.50**). É composta por três câmaras, uma principal de entrada e duas de fundo bifurcadas, sendo que todas apresentam formas de seção elipsoidal a globulares de altura métrica (**Figura 5.51**).



Figura 5.50. Proximidade da caverna com a rodovia BR-040, com sua entrada estreita, em declive em meio a blocos solapados.



Figura 5.51. Panoramas do salão principal da caverna (à esq.) e da bifurcação distal em câmaras globulares (à dir.).

O piso é regular com sedimentos finos argilosos, secundariamente composto por seixos autóctones, apresentando leve declive do fundo, em direção à câmara principal/entrada. Notam-se marcas de gotejamento e formação de canais de escoamento incipiente em trechos do piso. O ambiente é úmido consideravelmente, com recorrência de nuvens de vapor.

Em suas paredes arredondadas é possível notar níveis de umidificação, sendo o terço superior seco, com crostas brancas, terço médio úmido vermelho-alaranjado com aporte de fluxos lentos de água, escoando para o terço inferior e piso, onde localmente formam-se patamares cobertos por crosta rígida coloidal. Canalículos de fundo em parede e piso também contribuem para o aporte hídrico, como demonstrados na **Figura 5.52**.



Figura 5.52. Imagens superiores apresentam aspecto padrão nas paredes, onde o terço superior seco apresenta crostas brancas fúngicas. Terço médio apresenta coloração laranja-avermelhada, cuja percolação hídrica formam logo abaixo patamar coberto por crosta rígida de argilominerais até piso em trecho de canal de escoamento. Imagens inferiores são exemplos de canalículos em parede e piso com aporte hídrico e sedimentar alóctone.

Em linhas do teto há formação de estalactites moles, centi e decimétricas, compostas por argilominerais que escorrem de descontinuidades do teto, aproveitando pendentes rochosos como suportes condutores. Alguns exemplos são apresentados na **Figura 5.53**. Sua proximidade da superfície (75 cm abaixo dela em média) na camada de canga facilita este aporte hidrológico vertical.



Figura 5.53. Espeleotemas tipo estalactites centi a decimétricos, de composição argilomineral, encontrados em várias linhas do teto, com hidrologia ativa mesmo em período seco (setembro/2024).

Suas características seguem o padrão de cavernas ferríferas em canga (crostas detrito-lateríticas) conforme Piló & Auler (2005, 2007 e 2009) e permitem deduzir que seu desenvolvimento se deu por formação de zona de baixa densidade na canga, aproveitando o fator gravitacional, respeitando a inclinação de baixo gradiente das camadas lateríticas.

Ressalta-se que a altimetria entre a crosta superficial e pontos inferiores atingiu o máximo de 3,5 m, aderindo aproximadamente à espessura laterítica observada em corte próximo à caverna. Esta condição permite deduzir que o contato entre crosta detrito-laterítica e embasamento subjacente potencialmente favoreceu escoamentos percolantes, lixiviação com formação de baixa densidade e desenvolvimento cavernícola.

Tal condição vai de encontro ao proposto por Calux (2013) na **Figura 5.54**. Entretanto não é possível precisar uma datação para sua gênese, em função das diferentes idades sugeridas para a formação da crosta detrito-laterítica local, cuja idade máxima com maturidade é indicada pela literatura e mapeamentos como do Paleógeno, por volta de 55 Ma.

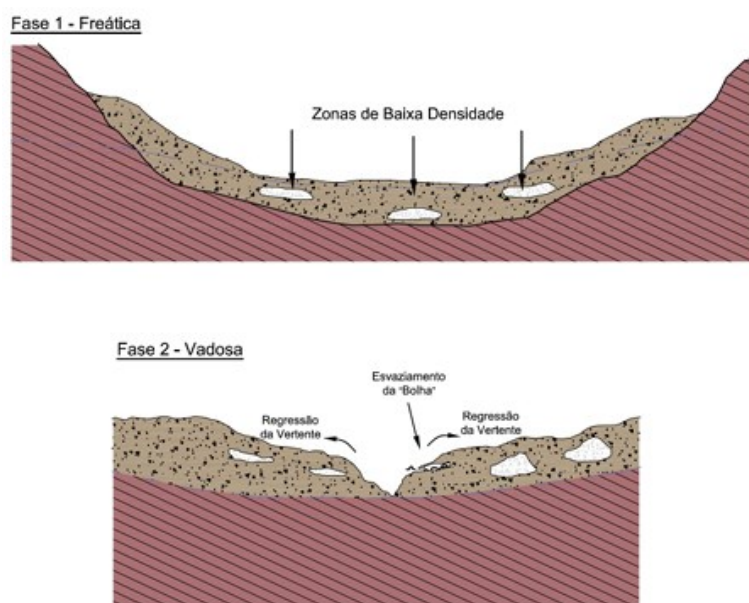


Figura 5.54. Processo genético-evolutivo da caverna JK, conforme proposição de Calux (2013).

Potencialmente a caverna JK era oclusa, sendo exposta pela implantação da rodovia em etapa de terraplenagem durante execução de cortes em suas margens. O aclave de sua entrada em meio a blocos solapados reforça esta constatação, mas não exclui possível processo natural erosivo à remontante de sua abertura. Este cenário é demonstrado pela **Figura 5.55**.

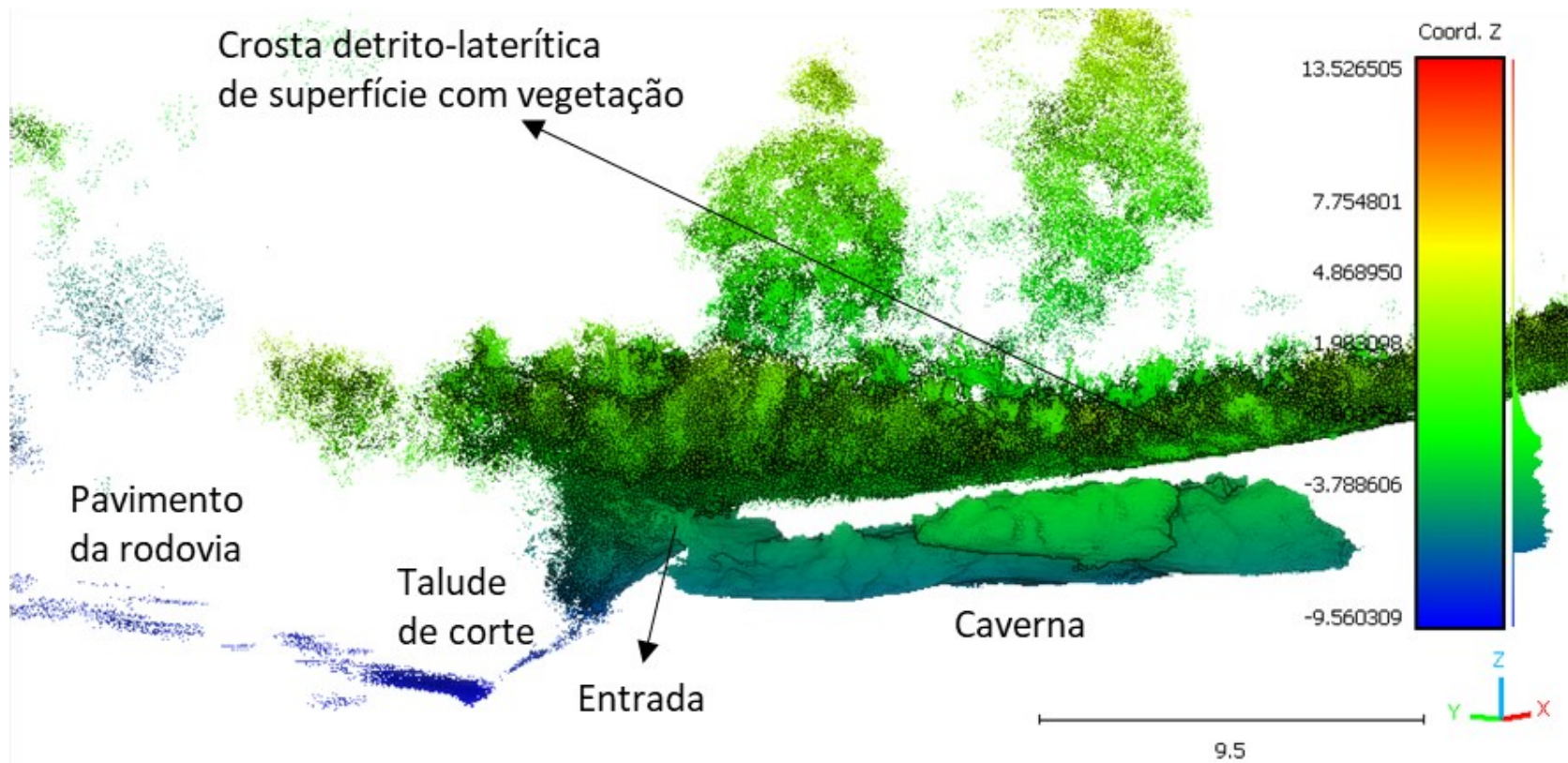


Figura 5.55. Nuvem 3D bruta, com inserção da caverna JK próxima à superfície e adjacente à rodovia BR-040.

6 CONCLUSÕES

O laser *scanner* móvel (MLS) permitiu mobilidade e agilidade na captura de dados morfológicos e cálculos espeleométricos em comparação com outros métodos. Limitações ergonômicas, de acessibilidade ou de alcance ocorrem de acordo com a complexidade morfológica e dimensional das cavernas.

Comparando os atributos espeleométricos observou-se um aumento geral nos valores de projeção horizontal, desnível e área. O volume é o único atributo com redução significativa nos valores.

Comparando morfologias 3D em variações escalares mili-centimétricas, há predomínio de maiores médias para planaridade, verticalidade e linearidade. A caverna ferrífera foi destacada das demais (excepcional com maior rugosidade). As mais semelhantes entre si são as cavernas granítica e quartzítica.

No monitoramento da integridade física, foi possível comparar nuvens de pontos 3D e seções. Nas seções padronizadas, fato interessante são os resultados das regressões lineares dos atributos quantitativos (perímetros, números de pontos e volumes) entre campanhas. Elas obtiveram valores iguais para as cavernas granítica, quartzítica e carbonática (0,9407), mesmo com as variações diversas de quantidade e atributos das seções, distintamente do valor menor da ferrífera (0,8636). Este comportamento seguiu o padrão obtido nas comparações dos atributos geométricos, podendo simultaneamente indicarem valores de corte para alterações em monitoramentos futuros.

A comparação pelos atributos geométricos das nuvens por campanha indicou bom nível de diferenciação sazonal em todas as cavernas, com atenção para interferência de umidade, em destaque na caverna ferrífera JK. Fato este denominado de “efeito de atenuação atmosférica” por Nováková *et al.* (2022). Dificuldades semelhantes são apontados por Nocerino *et al.* (2019), Nováková *et al.* (2022) e Grasso *et al.* (2023), sendo em caso de mapeamento, necessário ampliar processo de limpeza na nuvem de pontos.

O método de cálculo das distâncias absolutas entre nuvens sazonais gera duas constatações. Primeiramente, o método permite o zoneamento de locais com alterações morfológicas principalmente nas faces externas de cavernas (tetos, paredes e pisos). Em segundo lugar, foram observadas variações nas morfologias com interferência de:

- (i) água, seja por umidade ou drenagem subterrânea devido à variação sazonal no período chuvoso;
- (ii) vegetação, principalmente em cavernas com diversas entradas;
- (iii) variações na captura devido à inacessibilidade e interações ambientais do sensor;
- (iv) distorções entre as nuvens de pontos 3D compostas e no georreferenciamento entre elas, também notadas por Grasso *et al.* (2023) em mapeamento cavernícola por momentos distintos e comparando sensores, assim como Dora *et al.* (2025);
- (v) potencial interferência magnética em cavernas ferríferas.

Ressalta-se que durante as campanhas de monitoramento, entre setembro/2024 e abril/2025, não foram identificadas alterações na integridade física nas quatro cavidades percorridas.

Dessa maneira, conclui-se que apenas as análises estatísticas das nuvens de pontos 3D não são capazes de determinar alterações da integridade física em uma caverna. São necessárias etapas complementares, devendo ser integradas:

- (i) análise visual de cada nuvem, incluindo seções dinâmicas;
- (ii) análise geométrica e estatística entre nuvens;
- (iii) análise da distância absoluta entre nuvens;
- (iv) aplicação das mesmas análises em seções padronizadas e dinâmicas;
- (v) avaliação de interferências durante a etapa de escaneamentos em campo que atenuaram a qualidade ótima da morfologia 3D de uma caverna alvo.

A integração destas etapas é capaz de determinar alterações de uma caverna em um determinado intervalo de tempo. Recomenda-se a padronização das rotas de captação, fixando a quantidade de escaneamentos necessários para a cobertura de uma caverna, integrando observações de campo com o processamento em escritório, como apontado por Sales *et al.* (2025). Ou seja, a primeira campanha demandará um planejamento de execução e ajustes robustos.

Somando, sugere-se que monitoramentos tenham intervalo anual (comparando campanhas de mesma estação anual, indicando-se a seca), ou que campanhas semestrais sejam comparadas apenas pela mesma sazonalidade (úmida/úmida e seca/seca). Indica-se que para cada estação haja campanha de escaneamento de referência (comumente denominada “*background*”), permitindo as comparações de campanhas posteriores.

O escaneamento, associado aos métodos convencionais (registros fotográficos e interpretativos), permitiu detalhar o mapeamento, a morfologia de elementos não detectáveis ou delimitáveis a olho nu (canais de teto e rugosidades de paredes, por exemplo) e suas altimetrias no sentido de correlacionar com atributos da paisagem. Em outras palavras, viabilizou uma compreensão das morfodinâmicas locais, a partir da ampliação de formas e fenômenos interpretáveis em detalhe nas cavernas.

Esta condição confirma conclusão de Gallay *et al.* (2016), em que colaboração de um geomorfólogo/espeleólogo e um especialista em SIG é o fator chave para a interpretação eficiente dos conjuntos de dados 2D/3D gerados. Ambas as disciplinas requerem conhecimento e experiência mais amplos para lidar com os dados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sensor LIDAR utilizado permitiu ampla aplicação em análises espeleológicas. As quatro aplicações testadas forneceram entendimento e detalhamento com melhoria da interpretação dimensional e precisão geográfica. Mesmo com certas interferências ambientais identificadas, o método tridimensional avança na qualidade em relação aos métodos atuais e permite com a experiência contornar potenciais desvios.

As aplicações espeleométricas, além do refinamento de mapeamento, permitiram a tomada de dimensões mais confiáveis, independente de variações elevando ou reduzindo valores. A aplicação geométrica permitiu aprofundar análises morfológicas quantitativas e reconhecer diferenças e similaridades entre cavernas de modo estatístico acurado. A ampliação da amostragem 3D e da aplicação deste método, em mais cavernas e litologias, poderão delimitar padrões morfológicos/geométricos robustos posteriormente.

A aplicação no monitoramento de integridade física forneceu parâmetros e reconhecimento da potencialidade dos métodos para uso futuro. Recomendações práticas foram indicadas ao longo dos tópicos de cada teste e nas conclusões.

Com a qualidade dos dados, a interpretação de fatores evolutivos e dinâmica subterrânea forneceu acurácia para análises ambientais confiáveis. Destaca-se a importância de cavernas como unidades de análise do relevo que subsidiam integrar e permutar o entendimento das morfodinâmicas externas superficiais locais, com as subterrâneas.

Demais análises podem ser aprofundadas futuramente, com a continuidade das campanhas de monitoramento de integridade física tridimensional. Além do acréscimo de outras, como as geológicas e geotécnicas, acompanhando aplicações de Araújo *et al.* (2016) e Bordehore *et al.* (2023, 2024 e 2025).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, MARIA DE JESUS SANTOS; *et al.* 2025. Espeleotopografia: análise comparativa de topografia convencional e laser *scanner* nas cavidades N4WS_0072 e N4WS_0073, Serra Norte, Parauapebas-PA. *In*: CALUX, A.; SBE (Ed.) **19° International Congress of, Speleology: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, July 20-27, 2025. Proceedings. Volume 4**, p 124-128.

ANDREYCHOUK, V.; DUBLYANSKY, Y; EZHOV, Y; LYSENIN, G. 2009. **Karst in the Earth's Crust: its distribution and principal types**. Poland: University of Silesia/Ukrainian Academy of Sciences/Tavrishesky National University-Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009.

ARAÚJO, R.N.; MUNIZ, F.; SILVA, B.R.; BRANDI, I. 2015. Controle morfológico de cavidades com a utilização de laser *scanner*. *In*: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33,2015. Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p.321-327. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_321-327.pdf>. Acesso em: 04/11/2023.

ARAÚJO, RAMON & BRANDI, IURI & BARBOSA, MARCELO & SEBASTIÃO, CRISTIANE & SOARES, LEONARDO & DIAS, LEONARDO & MUNIZ, FABRÍCIO & FERREIRA, MAURI. 2016. Levantamento litoestrutural em cavidades em formação ferrífera utilizando dados de LASER SCANNER 3D. **Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR 2016**. Mecânica das Rochas e Engenharia de Rochas para Inovação e Desenvolvimento. Conferência Especializada ISRM 19-22 Outubro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. © CBMR/ABMS e ISRM, 2016. DOI: 10.20906/CPS/SBMR-02-0014.

ARUZZO, FERNANDO AUGUSTO. 2016. **Mapeamento geológico estrutural da Formação Tiradentes, Mesoproterozóico, São João del-Rei, Minas Gerais**. Monografia de graduação. Instituto de Geociências; Departamento de Geologia; Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016. 48 p.

AUGUSTIN, C.H.R.R.; LOPES, M.R.S.; SILVA, S.M. 2013. Lateritas: um conceito em construção. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 3, p. 241-257, 2013.

AULER, A. 1994. **Hydrogeological and Hydrochemical Characterization of the Matozinhos-Pedro Leopoldo Karst**. Bowling Green: Faculty of the Department of Geography and Geology / Western Kentucky. Thesis, Master of Science. 1994. 110p.

AULER, A.S; PILÓ, L.B. 2007. Aspectos morfológicos e evolução de cavernas em minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *In*: **II Encontro Brasileiro de Estudos do Instituto de Geociências**. IG-USP. Caderno de Resumos, pagina 8. 2007.

BARBOSA, H.S.L. *et al.* 2019. Processos estruturais Condicionantes de um exemplar de Patrimônio Espeleológico da Serra do Lenheiro em São João del-Rei – MG. **Caderno de Geografia**, v.29, n.58: 786-804. 2019. DOI 10.5752/p.2318-2962.2019v29n58p786

BCRA, **British Cave Research Association**. Disponível em: <<http://bcra.org.uk/surveying/index.html>> . Acesso em: 03/01/2015.

BERENGUER-SEMPERE, FERNANDO & GÓMEZ-LENDE, MANUEL & SERRANO, ENRIQUE & BLASCO, SANJOSÉ, 2014. Orthothermographies and 3D modeling as potential tools in ice caves studies: The Peña Castil Ice Cave (Picos de Europa, Northern Spain). **International Journal of Speleology**. 43. 35-43. 10.5038/1827-806X.43.1.4. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.43.1.4>

BRANDÃO, L. DE J., *et al.* 2022. CARACTERIZAÇÃO ESPELEOLÓGICA E SEDIMENTAR DE UMA CAVERNA DO MACIÇO QUARTZÍTICO SERRA SÃO JOSÉ, MINAS GERAIS. **Revista Brasileira De Espeleologia - RBEsp**, 1(11), 4–36. 2022. DOI: <https://doi.org/10.37002/rbsp.v1i11.2315>

BRASIL. CONAMA RESOLUÇÃO Nº 347, DE 10 DE SETEMBRO DE 2004. Publicada no **Diário Oficial da União**: nº 176, de 13/09/2004, págs. 54-55. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico.

BRASIL. DECRETO Nº 6.640, DE 7 DE NOVEMBRO DE 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Publicação **Diário Oficial da União**: Seção 1 - Nº 218, 10/11/2008.

BRASIL. DECRETO Nº 10.935, DE 12 DE JANEIRO DE 2022. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. **Diário Oficial da União**: Seção 1 - Edição Extra - A - 12/1/2022, Página 1 (Publicação Original).

BRICHTA, A.; PATERNOSTER, K.; SCHOLL, W.U.; TURINSKY, F. 1980. Die Gruta do Salitre bei Diamantina, Minas Gerais, Brasilien, kein "Einsturzloch". **Zeitschrift fur Geomorphologie**. 1980. 24: 236-242.

BORDEHORE, JORDÁ LUIS; LISSETTE G. ALBÁN; RAMIRO C. VALENZUELA; GIANELLA BRAVO; MELANIE MENOSCAL-MENOSCAL; ERWIN LARRETA; DANIEL GARCES; MAURIZIO MULAS. 2023. An Analysis of Slope Stability in the Penipe–Baños Road by Applying Empirical Methods, Kinematic Analysis and Remote Photogrammetry Techniques. **Geosciences** 13, no. 12: 366. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences13120366>

BORDEHORE, J.L. *et al.* 2024. Discussion on the applicability of empirical “tunnelling” methodologies for cave stability analysis: case of the Al-Badia lava tube in Harrat Al-Shaam/Jordan. *In*: A. Aramburu, L. Damas y J. J. Durán (eds.). **Geología y turismo: realidades complementarias**. Karrantza (Bizkaia), Asociación de Cuevas Turísticas Españolas (ACTE, 2024). 2024. 284 pags.

BORDEHORE, J.L.; BENRABAH, ABDELMADJID & DOMINGUEZ, SALVADOR. 2025. Discontinuity mapping in natural caves: a comparative study of manual data collection, structure from motion, and IPHONE 13 PRO MAX. **Civil and Environmental Engineering Reports**, 35(4), 81–90. 2025. DOI: <https://doi.org/10.59440/ceer/208299>.

BUCHROITHNER, M. F. 2015. Mountain cartography ‘down under’ – Speleological 3-D Mapping. **Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie**, Wien, 2015. 21, 93–204.

CALUX, A. S. 2013. **Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em formação ferrífera no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Dissertação Mestrado. Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013. 177 p.

CÂMELO, D.L. 2017. **Duricrusts ferruginosos da Serra do Espinhaço Meridional (MG) e suas relações com a evolução da paisagem**. Tese de Doutorado – USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2017. 93 p.

CARDIA, S. *et al.* 2024. 3D digital analysis for geo-structural monitoring and virtual documentation of the saint Michael cave in Minervino Murge, Bari (Italy). **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage**. Volume 32, March 2024, e00308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00308>

CHEREM, L.F.S. *et al.* 2012. Denudação química e rebaixamento do relevo em bordas interplanálticas com substrato granítico: dois exemplos no SE de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, n.1, (Jan-Mar) 2012. p.73-84.

CLOUDCOMPARE, n.d. **Free 3D point cloud processing software.** <https://www.cloudcompare.org/>

COELHO, A. 2013. **Registros de Grandes Alagamentos no Cânion do Rio Peruaçu, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu - PNCP, MG.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2013. 136 f.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. 2004. **Projeto APA Sul RMBH: geomorfologia, mapa geomorfológico, escala 1:50.000 em 3 partes.** Antônio I. Medina, Marcelo E. Dantas, Allaoua Saadi - Belo Horizonte: SEMAD/CPRM, 2004.

CORRÊA NETO, A.V.; ANÍSIO, L.C.C.; BRANDÃO, C.P. 1993. Um endocarste quartzítico na Serra do Ibitipoca, sudeste de Minas Gerais. **Anais do VII Simpósio de Geologia de Minas Gerais - SBG Núcleo MG – Bol.** 1993. 12: 83-86.

COSSO, T., FERRANDO, I., AND ORLANDO, A. 2014. **Surveying and mapping a cave using 3d laser scanner: the open challenge with free and open source software.** Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-5, 181–186, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-181-2014>

COSTA-CARDOSO, R.; FRANCO-JÚNIOR, R.; SILVA-TEXEIRA, R.; COSTA-CARDOSO, A. 2015. Considerações sobre cavernas em quartzito na ‘Serra Nova’ e a Lapa do Jair, localizados na APA da Serra de São José, município de Prados, MG. *In*: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p.315-319. Disponível em: <https://www.cavernas.org.br/wp-content/uploads/2021/07/33cbe_315-319.pdf>. Acesso em: 26/11/2024.

COSTA, L.B.F. 2010. **Geologia da porção nordeste do granitóide Ritópolis entre Resende Costa e Ritópolis, Estado de Minas Gerais.** Instituto de Geociências – Departamento de Geologia – UFRJ, Monografia de Graduação, 2010. XIX, 101 p.

CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. (org.). 2019. **Espeleologia e Licenciamento Ambiental.** Brasília: ICMBio, 2019. 262 p. ISBN 978-65-5024-005-9.

DE WAELE, JO & FABBRI, STEFANO & SANTAGATA, TOMMASO & CHIARINI, VERONICA & COLUMBU, ANDREA & PISANI, LUCA. 2018. Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave (Emilia Romagna, N. Italy). **Geomorphology**. 319. 10.1016/j.geomorph.2018.07.012. 2018.

DIAS, C.R.C.; *et al.* 2025. Registro fotográfico para o monitoramento de feições geoestruturais e geoespeleológicas em cavidades na serra da bocaina, sudeste do Pará. *In*: RASTEIRO, M.A.; MORATO, L. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 32, 2013. Barreiras. **Anais...** Campinas: SBE, 2013. p.293-298. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais32cbe/32cbe_293-298.pdf>. Acesso em: 07/07/2025.

DORA, DESPOINA; *et al.* 2025. Assessment of a low-cost solution for cave mapping: a comparative analysis. *In*: CALUX, A.; SBE (Ed.) **19º International Congress of, Speleology: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, July 20-27, 2025. Proceedings. Volume 4**, p 168-171.

DUTRA, G. 2015. Gênese e desenvolvimento de cavernas naturais subterrâneas em formações ferríferas. *In: Úrsula de Azevedo Ruchkys... [et al.]*, (organizadores). **Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais** [livro eletrônico] – 1. Ed. – Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2015. 110Mb; PDF.

ESCH, L. 1991. **Speleogenesis in the Lost Creek Wilderness Area, 2 Colorado**. *Geo*, 18: 31-35, 1991.

FABBRI, S., SAURO, F., SANTAGATA, T., ROSSI, G., DE WAELE, J. 2017. High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: An example from the Lessini mountains (North Italy). **Geomorphology**, 280, 16-29. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.001>.

FABRI, FABIANA PENA. 2011. **Estudo das cavernas quartzíticas da região de Itambé do Mato Dentro**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011, 179 pág.

FABRI, F.P. 2018. **Fenômenos e processos cársticos associados à gênese de cavidades em rochas siliciclásticas na Serra do Espinhaço Meridional (região sudeste de Diamantina / MG)**. Tese de Doutorado. Departamento de Geografia. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS UFMG - 2018. 136 p.

FERNANDES, A.B. *et al.* 2023. Mapeamento topográfico de cavernas no setor mineral: avanços e novas tecnologias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. ISSN 2236-5664, v. 24, nº 3, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i3.2315>

FERNANDES, A.B. *et al.* 2024. Comparison Between Topographic Surveys of Iron Caves: Case Study in the Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Cartografia**, ISSN 1808-0936, vol. 76, pág. 1-18, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv75n0a-71241>

FINLAYSON, B. 1983. The formation of caves in granite. *In: OF THE ANGLO-FRESCH KARST SYMPOSIUM. Proceedings...* Norwich, England: Geo Books, Sept. 1983.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. 2007. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. Wiley: Chichester, 2007.

GALLAY, M., HOCHMUTH, Z., KAŇUK, J., *et al.* 2016. Geomorphometric analysis of cave ceiling channels mapped with 3D terrestrial laser scanning. **Hydrology and Earth System Sciences**, 2016. 20(5), 1827–1849.

GOLDSTEIN-GREENWOOD, J. 2022. **Nonparametric and Parametric Power: Comparing the Wilcoxon Test and the T-test**. Biblioteca da Universidade da Virgínia. 2022. Digital Article. Disponível em: <https://library.virginia.edu/data/articles/nonparametric-and-parametric-power-comparing-wilcoxon-test-and-t-test>

GONÇALVES SOBRINHO, L.C. 2012. **Estudo da evolução da escarpa do divisor hidrográfico Doce/Paraná em Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 2012. 86 f.

GRASSO, N., DABOVE, P., AND PIRAS, M. 2023. The use of SLAM and UAV technology in geological field for monitoring: the case study of the Bossea Cave. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, XLVIII-2/W3-2023, 73–79. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W3-2023-73-2023>

GRILLI, E., FARELLA, E. M., TORRESANI, A., AND REMONDINO, F. 2019. Geometric features analysis for the classification of cultural heritage point clouds, **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, XLII-2/W15, 541–548, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-541-2019>

GROHMANN, C.H. *et al.* 2019. Mapeamento e modelagem 3D do setor turístico da Caverna do Diabo (SP) com laser scanner: resultados preliminares. *In*: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019. Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p.201-206. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_201-206.pdf> Acesso em: 26/11/2025.

HARDT, R. 2003. Cavernas em granite e gnaiss. Aplicação de um sistema de classificação. *In*: **Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Espeleologia**. Sociedade Brasileira de Espeleologia, Januária, pp. 52-55. 2003.

HILDRETH-WERKER, V. 2006. Photographs as Cave Management Tools. *In*: **Cave Conservation and Restoration**. Huntsville: National Speleological Society, Inc., p. 203-214, 2006.

IBGE; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **As Grutas em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Oficinas Gráficas da Estatística, 1939. 278p.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV). 2023. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>>. Acesso em: 28/04/2024.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV). 2022a. **Planos de Manejo Espeleológico: diretrizes e orientações técnicas**. Reedição 2022. Brasília: ICMBio, 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/orientacoes-e-procedimentos/plano-de-manejo-espeleologico-1/pme-diretrizes-cecav-ed_2022.pdf>. Acesso em: 07/07/2025.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV). 2022b. **Área De Influência Sobre O Patrimônio Espeleológico: Orientações básicas à realização de estudos espeleológicos**. Reedição 2022. Brasília: ICMBio, 2022b. Disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/orientacoes-e-procedimentos/area-de-influencia-sobre-o-patrimonio-espeleologico/area-de-influencia-diretrizes-out2022.pdf>>. Acesso em: 07/07/2025.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV). 2025. **Anuário Estatístico do Patrimônio Espeleológico Brasileiro 2023-2024; Ano 7 | N° 6**. Brasília, 2025. disponível em: <<https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/anuario-estatistico-do-patrimonio-espeleologico-brasileiro/cecav-anuario-estatistico-espeleologico-2023-24.pdf>>. Acesso em: 15 dezembro 2025.

IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Hidrografia de Minas Gerais**. Base cartográfica digital. Belo Horizonte. 2002.

KAŇUK, JÁN & SUPINSKY, JOZEF & MENEELY, JOHN & HOCHMUTH, ZDENKO & ŠAŠAK, JÁN & GALLAY, MICHAL & CALLIERI. 2023. Laser Scanning of a Complex Cave System during Multiple Campaigns. 10.1201/9780429327575-4. *In: 3D Imaging of the Environment* (pp.56-81). John Meneely (Ed.). 2023.

LIMA, THIAGO. 2025. Mapeamento de cavidades hospedadas em rochas ferríferas e/ou ferruginosas com uso de sensor LIDAR. O caso da Caverna do Manso. *In: CALUX, A.; SBE (Ed.) 19° International Congress of, Speleology: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, July 20-27, 2025. Proceedings. Volume 4*, p 195-199.

MAURITY, C.; KOTSCHOUBEY, B. 1994. Caracterização e Gênese dos Minerais de Espeleotemas das Cavernas do Platô N1 – Serra dos Carajás-PA. SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 4., 1994, Belém. **Anais...**Belém: SBG, 1994.

MAURITY, C. W.; KOTSCHOUBEY, B. 1995. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 – Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra**, v. 7, p. 331-362. 1995.

MAURITY, C.W.; KOTSCHOUBEY, B. 2005. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 – Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. **O Carste** 17(3): 78-91.

MCFARLANE, M.J.; TWIDALE, C.R. 1987. Karstic features associated with tropical weathering profiles. **Zeitschrift fur Geomorphologie Suppl.** Bd 64: 73-95.

MIOTO, J. A. 1990. Tentativa de zoneamento sísmico do sudeste brasileiro. *In: Workshop Neotectônica e Sedimentação Continental. Cenozóica do sudeste do Brasil*, I, Belo Horizonte, 1990, **Anais**. Belo Horizonte: SBG/MG, Bol. 11, p. 33-45, 1990.

MONTEIRO, H.; VASCONCELOS, P.M.; FARLEY, K.A.; SPIER, C. & MELLO, C. 2014. (U-Th)/He Geochronology of Goethite and the Origin and Evolution of Cangas. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 131: 267-289.

NETO, R. M. 2008. Evolução de caverna em quartzito e processos cársticos em São Thomé das Letras-MG: contribuição ao estudo de sistemas cársticos em rochas silicáticas. **Geosul**, Florianópolis. 2008. v. 23, n. 45, p 105-121, jan./jun.

NICACIO, G. *et al.* 2017. Proposta para a determinação de cavernas de dimensões notáveis em cavernas ferríferas. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v.2, n° 8 (2017), pag 16-25.

NOVÁKOVÁ, M.; GALLAY, M.; ŠUPINSKÝ, J.; FERRÉ, E.; ASTI, R., *et al.* 2022. Correcting laser scanning intensity recorded in a cave environment for high-resolution lithological mapping: A case study of the Gouffre Georges, France. **Remote Sensing of Environment**, 2022, 280 pp.113210.10.1016/j.rse.2022.113210. insu-03752599

PARKER, C.W.; AULER, A.S.; SENKO, J.; SASOWSKY, I.D.; PILÓ, L.B.; SMITH, M.; JOHNSTON, M.; BARTON, H. 2013. Microbial iron cycling and biospeleogenesis: cave development in the Carajás Formation, Brazil. **ICS Proceedings**. Prague:442-446. 2013.

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

PALMER, A. N. 2003. Speleogenesis in carbonate rocks. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, 1:1-11. 2003. Virtual Journal.

PASSARELLI, U. 2023. **Dossiê Serra do Lenheiro** (org.). Instituto Histórico e Geográfico de São João del-Rei. São João del-Rei – MG. 2023. 966 p.

PEREZ, R.C. 1997. Documentação fotográfica aplicada à caracterização geoespeleológica em áreas ambientalmente comprometidas: um estudo de caso. *In*: XXIV CBE, Ouro Preto, MG, **Anais XXIV CBE**, Ouro Preto, p. 87-96, 1997.

PILÓ, L. B. 2000. Geomorfologia Carstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, n. 1, 2000. p. 88-102.

PILÓ, L.B; AULER, A. S. 2005. As cavernas em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero, MG. **O Carste** 17(3): 93-105.

PILÓ, L.B.; AULER, A.S. 2009. Geoespeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. *In*: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 30, Montes Claros. **Anais...** Montes Claros: SBE, 2009. p. 181-186.

PILÓ, L.B. & COELHO, A.. 2014. Geoespeleologia. *In*: **Serra da Bocaina – Espeleologia, Diagnóstico e Análise de Relevância. Estudo diagnóstico e análise de relevância de 235 cavernas da Serra da Bocaina, Canaã dos Carajás, PA**. Atendimento de condicionante da Licença Prévia N. 436/2012 do Projeto Ferro Carajás S11D definida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis – IBAMA. EMPRESA CARSTE. PDF. Maio de 2014.

PILÓ, L.B.; COELHO, A.; REINO, J.C.R. 2015. Geoespeleologia em rochas ferríferas: cenário atual e conservação. *In*: **CARMO, F.F. & KAMINO, L.H.Y. (Org.). 2015. Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais** — Belo Horizonte : 3i Editora, 2015. 552 p. il.

PINHEIRO, R.V.L.; HENRIQUES, A.L.; SILVEIRA, L.T.; MAURITY, C.W. 1985. **Considerações Preliminares sobre a Espeleologia da Serra dos Carajás (PA)**. Grupo Espeleológico Paraense. Relatório inédito, 38p. 1985.

PINHEIRO, R. V. L.; MAURITY, C. W. 1988. 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: [s.n.], p. 179-186. 1988.

RIBEIRO, André *et al.* 2002. Carta Geológica – Folha SF.23-X-C-II – São João Del-Rei – Escala 1:100.000 com texto explicativo. **Projeto Sul de Minas – Etapa I**. Belo Horizonte: COMIG. 2002.

RIBEIRO, André *et al.* 2003. Capítulo 11, Geologia da Folha São João del-Rei. *In*: PEDROSA-SOARES, Antônio Carlos *et al.* (Ed.). **Projeto Sul Minas, Etapa I: Geologia e Recursos Minerais do Sudeste Mineiro**. Belo Horizonte: Companhia Mineradora de Minas Gerais, 2003. p. 521-622.

REDOVNIKOVIĆ, L., JAKOPEC, A., BĘDKOWSKI J., JAGETIĆ, J. 2025. The affordable DIY Mandeye LiDAR system for surveying caves, and how to convert 3D clouds into traditional cave ground plans and extended profiles. **International Journal of Speleology**, 2025. 53(3), ijs2535. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.53.3.2535>

REZENDE, A.F. *et al.* 2025. Análise estatística do monitoramento sismográfico de cavidades em formações ferríferas. Minas de N4 e N5, Carajás, Brasil. *In*: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019. Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p.38-44. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_038-044.pdf>.

RODET, J.; RODET, M.J.; WILLEMS, L.; POUCKET, A. 2009. Abordagem geomorfológica da bacia do rio Peruaçu e implicações geoarqueológicas. *In: ARQUEOLOGIA DO VALE DO RIO PERUAÇU E ADJACÊNCIAS – MINAS GERAIS*. Tomo I. Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico / UFMG. Belo Horizonte. Vol. 19. 2009. 75-102 p.

RODET, J. 2017. The cave: a result of a long evolution named karstification. *In: 25th International Karstological School 'Classical Karst', 2017, Postojna. Milestones and challenges in karstology*. Postojna: Karst Research Institute ZRC SAZU, 2017. v. 1. p. 48-49.

ROSIÉRE, C. A. 2015. Formações ferríferas e minérios de alto teor associados. *In: Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas [livro eletrônico] : propostas para sua conservação no quadrilátero ferrífero, Minas Gerais / Úrsula de Azevedo Ruchkys... [et al.]*, (organizadores). – 1. Ed. – Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2015. 110Mb; PDF.

ROSSI, P.G.G. ; ROCHA, L.C. ; VITAL, L.H.S. *et al.* 2024. Buraco do Inferno: registro de caverna em granito no centro urbano de Resende Costa-MG. **51º Congresso Brasileiro de Geologia**. 13 a 17 de outubro de 2024. Belo Horizonte, pôster.

ROSSI, P.G.G; ROCHA, L.C. *et al.* 2025a. Teste metodológico com dados 3D Lidar, para análise morfológica e monitoramento da Caverna Buraco do Inferno, Resende Costa-MG. *In: CALUX, A.; SBE (Ed.) 19º International Congress of, Speleology: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, July 20-27, 2025a. Proceedings. Volume IV*, p 258-263. Disponível em: <https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2025/09/19ICS_Proceedings_Vol-IV.pdf>. Acesso em 26/11/2025.

ROSSI, P.G.G; ROCHA, L.C. *et al.* 2025b. Análise dimensional, morfológica e paisagística de cavernas siliciclásticas no setor noroeste da Serra do Lenheiro, São João del Rei - MG. *In: CALUX, A.; SBE (Ed.) 19º International Congress of, Speleology: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, July 20-27, 2025b. Proceedings. Volume V*, p 116-121. Disponível em: <https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2025/09/19ICS_Proceedings_Vol-V.pdf>. Acesso em 26/11/2025.

RUBBIOLI, E.L. 2019. 4- Topografia e espeleometria de cavidades naturais. *In: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Espeleologia e Licenciamento Ambiental / Jocy Brandão Cruz e Luís Beethoven Piló. [org] – Brasília: ICMBio, 2019. 262 p. ; Il. Color. ISBN 978-65-5024-005-9*

SAADI, A. 1990. Um rift Neo-Cenozóico na região de São João Del Rei – MG, borda sul do Cráton do São Francisco. *In: Workshop Neotectônica e Sedimentação Continental Cenozóica do sudeste do Brasil, I, Belo Horizonte, 1990, Anais*. Belo Horizonte: SBG/MG, Bol. 11, p. 63-79, 1990.

SAADI, A.; VALADÃO, R. C. 1990. Eventos tectono-sedimentares na bacia neocenozóica de Rio das Mortes (região de São João Del Rei – MG). **Bol. Soc. Bras. Geologia – Núcleo Minas Gerais**. n.11, p.81-99. 1990.

SAADI, A. 1991. **Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais Saadi, (Tensões intraplaca, descontinuidades crustais e morfogênese)**. Tese para obtenção do cargo de Professor Titular. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia. Belo Horizonte. 1991. 290p.

SALES, S.L. *et al.* 2025. Desempenho do scanner portátil BLK2GO na elaboração de mapas espeleotopográficos: um estudo de caso. *In: CALUX, A.; SBE (Ed.) 19º International Congress of, Speleology: Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, July 20-27, 2025. Proceedings*.

Volume IV, p 264-268. Disponível em: <https://uis-speleo.org/wp-content/uploads/2025/09/19ICS_Proceedings_Vol-IV.pdf>. Acesso em 26/11/2025.

SANTOS JUNIOR, E. J. 2017. **Modelagem Estocástica Aplicada na Estimativa do Raio de Proteção de Cavidades Naturais Subterrâneas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral., 2017. 117 pág.

SENA, I.S. de; ANDRADE, J.M.; ROCHA, L.C; FIGUEIREDO, M.A. 2011. Considerações sobre a geologia e história da Gruta Casa da Pedra, São João del-Rei –MG. **Caderno de Geografia**, v.21, n.36, 2011. 12p. ISSN 0103-8427

SIMMONS, G.C. 1963. Canga caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **The National Speleological Society Bulletin** 25: 66-72.

SPIER, C. A. 2005. **Geoquímica e gênese das formações ferríferas bandadas e do minério de ferro da mina de Águas Claras, Quadrilátero Ferrífero, MG**. 298 f. Tese (Tese de Doutorado em Geologia) - Instituto de Geologia, Universidade de São Paulo. 2005.

TANIKAWA, WENDY. 2022. **Gatilhos espeleogenéticos de cavernas quartzíticas e a evolução da paisagem cárstica da Serra do Espinhaço Meridional**. Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Geologia. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais..- 2022. 98 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

TOMETZOVÁ, DANA, *et al.* 2020. The development of geotourism with the use of 3D digital cave model. A case study of the Bear Cave, Slovakia. **Geomatics and Environmental Engineering**, 2020. 14 (2):83-105. DOI: <https://doi.org/10.7494/geom.2020.14.2.83>.

TRAVASSOS, L.E.P. 2019. **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade-ICMBio – 2019. 242 p.; Il. Color. ISBN 978-65-5024-003-5.

VALADÃO, R.C. 2009. Geodinâmica de superfícies de aplanamento, desnudação continental e tectônica ativa como condicionantes da megageomorfologia do Brasil oriental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.10, n.2, 2009.p.77-90.

VERDI, M.; BASSI, F.; CALABRESE, L.; AZZOLINI, M.; MALEK, S.; BATTISTI, R.; GRILLI, E.; MENNA, F.; GALLUS, E.; REMONDINO, F. 2024. Metrological analysis with covariance features of micro-channels fabricated with a femtosecond laser. **Metrology** 2024, 4, 398-410. DOI: <https://doi.org/10.3390/metrology4030024>

WEINMANN, M., JUTZI, B., MALLET, C., AND WEINMANN, M. 2017. Geometric features and their relevance for 3D point cloud classification. *In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-1/W1, 157–164, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-1-W1-157-2017>

WIEGAND, J., FEY, M., HAUS, N. & KARMANN, I. 2004. **Geochemical and hydrochemical investigation on the genesis of sandstone and quartzite karst of the Chapada Diamantina and the Iron Quadrangle (Brazil)**. Z.d.t.geol. Ges. Stuttgart. 2004. 155:61-90.

WILLEMS, L.; RODET, J.; POUCKET, A.; MELO, S.; RODET, M. J.; COMPÈRE, P.; HARTET, F.; AULER, A. S. 2008. Karsts in sandstones and quartzites of Minas Gerais, Brazil. **Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña**. 2008. Vol. 33, pp. 127 – 138.

