

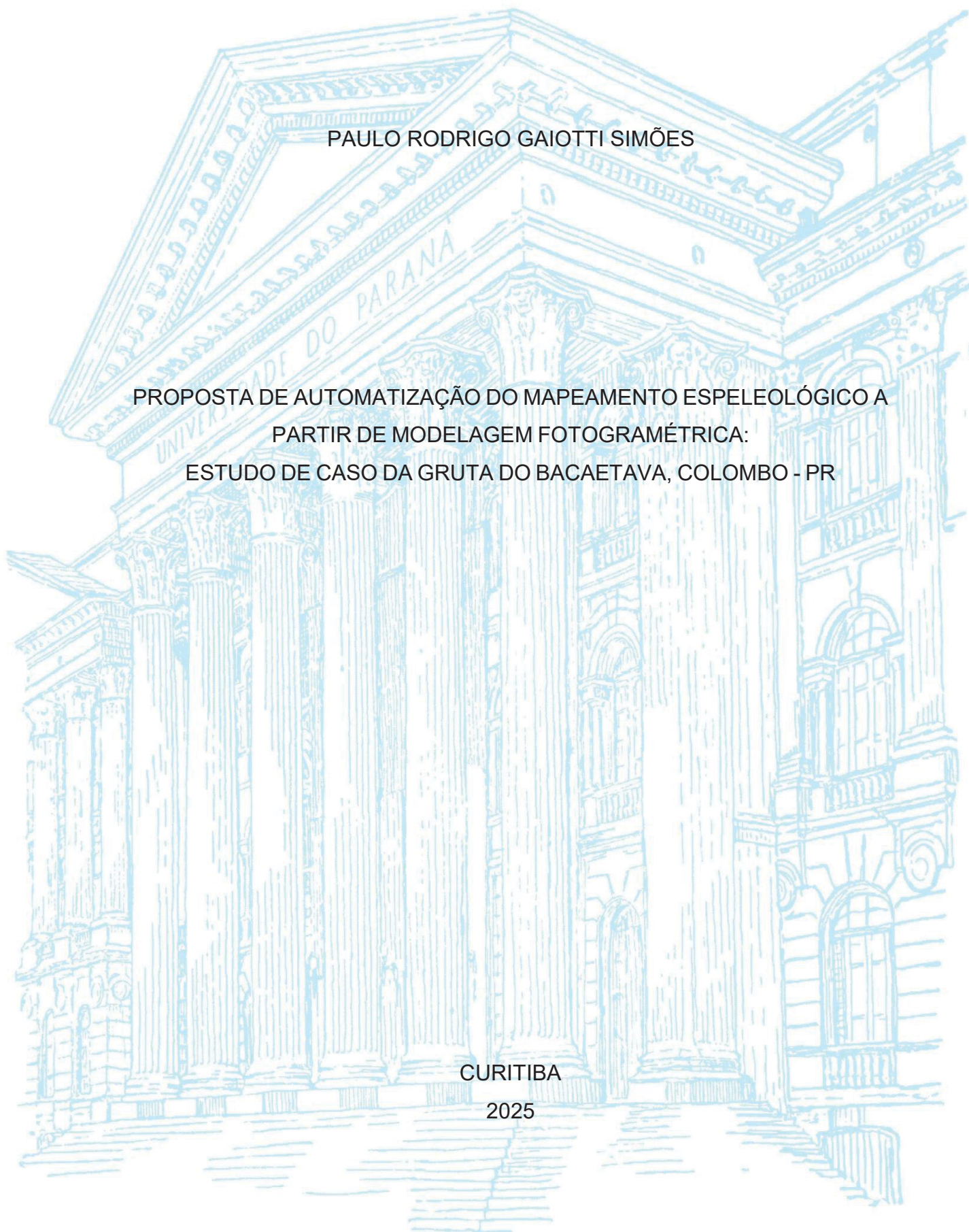
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR

PAULO RODRIGO GAIOTTI SIMÕES

PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DO MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO A
PARTIR DE MODELAGEM FOTOGRAMÉTRICA:
ESTUDO DE CASO DA GRUTA DO BACAETAVA, COLOMBO - PR

CURITIBA

2025



PAULO RODRIGO GAIOTTI SIMÕES

PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DO MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO
A PARTIR DE MODELAGEM FOTOGRAFÉTRICA:
ESTUDO DE CASO DA GRUTA DO BACAETAVA, COLOMBO - PR

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Simões, Paulo Rodrigo Gaiotti

Proposta de automatização do mapeamento espeleológico a partir de modelagem fotogramétrica: estudo de caso da Gruta do Bacaetava, Colombo - PR / Paulo Rodrigo Gaiotti Simões. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas.

Orientador: Luis Augusto Koenig Veiga

Coorientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt

1. Espeleologia. 2. Fotogrametria. 3. Cartografia. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. III. Veiga, Luis Augusto Koenig. IV. Schmidt, Marcio Augusto Reolon. V. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **PAULO RODRIGO GAIOTTI SIMÕES** intitulada: **PROPOSTA DE AUTOMATIZAÇÃO DO MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO A PARTIR DE MODELAGEM FOTOGRAMÉTRICA: ESTUDO DE CASO DA GRUTA DO BACAETAVA, COLOMBO - PR**, sob orientação do Prof. Dr. LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 19 de Fevereiro de 2025.

Assinatura Eletrônica

24/02/2025 14:07:10.0

LUÍS AUGUSTO KOENIG VEIGA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

20/02/2025 15:44:24.0

JOSÉ ADILSON CAVALCANTI

Avaliador Externo (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS
MINERAIS)

Assinatura Eletrônica

24/02/2025 16:41:36.0

PAULO SERGIO DE OLIVEIRA JUNIOR

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

24/02/2025 09:17:50.0

FERNANDO MORAIS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE TOCANTINS)

Este trabalho é dedicado à comunidade espeleológica, ao qual foi destinado e à comunidade geodésica. Que seja mais do que o usual aplicado a um ambiente peculiar.

AGRADECIMENTOS

Às universidades públicas, gratuitas e de qualidade, em especial à UFOP, UFPE, UESPI, UNICAMP e UFPR e ao SUS, sem os quais esse trabalho não teria sido iniciado e, muito menos, finalizado.

À minha Tia Nedir e à minha irmã Simone, pelo apoio incondicional. À memória do meu pai, Hélio e do meu irmão, Helinho. Ao Cauã, meu filho querido. À Savana, a mais fiel companheira.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – PPGCG – UFPR pela oportunidade do desenvolvimento desta pesquisa, à CAPES pela concessão da bolsa de estudos e ao Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia, pelo suporte.

Aos orientadores Prof. Dr. Luís Veiga e Prof. Dr. Marcio Schmidt por terem apostado e contribuído no desenvolvimento do projeto e à Profa. Dra. Silvana Camboim pelos incentivos e compartilhamento dos conhecimentos. Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio de Oliveira Júnior e à Prof. Dra. Ines Parellada, pelas contribuições por ocasião da minha qualificação. Às professoras Dra. Luciene Stamato Delazari e Dra. Regiane Dalazoana e ao professor Dr. Edson Aparecido Mitishita, pela introdução aos conceitos geodésicos e fotogramétricos e expansão dos cartográficos.

À Sociedade Excursionista e Espeleológica – SEE, início e meio de toda essa trajetória e ao seu fundador mais ilustre, o paranaense Victor Dequech. Aos amigos espeleólogos da SEE por todo o aprendizado e convivência: Milton Pereira Filho e Luciana Vetel, Marcelo Taylor, José Adilson Cavalcanti, Cláudio Maurício T. Silva, Cláudia Pessoa. Ao Grupo de Desenvolvimento do TOPGRU, cujas discussões muito enriqueceram este trabalho.

À Fundação Museu do Homem Americano – FUMDHAM, pela introdução no mundo das Geotecnologias, em especial às mestras, Dra. Niéde Guidon e Dra. Anne-Marie Pessis e ao grande mestre Dr. Marcelo Souza.

À República Rebu, por anos de grata convivência, onde se iniciou a redação deste projeto.

Ao Prof. Dr. Alvaro Crósta, orientador do Mestrado, pelo rico aprendizado que me proporcionou e pela sugestão certa do programa.

Aos amigos espeleólogos do GEOP – Açungui pela acolhida, suporte nos trabalhos de campo, disponibilização de estudos e mapas, em especial

Savério Ronchi Junior, Gabriel Ghedin, Gisele Sessegolo, Rafael Balestieri e Kleber Mise.

À Prefeitura Municipal de Colombo e ao Parque Municipal da Gruta do Bacaetava na pessoa de sua gestora, Beatriz Pereira e aos monitores, pelo interesse em apoiar a pesquisa e dar suporte aos trabalhos de campo.

Ao ICMBio, pela concessão da licença de pesquisa.

Aos amigos espeleólogos reais e virtuais que de alguma forma se manifestaram e incentivaram o desenvolvimento deste trabalho: Ericson Igual, Davi Silva, José Antonio Ferrari, Herman Figueiredo, Peter Dotz, Eduardo Ga-Onze, Angel "Acosta" Colón, Robert Mark.

À Autodesk, pelas licenças educacionais de vários dos softwares utilizados.

Aos amigos da Rep: Lilo, Lays, Paulão, Marcel, Amorim, Vaz, pela grata e enriquecedora convivência.

Aos amigos do copo e do pito do Villa Bambu: Lisi de Paula, Abdul Osiecki, Priscila Krüger, Daniel Piosiadlo Jr., Mariano, Pat Cunha, Drê, Rafael, Pedro Alkimista por ajudarem a amenizar os momentos de stress. À Alana, Aurélio e à Máquina do Mal, *Long Live to Rock and Roll*.

Aos espeleólogos e arqueólogos que possam vir a replicar os procedimentos aqui apresentados em suas pesquisas, uma das propostas deste trabalho.

A todos vocês meus mais profundos agradecimentos.

Recollection

*Memories of a life on earth go flashing past,
Of home, of Grauben, friends of whom he's seen his last
Contemplating what his life's been worth,
While trapped beneath the earth,
An embryo at birth
Pain and fear destroy the beauty I have seen,
Of caverns, where no other man has been
Silurian epoch hosts me as my grave,
My final blow I wave,
A life too late to save
Crystals of opaque quartz, studded limpid tears,
Forming magic chandeliers, lighting blistered galleries*

Rick Wakeman

Journey to the Centre of the Earth, 1974.

RESUMO

Características do ambiente subterrâneo impuseram limitações técnicas e instrumentais no mapeamento de cavidades brasileiras desde fins do século XVIII, sendo este realizado através de levantamento topográfico, utilizado enquanto referencial espacial para a elaboração de croquis. Os recentes avanços na microeletrônica e microinformática têm permitido o desenvolvimento de novos instrumentos e métodos de levantamento, notadamente a Fotogrametria Terrestre e a Varredura a Laser Terrestre. Seguindo essa tendência, esta pesquisa apresenta uma proposta de Mapeamento por Modelagem 3D enquanto método inovador e alternativo ao mapeamento topográfico tradicional, onde o mapa espeleológico é composto a partir da extração e edição vetoriais de elementos espeleológicos e de produtos cartográficos gerados a partir do modelo fotogramétrico, utilizando-se de processos predominantemente automatizados em ambiente computacional. Os procedimentos adotados permitiram avaliar a precisão posicional através do método dos mínimos quadrados e a geometria da nuvem fotogramétrica através da comparação com a varredura a laser, utilizada como método de referência, validada pela métrica da mínima distância entre pontos correspondentes. Diversas variáveis espeleométricas foram calculadas, incluindo algumas não convencionais. A composição final do mapa espeleológico foi feita em ambiente SIG segundo um projeto cartográfico, incluindo a inserção de elementos gráficos como QR Codes e hiperlinks para acesso dos modelos 3D via Internet. O mapa resultante foi classificado no mais alto nível de precisão e detalhamento do sistema da classificação da União Internacional de Espeleologia, com erro médio quadrático inferior a 2 cm. O processo de construção do mapa espeleológico foi detalhado num fluxograma de trabalho na expectativa de que possa servir de referência teórico-metodológica para a reprodutibilidade do método proposto pela comunidade espeleológica. Formas de divulgação dos modelos 3D via repositórios na Web e através de visita virtual implementada em plataforma de desenvolvimento de jogos foram experimentadas visando a democratização do acesso e novas formas de interação com os modelos 3D, sendo explorados recursos de realidade virtual. Vantagens e limitações dos métodos em relação ao ambiente subterrâneo são apresentadas, considerando-se os recursos técnicos, financeiros e humanos necessários à sua implementação.

Palavras-chave: Espeleologia. Fotogrametria terrestre. Varredura a laser. Cartografia espeleológica. SIG.

ABSTRACT

Characteristics of the underground environment have imposed technical and instrumental limitations on the mapping of Brazilian cavities since the late 18th century, with this being carried out through topographic surveying, used as a spatial reference for sketch elaboration. Recent advancements in microelectronics and microinformatics have facilitated the development of new instruments and surveying methods, notably Terrestrial Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning. Following this trend, this research presents a proposal for 3D Modeling Mapping as an innovative and alternative method to traditional topographic mapping, where the speleological map is composed from vector extraction and editing of speleological elements and cartographic products generated from the photogrammetric model, utilizing predominantly automated processes in a computational environment. The adopted procedures allowed for positional accuracy evaluation through the least squares method and the geometry of the photogrammetric cloud through comparison with laser scanning, used as a reference method, validated by the metric of the minimum distance between corresponding points. Several speleometric variables were calculated, including some unconventional ones. The final composition of the speleological map was carried out in a GIS environment according to a cartographic project, including the insertion of graphic elements such as QR codes and hyperlinks for accessing the 3D models via the internet. The resulting map was classified at the highest level of precision and detail of the International Union of Speleology classification system, with a mean square error less than 2 cm. The process of constructing the speleological map was detailed in a workflow diagram in the expectation that it may serve as a theoretical-methodological reference for the reproducibility of the method proposed by the speleological community. Means of disseminating the 3D models via web repositories and through virtual visits implemented on a game development platform were experimented with aiming at democratizing access and exploring new forms of interaction with the 3D models, with virtual reality resources being explored. Advantages and limitations of the methods concerning the underground environment are presented, considering the technical, financial, and human resources required for their implementation.

Keywords: Speleology. Close-range Photogrammetry. Terrestrial Laser Scanner. Cave Mapping. GIS.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ÁREAS COM POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE CAVERNAS NO BRASIL E DISTRIBUIÇÃO DAS CAVERNAS CADASTRADAS SEGUNDO O CANIE EM 2020.	17
FIGURA 2 - LINHA DO TEMPO DA EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE MAPEAMENTO DE CAVIDADES NO BRASIL.	20
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO EM PLANTA BAIXA (ACIMA) E PERFIL LONGITUDINAL (ABAIXO) DA GRUTA DAS ONÇAS. PRIMEIRO MAPEAMENTO DE CAVERNAS NO BRASIL. 1790.	28
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DA LAPA DO MOSQUITO FEITA POR PETER ANDREAS BRANDT.	29
FIGURA 5 - GRUTA DA IGREJINHA, OURO PRETO, MINAS GERAIS. MAPA FEITO PELA SEE EM 1964.	32
FIGURA 6 - GRUTA DA IGREJINHA, OURO PRETO, MINAS GERAIS. MAPA FEITO PELA SEE EM 1985 COM NÍVEL DE PRECISÃO E DETALHAMENTO 6D (BCRA), RASTERIZADO E VETORIZADO EM AUTOCAD EM 2001.	32
FIGURA 7 - MAPA DA GRUTA DE MAQUINÉ ELABORADO POR AFONSO DE GUAÍRA HEBERLE EM 1940.	33
FIGURA 8 - PERFIL LONGITUDINAL DA GRUTA SANTANA, IPORANGA – SP, FEITO POR MICHEL LE BRET NA DÉCADA DE 60.	34
FIGURA 9 - LAYOUT DE MAPA ESPELEOLÓGICO PROPOSTO NAS “NORMAS E CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS”.	37
FIGURA 10 - MAPA DA GRUTA CONVENTO, CAMPO FORMOSO - BA, MAPEADA PELA SEE EM 1986 E INCLUÍDA NO ATLAS DAS GRANDES CAVERNAS DO BRASIL.	38
FIGURA 11 - MAPA DA TOCA DA BOA VISTA, CAMPO FORMOSO - BA NO ANO DE 2001. MAIOR CAVERNA DO HEMISFÉRIO SUL, ATUALMENTE COM CERCA DE 113 KM DE DESENVOLVIMENTO HORIZONTAL.	38
FIGURA 12 - DISTOX (ESQUERDA) EM COMUNICAÇÃO VIA BLUETOOTH COM PDA (DIREITA) COM O SOFTWARE POCKETTOPO.	39
FIGURA 13 - INTERFACE DO TOPODROID.	43

FIGURA 14 - PROCESSO DE CONSTITUIÇÃO DE MAPA ESPELEOLÓGICO. LINHA DE TRENA (A); TRAÇADO DO CONTORNO E BLOCOS (B); PERFIL LONGITUDINAL E CORTES TRANSVERSAIS (D).	44
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO LINEAR (DL) E DA PROJEÇÃO HORIZONTAL (PH) EM UMA CAVIDADE HIPOTÉTICA.	46
FIGURA 16 - FÓRMULAS PARA CÁLCULO DA ÁREA (ESQUERDA) E VOLUME (DIREITA) PELO MÉTODO DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO.	47
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DO PONTO ZERO EM UMA CAVIDADE VERTICAL (ESQUERDA) E HORIZONTAL (DIREITA).	49
FIGURA 18 – INFLUÊNCIA DA FORMA DE REPRESENTAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA GRUTA MARTIMIANO II SOBRE A VARIÁVEL ESPELEOMÉTRICA “ÁREA”.....	50
FIGURA 19 - REPRESENTAÇÕES DOS DESNÍVEIS POSITIVO E NEGATIVO EM UM PERFIL LONGITUDINAL DE UMA CAVERNA HIPOTÉTICA.	51
FIGURA 20 - EXTRAÇÃO VETORIAL DOS CONTORNOS DA CAVIDADE EM PLANTA BAIXA (VERMELHO), PERFIL LONGITUDINAL (LARANJA), PROJEÇÃO VERTICAL LONGITUDINAL NW-SE (EM MARROM), PROJEÇÃO VERTICAL TRANSVERSAL NE-SW (LARANJA), CORTES TRANSVERSAIS (VERDE), CORTES TRANSVERSAIS ROTACIONADOS E TRANSLADADOS (VERDE E EM PLANTA) E CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 10 CM (CINZA).	54
FIGURA 21 – MODELAGEM 3D DE PAINEL RUPESTRE DO ABRIGO CAP BLANC, FRANÇA, ILUMINADO PELA SIMULAÇÃO DE UMA VELA.	55
FIGURA 22 - LEVANTAMENTO A LASER DA LAPA NOVA DE VAZANTE E APRESENTAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS NO SOFTWARE ISITE.	57
FIGURA 23 – DIFERENTES VISTAS DA DOCUMENTAÇÃO DO SCANNER A LASER 3D DE PARTE DA CAVERNA BURGESH NA JORDÂNIA. ...	58
FIGURA 24 - IMAGEM DA CAVERNA SKOTEINO OBTIDA PELA TÉCNICA DE VARREDURA A LASER DE NUVEM DE PONTOS USANDO RISCAN PRO E POINTTOOLS VIEW 1.7 P.....	59
FIGURA 25 - ESTAÇÕES DE VARREDURA DE UMA CAVERNA NA TURQUIA....	64

FIGURA 26 – EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DA CAVERNAS EM FORMAÇÃO FERRÍFERA (N4E-0026) LOCALIZADA EM CARAJÁS, PA.....	66
FIGURA 27 – VARREDURA A LASER DA CAVERNA DE GELO DOBŠINSKÁ E A NUVEM DE PONTOS FINAL.....	68
FIGURA 28 - LEVANTAMENTO TOTAL DA CAVERNA GROTTA A SUBDIVIDIDO EM 134 SETORES ORTOGONAIS DE 1 M. DIFERENTES PERFIS DE SEÇÃO TRANSVERSAL COM DIFERENTES ELEMENTOS MORFOLÓGICOS SÃO DESTACADOS NAS INSERÇÕES.....	68
FIGURA 29 – VISTA DO TETO DA CAVERNA CA´ CASTELLINA COM A INDICAÇÃO DAS 44 ESTAÇÕES DO TLS.	69
FIGURA 30 - COMPARAÇÃO ENTRE A NUVEM DE PONTOS DA CAVERNA DO DIABO PARA COM OS MAPAS TOPOGRÁFICOS DO PROCAD (A) E SILVERIO (B).	71
FIGURA 31 - VARREDURA A LASER DA CAVERNA ŠKOCJANSKE.....	73
FIGURA 32 - NUVENS DE PONTOS DO SISTEMA DE CAVERNAS JENOLAN PROJETADAS EM PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL COM A DIFERENCIAÇÃO DOS QUATRO LEVANTAMENTOS DAS VISITAS DE 2010, 2011, 2013 E 2013, NUM TOTAL DE MAIS DE 2,7 BILHÕES DE PONTOS.	74
FIGURA 33 – FORTIFICAÇÕES SUBTERRÂNEAS DA I GUERRA MUNDIAL: GALERIA DE CONEXAO (1), BATERIA DE ARTILHARIA (2), QUARTOS (3), CONEXÃO COM A TRINCHEIRA (4).	75
FIGURA 34 - A MOCHILA COM OS LASER SCANNERS RIEGL VZ-400 E VELODYNE VLP16 LITE.	76
FIGURA 35 - DISTÂNCIAS ENTRE A NUVEM DE PONTO DE REFERÊNCIA DO SFM MVS E A NUVEM DE PONTOS DO IPHONE CALCULADAS EM 5 MILHÕES DE PONTOS COM SOBREPOSIÇÃO TEÓRICA DE 75%; NUVENS DE PONTO REAMOSTRADO A 0,05 M DE ESPAÇAMENTO NOMINAL MÍNIMO (A); MODELO TEXTURIZADO DO IPHONE LIDAR (B); MODELO SOMBREADO POR IPHONE LIDAR (C);.....	77
FIGURA 36 – SISTEMA DE EXPLORAÇÃO AUTÔNOMO EM OPERAÇÃO NO DINNING ROOM DA CAVERNA LAUREL.....	79

FIGURA 37 – PERFIL LONGITUDINAL DOS LEVANTAMENTOS DO CENTRO DA CIDADE DE CAMERANO (ITÁLIA) E DAS CAVERNAS.	81
FIGURA 38 - ESQUEMA DE ESTRATÉGIA DE LINK DE COMUNICAÇÃO ENTRE ROBÔS ESFÉRICOS AUTÔNOMOS.	81
FIGURA 39 - TELA DA GUI DO CAVEATRON, INCLUINDO O MENU PRINCIPAL (ESQUERDA) E TELA DE RESULTADO DE MEDIDA (DIREITA). ...	83
FIGURA 40 - EXEMPLO DE DADOS DO CAVEATRON: A – CAVERNA ROBBER BARON, SAN ANTONIO, TX; B – INTERIOR DA CAVERNA ROBBER BARON E COMPARAÇÃO DE UMA FOTO E OS DADOS RENDERIZADOS; C – RENDERIZAÇÃO DA CRICKET CAVE, BOERNE, TX; D – GRÁFICO DE LINHA DA WHIRLPOOL CAVE EM AUSTIN, TX; E – MODELOS IMPRESSOS EM 3D DE WHIRLPOOL CAVE, CANYON WREN CAVE E CRICKET CAVE.....	84
FIGURA 41 - MÓDULO CAVEATRON.....	85
FIGURA 42 - ANAGLIFOS DA ÁREA DE PESQUISA REPRESENTANDO A RUGOSIDADE DO TERRENO (ESQ.), RELEVO INTERPOLADO (CENTRO) E RELEVO TOTAL (DIR.).....	86
FIGURA 43 - EXEMPLOS DE MODELOS 3D DO VISUALIZADOR PDF-3D	87
FIGURA 44 - MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE CONSTITUTION HILL USANDO (A) TLS E (B) SFM; (C) FOTOGRAFIA AÉREA DO LOCAL; E (D) MAPA DE DENSIDADE DE PONTOS. SISTEMA DE COORDENADAS UTM ZONA 30N.....	88
FIGURA 45 - ÁREA COBERTA PELO PROJETO RADAM.	90
FIGURA 46 - PLANTA BAIXA DA CAVERNA TOPOGRAFADA COM O SISTEMA DISTOX2 E MAPEADA COM O SOFTWARE THERION (AZUL) E PLANTA BAIXA OBTIDA COM ESTAÇÃO TOTAL (VERMELHO)...	91
FIGURA 47 - EDIÇÃO DE LAYOUT NO AUTOCAD MAP 3D VISTO EM PLANTA..	92
FIGURA 48 - VISTA EM PLANTA DA <i>INNER SPACE CAVERN</i> , ONDE O LEVANTAMENTO FOI REALIZADO.....	93
FIGURA 49 - O SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO ARTESANAL UTILIZADO NO LEVANTAMENTO.....	95
FIGURA 50 - NUVEM DE PONTOS DENSA FINAL DA CAVERNA GUATTARI COM AS INDICAÇÕES DOS PONTOS DE CONTROLE.	96

FIGURA 51 - PLANTA BAIXA DA PALEOTOCA DE DOUTOR PEDRINHO (A), COLETA DAS MEDIDAS DOS TÚNEIS (B) E LEVANTAMENTO FOTOGRAFÉTICO (C).....	98
FIGURA 52 - PERSPECTIVA ISOMÉTRICA SW-NE DA PROJEÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DO MODELO 3D DA MINA DO VELOSO (AO CENTRO) EM PLANTA BAIXA (CINZA), EM PERFIL VERTICAL LONGITUDINAL (VERMELHO) E CONTORNO VERTICAL TRANSVERSAL (VERDE).	99
FIGURA 53 - LEVANTAMENTO DA GRUTA DO RATO POR TECNOLOGIA MATTERPORT.	101
FIGURA 54 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA CAVERNA BURACO DO INFERNO.....	102
FIGURA 55 - IMAGEM TRIDIMENSIONAL DOS CONDUTOS CÁRSTICOS DETECTADOS POR TOMOGRAFIA POR RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO VALE KLEŠNICA DESTACADOS EM CORES QUENTES.....	103
FIGURA 56 - LOCALIZAÇÃO DA CAVERNA FUMANE (NORTE DA ITÁLIA) (A); VISTA NORTE DA ENTRADA DA CAVERNA ONDE FOI REALIZADO O LEVANTAMENTO DO ERT (B); INSTANTE DA FASE DE COLETA DE DADOS DO SCANNER A LASER (C); E UMA PARTE DA ENTRADA DA CAVERNA DESENTERRADA DURANTE A ESCAVAÇÃO EM 1989 (D).....	104
FIGURA 57 - VISTA EM PLANTA DOS PERFIS DE ERT (LINHAS VERMELHAS) (A); VISTA 3D DOS PERFIS DA ERT E DO MODELO TOPOGRÁFICO DA GRUTA DE FUMANE (B); FOTO DO MODELO TOPOGRÁFICO GEORREFERENCIADO (C). QUADRADOS VERMELHOS: POSIÇÃO DE DOIS DOS TESTES HVSR.	105
FIGURA 58 - MODELO GEOESTATÍSTICO 3D DA GRUTA DE LASCAUX INTERPRETADO A PARTIR DOS LEVANTAMENTOS POR ERT; (A) VISTA EM PLANTA DOS LIMITES DA SUPERFÍCIE; (B) VISTA DE SUL MOSTRANDO A ESTRUTURA INTERNA DO MACIÇO.	106
FIGURA 59 - VISTA EM PLANTA DO CONJUNTO DE PERFIS VERTICAIS DIMENSIONADOS E ORIENTADOS CORRETAMENTE NO AUTOCAD.....	108

FIGURA 60 - EXEMPLO DE SEÇÃO TRANSVERSAL (À ESQUERDA) E A VETORIZAÇÃO MANUAL (À DIREITA).....	110
FIGURA 61 - SUNFISH® AO LADO DE UM MERGULHADOR.....	110
FIGURA 62 - LEVANTAMENTO DA CAVERNA HUDSON (A) E CAVERNAS SEAL COVE (B) REALIZADO PELO SUNFISH®.	111
FIGURA 63 - MAPEAMENTO RÁPIDO DE UMA CAVERNA SUBAQUÁTICA. (A) CORDA de REFERÊNCIA PARA O SISTEMA DE COORDENADAS (LINHA AZUL) E AS MEDIÇÕES DE SEÇÃO TRANSVERSAL EM INTERVALOS LONGITUDINAIS (LIMITES VERMELHOS). (B) ENTRADA DA CAVERNA (MARCADOR VERDE).	113
FIGURA 64 - POSIÇÃO RELATIVA DOS QUADROS DO SENSOR EM RELAÇÃO AO QUADRO DO VEÍCULO.	114
FIGURA 65 - EXEMPLO DE POLIGONAL FECHADA ONDE O PONTO 6 DEVERIA COINCIDIR COM O PONTO 1, SENDO O SEGMENTO E O ERRO ASSOCIADO.....	116
FIGURA 66 - ERROS NUMA POLIGONAL ABERTA, SITUAÇÃO COMUM EM LEVANTAMENTOS ESPELEOLÓGICOS.	117
FIGURA 67 – ALVO COM ILUMINAÇÃO SOBRE CABEÇA GIRATÓRIA.....	117
FIGURA 68 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL E PRINCIPAIS INTERVALOS DE CONFIANÇA.....	119
FIGURA 69 – EXEMPLO DE FECHAMENTO DE POLIGONAL COM ERRO ASSOCIADO.....	122
FIGURA 70 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS NÃO AJUSTADOS (A), AJUSTAMENTO PELO SOFTWARE CMAP (B) E PELO SOFTWARE COMPASS (C) NUM GRID DE 20 X 20.....	124
FIGURA 71 - PROPAGAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS POR POLIGONAIS ADJACENTES.	126
FIGURA 72 - EXEMPLO DE SOLICITAÇÃO DE CONTRATAÇÃO DE UM MAPA E UM PROJETO CARTOGRÁFICO.....	131
FIGURA 73 - EXEMPLO DE PROBLEMA OCACIONADO PELO SOFTWARE MAPINFO EM QUE OCORRE A SUPERPOSIÇÃO E OCULTAÇÃO DE TOPÔNIMOS.	134
FIGURA 74: ESQUEMA DA COMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS, INCLUINDO A CARTOGRAFIA DIGITAL.	135

FIGURA 75 - NOVO MODELO DE ORTOFOTOCARTA ADOTADO PELO IGC....	139
FIGURA 76 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA O MAPEAMENTO DO ÍNDICE DE DISSECAÇÃO.....	141
FIGURA 77 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA O MAPEAMENTO DO ÍNDICE DE DISSECAÇÃO, SENDO QUE OS RESULTADOS MAIS ADEQUADOS SE REFEREM À PROPOSTA 3.....	141
FIGURA 78 – DIFERENÇA DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA ENTRE O LEVANTAMENTO POR TLS E POR KINECT.	144
FIGURA 79 - DIFERENÇA NO IMAGEAMENTO ENTRE O MÉTODO SFM (ESQ.) E IMAGE SCANNING (DIR.).	145
FIGURA 80 – PALETA DE CORES REPRESENTANDO A ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA PELO ZEBREVO DA MINA BUCCA DELA FAINA.	147
FIGURA 81 - DISTRIBUIÇÃO DAS POSIÇÕES DE VARREDURA DERIVADA DO MAPEAMENTO TLS. O POLÍGONO AMARELO MOSTRA UMA ÁREA DE INTERESSE (AOI) DEFINIDA PARA O CÁLCULO DAS MUDANÇAS NO ACÚMULO DE GELO.	149
FIGURA 82 - "PLANO DA MARAVILHOSA SITUAÇÃO, EM ST. CANTIAM, ASSIM COMO O CURSO DO RIO SERO, ATRAVÉS DE 3 GRUTAS (GEYER ČINNÝ, ENTRE 1751 E 1760)".	150
FIGURA 83 - PERSPECTIVA AXONOMÉTRICA PRODUZIDA POR BERNARD PEIGNÉ DA PARTE SUPERIOR DE "LE TROU QUI SOUFFLE". ..	152
FIGURA 84 – PERSPECTIVA ISOMÉTRICA DA LAPA NOVA DE VAZANTE, VAZANTE – MG.....	152
FIGURA 85 - REPRESENTAÇÃO EM PERSPECTIVA ISOMÉTRICA DA GRUTA DE ITAPERUÇU.	153
FIGURA 86 - REPRESENTAÇÃO EM PERSPECTIVA OBLÍQUA CAVALEIRA DE UMA GRUTA HIPOTÉTICA.	153
FIGURA 87 – BLOCO-DIAGRAMA DA GRUTA DO JANELÃO FEITO POR FRANÇOIS FEDERLÉ.	154
FIGURA 88 - BLOCO-DIAGRAMA DA GRUTA DO JANELÃO. PARNA CAVERNAS DO PERUAÇU - MG.	154

FIGURA 89 - MODELO TOPOGRÁFICO 3D DA GRUTA DO BOCÃO, P.E. DO IBITIPOCA - MG PRODUZIDO PELO SOFTWARE THERION E VISUALIZADO NO SOFTWARE LOCH.....	155
FIGURA 90 - GRIDE DE PONTOS SOBREPOSTO AOS POLÍGONOS DOS DIVERSOS COMPARTIMENTOS.	158
FIGURA 91 - MORFOLOGIA DE CONDUTOS SEGUNDO SUA GÊNESE: CONDUTO FREÁTICO (ESQ.), CONDUTO VADOSO (CENTRO) E CONDUTO COMBINADO (DIR.).	160
FIGURA 92 - EXEMPLOS DE PADRÕES DE DESENVOLVIMENTO DE CAVERNAS CARBONÁTICAS: RAMIFICADA RETILÍNEA (A); ANASTOMOSADA (B); EM REDE (C) E ESPONJOSA (D).....	163
FIGURA 93 - ESQUEMA DE INFORMAÇÃO GEOESPACIAL.	166
FIGURA 94 - INTERFACE DO SILEXGIS.....	168
FIGURA 95 - FUNÇÕES CARTOGRÁFICAS EXPLORATÓRIAS: NAVEGAÇÃO (I); DISPLAY BÁSICO; (II) NAVEGAÇÃO E ORIENTAÇÃO; (III) PESQUISA; (IV) MULTI-ESCALA.....	170
FIGURA 96 - SISTEMA SUBTERRÂNEO EM ESTRUTURA DE ARAME, COM OS POLÍGONOS PREENCHIDOS E SOB UMA SUPERFÍCIE.....	173
FIGURA 97 – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE CAVERNAS INTERATIVO EM FORMATO VRML.	175
FIGURA 98 - VISUALIZAÇÃO NA WEB DA MALHA 3D DE ESTALACTITES E SUAS LINHAS DE CONTORNO.	176
FIGURA 99 - INTERFACE DE USUÁRIO DO APLICATIVO.....	178
FIGURA 100 – VISUALIZADOR DE FEIÇÕES DA NUVEM DE PONTOS.....	179
FIGURA 101 - SISTEMA DE ALTA IMERSÃO COM QUATRO TELAS, ESTEREOSCOPIA E “RASTREAMENTO DE CABEÇA” (ESQ.) E DE BAIXA IMERSÃO COM TELA ÚNICA E NÃO ESTEREOSCÓPICA (DIR.).	180
FIGURA 102 - AVATAR PERCORRENDO A CAVERNA DE FORT STANTON.....	182
FIGURA 103 - ANAGLIFO DE UMA ARANHA MARROM (LOXOSCELES SP.) ENCONTRADA NA TOCA DA RAPOSA, INCLUÍDA NO CD - ROM.	183
FIGURA 104 - PROCESSO DE MODELAGEM DA CAVERNA. GERAÇÃO DA MALHA (ALTO E ESQ.); RENDERIZAÇÃO (ALTO E DIR.);	

TEXTURIZAÇÃO NO 3D MAX (ABAIXO E ESQ.) E COMPOSIÇÃO FINAL NA UNITY (ABAIXO E DIR.).....	184
FIGURA 105 – MODELO 3D DA CAVERNA DO URSO.....	185
FIGURA 106 – PRIMEIROS EXPERIMENTOS EM NAVEGAÇÃO EM PRIMEIRA PESSOA NO TOUR VIRTUAL DA GRUTA DOS FUGITIVOS.	186
FIGURA 107 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO PARQUE MUNICIPAL DA GRUTA DO BACAETAVA E DA GRUTA DO BACAETAVA, MUNICÍPIO DE COLOMBO - PR.....	188
FIGURA 108 - MAPA DA GRUTA DO BACAETAVA FEITO POR PIERRE MARTIN E CLEON CASTRO EM 1965.....	190
FIGURA 109 – MAPA DA GRUTA DO BACAETAVA ELABORADA POR COLLET ET AL., 1976.....	191
FIGURA 110 - MAPA DA GRUTA DO BACAETAVA FEITO PELO GRUPO DE ESTUDOS ESPELEOLÓGICOS DO PARANÁ / GEEP-AÇUNGUI EM 1994.....	192
FIGURA 111 - FLUXO DE TRABALHO PARA GERAÇÃO DE MAPAS ESPELEOLÓGICOS A PARTIR DE MODELOS FOTOGRAMÉTRICOS.	194
FIGURA 112 - DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES GNSS, ESTAÇÕES TOPOGRÁFICAS E ALVOS SOBRE PLANTA BAIXA DA CAVIDADE.	195
FIGURA 113 - PARAMETROS DE CALIBRAÇÃO DA CAMERA NIKON P900.....	196
FIGURA 114 – IMAGEM DOS RESÍDUOS DA CALIBRAÇÃO PARA A CAMERA NIKON COOLPIX P900.	197
FIGURA 115 – POSICIONAMENTO DE ESTAÇÃO GNSS NA BASE DO PRISMA NA ENTRADA TURÍSTICA DA GRUTA DO BACAETAVA.	199
FIGURA 116 – EXEMPLOS DE ALVOS CODIFICADOS PARA REFERENCIA ESPACIAL AOS LEVANTAMENTOS FOTOGRAMÉTRICO E POR VARREDURA A LASER.	200
FIGURA 117 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO COM ESTAÇÃO TOTAL LEICA TCRA 1200, COM O LEICA BLK 360 AO FUNDO.	201
FIGURA 118 – EXEMPLO DE REGISTRO SEMIAUTOMATIZADO DE NUVENS DE PONTOS NO SOFTWARE CYCLONE REGISTER 360,	

ESTATÍSTICAS DE ERRO E PORCENTAGEM DE SOBREPOSIÇÃO.	202
FIGURA 119 - INTERFACE DO SOFTWARE LEICA CYCLONE REGISTER 360 COM A DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE VARREDURA (EM VERMELHO) E DOS PONTOS DE CONTROLE (EM MAGENTA). 203	203
FIGURA 120 - INTERFACE DO SOFTWARE CYCLONE REGISTER 360 COM NUVEM DE PONTOS POR VARREDURA A LASER DA GRUTA DO BACAETAVA.....	204
FIGURA 121 – MODELO 3D DO PISO COM OS PONTOS DE CONTROLE E AS ESCALAS DE CHECAGEM.....	205
FIGURA 122 – PRODUTOS CARTOGRÁFICOS GERADOS A PARTIR DOS MODELOS FOTOGRAMÉTRICOS. MOSAICO DE ORTOFOTOS DO TETO (A); MOSAICO DE ORTOFOTOS DO PISO (B); MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DO TETO (C); MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DO PISO (D); CURVAS DE NÍVEL DO PISO (E).....	206
FIGURA 123 – DEFINIÇÃO DA NUVEM DE REFERÊNCIA (LASER) EM VERMELHO E NUVEM COMPARADA (FOTOGRAMETRIA) EM AMARELO.....	207
FIGURA 124 – NUVEM COMPARADA E DISTÂNCIAS APROXIMADAS.....	207
FIGURA 125 - COMPARAÇÃO VISUAL DOS VETORES DOS CONTORNOS VISTOS EM PLANTA BAIXA E CORTES TRANSVERSAIS EXTRAÍDOS AUTOMATICAMENTE DAS NUVENS DE PONTOS DA VARREDURA A LASER (AMARELO) E NUVEM FOTOGRAMÉTRICA (VERMELHO).....	208
FIGURA 126 - FECHAMENTO DO PLANO VERTICAL NUMA DAS ENTRADAS DA CAVIDADE E DEMAIS BURACOS PARA O CÁLCULO DO VOLUME NO SOFTWARE METASHAPE.	210
FIGURA 127 - VETORIZAÇÃO E SOMATÓRIA DOS SEGMENTOS DESCONTÍNUOS PARA O CÁLCULO DO DESENVOLVIMENTO EM PROJEÇÃO HORIZONTAL NO SOFTWARE ARCMAP 10.8.....	211
FIGURA 128 – TRAÇADO DO DESENVOLVIMENTO LINEAR SOBRE CURVAS DE NÍVEL NO AUTOCAD (ACIMA) E SOBRE MODELO 3D DO PISO NO 3D RESHAPER (ABAIXO).	212

FIGURA 129 - REPRESENTAÇÕES DAS PROJEÇÕES HORIZONTAL (EM VERMELHO), VERTICAL LONGITUDINAL (EM VERDE) E VERTICAL TRANSVERSAL (EM AMARELO) COM A NUVEM DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICA AO CENTRO.	213
FIGURA 130 – DADOS ESTATÍSTICOS DAS LARGURAS E ALTURAS DO CONDUTO PRINCIPAL DA GRUTA DO BACAETAVA.	214
FIGURA 131 - OBTENÇÃO DA TEMPERATURA NUMA SUPERFÍCIE.	214
FIGURA 132 – INTERFACE DO SOFTWARE 3D RESHAPER NO PROCESSO DE EXTRAÇÃO VETORIAL DO CONTORNO EXTERNO DA CAVIDADE.	215
FIGURA 133 - PROCESSO DE VETORIZAÇÃO DE BLOCOS SOBRE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE EM ESCALA DE 1:20.	216
FIGURA 134 – INTERFACE DO SOFTWARE INFRAWORKS 2024 APRESENTANDO A NUVEM DE PONTOS, AO CENTRO, SOBRE IMAGEM DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO.	218
FIGURA 135 – INTERFACE DO SITE SKETCHFAB.COM COM A COLEÇÃO DE MODELOS DA GRUTA DO BACAETAVA.	219
FIGURA 136 - INTERFACE DA PLATAFORMA UNREAL ENGINE 5.3 COM A VISITA VIRTUAL EM PRIMEIRA PESSOA DA GRUTA DO BACAETAVA.	220
FIGURA 137 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E ESTIMATIVAS DE ERROS. ERROS EM Z SÃO REPRESENTADOS POR CORES E ERROS EM X E Y SÃO REPRESENTADOS PELA FORMA DA ELIPSE.	224
FIGURA 138 – ASPECTO DO MOSAICO DE ORTOFOTOS DO PISO.	225
FIGURA 139 – ASPECTO DO MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DO PISO EM TONS DE CINZA.	226
FIGURA 140 – ALVO CODIFICADO PARA REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS DA VARREDURA A LASER TERRESTRE VISTO EM IMAGEM NO ESPECTRO DO IR.	228
FIGURA 141 - VISTA DA NUVEM DE PONTOS DE OESTE PARA LESTE MOSTRANDO A PARTE INICIAL DA GRUTA DO BACAETAVA.	229
FIGURA 142 - VISTA DA ENTRADA DA GRUTA DO BACAETAVA NA NUVEM DE PONTOS DA VARREDURA A LASER TERRESTRE.	229

FIGURA 143 – NUVEM COMPARADA (FOTOGRAMÉTRICA) E DISTÂNCIAS REAIS VISTA EM PERFIL LONGITUDINAL (SUPERIOR) E EM PLANTA (INFERIOR).....	231
FIGURA 144 - NUVEM COMPARADA (LASER) E DISTÂNCIAS REAIS VISTA EM PERFIL LONGITUDINAL (SUPERIOR) E EM PLANTA (INFERIOR).	232
FIGURA 146 - COMPOSIÇÃO FINAL DO MAPA DO CONDUTO PRINCIPAL DA GRUTA DO BACAETAVA, COLOMBO, PR.....	236
FIGURA 147 - INTERFACE DE CONFIGURAÇÕES DO MODELO 3D NA PÁGINA SKETCHFAB.COM.	238

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DA PRECISÃO E NÍVEL DE DETALHAMENTO DE MAPAS ESPELEOLÓGICOS SEGUNDO CRITÉRIOS DA BCRA.	36
QUADRO 2 - PRINCIPAIS FORMAS DE REGISTRO DE DADOS E CROQUIS UTILIZADOS PELA COMUNIDADE ESPELEOLÓGICA INTERNACIONAL. A PRIMEIRA LINHA SE REFERE AOS PAÍSES CONSULTADOS COLUNA DA ESQUERDA SE REFERE AO SOFTWARE UTILIZADO, SENDO PAPER OS CROQUIS FEITOS MANUALMENTE.....	42
QUADRO 3 - PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DE PRECISÃO E NÍVEL DE DETALHAMENTO DE UMA CAVERNA.....	48
QUADRO 4 - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS TLS E SUAS PROPRIEDADES BÁSICAS EM RELAÇÃO AOS LEVANTAMENTOS DE CAVERNAS..	61
QUADRO 5 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS CONJUNTOS DE DADOS EMPREGADOS.	94
QUADRO 6 - LINHAS DESENVOLVIDAS PARA UTILIZAÇÃO NA CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA A PARTIR DOS PADRÕES DE SÍMBOLOS LINEARES PROPOSTOS PELO SISTEMA ITC ENTRE OUTROS...	138
QUADRO 7 – PORCENTAGENS DAS CLASSES DE DISTÂNCIAS DA NUVEM COMPARADA EM METROS.	209
QUADRO 8 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS PONTOS DE CONTROLE.	223
QUADRO 9 - ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS PONTOS DE CHECAGEM.	223
QUADRO 10 - ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS PONTOS DE CONTROLE DAS ESCALAS.....	223
QUADRO 11 - ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS PONTOS DE CHECAGEM DAS ESCALAS.....	224
QUADRO 12 - VALORES DAS VARIÁVEIS ESPELEOMÉTRICAS CALCULADAS A PARTIR DO MODELO FOTOGRAMÉTRICO.	234
QUADRO 13 - COMPARATIVO ENTRE A VARREDURA A LASER TERRESTRE (TLS) E A FOTOGRAMETRIA DE CURTA DISTÂNCIA COM A VANTAGEM EM VERDE E DESVANTAGEM EM VERMELHO.	241

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TIPOS DE ERROS, CLASSIFICAÇÃO E FORMAS DE MINIMIZAÇÃO.	115
TABELA 2 - COMPARATIVO ENTRE O MODELO DE MALHA E O MODELO 3D TEXTURIZADO.	161
TABELA 3 – COORDENADAS UTM OBTIDAS PARA O RASTREAMENTO DO PONTO 1.....	198
TABELA 4 - COORDENADAS UTM OBTIDAS PARA O RASTREAMENTO DO PONTO 2.....	198
TABELA 5 - ERRO MÉDIO ABSOLUTO DE CONTROLE DA NUVEM DE PONTOS DA GRUTA DO BACAETAVA.	228

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

BCRA - *British Cave Research Association*
BGS - *British Geological Survey*
CAD - *Computer Aided Design*
CANIE – Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas
CCE - Comissão de Cadastro e Espeleometria da SBE
CECAV – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
COGO - *Coordinate Geometry*
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
DESN+ - Desnível Positivo
DESN- - Desnível Negativo
DL - Desenvolvimento Linear
EGB – Espeleo Grupo de Brasília
ERT - *Electrical Resistivity Tomography*
ET-PCDG - Especificações Téc. para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais
GCP – *Ground Control Point*
GBPE – Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas
GEENG - Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia
GPME – Grupo Pierre Martin de Espeleologia
GPS - *Global Positioning System*
GPR - *Ground Penetrating Radar*
GSD - *Ground Sample Distance*
IDW - *Inverse Distance Weighted*
IGC - Instituto Geográfico e Cartográficos de São Paulo
IMU – *Inertial Measurement Unit*
IoT – *Internet of Things*
IS – *Image Scanning*
IR - Infravermelho
ITC - *International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences*
LD - *Linear Development*
LiDAR – *Light Detecting and Ranging*
LSSE – Least Square / Simultaneous Equation
MDT - Modelo Digital de Terreno
ML - *Map Length*
MMS - *Mobile Mapping System*

PDA - *Portable Digital Assistant*
PDF – *Portable Document Format*
PH - *Projeção Horizontal*
PROCAD – *Projeto Caverna do Diabo*
QTVR - *QuickTime Virtual Reality*
RGB – *Red Green Blue*
RMSE - *Root Mean Squared Error*
RQD - *Rock Quality Designation*
RV – *Realidade Virtual*
SBE - *Sociedade Brasileira de Espeleologia*
SEE - *Sociedade Excursionista e Espeleológica*
SfM – *Structure from Motion*
SIC - *Sistema de Informação de Caverna*
SLAM - *Simultaneous Localization and Mapping*
SMAC - *Sistema de Mapeamento Automatizado em Campo*
SRTM – *Shuttle Radar Topography Mapping*
TBV - *Toca da Boa Vista*
TLS - *Terrestrial Laser Scanner*
TS - *Total Station*
UIS - *Union Internationale de Speleologie*
UNESCO - *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*
VANT - *Veículo Aéreo Não Tripulado*
VOL – *Volume*
VRML - *Virtual Reality Modeling Language*

SUMÁRIO

1	- INTRODUÇÃO	16
1.1	- OBJETIVOS	22
1.1.1	- OBJETIVO GERAL.....	22
1.1.2	- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.2	- JUSTIFICATIVAS	23
2	- REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1	- MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO TRADICIONAL	27
2.2	- ESPELEOMETRIA	45
2.3	- PERFIL ATUAL DOS MAPEADORES DE CAVERNAS NO BRASIL.....	51
2.4	- OS MÉTODOS DE LEVANTAMENTO “NÃO TRADICIONAIS” EM ESPELEOLOGIA.....	53
2.4.1	- VARREDURAS A LASER	55
2.4.1.1	- VARREDURA A LASER TERRESTRE (TLS)	55
2.4.1.2	- SISTEMA DE MAPEAMENTO MÓVEL (MMS)	73
2.4.2	- FOTOGRAMETRIA DE CURTA DISTÂNCIA.....	85
2.4.3	- MATTERPORT	100
2.4.4	- MÉTODOS GEOFÍSICOS	102
2.4.5	- LEVANTAMENTOS POR SONAR	107
2.5	- ERROS E AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES	114
2.6	- PROJETO CARTOGRÁFICO.....	130
2.7	- AUTOMATIZAÇÃO DE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS	132
2.8	- COMPARAÇÕES ENTRE NUVENS DE PONTOS	142
2.9	- REPRESENTAÇÕES EM 3D, SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS - SIG, GEOVISUALIZAÇÃO E TURISMO VIRTUAL	149
2.9.1	- REPRESENTAÇÕES EM 3D	149
2.9.2	- SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG	164
2.9.3	- GEOVISUALIZAÇÃO	168
2.9.4	- TURISMO VIRTUAL.....	181
3	- MATERIAIS E MÉTODOS	187
3.1	- ÁREA DE ESTUDOS	187
3.2	- MATERIAIS.....	192
3.3	- MÉTODOS.....	193

3.3.1	– CONSTITUIÇÃO DE BASE DE DADOS GEOGRÁFICOS EM SIG	194
3.3.2	– LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO	196
3.3.3	– DISTRIBUIÇÃO DOS ALVOS CODIFICADOS	199
3.3.4	– LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO POR ESTAÇÃO TOTAL	200
3.3.5	– VARREDURA A LASER TERRESTRE E REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS	201
3.3.6	– PÓS-PROCESSAMENTO DO LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO	204
3.3.7	– COMPARAÇÃO ENTRE AS GEOMETRIAS DAS NUVENS DE PONTOS	206
3.3.8	– PROJETO CARTOGRÁFICO	209
3.3.9	– CÁLCULOS ESPELEOMÉTRICOS	209
3.3.10	– MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO POR MODELAGEM 3D	215
3.3.11	– INTEGRAÇÃO DO MODELO SUBTERRÂNEO AO TOPOGRÁFICO ...	217
3.3.12	– PUBLICAÇÃO DOS MODELOS 3D	219
3.3.13	– ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A VARREDURA A LASER E A FOTOGRAMETRIA	220
3.3.14	– FLUXOGRAMA DE TRABALHO	221
3.3.15	– LISTAGEM DOS PROCEDIMENTOS	221
4	- RESULTADOS	222
4.1	– MODELO FOTOGRAMÉTRICO 3D	222
4.2	– NUVEM DE PONTOS DA VARREDURA A LASER TERRESTRE	227
4.3	– COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS	230
4.4	– ESPELEOMETRIA	234
4.5	– MAPA ESPELEOLÓGICO	235
4.6	– PUBLICAÇÃO DE MODELOS E VISITA VIRTUAL	236
4.7	– ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE LEVANTAMENTO ..	239
5	– CONCLUSÕES	242
5.1	- RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	252
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	256

1 - INTRODUÇÃO

Cavernas são espaços subterrâneos naturais penetráveis pelo homem. O termo caverna vem do latim “*cavus*”, que significa buraco (FRANK *et al.* 2010). Esta definição, essencialmente antropocêntrica, não considera os mecanismos genéticos, morfologia ou litologia. No Brasil, vários outros regionalismos são utilizados como toca, gruta, gruna, loca, furna ou lapa, independentemente de tamanho. O termo “caverna” pode ser utilizado de forma generalizada a qualquer cavidade subterrânea, sendo conhecidas por “grutas” as cavernas predominantemente horizontais e “simas” ou “abismos”, as cavernas com desenvolvimento vertical.

As cavernas ocorrem em todas as litologias, em minerais como gesso e salgema, em recifes de corais e geleiras. Mas são nas rochas carbonáticas, notadamente calcários e dolomitos que se forma a grande maioria das cavernas, as mais volumosas e mais extensas, sendo o resultado da dissolução da rocha por ação corrosiva da água acidulada (PALMER, 1991).

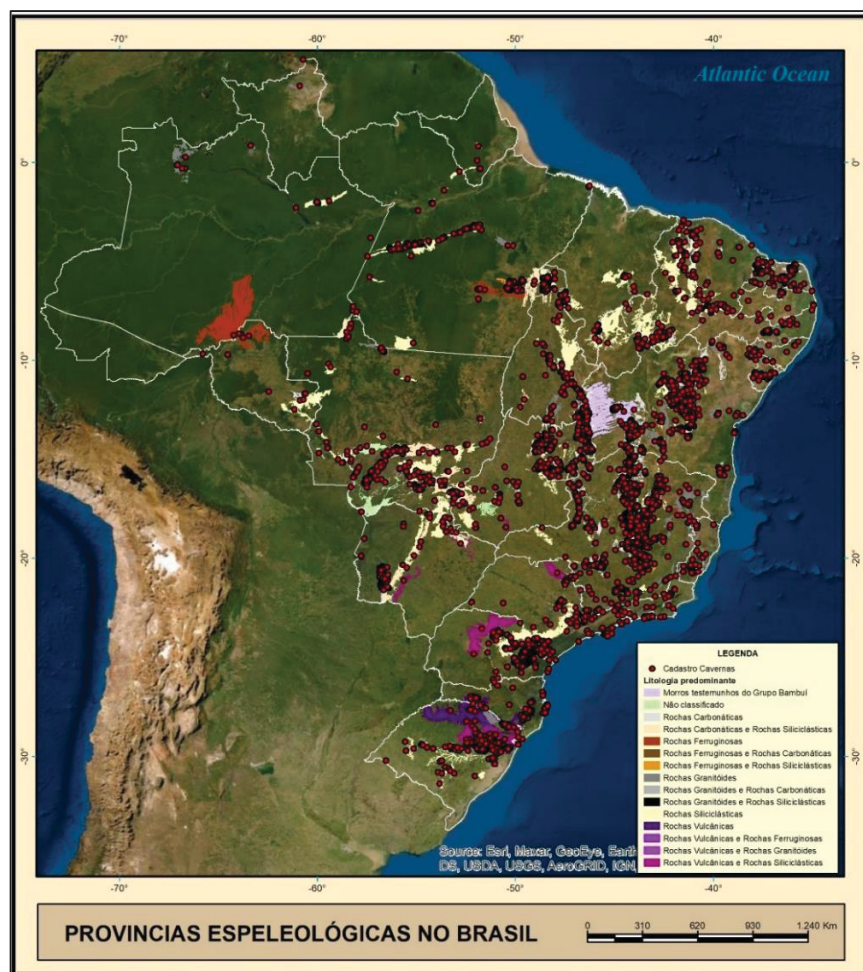
O Brasil possui uma extensa área de ocorrência de rochas carbonáticas e de outras litologias mais favoráveis, o que confere um alto potencial de ocorrência de cavernas. Estimativas apontam que apenas 5% destas tenham sido identificadas. Cerca de 20.000 cavidades já foram cadastradas até 2024 no [Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE](#) (FIGURA 1), com predominância dos estados de Minas Gerais (39%), Pará (15%) e Bahia (8%).

Seu ambiente é muito diferenciado do meio externo e se caracteriza por um espaço vazio, composto de morfologias muito variáveis, com ausência ou restrição de luz e de vegetação superior, além da pouca variação de umidade e temperatura, composições do ar e água características.

As cavernas têm a particularidade de capturar e preservar elementos do exterior em seus depósitos sedimentares, comumente fósseis de animais pleistocênicos, além de vestígios humanos como artefatos líticos, cerâmica, fogueiras e enterramentos. As cavernas exercem importante papel no armazenamento de água, podendo dar origem aos aquíferos cársticos, reconhecidamente frágeis. Além das pesquisas científicas possibilitam, também, o exercício de atividades economicamente viáveis como o turismo e o esporte. Destaca-se, também, o uso religioso dado a esses ambientes desde a Pré-História, havendo diversos exemplos ao redor do Brasil e do Mundo.

Cavernas são consideradas patrimônio da União desde a Constituição de 1988 sendo que, atualmente, a legislação permite sua supressão em função de empreendimentos impactantes ao Meio Ambiente que tenham passado pelo rito do Licenciamento Ambiental. No caso de serem repositórios de material arqueológico, são considerados monumentos arqueológicos ou pré-históricos, reconhecidas enquanto Patrimônio Cultural e regidas pela [Lei 3.924 de 26 de julho de 1961](#). Qualquer atividade causadora de potenciais impactos ambientais deve ser precedida pela realização de estudos acerca do meio físico, biótico e cultural, com resultados expressos em mapas espeleológicos, em considerações textuais e em matrizes de valoração destes atributos.

FIGURA 1 - ÁREAS COM POTENCIAL DE OCORRÊNCIA DE CAVERNAS NO BRASIL E DISTRIBUIÇÃO DAS CAVERNAS CADASTRADAS SEGUNDO O CANIE EM 2020.



FONTE: Figura elaborada pelo autor com base no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) de junho de 2022. Disponível em <https://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>.

A Espeleologia nacional vem se organizando a partir da atuação de grupos espeleológicos, muitos dos quais ligados a universidades e da [Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE](#), entidade representativa que tem a função de congregar os interessados na exploração, pesquisa e preservação das cavernas. No entanto, nas últimas duas décadas vem passando por um processo de profissionalização em função das demandas originadas nos processos de licenciamento ambiental notadamente de natureza mineral, o que gerou a criação de várias consultorias espeleológicas, a estruturação de órgãos ambientais governamentais para a condução desses processos e a qualificação dos profissionais envolvidos.

Este processo de profissionalização da atividade espeleológica teve reflexos nos métodos de prospecção, cadastro e mapeamento de cavidades, tendo aumentado o nível de qualidade na documentação e posicionamento das cavidades e na produção de mapas com maior precisão e nível de detalhamento.

Ao mesmo tempo, os ambientes de ocorrência de cavernas são reconhecidamente frágeis, sofrendo ainda com falta de dados e mesmo com equívocos no processo de documentação, gerando inconsistências nas bases de dados.

Um mapa espeleológico é um elemento básico na documentação de uma caverna e representa a morfologia da cavidade, os elementos que a constituem, localização e suas dimensões. Os usos mais comuns de mapas espeleológicos são servir de referência para os deslocamentos dentro da cavidade, representação da sua morfologia e interpretações geoespeleológicas, avaliação de dimensões, suporte a pesquisas paleontológicas, arqueológicas, bioespeleológicas, hidrogeológicas, turísticas, de resgate, entre outras. Os usuários são variados: de servidores públicos de órgãos ambientais, espeleólogos, consultores, gestores, empreendedores a turistas e devem ser considerados quando da elaboração do projeto cartográfico.

Comumente, os mapas espeleológicos são realizados em condições muito adversas em função das características peculiares de uma cavidade. Um ambiente subterrâneo hostil, sem iluminação natural, de morfologia complexa e uma diversidade de situações como teto baixo, lama, corpos d'água, poeira, blocos instáveis, dificuldades de progressão, de difícil acesso, entre outras. Tais condições impõem restrições na escolha do método e dos instrumentos, normalmente bússola de visada Suunto, ou bússola Brunton montada sobre tripé e trena laser. Estes instrumentos são

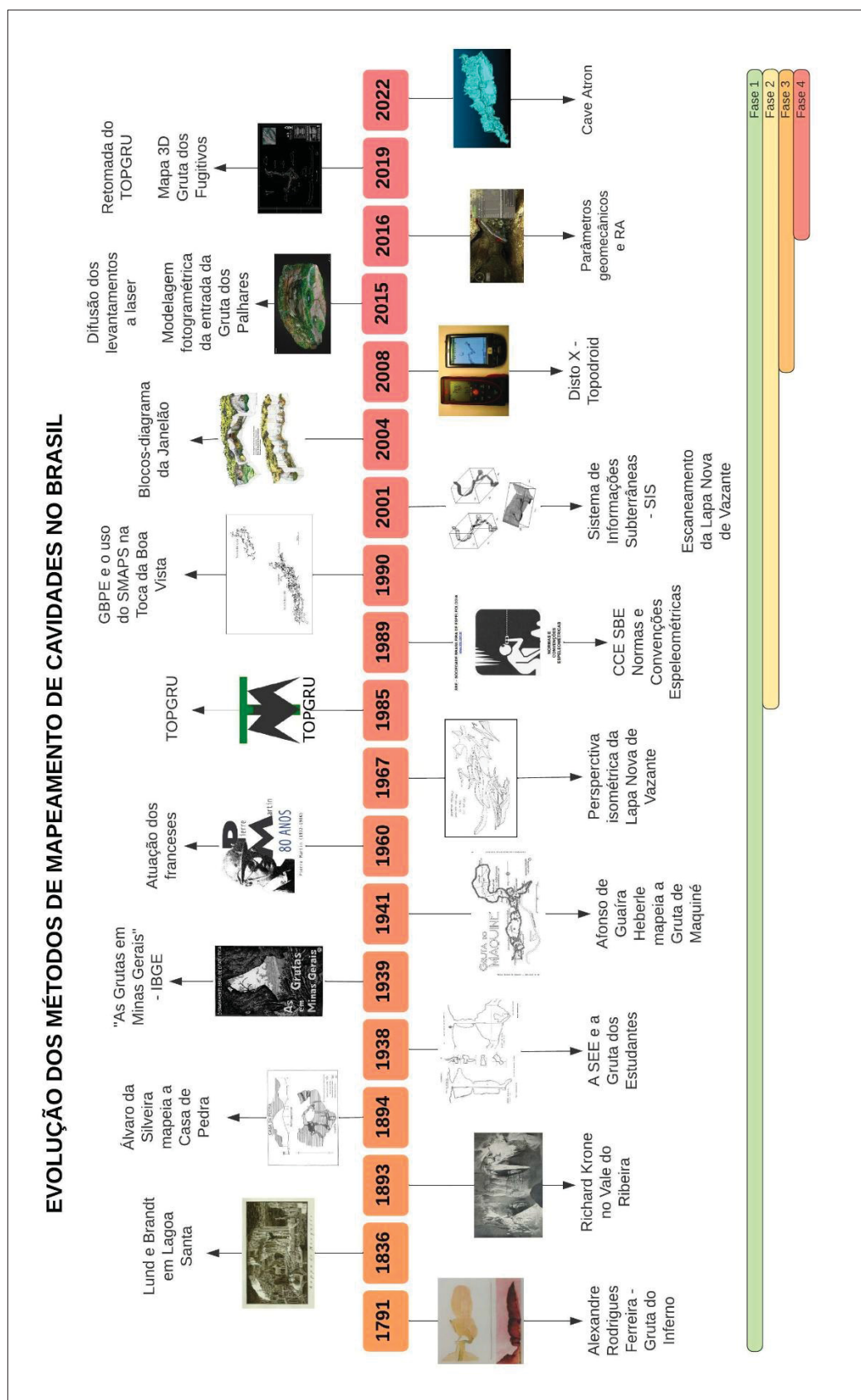
utilizados para medir distâncias e direções entre estações topográficas que, por sua vez, servem de referência para a elaboração dos croquis que representam a caverna segundo um plano horizontal (planta baixa) e verticais (perfil longitudinal e cortes transversais) (SBE, 1991). Esta forma de representação cartográfica fundamenta o mapeamento espeleológico e ocorre pela dificuldade em se representar uma estrutura tridimensional em um plano.

O mapeamento de cavidades pelo método tradicional vem sendo empregado com sucesso no Brasil desde o século XIX, mas que apresenta limitações metodológicas inerentes como o baixo nível de detalhamento das variações morfológicas, erros grosseiros potenciais, tempo relativamente longo para os trabalhos de campo e de escritório, necessidade de transcrição e lançamento de dados topográficos e desenho manual, mesmo com o suporte de *apps* (FIGURA 2). O baixo nível de detalhamento da geometria dos condutos compromete a obtenção do volume da cavidade, requisito legal para o cálculo de relevância em processos de licenciamento ambiental segundo a legislação brasileira (CALUX, 2018). O nível de detalhamento e o grau de precisão de um mapa espeleológico podem ser classificados por dois dos sistemas mais utilizados no mundo, o da *Union Internationale de Spéléologie - UIS* e o da *British Cave Research Association - BCRA*.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de novos instrumentos como o sistema DistoX (HEEB, 2008) e de programas para tratamento de dados topográficos e elaboração de croquis (CORVI, 2017) permitiu que o processo de mapeamento se tornasse totalmente digital, sendo executado de forma mais rápida, com grau de precisão em nível milimétrico e maior nível de detalhe, ainda que de forma manual. Tais alterações, no entanto, não eliminaram todas as limitações do método e sua difusão junto à comunidade espeleológica brasileira, ainda que desigual, mostra-se crescente.

A miniaturização de sensores, disponibilização de algoritmos e de novos instrumentos de mensuração têm contribuído para a reconstrução e análise virtual do ambiente e, também, sua disponibilização para um público diverso e crescente, dadas as facilidades e alcance da Internet. E essa maior acessibilidade a inovações tecnológicas tem permitido a experimentação de novos métodos de levantamento e modelagem 3D de cavidades, a exemplo das varreduras à laser (empregando-se

FIGURA 2 - LINHA DO TEMPO DA EVOLUÇÃO DOS MÉTODOS DE MAPEAMENTO DE CAVIDADES NO BRASIL.



FONTE: Figura elaborada pelo autor (2022).

escâneres estáticos ou cinemáticos) e, mais recentemente, a Fotogrametria de Curta Distância.

A varredura a laser ainda que tenha as vantagens de maior rapidez na coleta e processamento dos dados espaciais e uma alta precisão geométrica, o alto custo do equipamento e as dificuldades operacionais no ambiente subterrâneo são condições restritivas à sua difusão junto à comunidade espeleológica. E ainda que este método de levantamento venha sendo utilizado de forma intensiva por mineradoras em função de exigências legais em processos de licenciamento ambiental, os resultados não têm se tornado públicos, ficando restritos aos arquivos dos órgãos ambientais ou apresentações de resultados em congressos.

Já a modelagem fotogramétrica de ambientes subterrâneos, ainda que pouco explorada no Brasil, vem apresentando resultados positivos na reconstituição tridimensional de cavidades com relativa complexidade morfológica, altas resolução e precisão geométrica (centimétrica e mesmo milimétrica) e textura em cores RGB, havendo vários exemplos de modelos 3D navegáveis em repositórios na Internet. Este método tem ainda as vantagens de ter um menor custo, utilizar equipamentos de maior portabilidade. As principais desvantagens se referem à necessidade de alto desempenho computacional e uma maior curva de aprendizado.

Seguindo a tendência mundial, no Brasil esforços vêm sendo feitos na aplicação desses novos métodos de levantamento no âmbito da Espeleologia e no registro de outros tipos de ambientes subterrâneos como em minas de ouro históricas, paleotocas e *bunkers*. No entanto, estes métodos têm contemplado apenas a geração de modelos 3D das cavidades, não um mapeamento cartográfico propriamente dito.

Nesse contexto, essa pesquisa busca elaborar uma metodologia de mapeamento automatizado utilizando a modelagem fotogramétrica na elaboração de mapas espeleológicos e no cálculo das variáveis espeleométricas, resultando num mapeamento de maior nível de detalhamento, que se constitui numa lacuna na produção acadêmica. Esta pesquisa abre-se à investigação das potencialidades no uso de modelos 3D e da identificação de procedimentos passíveis de automatização na elaboração de mapas espeleológicos e cálculos das variáveis espeleométricas dentro dos preceitos dos levantamentos geodésicos: precisão posicional, rigor geométrico, alto nível de detalhamento e produtividade.

A hipótese desta pesquisa é de que mapas espeleológicos e os cálculos espeleométricos poderão ser realizados a partir da automatização de processos para a extração e edição vetorial de informações espaciais dos modelos 3D e produtos cartográficos oriundos destes, como os mosaicos de ortofotos e modelos digitais de elevação. A este novo método de mapeamento sugere-se o nome de Mapeamento por Modelagem 3D.

Essa pesquisa se propõe a responder as seguintes questões. Em que medida a construção de mapas espeleológicos poderá ser realizada através da extração e edição vetoriais sobre modelos 3D? A qualidade dos modelos fotogramétricos em relação à geometria se equipara aos modelos gerados por varredura a laser? Os resultados poderão ser utilizados para balizar a revisão das tabelas de classificação da precisão e grau de detalhamento (UIS e BCRA)? Quais os limites de aplicação dada as peculiaridades e restrições do ambiente cavernícola? Quais as vantagens e restrições de sua utilização em relação aos demais métodos de mapeamento? Quais as variáveis espeleométricas poderão ter seu uso implementado a partir dos cálculos obtidos com o método proposto? Haverá ganho em termos de tempo, nível de precisão, grau de detalhamento e recursos financeiros que justifiquem sua adoção? A definição de um fluxo de trabalho permitirá a reprodutibilidade dos procedimentos por outrem?

Espera-se que esta pesquisa resulte num método alternativo de mapeamento de cavidades subterrâneas de baixo custo, que possa ser assimilado pela comunidade espeleológica e que os produtos gerados estejam dentro de critérios de precisão aceitáveis.

1.1 - OBJETIVOS

1.1.1 - OBJETIVO GERAL

Propor uma metodologia para a automatização de procedimentos de levantamento de cavernas voltados para a produção do mapa espeleológico digital e a realização de cálculos espeleométricos a partir de modelos fotogramétricos e por varredura a laser tendo, como estudo de caso, a [Gruta do Bacaetava](#), Colombo, PR.

1.1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.1.2.1 – Avaliar a precisão do posicionamento das nuvens de pontos em relação aos referenciais geodésicos, realizar a comparação das distâncias euclidianas médias entre os pontos de ambas as nuvens, realizar análises da completude dos levantamentos a partir de critérios visuais e estatísticos e analisar visualmente as respostas às diferentes composições das superfícies visando a validação da geometria do modelo fotogramétrico;
- 1.1.2.2 – Realizar os cálculos espeleométricos das variáveis usuais e apresentar variáveis espeleométricas não convencionais enquanto critérios auxiliares para a caracterização e valoração das características físicas das cavidades;
- 1.1.2.3 - Compor o mapa espeleológico parcial da Gruta do Bacaetava segundo um projeto cartográfico previamente definido, considerando as necessidades do usuário, os recursos disponíveis e os procedimentos passíveis de automatização;
- 1.1.2.4 - Gerar modelos 3D do ambiente subterrâneo combinados a modelos topográficos de forma a integrar os meios epígeo (subterrâneo) e hipógeo (superficial) e buscar formas de compartilhamento e interação;
- 1.1.2.5 – Avaliar as características da varredura a laser e do levantamento fotogramétrico considerando as especificidades do ambiente hipógeo (ausência de luz, complexidade morfológica e dificuldades em deslocamentos), portabilidade, autonomia e resistência do equipamento, produtos gerados, etc;

1.2 - JUSTIFICATIVAS

Cavernas são ambientes peculiares e enquanto objetos de interesse científico apresentam muitos desafios, por suas entradas estarem geralmente fora de vista, pela

pouca incidência ou ausência de luz no seu interior e pela morfologia complexa. Dadas as suas características morfológicas e topográficas, as cavernas podem ser importantes repositórios de registros geológicos, paleontológicos, paleoclimáticos, paleoambientais e arqueológicos. Isso ocorre pelo fato de seus depósitos sofrerem menor exposição ao intemperismo químico e físico quando comparados com os depósitos exteriores e dados os processos de fossilização, contribuindo para a sua preservação.

A pesquisa científica desses elementos identificados no ambiente cavernícola depende de mapas precisos e de alto nível de detalhe para o registro das feições espeleológicas observadas e para a avaliação dos atributos geométricos e mesmo para a busca de possíveis padrões geoestruturais, morfológicos ou deposicionais.

Registros tridimensionais de cavidades proporcionam suporte analítico em pesquisas com enfoques diversos como a geoespeleologia, espeleogênese, geomorfologia, hidrologia, biologia subterrânea, climatologia e paleoclimatologia, análises geomecânicas, entre outros. Além disso, modelos 3D podem proporcionar maior número de variáveis espeleométricas, algumas de difícil obtenção através do mapeamento convencional como o volume e o desenvolvimento linear.

Nos mapas espeleológicos são representadas a morfologia e dimensões da cavidade, além elementos espeleológicos como os espeleotemas, corpos hídricos, sedimentos clásticos, formas residuais, fraturas, falhas e litofácies, conteúdo fossilífero ou arqueológico. Mapas espeleológicos servem para registrar as feições de interesse em uma cavidade e também como elemento de comparação com outras cavidades de uma mesma área, por exemplo.

Raras exceções, suas entradas não são observáveis em mapas topográficos, ortofotocartas, fotos aéreas ou imagens de satélite. Daí que a documentação destes ambientes depende do explorador de cavernas se aventurar em ultrapassar obstáculos físicos e psicológicos para realizar a documentação destes ambientes, motivado pela curiosidade e desejo de encontrar lugares inexplorados (KAMBESIS, 2007). Em geral, mapas de cavernas não são feitos por cartógrafos, mas por profissionais ou estudantes membros de grupos espeleológicos, consultores ambientais ou pesquisadores, nem sempre conhecedores das normas regulamentadoras de levantamentos como a NBR 13.133 (ABNT, 2021), requisitos ou procedimentos necessários à efetividade da comunicação cartográfica.

No que se refere à pesquisa proposta, o desenvolvimento de um fluxo de trabalho para a geração de mapas espeleológicos e a obtenção das variáveis espeleométricas a partir de modelos fotogramétricos 3D por processos automatizados se justifica pelo seu ineditismo na área de mapeamento desse tipo de ambiente, seu potencial de replicação junto à comunidade espeleológica, pelo baixo custo, rapidez, precisão e nível de detalhamento. Os métodos citados permitem a adequação do mapeamento espeleológico às exigências legais ao proporcionar o cálculo do volume (VOL), desnível positivo (DESN+) e do desenvolvimento linear (DL), variáveis espeleométricas de difícil nível de precisão quando obtidas pelo método de mapeamento tradicional (ver item 2.2).

Esta pesquisa se beneficia da evolução atual da capacidade computacional para o processamento, análise, armazenamento e divulgação de dados espaciais através da Internet de alta velocidade. Ao mesmo tempo reforça essa tendência de inovação e busca de alternativas aos levantamentos topográficos convencionais, como o que já vem ocorrendo com o uso de novos instrumentos de mensuração ([DistoX](#) e [BRIC4](#)) e aplicativos, junto à comunidade espeleológica mundial.

Abre-se, também, às possibilidades de integração com outros métodos de levantamento como a aerofotogrametria com uso de Veículos Aéreos Não Tripulados – VANTs, ou a partir de modelos de elevação globais como o [Shuttle Radar Topography Mission - SRTM](#) e imagens de satélite de alta resolução, permitindo correlacionar modelos subterrâneos à superfície topográfica.

A abordagem proposta permite a realização de levantamentos multitemporais a exemplo dos monitoramentos da subsidência de espeleotemas, abertura de fraturas, quedas de blocos, das variações de nível d'água, variações de depósitos clásticos, conservação de estruturas de visitação e registros rupestres, grafitismos, entre outras possibilidades.

As exigências legais nos processos de licenciamento ambiental contribuíram para um crescente número de estudos realizados por empresas de consultoria, resultando na necessidade de formação de profissionais capacitados e adoção de novos métodos de registro e análise de dados.

Digno de nota o fato de levantamentos fotogramétricos não serem susceptíveis a interferências magnéticas, fenômeno comum em cavidades em

formações ferríferas, atualmente as mais pesquisadas e suprimidas em função da demanda mineral.

Há potencial de repercussão dos resultados dessa pesquisa no nível internacional dada a necessidade de revisão das graduações da acurácia dos mapas (UIS¹ e BCRA²) que não contemplam os novos métodos de levantamento e os mapas gerados a partir destes (SIMÕES, 2019). O material produzido é de fácil divulgação e compartilhamento entre pesquisadores parceiros através da internet, sendo também atrativo para os leigos, dada a interatividade proporcionada nos repositórios online³.

A automatização de processos no contexto dessa pesquisa pode ser entendida enquanto a busca por softwares e algoritmos capazes de realizar ações não-manuais na elaboração do mapa espeleológico, notadamente a geração de modelos 3D, mosaicos de ortofotos e modelos de superfície e as extrações vetoriais. Tem a função de minimizar a subjetividade e interferência humanas, reduzir tempo de levantamentos e custos com aquisição de equipamentos, aumentar a precisão e o nível de detalhamento dos levantamentos e estabelecer rotinas de trabalho.

Alinhada à tendência mundial na busca por métodos alternativos de levantamento de cavidades subterrâneas (CORVI, 2017) e aproveitando-se da ausência de abordagens similares à esta, este estudo pretende aproximar Espeleologia e Ciências Geodésicas na expectativa da melhoria no processo de construção de um mapa espeleológico. Tais processos poderão ser replicados a cavernas com diferentes dimensões e morfologias, assim como a outros tipos de ambientes subterrâneos como minas históricas, paleotocas, tumbas, câmaras, adegas e túneis.

¹ Disponível em: <https://www.uis-speleo.org/>. Acessado em 20 de abril de 2022.

² Disponível em: <http://bcra.org.uk/>. Acessado em 20 de abril de 2022.

³ Perfil do autor no repositório de modelos 3D Sketchfab: <https://sketchfab.com/rollingdrone/models>. Acessado em 05 de março de 2022.

2 - REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura teve, por finalidade, dar fundamentação teórica à proposta apresentada e foi iniciada com a localização de trabalhos afins em portais de periódicos, nas bibliotecas digitais do Grupo Pierre Martin de Espeleologia - GPME⁴ e da Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE⁵ e na biblioteca da [Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE](#).

Este procedimento foi feito de forma contínua durante toda a vigência dessa pesquisa sendo, os artigos localizados, indexados na biblioteca do software Mendeley⁶, neste momento com 647 registros nas diversas temáticas abordadas, sendo privilegiadas, na medida do possível, as experiências brasileiras. Foram privilegiados os artigos nas línguas Português, Inglês, Espanhol e em menor quantidade, o Francês. Deste total, 216 registros constam nas referências bibliográficas.

A redação deste item seguiu, preferencialmente, a cronologia dos estudos dentro de cada temática, salvo em casos em que houve a necessidade de ser feita uma introdução teórica.

2.1 - MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO TRADICIONAL

Durante expedições militares no estado do Mato Grosso em fins do século XVIII, o naturalista baiano Alexandre Rodrigues Ferreira tomou o conhecimento da existência da Gruta das Onças através dos Anais da Câmara de Vila Bela, tendo realizado o seu registro, descrições e medidas de seus três salões. Historicamente esta é a mais antiga referência conhecida ao mapeamento de uma cavidade subterrânea no Brasil (AULER, 1997), sendo sua representação feita pelos desenhistas/riscadores José Joaquim Freire e Joaquim José Codina (LIMA *et al.* 2015) (FIGURA 3).

⁴ Disponível em: <http://www.gpme.org.br/si/>. Acessado em 18 de abril de 2022.

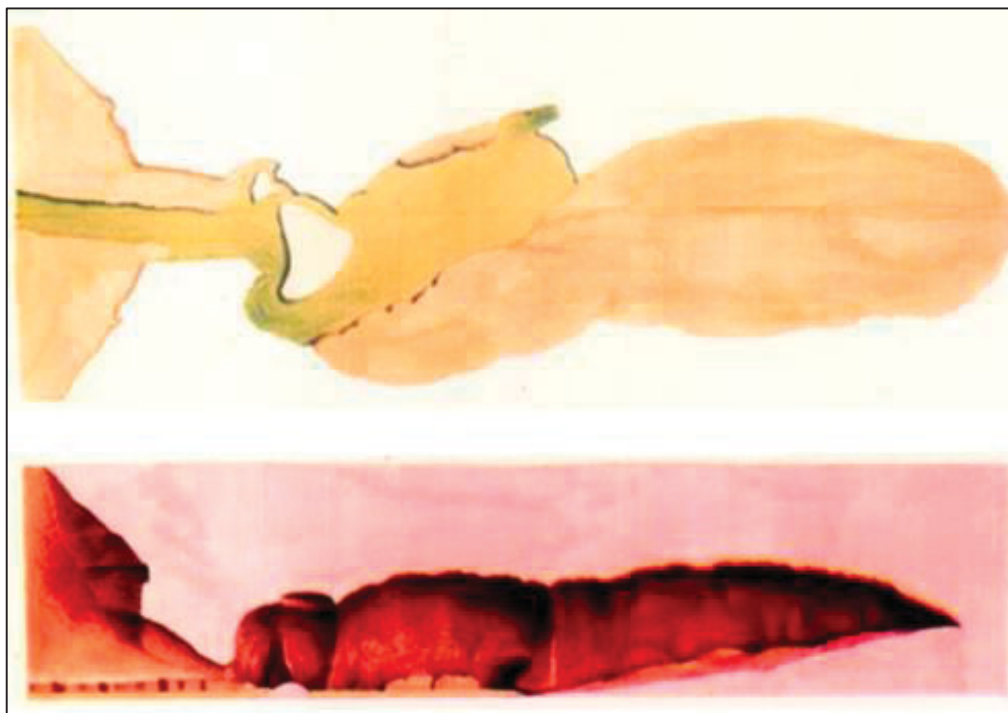
⁵ Disponível em: <https://www.cavernas.org.br/>. Acessado em 19 de abril de 2022.

⁶ Disponível em: <https://www.mendeley.com/>. Acessado em 14 de abril de 2020.

Esta gruta teve sua localização desconhecida até 2014, quando foi redescoberta pela equipe do [Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECAV](#), que realizou o levantamento histórico documental e iconográfico, prospecção em campo, identificação, geoespacialização, nova topografia e cálculos espeleométricos.

Mas o marco referencial histórico do mapeamento espeleológico no Brasil é o trabalho de Peter Andreas Brandt, que fez levantamentos de pelo menos 27 cavernas pesquisadas por Peter Lund entre 1835 e 1836 na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. Segundo Auler (1997), os mapas foram desenhados em um caderno de esboços, em geral com a representação de plantas e perfis. Como poucas das cavernas pesquisadas por Lund foram relocalizadas no presente, torna-se difícil avaliar a precisão desses levantamentos, mesmo porque não há descrição da metodologia utilizada. Os mapas são policromáticos, ainda que as cores não correspondam a níveis ou características da caverna representada, aplicadas de forma com viéses artísticos como era comum na época.

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO EM PLANTA BAIXA (ACIMA) E PERFIL LONGITUDINAL (ABAIXO) DA GRUTA DAS ONÇAS. PRIMEIRO MAPEAMENTO DE CAVERNAS NO BRASIL. 1790.



FONTE: Modificado de Lima *et al.*, 2015. Acervo do Museu Bocage, Faculdade de Ciências de Lisboa.

Auler (1997) considera que os mapas apresentam riqueza de detalhes como blocos abatidos, sedimentos, espeleotemas e corpos d'água (FIGURA 4). Os mapas apresentam o Norte, escalas gráficas, indicação das entradas, alturas de galerias e é de se supor que Brandt tenha utilizado uma bússola e algum tipo de medidor de distâncias. No caso da Lapa do Mosquito a representação foi feita em várias páginas em função das dimensões da caverna, sendo que este recurso de transposição foi feito por Brandt em outras cavidades. É possível que outros mapas tenham sido elaborados por Brandt, uma vez que cavernas importantes como a Lapa Nova de Maquiné e a Lapa Vermelha não constam no seu caderno de esboços, tendo sido esta última, publicada por Hartt em 1941 (HARTT⁷ *apud* AULER, 1997).

FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DA LAPA DO MOSQUITO FEITA POR PETER ANDREAS BRANDT.



FONTE: https://www.google.com/search?q=peter+andreas+brandt&sxsrf=ALiCzsZXMpPC9-RXOXFv49mgMsFCssbcww:1652296148061&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwik4t_nktj3AhUwjJUCHbPADMYQ_AUoAnoECAIQBA&biw=1680&bih=907#imgsrc=zn1BD4Qu_wL1XM.
Acessado em 18 de maio de 2022.

⁷ HARTT, C. F. Geologia e Geografia Física do Brasil. Companhia Editora Nacional. 1941, 649 p.

Para Rubbioli *et al.* (2002), “... os mapas espeleológicos produzidos por Brandt a pedido de Lund, constituem um registro pioneiro da configuração espacial de nossas grutas e, como conjunto, considerando a época em que foram produzidos, formam um acervo de relevância internacional”. O autor considera um verdadeiro desafio técnico para Brandt explorar e representar uma caverna de grandes dimensões como a Lapa Nova de Maquiné, por ser um trabalho altamente especializado e por ser provável que jamais o tenha feito anteriormente. É provável, também, que tenha feito de forma solitária em função da indisponibilidade de auxiliares capacitados, enquanto Lund fazia suas pesquisas e coletas.

Neste artigo, Rubbioli *et al.* (2002) analisam os mapeamentos da Lapa Nova de Maquiné e da Lapa do Saco Comprido, realizados por Brandt, a partir da comparação com mapas mais recentes, baseados em técnicas topográficas espeleológicas atuais, por tratamento matemático. A comparação foi realizada a partir da definição de seis pontos notáveis em cada cavidade e do estabelecimento de distâncias e azimutes segundo várias combinações para a definição das posições relativas de cada base. Na maior parte das medidas, os azimutes mostram-se razoavelmente precisos, o que indica que Brandt utilizou uma bússola enquanto instrumento para auxiliar nos levantamentos, afirmação corroborada pela representação do Norte em todos os mapas. Já em termos de distâncias, a alta variação se destaca e indica uma tendência à superestimação destas. A alta variabilidade das medidas comparadas, aliada ao fato de possivelmente trabalhar sozinho leva a crer ser improvável que Brandt tenha se utilizado de uma trena ou equivalente.

Ainda que os mapas de Brandt tenham alto nível de detalhe, Rubbioli *et al.*, (2019) destacam o fato destes terem detalhes fantasiosos, como a representação disfarçada de uma cidade nórdica entre colunas e estalactites da Gruta de Maquiné, seu primeiro levantamento. Nesta publicação são enumeradas as 27 cavernas contidas no caderno de esboços de Brandt, mapeadas entre 1835 e 1836 e classificadas as formas de representação e existência de escala gráfica.

A partir da metade do século XIX, vários naturalistas estrangeiros passaram a fazer referências às cavidades brasileiras na forma de descrições de incursões, das suas características e quantitativos, sem maiores contribuições diretas ao histórico do mapeamento espeleológico, à exceção do naturalista português João Silva Freijó

(LINO, 1989). Do ponto de vista espeleológico, o mais importante destes naturalistas foi Richard Krone, engenheiro alemão que realizou o primeiro cadastramento de 42 cavernas no país, além de pesquisas arqueológicas e paleontológicas no Vale do Ribeira entre 1896 a 1906 (AULER, 1997).

Além do cadastro, Krone realizou descrições e localizou as cavernas, tendo também realizado o mapeamento, ainda que simplificado, das grutas do Morro Preto e do Córrego Grande. Ainda em fins do século XIX, o naturalista mineiro Álvaro da Silveira executou o mapeamento topográfico da Gruta Casa de Pedra, localizada nas proximidades de Tiradentes, Minas Gerais. Para tanto, foi utilizada “bússola de mão, trena e clinômetro” para a geração da planta e perfil da cavidade. Coube ao cartógrafo alemão Afonso de Guaira Heberle e a Heitor Cantagalli a realização de mapeamentos de cavernas que foram publicados no livro *As Grutas em Minas Gerais* (IBGE, 1939).

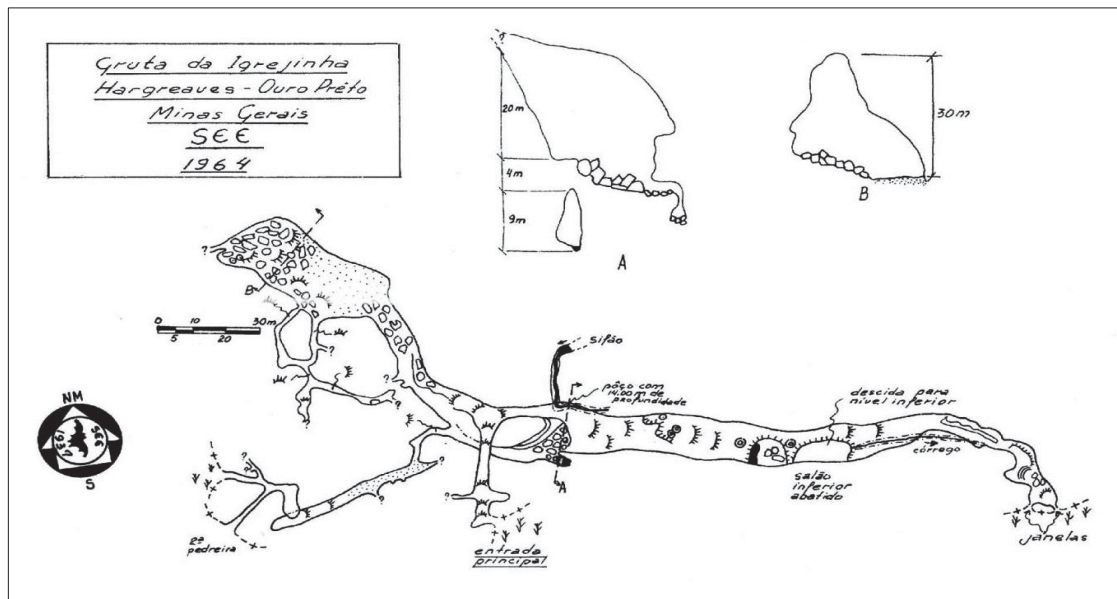
Fundada em 1937 por estudantes da Escola de Minas de Ouro Preto, a Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE, foi a primeira instituição voltada ao estudo de cavernas nas Américas (MARTIN, 1979). Sua criação marca o início da espeleologia organizada no Brasil (AULER, 1997). Segundo Rubbioli *et al.* (2019), já nas primeiras campanhas de campo em 1938 e 1939, a SEE produziu mapas e descrições detalhadas de cavernas em Minas Gerais, sendo realizados mapeamentos de importantes cavernas nos anos seguintes, inicialmente na região de Lagoa Santa e posteriormente em outras regiões da Bahia, São Paulo, Ceará e Goiás.

O mapeamento da Gruta dos Estudantes, realizado em 1938 foi publicado na Revista da Escola de Minas em 1945 (BITTENCOURT, 1945), enquanto as Grutas do Morro Redondo, Poções, Lavoura e Cacimbas foram publicadas em 1949, sendo essas mapeadas com bússola, prancheta, trena e clinômetro e representadas em planta e perfil (PARADA, 1949). Nas décadas seguintes, várias explorações e mapeamentos foram empreendidos pela SEE nas principais cavernas brasileiras conhecidas até então, como a Lapa dos Brejões, Toca da Barriguda e Lapa do Convento (BA), Lapa de Terra Ronca (GO), Lapa Grande, Lapa Nova e Gruta do Janelão (MG), Caverna do Diabo e Caverna de Santana (SP), Gruta de Ubajara (CE), entre outras.

Dado o seu pioneirismo e continuidade das atividades espeleológicas, a SEE teve condições de desenvolver técnicas de mapeamento topográfico e formas de representações cartográficas próprias (FIGURA 5 e FIGURA 6) ou assimiladas a partir

das publicações nacionais e internacionais recebidas em intercâmbio com a Revista Espeleologia, editada pela entidade.

FIGURA 5 - GRUTA DA IGREJINHA, OURO PRETO, MINAS GERAIS. MAPA FEITO PELA SEE EM 1964.



FONTE: Revista Espeleologia N.1, 1969.

FIGURA 6 - GRUTA DA IGREJINHA, OURO PRETO, MINAS GERAIS. MAPA FEITO PELA SEE EM 1985 COM NÍVEL DE PRECISÃO E DETALHAMENTO 6D (BCRA), RASTERIZADO E VETORIZADO EM AUTOCAD EM 2001.



FONTE: Arquivo SEE, 2001.

Rubbioli *et al.* (2019) consideram a síntese de Heberle acerca das cavernas do entorno da Gruta de Maquiné como um dos melhores trabalhos de espeleometria já publicados no Brasil (HEBERLE, 1941). Este levantamento contou com fotografias, descrições, croquis e mapeamentos com a localização das sete cavernas em planta, perfis e cortes transversais que acompanham o texto (FIGURA 7).

Anos depois, em 1948, Harold Walter e Aníbal Mattos realizam o mapeamento topográfico da Lapa de Confins, gruta essa já anteriormente levantada por Heberle e Cantagalli.

FIGURA 7 - MAPA DA GRUTA DE MAQUINÉ ELABORADO POR AFONSO DE GUÁIRA HEBERLE EM 1940.



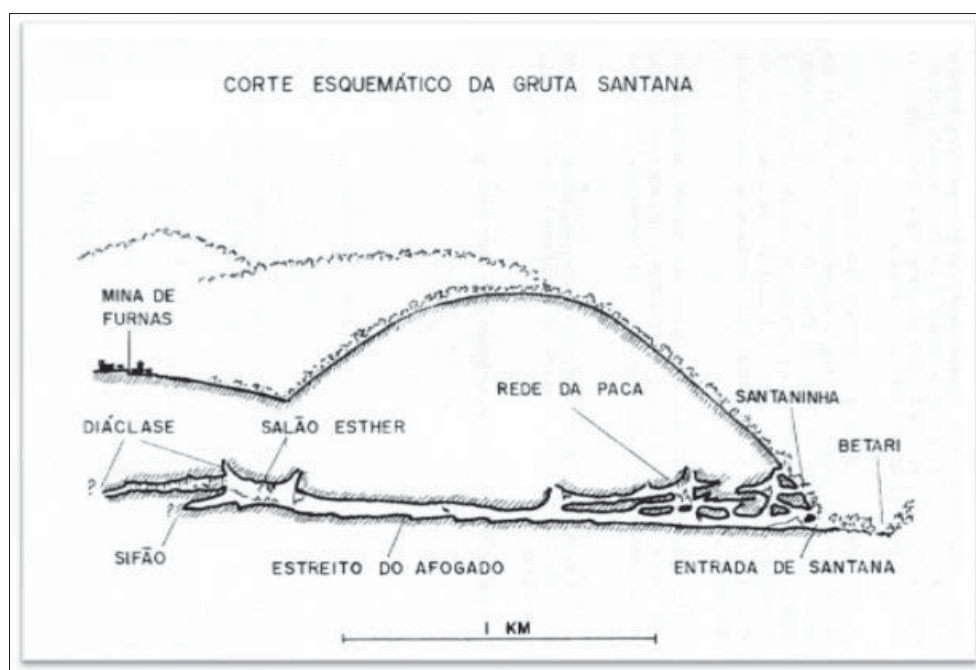
FONTE: Heberle, 1941.

A vinda de espeleólogos franceses na década de 60 do século XX para São Paulo, notadamente Michel Le Bret, teve grande importância na introdução de métodos e técnicas de exploração e mapeamento de cavernas (FIGUEIREDO, 2011), resultando em extensa produção cartográfica (FIGURA 8) e na realização de congressos (MARTIN, 1979).

No mesmo ano de fundação da Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE, Kruger (1969) publicou um artigo na Revista Espeleologia onde argumenta que os

princípios que norteiam o mapeamento subterrâneo diferem sensivelmente dos aplicados à topografia de superfície em função das condições de trabalho. Para ele, a topografia mineira subterrânea é a que mais se aproxima da topografia das grutas e dada a regularidade das galerias de mineração, é possível de se usar o teodolito de mina de forma eficiente. O mesmo não poderia ser utilizado de forma eficiente numa gruta dadas as características morfológicas irregulares e os problemas decorrentes de transporte, nivelamento e espaço de instalação. O mais apropriado para o levantamento de grutas seria um instrumento como a bússola, universalmente utilizado na espeleologia, sendo a de marca Silva a recomendada pelo autor para utilização em conjunto com clinômetro e trena.

FIGURA 8 - PERFIL LONGITUDINAL DA GRUTA SANTANA, IPORANGA – SP, FEITO POR MICHEL LE BRET NA DÉCADA DE 60.



FONTE: Le Bret, 1995.

Em termos de método de levantamento topográfico, Kruger explicita que o de caminhamento simples e poligonal aberta com uso de irradiações, distâncias medidas por trena e desníveis por clinômetro é o utilizado pela SEE, chamado de tradicional. A equipe é composta por topógrafo (operador), baliza (ponta-de-trena) e executor de croquis (croquistas) e o principal objetivo da topografia em espeleologia é dar suporte a um mapeamento relativamente preciso, onde possam ser apresentadas as

características morfológicas das cavidades. Por fim, apresenta um método de levantamento por triangulação ainda em fase de desenvolvimento naquele momento, aplicável a salões e galerias relativamente grandes que teria como vantagens a dispensa do uso de trena, uso de distâncias horizontais, sendo inviável seu uso em galerias estreitas.

A fundação da SBE, em 1969, contribuiu para o crescimento do número de grupos espeleológicos, além da preocupação de inventariar e documentar as cavernas brasileiras (AULER, 1997). Na década seguinte, discussões sobre os métodos se tornaram frequentes (SEE, 1975) e foram retomadas anos depois (AULER, 1986; ARAÚJO, 1989).

A atenção para com a necessidade de uma maior precisão dos levantamentos topográficos de cavernas fez com que Sánchez (1980) propusesse a adoção do sistema de classificação de mapas da *British Cave Research Association* (BCRA) para a definição do nível de confiabilidade (QUADRO 1). Também chama a atenção para a necessidade de compatibilização entre a escala de trabalho e o nível de detalhamento de forma a prevenir a perda de informação. O uso da bússola, clinômetro e trena mostra-se adequado e é universalmente aceito, cumprindo sua função, sendo que a necessidade de mapeamento com alta precisão é uma situação rara a ser feita com Teodolito.

Essa necessidade de definições claras e padronização do mapeamento e das medidas espeleométricas preconizadas por Chabert *et al.* (1981) teve repercussão na comunidade espeleológica brasileira, sendo que em 1991 foi lançado o manual das [Normas e Convenções Espeleométricas](#). Esta publicação (SBE, 1991), elaborada pela Comissão de Cadastro e Espeleometria da SBE, traz orientações e conceitos para o cadastramento e caracterização qualitativa e quantitativa (espeleometria) da cavidade através de descrições de cada campo de informação e da classificação da precisão e detalhamento dos mapas espeleológicos, convenções e os elementos a serem incluídos (FIGURA 9). Trata, também, das normas e convenções espeleométricas, contendo um breve histórico da atuação da comissão, objetivos, métodos de medição. O documento foi concebido enquanto uma proposta de sistematização e padronização no que se refere ao cadastramento, províncias espeleológicas e espeleometria, de forma que os dados das cavernas possam ser comparados entre si.

QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DA PRECISÃO E NÍVEL DE DETALHAMENTO DE MAPAS ESPELEOLÓGICOS SEGUNDO CRITÉRIOS DA BCRA.

Tabela 1 - Classificação de acordo com a precisão do levantamento da linha-base

grau 1	Um esboço de baixa precisão, onde nenhuma medida foi feita	
grau 2	Pode ser usado, se necessário, para descrever um esboço que é intermediário em precisão entre os graus 1 e 3	Não é um grau preferível
grau 3	Um levantamento magnético aproximado. Ângulos horizontais e verticais medidos com precisão de 2 ½°; distâncias com precisão de 0,5 m; erro no posicionamento das bases menor que 0,5 m	Usado quando o tempo disponível para o mapeamento é limitado
grau 4	Pode ser usado, se necessário, para descrever um levantamento que não atinge os requisitos do grau 5 mas é mais preciso que o grau 3	Não é um grau preferível
grau 5	Um levantamento magnético. Ângulos horizontais e verticais com precisão de 1°; distâncias com precisão de 10 cm; erro no posicionamento das bases menor que 10 cm	O grau preferível. Para atingi-lo é essencial que os instrumentos sejam precisos
grau 6	Um levantamento magnético mais preciso que o de grau 5	Os requisitos mínimos são ângulos horizontais e verticais com precisão de ½°; distâncias e posicionamento das bases com precisão de 5 cm.
grau X	Um levantamento baseado principalmente no uso de teodolito	Todos os levantamentos de grau X devem dar uma estimativa de sua precisão (por comparação com os graus 3 a 6) e detalhes dos métodos e instrumentos utilizados

Ellis, 1976.

Tabela 2 - Classificação do grau de detalhamento

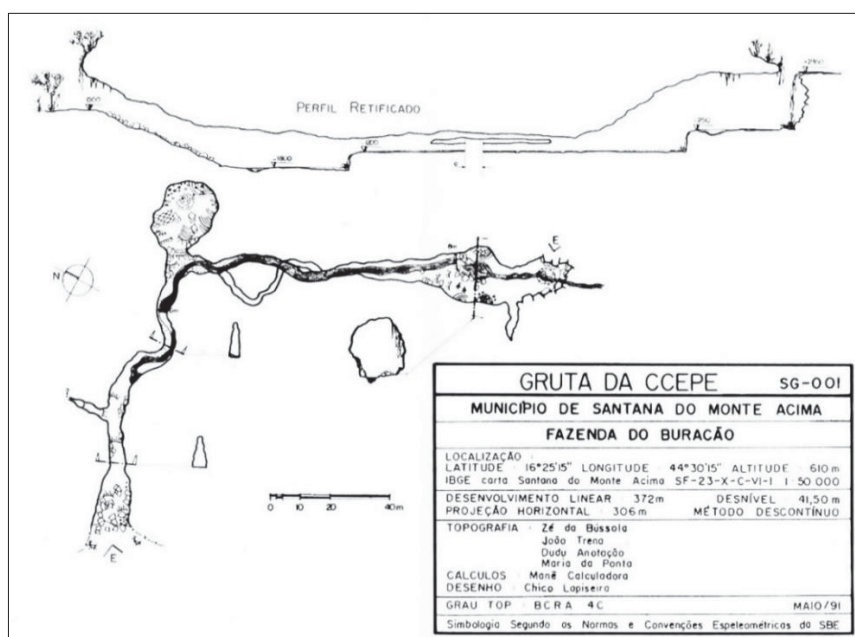
classe A	Todos os detalhes baseados na memória
classe B	Detalhes das passagens estimados e anotados na caverna
classe C	Medidas de detalhes feitas nas bases topográficas a penas
classe D	Medidas de detalhes feitas nas bases topográficas e onde quer que seja necessário entre as bases para mostrar mudanças significativas na forma, tamanho e direção da passagem

FONTE: Sánchez, 1980 modificado de Ellis, 1976.

A Espeleologia brasileira entra na era digital com o uso de computadores e de um programa chamado TopGru, escrito em Fortran 77 para o tratamento dos dados topográficos durante os trabalhos de mapeamento da Gruta Convento (FIGURA 10), Campo Formoso, BA pela SEE (LIMA, 1987). As centenas de estações topográficas utilizadas no mapeamento desta gruta exigiram um processo de automatização para o lançamento da linha de trena, evitando o tedioso processo de posicionamento das estações com transferidor e escalímetro e os erros grosseiros advindos desse processo manual. O autor destaca o processo de aperfeiçoamento de técnicas de mapeamento subterrâneo experimentado pela SEE e a utilização de equipamentos de campo mais precisos e da necessidade de maior precisão e velocidade no processamento dos dados de campo. O TopGru foi concebido para ser utilizado em

diferentes técnicas de levantamentos topográficos (visadas inversas, bases flutuantes ou fixas) com diferentes instrumentos (bússola ou Teodolito), ser de código aberto e livre distribuição. Aprimoramentos foram propostos, como a plotagem automática, o ajustamento das observações e fechamento das poligonais, o cálculo de erros e projeções tridimensionais, entre outras possibilidades.

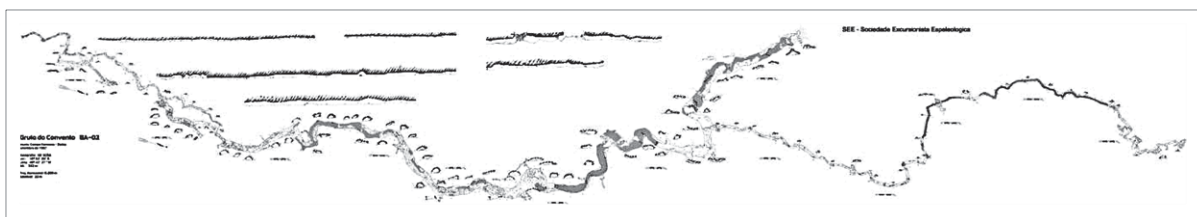
FIGURA 9 - LAYOUT DE MAPA ESPELEOLÓGICO PROPOSTO NAS “NORMAS E CONVENÇÕES ESPELEOMÉTRICAS”.



FONTE: SBE, 1991.

Em certas situações, a complexidade morfológica de uma caverna exige a introdução, o aprimoramento ou a adaptação de técnicas de levantamento, como aconteceu com o mapeamento da Toca da Boa Vista (TBV) pelo Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas - GBPE. A Toca da Boa Vista se localiza no município de Campo Formoso, BA e é uma rede de condutos que forma um extenso labirinto, o que reflete na necessidade de fechamento de um número grande de poligonais. Os erros de fechamento de poligonal obtidos foram da ordem de 7 a 15 cm, o que atesta um bom grau de precisão, que enquadraria como um levantamento 5D segundo a classificação do BCRA (QUADRO 1).

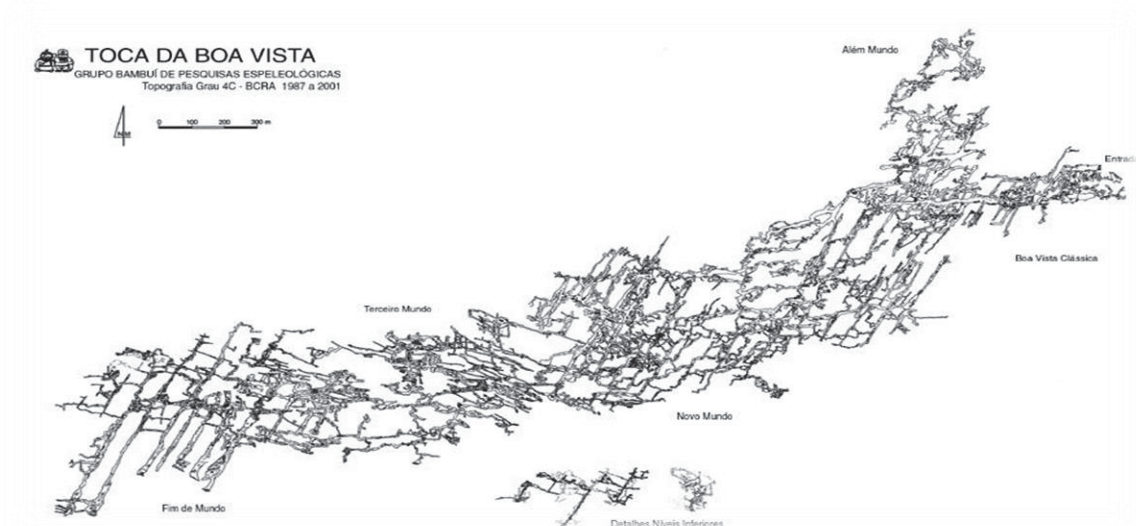
FIGURA 10 - MAPA DA GRUTA CONVENTO, CAMPO FORMOSO - BA, MAPEADA PELA SEE EM 1986 E INCLUÍDA NO ATLAS DAS GRANDES CAVERNAS DO BRASIL.



FONTE: Rubbioli *et al.*, 2002.

O tratamento dos dados topográficos no início do mapeamento da TBV era feito através de calculadoras científicas, que transformavam o sistema polar em cartesiano, sendo as estações lançadas de modo manual no papel quadriculado. Dado o volume de dados topográficos ao final de cada expedição, o uso da calculadora tornou-se inviável, tendo o grupo adquirido o software SMAPS, utilizado pela comunidade internacional no mapeamento de grandes cavidades (AULER *et al.* 1992). Passados 30 anos da publicação daquele artigo, o mapeamento da TBV prossegue, sendo impensável sua realização por métodos manuais (FIGURA 11).

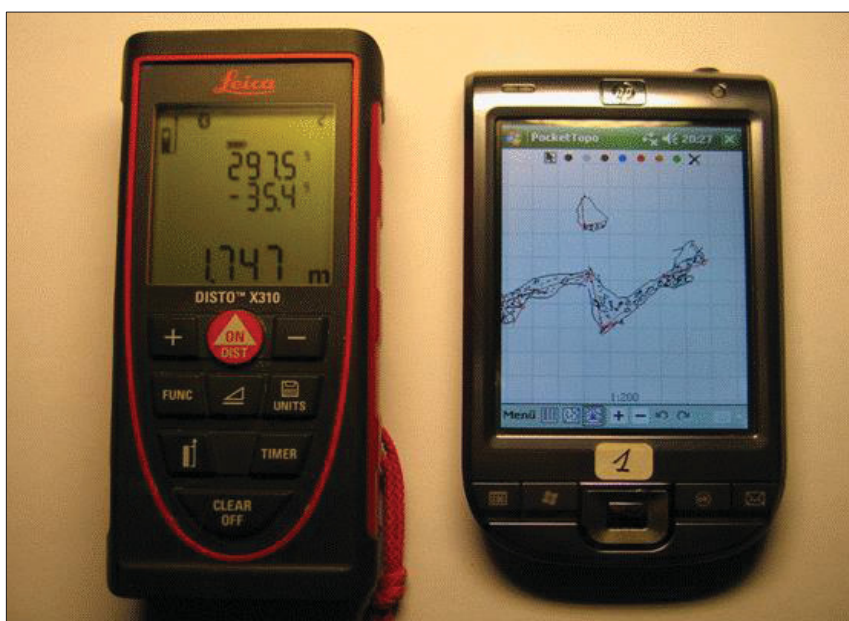
FIGURA 11 - MAPA DA TOCA DA BOA VISTA, CAMPO FORMOSO - BA NO ANO DE 2001. MAIOR CAVERNA DO HEMISFÉRIO SUL, ATUALMENTE COM CERCA DE 113 KM DE DESENVOLVIMENTO HORIZONTAL.



FONTE: Rubbioli *et al.*, 2001.

A Disto X é um dispositivo construído a partir da modificação da trena a laser Leica X310 capaz de medir a declinação, inclinação e distância simultaneamente com um disparo e transferir imediatamente para um *app* num PDA ou *smartphone*, (FIGURA 12). Os dados topográficos coletados são enviados imediatamente para um PDA usando uma conexão sem fio Bluetooth (HEEB, 2008). O software gerencia e armazena os dados topográficos recebidos e permite fazer croquis diretamente na tela do dispositivo. Em escritório, os dados do levantamento e os croquis podem ser transferidos para um PC e trabalhados em programas para o mapeamento de cavernas. O autor cita várias vantagens desse sistema em comparação com instrumentos óticos convencionais e croquis em papel: rapidez nas coletas, medições mais precisas, menos fontes de erro, desenhos mais precisos, identificação e controle de erros de fechamento de poligonais e fácil transferência de dados para programas baseados em PC.

FIGURA 12 - DISTOX (ESQUERDA) EM COMUNICAÇÃO VIA BLUETOOTH COM PDA (DIREITA) COM O SOFTWARE POCKETTOPO.



FONTE: Heeb, 2008.

Para Corvi (2017), a tendência era de que a instrumentação tradicional de mapeamento de cavernas fosse cada vez mais substituída pela DistoX, havendo cerca de 2200 unidades distribuídas irregularmente pelo mundo. Para ele, o dispositivo é campeão no processo de substituição dos instrumentos tradicionais de levantamento

para os dispositivos digitais. A DistoX é o único dispositivo que obteve uma distribuição mundial e revolucionou as práticas de levantamento de cavernas. Seu sucesso se deve à escolha de projeto de um instrumento integrado que permite realizar três medições em um único disparo, por possuir um procedimento de calibração que pode ser realizado sem equipamento especial e um programa Windows, o [PocketTopo](#), escrito pelo próprio Heeb.

Os temas Topografia e Espeleometria de cavidades naturais foram abordados no IV Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental do Instituto Chico Mendes promovido pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), juntamente com o [Instituto Terra Brasilis](#). Realizado em 2016, tinha como público alvo, os profissionais de instituições ligadas ao SISNAMA e responsáveis pela análise dos processos de licenciamento ambiental de atividades potencialmente poluidoras ou degradadores de cavidades naturais subterrâneas. Este curso foi elaborado em função da necessidade de se “aprimorar os instrumentos de gestão ambiental do patrimônio espeleológico no sistema de licenciamento ambiental” dada a expansão da atividade econômica no Brasil com conseqüente aumento da pressão sobre os recursos naturais (CECAV, 2016). O autor ressalta que já houve tentativas de se padronizar a simbologia espeleológica, sendo que este consenso ainda não existe e cada desenhista pode adotar os símbolos que julgar mais adequados de acordo com o tipo de caverna a ser representada.

Partindo das justificativas do porquê se fazer um mapa espeleológico são abordados vários conceitos relacionados à topografia de cavernas como a precisão de um mapa e as características peculiares do ambiente subterrâneo como a acessibilidade, morfologia, dimensões e as dificuldades de deslocamento. Os temas tratados se estendem aos métodos de mapeamento, instrumentos, produtos cartográficos, convenções, graus de precisão, *Global Navigation Satellite System* (GNSS) e a configuração de uma equipe topográfica.

Num dos raros trabalhos acerca da Cartografia Espeleológica, Lott (2014) realizou uma discussão sobre esta, entendendo como cartografia a disciplina que trata da documentação das cavernas brasileiras, partindo da deficiência conceitual encontrada na literatura espeleológica disponível. Segundo o autor, pretendeu-se discutir o que seria de fato a cartografia espeleológica, ressaltando-se que essas questões cartográficas vêm sendo tratadas de forma tímida dentro de grupos

espeleológicos e em eventos como congressos e workshops. Tais discussões são importantes na medida em que podem vir a contribuir para uma maior qualidade dos documentos cartográficos.

Para Lott (2014), o que se entende por mapeamento é uma “conjunção entre técnicas de topografia e cartografia”, sendo o nome correto da atividade o “mapeamento topográfico de cavernas”. Para ele, existe uma falta de identidade da cartografia espeleológica em função da ausência de conceitos modernos de cartografia nesta disciplina, sendo executada de forma empírica. E muitas dessas deficiências conceituais se dão pelo fato de, em geral, os mapas espeleológicos serem feitos por cientistas ou exploradores de cavernas e não por topógrafos profissionais (PALMER, 2007). Disso decorre o fato de que conceitos cartográficos fundamentais como a semiologia gráfica, a definição de legendas, a teoria das cores, tipo de papel para impressão, entre outros detalhes de diagramação são, geralmente, desconhecidos ou ignorados. Adicionalmente podemos estender o pensamento de PALMER (2007) considerando que o levantamento, conceitualmente, é feito por topógrafos e cartógrafos/agrimensores e a cartografia por cartógrafos.

A atividade de mapeamentos de cavernas sempre esteve ligada a grupos espeleológicos e instituições de pesquisa como as universidades, sendo que com a publicação da [Resolução n. 005 do CONAMA em 1987](#), empresas de consultorias ambientais também passaram a realizar tais levantamentos.

Um panorama da evolução dos métodos de mapeamento de cavernas em nível mundial foi dado por uma pesquisa feita por Corvi (2017), que coletou informações básicas sobre levantamentos ao redor do mundo, sintetizadas neste trabalho (QUADRO 2). Este atenta para o fato de ser um quadro fragmentado, incompleto e esboçado uma vez que raramente os mapeadores de cavernas mostram interesse em como seus colegas topógrafos fazem seus levantamentos.

Num breve histórico do mapeamento de cavernas, afirma que a ideia básica desta atividade é tão antiga quanto o próprio Martel, uma vez que o método de levantamento e desenhos que são descritos no seu livro “Les Abimes” são utilizados até hoje. No entanto, as técnicas têm evoluído consideravelmente, especialmente nas últimas décadas, para a aquisição e tratamento dos dados topográficos e croquis. Modelos 3D se tornaram populares e passaram a ser integrados aos Sistemas de Informações Geográficas - SIG's.

Muitos programas para tratamento dos dados topográficos vêm sendo escritos desde a década de 70 do século XX por espeleólogos. Inicialmente utilizados para a geração da linha de trena, os aplicativos hoje têm a capacidade de realizar correções de poligonais, disponibilizar biblioteca de símbolos, permitem a geração e visualização de modelos 3D e fazem conexões via Bluetooth com outros dispositivos eletrônicos como a DistoX ou o Cave Sniper, que permitem a mensuração de distâncias, azimutes e inclinação com um único disparo.

QUADRO 2 - PRINCIPAIS FORMAS DE REGISTRO DE DADOS E CROQUIS UTILIZADOS PELA COMUNIDADE ESPELEOLÓGICA INTERNACIONAL. A PRIMEIRA LINHA SE REFERE AOS PAÍSES CONSULTADOS COLUNA DA ESQUERDA SE REFERE AO SOFTWARE UTILIZADO, SENDO PAPER OS CROQUIS FEITOS MANUALMENTE.

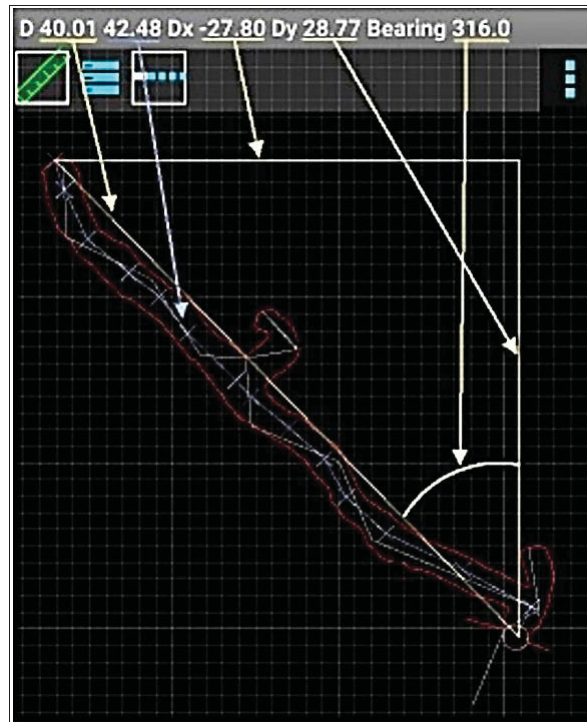
App\País	Au	At	Br	Bg	Cn	Cz	Fr	De	Hu	Ir	Il	It	Mx	Mo	Nz	No	Po	Ru	Sk	Es	Ch	Ua	Uk	Us
Paper	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
PocketTopo	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
TopoDroid	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Auriga																								■
Qave																	■							
CaveSurvey				■																				
SexyTopo																							■	

■ Mais utilizada
 ■ Muito utilizada
 ■ Pouco utilizada
 ■ Uso raro
 ■ Sem dados

FONTE: Modificado de Corvi, 2017.

Os resultados da pesquisa indicam que a DistoX estava quase suplantando a bússola de visada [Suunto](#) enquanto instrumento de medição naquele momento (2017), notadamente na Europa. A utilização do papel enquanto suporte para a elaboração de croquis ainda prevalece, com crescente uso dos *app*'s PocketTopo e [TopoDroid](#) (FIGURA 13). Para o tratamento dos dados topográficos, o software Compass é o mais utilizado, com destaques para o [Survex](#), [Walls](#) e [Visual Topo](#). A composição final do mapa em papel ainda prevalece, seguida do uso de softwares como Adobe Illustrator®, Corel Draw® e Inkscape, além de programas CAD.

FIGURA 13 - INTERFACE DO TOPODROID.



FONTE: <https://github.com/marcocorvi/topodroid/raw//master/manual.pdf>.

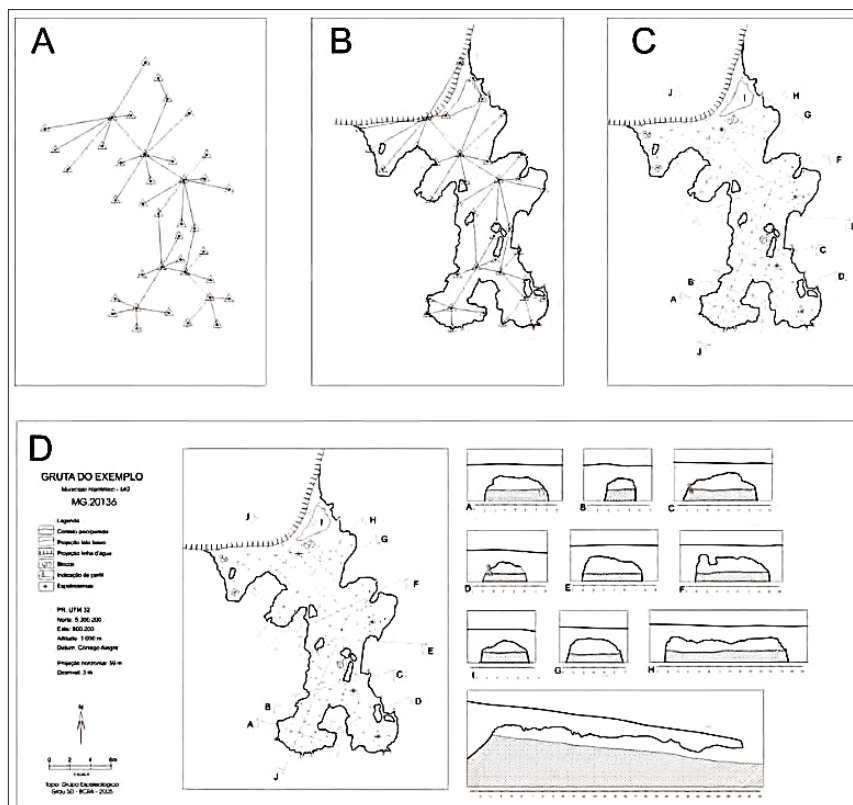
De forma resumida, o mapeamento topográfico tradicional de cavernas consiste na elaboração de croquis de acordo com planos de representação em planta, perfis longitudinais e cortes transversais. Os elementos espeleológicos são representados a partir de convenções, para a planta baixa e desenhados segundo se apresentam em cortes e perfis. Os limites, desníveis e distribuição das feições de interesse são determinados a partir de um levantamento topográfico realizado normalmente, com bússolas sobre tripé (tipo Brunton) ou de visada (Suunto) para se determinar o ângulo horizontal em relação ao Norte Magnético e ângulo vertical em relação à linha de visada horizontal e trena analógica ou a laser para a mensuração de distâncias. A equipe pode variar em número de componentes, mas consiste em operador de bússola, anotador, ponta de trena e conquistas. A topografia se inicia no ponto zero da cavidade e pode estar referenciada a um sistema de coordenadas mediante a inclusão de uma estação externa à cavidade às quais tenha se atribuído coordenadas obtidas por receptor GNSS.

Para a elaboração do mapa espeleológico em escritório, de forma manual ou com auxílio de computadores, faz-se o lançamento das “linhas de trena” e das

estações topográficas e medidas auxiliares e dos contornos da cavidade nas três vistas. Realizado o desenho da cavidade, segue-se com a inserção de simbologia das feições espeleológicas, são calculadas as variáveis espeleométricas, define-se a precisão e nível de detalhamento obtidos e é feita a composição final do layout (FIGURA 14). A simbolização dos mapas depende, ainda, do tipo de software utilizado para a composição do *layout* ou da habilidade do croquista em desenho manual. Não existe uma padronização das convenções espeleológicas para o Brasil e mesmo para o exterior, ainda que alguns ícones tenham maior aceitação. Por fim, deve-se atentar ao fato de que o nível de informações e o estilo de representação de um mapa espeleológico devem estar relacionados à sua destinação.

A inclusão de novos instrumentos no mapeamento nos últimos anos alterou significativamente o processo, conferindo maior agilidade, precisão, nível de detalhamento e ambiente digital, ainda que os procedimentos em campo se mantenham, basicamente, os mesmos.

FIGURA 14 - PROCESSO DE CONSTITUIÇÃO DE MAPA ESPELEOLÓGICO. LINHA DE TRENA (A); TRAÇADO DO CONTO E BLOCOS (B); PERFIL LONGITUDINAL E CORTES TRANSVERSAIS (D).



FONTE: Moura, 2016.

2.2 - ESPELEOMETRIA

As primeiras tentativas de considerar conceitos básicos da espeleologia do ponto de vista quantitativo parecem ser bastante antigas, provavelmente tão antigas quanto a própria Espeleologia Moderna. Šušteršič (1978), se propõe a extrair os enunciados básicos dos trabalhos anteriores, reorganizar as diferentes concepções e fornecer um ponto de partida mais homogêneo para estudos posteriores e discussões quantitativas sobre características de cavernas, sugerindo que uma expressão adequada para este ramo da espeleologia seria espeleometria.

Segundo ele, os anglosaxônicos introduziram as expressões espeleotema e espeleogens para se referirem às características secundárias de cavernas devido ao transporte de massa positivo ou negativo, respectivamente. Lange (LANGE, 1960 *apud* ŠUŠTERŠIČ, 1978) propôs uma expressão comum, espeleofato. Como o limite entre as características primárias e secundárias da caverna é de fato apenas teórico, Šušteršič sugere, apenas para fins de espeleometria, estender essas expressões a todos os fenômenos das cavernas. Feitas essas considerações, a descrição "funcional" da espeleometria passa a ser entendida como o processo de coleta e análise de dados métricos de um sistema de espeleofatos.

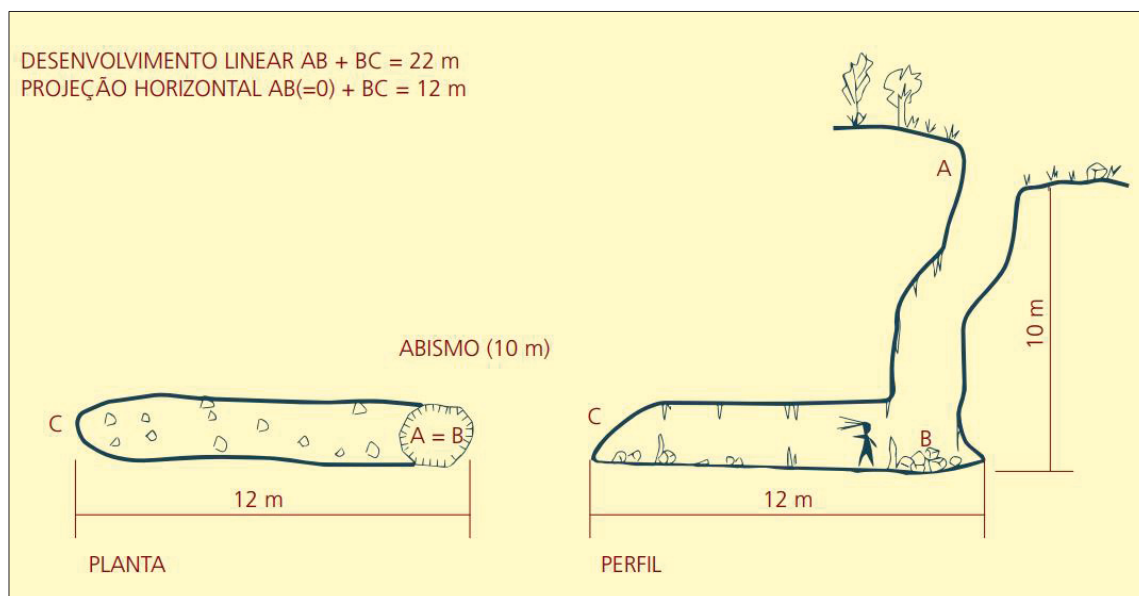
Adicionalmente, como observado por Curl (CURL, 1964 *apud* ŠUŠTERŠIČ, 1978), as informações sobre espeleogens estão concentradas em seus limites de fase, sendo que a espeleometria se preocupa, principalmente, com estes limites. Com base nesses aspectos, pode-se atualizar o conceito de Espeleometria, que passa a ser entendida enquanto o estudo das propriedades geométricas de uma cavidade dentro de seus limites de fase.

As bases do que é entendido por Espeleometria hoje no Brasil tem, por referência, os trabalhos de Claude Chabert, espeleólogo francês que atuou no Brasil. No artigo clássico *Mapping and Measuring Caves - A Conceptual Analysis* (CHABERT *et al.* 1981), define a Espeleologia enquanto uma ciência voltada à exploração de cavernas e seus contextos geológicos e geográficos, os processos, as feições e a fauna e flora que as ocupam. Para o estudo das cavernas, o pesquisador precisa de mapas e de realizar medições, distribuir suas descobertas e comunicá-las à comunidade científica, sendo a Cartografia uma ciência base essencial à Espeleologia. A caverna seria um espaço fechado tridimensional a ser representado

em um plano, usando-se das vistas em planta, perfis longitudinais e cortes transversais.

Segundo o autor, o interesse em quantificar as cavernas mais longas e as mais profundas remonta a Martel (1859-1938), cabendo a Hubert Trimmel a formação da Comissão de Grande Cavernas durante o 4º Congresso Internacional de Espeleologia em Lubljana, 1965. Desde então vem sendo feitos esforços para a padronização de mapeamentos e da obtenção dos dados espeleométricos. Segundo o autor, o método de se medir uma caverna denominado *linear development*⁸ é utilizado por muitos europeus e associado a cavernas verticalizadas. Já *projected map length*⁹ (FIGURA 15), método usado pelos norte-americanos e alguns europeus é um método mais adequado a cavernas horizontalizadas, tal qual se observa no Brasil.

FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO LINEAR (DL) E DA PROJEÇÃO HORIZONTAL (PH) EM UMA CAVIDADE HIPOTÉTICA.



FONTE: Rubbioli *et al.*, 2019.

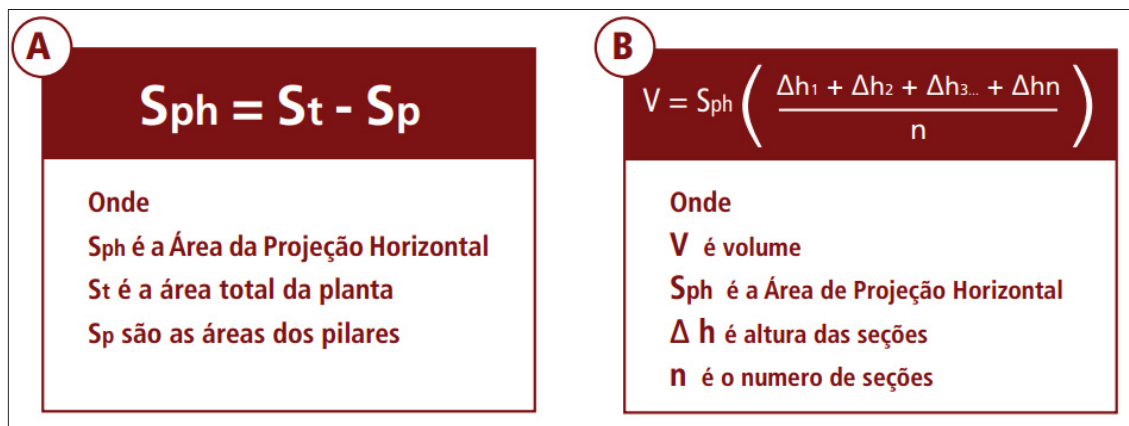
No entanto, Chabert afirma não existir um melhor método para se medir uma caverna para propósitos científicos, sendo que a escolha dependerá do fim a que se

⁸ O termo *Linear development* é o equivalente ao conceito de Desenvolvimento Linear (DL) para a comunidade espeleológica brasileira, tendo sido herdado da tradição francesa.

⁹ O termo *projected map length* é o equivalente ao conceito de Projeção Horizontal (PH), herdado da tradição norte americana.

propõe. O desnível (Depth) pode ser definido enquanto a distância absoluta entre o ponto mais alto da caverna e o ponto mais baixo, tendo um ponto zero na entrada da cavidade como referência altimétrica. O volume (FIGURA 16), variável que melhor expressa o tamanho de uma cavidade, seria a medida em metros cúbicos do espaço fechado, no entanto sendo variável de difícil obtenção pelo método tradicional de mapeamento. Daí que padrões internacionais de mapeamento e medições precisam ser estabelecidos, vindo a facilitar a comparação das cavernas segundo um critério preestabelecido.

FIGURA 16 - FÓRMULAS PARA CÁLCULO DA ÁREA (ESQUERDA) E VOLUME (DIREITA) PELO MÉTODO DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO.



FONTE: Rubbioli *et al.*, 2019.

Num trabalho que propõe a adoção de uma abordagem técnico-científica para as questões espeleométricas, Araújo (1989) afirma que toda atividade que envolva mensurações tem de estar alicerçada em conceitos técnicos e científicos fundamentais, caso contrário medir se resumirá a supor ou estimar. A definição dos níveis de acurácia e detalhamento são fundamentais para se saber se um determinado mapa oferece a precisão de que se necessita para a realização de um estudo ou se um novo mapeamento se torna necessário. Feitas as distinções entre os tipos de erro a que o mapeamento de cavernas está sujeito, o autor destaca que nenhum instrumento pode oferecer uma precisão maior do que a permitida em sua escala de trabalho, denominado de erro de precisão instrumental. O erro operacional, ou seja, aquele relacionado ao ato de usar um instrumento de medição difere do erro instrumental por ser próprio ao processo de medição. Crítico dos quadros existentes

para a classificação da precisão e detalhamento dos mapas espeleológicos, o autor propõe novos critérios para o enquadramento de um mapa em um sistema classificatório (QUADRO 3).

QUADRO 3 - PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DE PRECISÃO E NÍVEL DE DETALHAMENTO DE UMA CAVERNA.

Nível de acurácia.				
Níveis	Erro Angular	Erro Linear	Instrumento/ condição de mapeam.	Aplicação do Mapa
1	<0°04'	0,1%	Erro instr. 2' Teodolito Ótimas condições	Todo e qualquer estudo espeleocientífico de detalhe.
2	0°04' e 0°11'	0,3%	Erro instr. 10' Teodolito Boas condições	Todo e qualquer estudo espeleocientífico de detalhe.
3	0°11' e 0°30'	0,8%	Erro instr. 20' Teodolito/Habilidade Más condições	Não se presta ao levantamento espelegenético detalhado, nem à confecção de mapas isoteores, variações comportamentais, etc.
4	0°30' e 0°50'	1,3%	Erro instr. 40' Habilidade/Bússola Ótimas condições	Levantamento preliminar para aproveitamento turístico, estudos bioespeleológicos e espeleomorfológicos.
5	0°50' e 2°	2,2%	Erro instr. 1° Bússola Boas condições	Guia para direcionamento, estudo bioespeleológico simplificado, e anotações de detalhes.
6	2° e 5°	3,6%	Erro instr. 4° Bússola Más condições	Guia simplificado, trabalho de exploração e reconhecimento.
	>5°		CROQUI	Idéia geral da caverna.

Níveis de Detalhamento.					
dpt	A	B	C	D	E
	> 0,1	0,1 – 0,04	0,04 – 0,01	0,01 – 0,005	< 0,005
característica	1 base ou mais a cada 10m ²	1 base à cada 25m ² até menos de uma base a cada 10m ²	1 base à cada 100m ² até menos de uma base a cada 25m ²	1 base à cada 200m ² até menos de uma base a cada 100m ²	Menos de 1 base a cada 200m ²

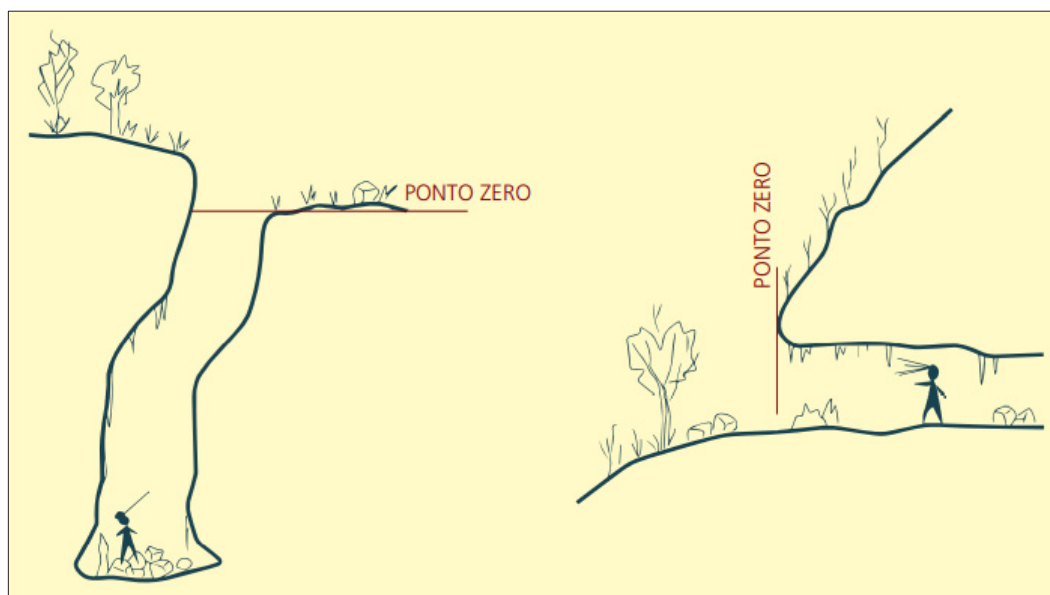
FONTE: Araújo, 1989.

Dando prosseguimento com as discussões acerca de como se mapear e medir as cavernas, desta vez com vários exemplos brasileiros, Chabert (1992) ressalta a importância de se "... estabelecer referências comuns que permitam comparar objetivamente as cavernas entre si ...". Ressalta, também, a necessidade de se "... fixar bases rigorosas que posteriormente permitam calcular o volume de uma cavidade...", sendo este o único critério que permite quantificar objetivamente o tamanho de uma caverna. Enquanto o desenvolvimento linear (DL) ou a projeção horizontal (PH) possuem apenas uma dimensão, o volume possui três. Nesta tentativa de padronização, estabelece alguns princípios, como só poderem "... ser contados no desenvolvimento de uma caverna as passagens ou condutos percorridos e medidos

pelo Homem” (CHABERT, 1992, *op. cit.*), o que pode ter reforçado o conceito antropocêntrico de caverna.

A temática Espeleometria é recorrente na Espeleologia brasileira em função da herança histórica europeia e norte-americana na criação de listagens das cavernas mais profundas e de maior desenvolvimento e, mais recentemente, enquanto atributos utilizados na classificação da relevância de cavernas em processos de licenciamento ambiental. E de forma gerar uma contribuição para as discussões no âmbito do comitê consultivo da revisão da [Instrução Normativa N. 2 do MMA](#), o Instituto do Carste realizou o Workshop Técnico Científico Espeleometria: Métodos, definições e limites em Belo Horizonte, MG (INSTITUTO DO CARSTE, 2012). As discussões foram apresentadas em um documento síntese do evento¹⁰, que contém várias palestras visando a conceituação de temas como “Ponto Zero” (FIGURA 17), os limites dimensionais para cavidades, metodologia de mapeamento e cálculos espeleométricos e o atributo “Dimensões Notáveis”.

FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DO PONTO ZERO EM UMA CAVIDADE VERTICAL (ESQUERDA) E HORIZONTAL (DIREITA).

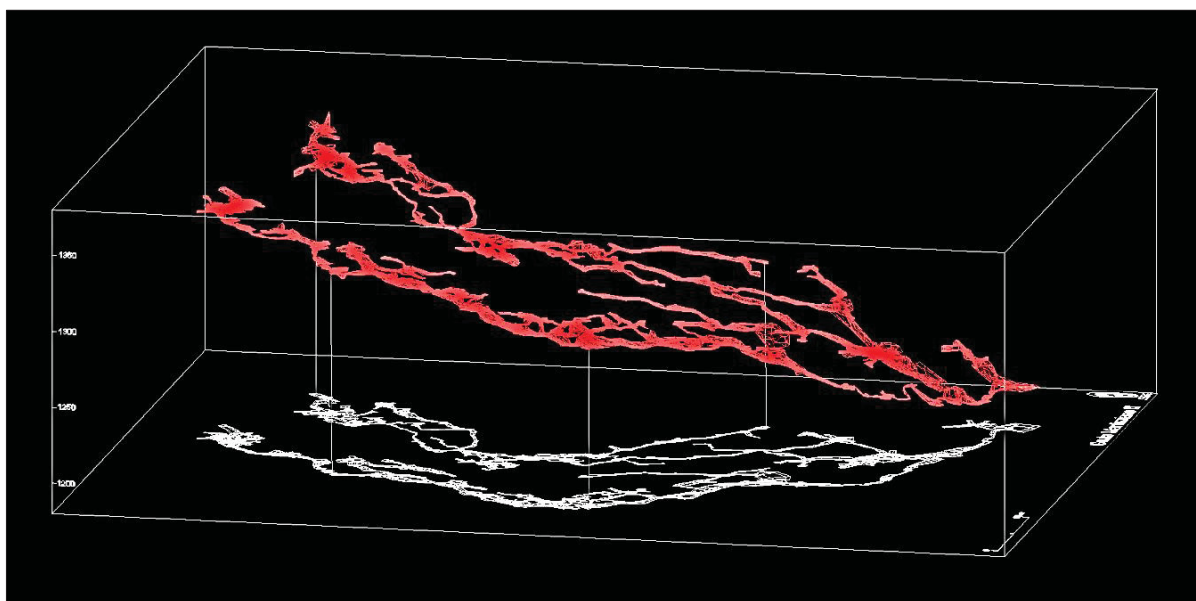


FONTE: Rubbioli *et al.*, 2019.

¹⁰ O documento está disponível em: <https://docplayer.com.br/13702603-Workshop-tecnico-cientifico.html>. Acessado em 21 de maio de 2022.

Dos temas debatidos, destaca-se o entendimento do volume enquanto melhor variável espeleométrica para quantificar a dimensão de uma caverna. Foi destacada a ocorrência de anomalias magnéticas enquanto o maior desafio em determinadas litologias, assim como destacados os pontos positivos e negativos da utilização de levantamentos a laser. Destacaram-se, também, as diferenças nos cálculos de área quando se utiliza a projeção horizontal ou o desenvolvimento linear (FIGURA 18). De consenso na comunidade espeleológica, o desnível é entendido enquanto a medida entre o piso mais alto e o piso mais baixo da caverna, diferentemente da abordagem de Chabert et al.(1981) que considera também o desnível positivo, entre a maior altura do teto e o ponto zero (FIGURA 19). Por fim, foram discutidas questões referentes aos modelos estatísticos para análises de dados espeleométricos e as dificuldades na sua implementação.

FIGURA 18 – INFLUÊNCIA DA FORMA DE REPRESENTAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA GRUTA MARTIMIANO II SOBRE A VARIÁVEL ESPELEOMÉTRICA “ÁREA”.



FONTE: Representação feita pelo autor (2022) a partir de mapeamento realizado pela SEE-UFOP (2019).

FIGURA 19 - REPRESENTAÇÕES DOS DESNÍVEIS POSITIVO E NEGATIVO EM UM PERFIL LONGITUDINAL DE UMA CAVERNA HIPOTÉTICA.



FONTE: Elaborada pelo autor (2023).

Definições e conceitos são formas de padronizar e tornar possível a comparação entre cavernas no que se refere às suas grandezas espaciais como a extensão, área ou volume. Segundo os autores (CRUZ *et al.*, 2019), as feições complexas e diversificadas das cavernas “... nem sempre se enquadram em definições rígidas dos modelos matemáticos que regem os sistemas de medição”, o que pode vir a acarretar grandes problemas na avaliação das variáveis espeleométricas de um conjunto de cavidades.

2.3 - PERFIL ATUAL DOS MAPEADORES DE CAVERNAS NO BRASIL

Numa pesquisa (inédita) realizada por membros do Grupo de Desenvolvimento do TOPGRU junto à comunidade espeleológica brasileira visando aperfeiçoar este software, pôde-se traçar um perfil básico do espeleotópografo do Brasil, equipamentos, tecnologias e metodologias adotadas em trabalhos de campo e escritório.

A pesquisa teve cerca de 70 respondentes, em sua maioria provenientes do Estado de MG, seguido de SP, DF, PR, SE, RJ, SC e TO, sendo notável a ausência de dados da BA. A relação para com a Espeleologia se faz através de grupos espeleológicos (75%), consultorias espeleológicas (42%), pesquisa acadêmica (10%)

e órgãos públicos (6%). Desses, 58% teriam interesse em participar de grupos de discussões, 30% teriam algum interesse e 12% não. E apenas 13% não aceitaria fazer trabalhos em parceria com outros grupos. Além da topografia convencional, utilizada por todos, outros métodos de levantamento como as varreduras a laser estática e cinemática (23%), fotogrametria (20%), triangulação (14%) e geofísicos (9%) eram conhecidos.

A precisão nominal dos instrumentos é conhecida por 96% dos respondentes, sendo os dispositivos mais utilizados o GNSS de navegação, bússolas e clinômetros de visada, trenas a laser, DistoX, bússolas sobre tripé, trena convencional, scanner a laser e teodolito. Das funções que o pesquisador tem habilidade de assumir no processo de elaboração do mapa espeleológico, a totalidade reconhece a instrumentação, seguida do desenho de croquis (92%), georreferenciamento da cavidade (76%), vetorização de croquis (75%), tratamento e análise dos dados topográficos (68%), cálculo das variáveis espeleométricas (55%) e desenho em app (40%). Ainda que o datum para sistema de coordenadas UTM adotadas pelo Brasil seja o SIRGAS 2000, 52% utilizam o WGS84 e 5% utilizam o SAD 69.

Os softwares mais utilizados são o AutoCAD (60%), ArcGIS (30%), Corel Draw (29%), Therion (11%), além do Adobe Illustrator, Inkscape. Através de software 51% dos respondentes lançam a linha de trena, digitalizam croquis, georreferenciam e corrigem erros. 30% ainda faz o lançamento manual através de escalímetros e transferidores, 17% lança a linha de trena e desenha observando os croquis e 1.5% transfere os dados digitais da DistoX e gera desenho no Topodroid. A organização dos dados organizados em SIG é realizada por 68%, sendo que em relação à política de dados, 51% pratica a cessão por solicitações ou permutas, 38% encontra-se em órgão ambiental, 32% usa apenas internamente, 29% procede com arquivamento na SBE e 25% no CECAV, ficando o uso público restrito a 19%.

Papel, transferidor e escalímetros ainda são os instrumentos preferidos de 66% para a elaboração de croquis em campo, sendo que os aplicativos são utilizados por 16% e 17% desenha em papel com estimativas de escala e direções. A declinação magnética é considerada por 77% dos espeleotopógrafos, 63% realiza a verificação dos instrumentos, 59% analisa e ajusta os dados através de software, sendo os procedimentos mais comuns para a minimização de erros.

As variáveis espeleométricas normalmente calculadas são a projeção horizontal (P.H.), o desenvolvimento linear (D.L.), desnível negativo (DESN), área em planta, volume, altura da entrada principal, altura média de condutos, área média dos cortes e conectividade.

De uma maneira geral, esta pesquisa permitiu inferir que a atual espeleotopografia é feita, no Brasil, de forma predominantemente convencional, com instrumentos analógicos, sendo que a utilização de instrumentos mais sofisticados é ainda incipiente, mas com tendência crescente na sua adoção. Muitos mapas ainda são feitos de forma completamente manual em papel, ainda que a utilização de softwares a tenha superado. Cerca de apenas metade dos topógrafos realiza os cálculos das variáveis espeleométricas, uma pequena minoria ainda realiza o desenho final do mapa em papel e a geração de modelos 3D é crescente, mesmo incipiente. As variáveis espeleológicas normalmente calculadas visam atender as exigências legais, ainda que com os valores questionáveis, como no caso do volume.

2.4 - OS MÉTODOS DE LEVANTAMENTO “NÃO TRADICIONAIS” EM ESPELEOLOGIA

Nos últimos anos, o uso das varreduras a laser se consolidou no Brasil sendo sistematicamente utilizadas por empresas de consultoria ambiental e por mineradoras no registro de cavidades em processos de licenciamento ambiental. Tanto o *Terrestrial Laser Scanner* (TLS) quanto o *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) vêm sendo empregados no registro de cavidades com a finalidade de representar morfologias, características litoestruturais, estabilidade geotécnica e de se obter as variáveis espeleométricas, notadamente o volume (ARAÚJO *et al.* 2015; ARAÚJO, 2016). No entanto, no âmbito acadêmico, as pesquisas ainda se encontram em estágio inicial.

Já a Fotogrametria tem sido usada como método de levantamento em pesquisas acadêmicas de cavernas nos últimos anos (SIMÕES, 2019; SILVA *et al.*, 2020), minas históricas (SIMÕES *et al.*, 2022) e paleotocas (AUDI *et al.*, 2021; AUDI *et al.*, 2022). Este método de levantamento parece ainda não ter tido inserção nas consultorias ambientais e mineradoras.

O levantamento por varredura a laser e a Fotogrametria têm se mostrado como métodos adequados aos levantamentos 3D de maior precisão e detalhe, vindo

a atender as questões legais nos processos de licenciamento ambiental, tanto na geração de mapas, quanto na obtenção das variáveis espeleométricas.

Mas diferentemente dos modelos 3D gerados por levantamentos a laser, modelos fotogramétricos estão sendo utilizados para a geração de mapas espeleológicos. A partir da extração vetorial de contornos da cavidade e de outras feições (FIGURA 20), somadas à edição vetorial sobre mosaicos de ortofotos de tetos, paredes e pisos, mapas espeleológicos estão sendo elaborados em ambiente totalmente digital e com predominância de procedimentos automatizados sobre os manuais, caracterizando a quarta fase no histórico de mapeamento de cavernas no Brasil.

FIGURA 20 - EXTRAÇÃO VETORIAL DOS CONTORNOS DA CAVIDADE EM PLANTA BAIXA (VERMELHO), PERFIL LONGITUDINAL (LARANJA), PROJEÇÃO VERTICAL LONGITUDINAL NW-SE (EM MARROM), PROJEÇÃO VERTICAL TRANSVERSAL NE-SW (LARANJA), CORTES TRANSVERSAIS (VERDE), CORTES TRANSVERSAIS ROTACIONADOS E TRANSLADADOS (VERDE E EM PLANTA) E CURVAS DE NÍVEL COM EQUIDISTÂNCIA DE 10 CM (CINZA).



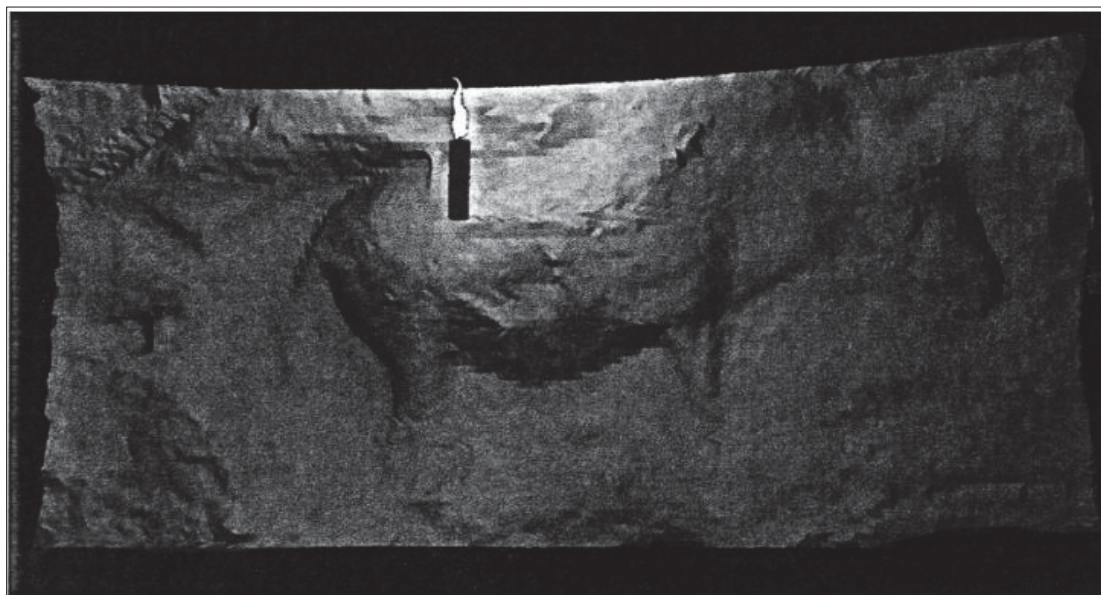
FONTE: Simões, 2022.

2.4.1 - VARREDURAS A LASER

2.4.1.1 - VARREDURA A LASER TERRESTRE (TLS)

A tentativa de replicar a [Caverna Altamira](#), localizada no norte da Espanha através da modelagem por varredura a laser é a referência mais antiga conhecida do uso desta tecnologia em levantamentos em cavernas, iniciado em 1988 e finalizado somente em 2001 (Blais, 2004 *apud* IDREES *et al.* 2016). Quase 10 anos depois, uma equipe de pesquisadores realizou o levantamento 3D das gravuras da Caverna Cap Blanc, situada no sudoeste da França (BROWN *et al.* 2001) (FIGURA 21). O objetivo deste trabalho era desenvolver um método acessível e prático para a captura, processamento, visualização e armazenamento de levantamentos de sítios em caverna e abrigo-sob-rocha sem que houvesse contato entre os instrumentos e os painéis rupestres, lançando as bases de uma arqueologia experimental virtual.

FIGURA 21 – MODELAGEM 3D DE PAINEL RUPESTRE DO ABRIGO CAP BLANC, FRANÇA, ILUMINADO PELA SIMULAÇÃO DE UMA VELA.



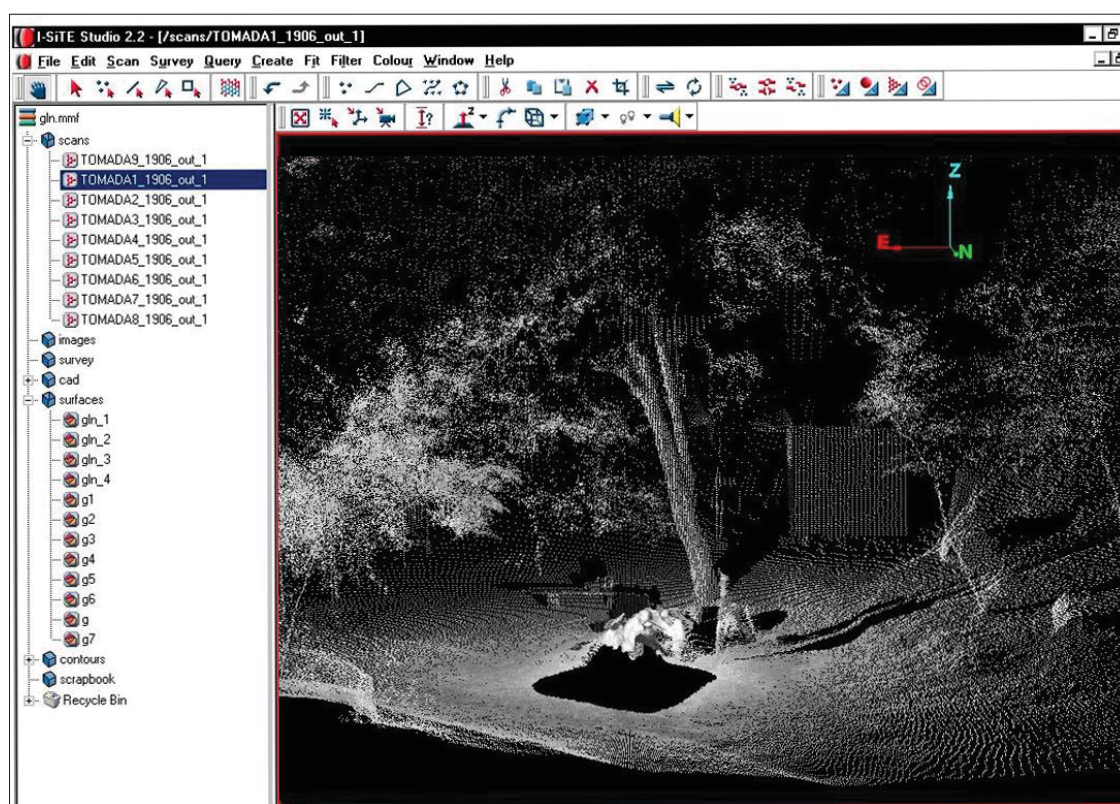
FONTE: Brown *et al.*, 2001.

Outro trabalho pioneiro no levantamento de painéis rupestres em grutas foi realizado na [Caverna Baiame](#), Austrália por El-Hakim *et al.* (2004), que propõem um método de levantamento por varredura a laser combinado à texturização por

modelagem fotogramétrica suportada por pontos de controle topográficos e visualização dos modelos gerados. Problemas como a dificuldade de obtenção das cores através do escaneamento em alguns tipos de scanners, registro da textura e da geometria e nível de ruído são apontados nesse estudo. Tais problemas serão considerados na proposta metodológica deste trabalho, onde o modelo geométrico serve de suporte ao imageamento dos painéis rupestres. Os autores concluem que a tecnologia de escaneamento a laser combinada a uma técnica apropriada de aquisição de textura e cor é a mais promissora abordagem para a documentação dos registros rupestres.

A mais antiga referência à utilização da varredura a laser no Brasil como método de levantamento de uma caverna data de 2001. Trata-se do levantamento da entrada da Lapa Nova de Vazante, localizada em Vazante - MG, realizado pela Votorantim Mineração em 2001 e apresentado no *stand* da empresa durante o 13º Congresso Internacional de Espeleologia - Speleo Brazil 2001 em Brasília (Bittencourt, 2001, com. pess.) e durante o I Encontro Brasileiro de Estudos do Carste (DRUMOND *et al.*, 2004). O experimento foi realizado pelo Grupo Espeleológico de Vazante – GEEV e contou com o apoio da Votorantim Metais, sendo o scanner utilizado em caráter experimental no levantamento de alguns salões da Lapa Nova. Foram realizados vários escaneamentos com detalhamento em escala centimétrica das paredes dos condutos, referenciadas ao sistema de coordenadas UTM com uso de estação total. A malha gerada possuía pontos com 2,5 cm (FIGURA 22) de espaçamento, o que permitiu o registro de feições de menor porte, como espeleotemas e estratificações da rocha. No entanto, os autores destacaram o alto custo do equipamento, a baixa portabilidade, restrições no alcance e a necessidade de qualificação do operador. E ainda que destaquem que o equipamento estivesse fora da realidade dos grupos espeleológicos naquele momento, consideraram que os avanços tecnológicos permitirão a geração de instrumentos mais compactos e de menor custo, tornando-o mais acessível. Por fim, destacam a necessidade de revisão dos padrões internacionais de classificação da precisão e detalhamento dos mapas das cavidades em face desta nova metodologia de levantamento espeleológico.

FIGURA 22 - LEVANTAMENTO A LASER DA LAPA NOVA DE VAZANTE E APRESENTAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS NO SOFTWARE ISITE.



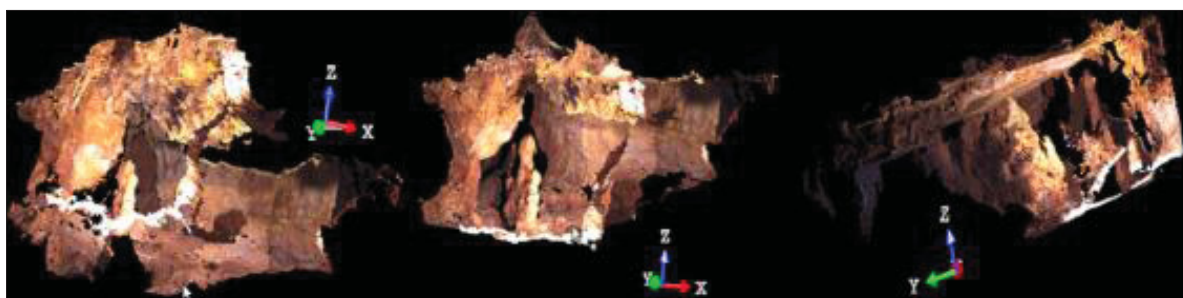
FONTE: Figura disponibilizada por Bittencourt em 2022.

Até meados dos anos 2000, os principais métodos de documentação da aparência e formas de uma caverna eram através do mapeamento e da fotografia. Com o advento dos sistemas de varredura a laser, surge uma nova forma de documentação rápida e precisa dos ambientes subterrâneos (TSAKIRI *et al.* 2007). Os autores supracitados analisaram os instrumentos dos diversos métodos como o mapeamento espeleológico tradicional por bússola, o uso de métodos topográficos empregando-se estação total, a fotogrametria e a varredura a laser. Consideram que a principal vantagem deste método de levantamento é a amostragem de pontos de alta densidade que permite uma modelagem da superfície acurada e alto detalhe, com visualização muito superior às tecnologias até então existentes, sendo a ferramenta mais promissora para esse tipo de ambiente. Tais afirmações foram fundamentadas nos trabalhos de levantamento na [Caverna Kefalas](#), Grécia, tendo sido usados um scanner a laser terrestre iQsun 880HE80 e 14 pontos de controle definidos com auxílio da estação total TCR 303 e GNSS para definição de ponto de referência na entrada,

resultando em um modelo com 12.000.000 de triângulos. Destacam que dada a complexidade geométrica das cavidades, além de baixa reflectância, restrições no posicionamento do scanner, a ocorrência de buracos é comum, devendo ser tratada por algoritmos.

A evolução tecnológica experimentada desde o início dos anos 2000 tem contribuído para registros de sítios históricos (HADDAD, 2011). O autor destaca o fato de que as ferramentas de documentação gráfica e não gráfica estão se fundindo em um processo, sendo que a tecnologia fotográfica digital é a base. No entanto, os produtos destes registros continuam pouco populares entre os usuários envolvidos na sua documentação, num distanciamento crescente entre técnicos especializados e usuários não-técnicos. Neste trabalho, o autor faz uma revisão da avaliação de métodos de documentação e técnicas de levantamento de sítios históricos, focando nas necessidades dos especialistas e usuários, incluindo a Caverna Burgesh, localizada na Jordânia (FIGURA 23). Segundo ele, os métodos podem ser não fotográficos, fotográficos e por escaneamento a laser, sendo que sua escolha depende de fatores como custos, tempo, características do local, acurácia, estilo de apresentação dos resultados, interpretação e monitoramento. Na prática, no entanto, a familiaridade do usuário ou do especialista com um método é fator decisivo nesta escolha, mais do que a adequação do método ao propósito pretendido.

FIGURA 23 – DIFERENTES VISTAS DA DOCUMENTAÇÃO DO SCANNER A LASER 3D DE PARTE DA CAVERNA BURGESH NA JORDÂNIA.



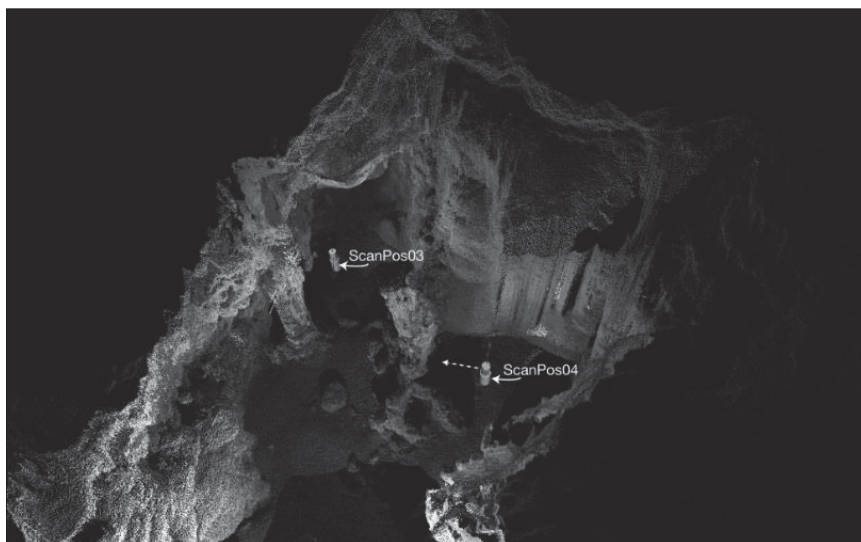
FONTE: Modificado de Haddad, 2011.

A modelagem 3D através de nuvens de pontos por escaneamento a laser tem se mostrado útil na reconstrução, como suporte a estudos geomorfológicos e na geração de visitas virtuais às cavernas em alto nível de detalhe (SILVESTRE *et al.*

2013). A identificação de feições geomorfológicas foi um dos principais aspectos considerados neste trabalho, que se utilizou de algoritmos para identificar as áreas de ocorrências de estalactites, na expectativa de obtenção de informações sobre feições estruturais escondidas, responsáveis sobre sua ocorrência. O framework proposto contemplou a navegação e a interação com o modelo 3D da caverna através de uma interface gráfica que utilizou X3D, WebGL e X3DOM associados a um navegador de Internet.

A **Caverna Skoteino** (Grécia) foi mapeada usando três métodos diferentes e se destaca como um estudo de caso excepcional para comparação entre os benefícios e desvantagens de cada um quando usados dentro de um espaço subterrâneo: estação total, varredura a laser e o mapeamento convencional (TYREE *et al.* 2014). Estes consideram que cada método tem uma finalidade diferente, um custo diferente e fornece uma diferença distinta na precisão do mapeamento.

FIGURA 24 - IMAGEM DA CAVERNA SKOTEINO OBTIDA PELA TÉCNICA DE VARREDURA A LASER DE NUVEM DE PONTOS USANDO RISCAN PRO E POINTTOOLS VIEW 1.7 P.



FONTE: Tyree *et al.*, 2014.

A experiência na Caverna Skoteino mostrou que não se deve presumir que a técnica mais recente ou tecnologicamente avançada representa a melhor abordagem. Assim, as duas primeiras técnicas, bússola e trena e estação total, são muito mais fáceis e simples de usar e processar do que a varredura a laser, visão não compartilhada pelo autor deste documento. A precisão do mapeamento melhora com

a estação total e com a nuvem de pontos. A varredura a laser 3D, fornece a maior quantidade de dados, mas com grandes custos em termos financeiros, requisitos de *hardware* e tempo de processamento (FIGURA 24). À medida que se tornam mais acessíveis, os avanços tecnológicos, incluindo a varredura a laser, beneficiam a comunidade arqueológica em suas tentativas de encontrar melhores métodos de representação de sítios arqueológicos. Além disso, o uso de equipamentos como scanners a laser terrestres, é particularmente útil no levantamento de monumentos e locais, como cavernas, que se beneficiaram com modelos 3D. Ao mesmo tempo, não se deve subestimar o tempo e o custo do pós-processamento necessário dos dados gerados por essa técnica. Como tal, nem todos os sítios se beneficiarão de ter um modelo 3D e, na maioria dos casos, nem é necessário ou desejado.

Considerado um dos grandes vazios subterrâneos do mundo e reconhecida como uma das mais famosas “*bird’s nest cave*”, a [Caverna Gomatong](#), localizada na Malásia, tem sido modificada extensivamente por processos biogênicos erosivos. Visando documentar essas alterações, McFarlane *et al.* (2013) utilizaram o TLS, GNSS, aerolevanteamento fotogramétrico com VANT da área de entorno e mesmo levantamento topográfico tradicional no registro da cavidade e das relações entre biologia e morfologia, procurando compreender a gênese das notáveis e largas galerias enquanto estruturas de um carste tropical. A varredura com o scanner Faro Focus 3D resultou em 69 estações, gerando nuvem de 5 bilhões de pontos, com espaçamento de 3.1 mm, processada no *software* Faro 5.0®. Os dados topográficos foram tratados no *software* Compass visando a geração de estatísticas e de dados espeleométricos, como volume para comparação com o modelo 3D.

A análise desses resultados demonstrou que os dados estatísticos do *software* Compass são estimativas grosseiras da proporção entre bloco retangular que envolve o sólido retangular e o volume ocupado pela cavidade. Já a análise do volume obtido com o modelo 3D se mostrou muito maior do que o previsto, considerando as modernas condições hidrológicas. As quantificações que permitiram essas conclusões não teriam sido possíveis se o método de mapeamento não permitisse um alto detalhamento e precisão, destacam os autores. Trabalhos futuros preveem o uso do LiDAR para a discriminação dos ninhos das diversas espécies de morcegos e da implementação de um algoritmo para a contagem destas colônias (MCFARLANE *et al.*, 2013).

Idrees *et al.* (2016) analisaram levantamentos 3D realizados em cavernas entre 2006 e 2016 em quase 50 artigos de várias revistas internacionais e destacam o fato de haver um padrão de procedimentos universal estabelecido sendo que o escaneamento terrestre a laser fornece procedimentos flexíveis que o tornam adaptável para atender diferentes condições em cavernas. Este trabalho, que revisa o estado-da-arte do escaneamento 3D por varredura a laser, faz considerações acerca do design do sensor, da metodologia e processamento de dados, do desenvolvimento de aplicativos e destaca a velocidade sem precedentes da coleta de pontos de alta densidade, a redução do tamanho dos sensores e a cobertura panorâmica quase total (QUADRO 4).

QUADRO 4 - COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS TLS E SUAS PROPRIEDADES BÁSICAS EM RELAÇÃO AOS LEVANTAMENTOS DE CAVERNAS.

Manufacturer	Product	Year	FOV	Range (m)	Points/Sec	Accuracy	Weight (kg)	Wave-length (nm)	Meas. mode
FARO	iQsun 880HE80	2004	360H 320V	30	120,000	±3 mm @ 30 m	14.5	-	TOF
	FARO LS 880HE		360H 320V	76	120,000	±3 mm @ 10 m	14.5	785	PS
	FARO photon 80	2008	360H 320V	76	120,000	≤2 mm @ 25 m	14.5	785	PS
	FARO Photon 120	2009	360H 320V	120	120,000 - 976,000	±2 mm @ 25 m	14.5	785	PS
	FARO Focus 3D 120	2010	360H 305V	120	12,200 - 976,000	± 2 mm	5.0	905	PS
Leica Geosystems	Cyrax 2400	1998	40H 40V	50	800	±6 mm	20.5	532	TOF
	Leica HDS 3000	2004	360H 270V	100	1,800 - 4,000	±4 mm @ 50 m	17	532	TOF
	Leica HDS6100	2009	360H 310V	79	500,000	±1 mm @ 25 m ±2.4 mm @ 50 m	14	650 - 690	PS
	Leica ScanStation C10	2011	360H 270V	300	50,000	±4 mm	13	532	TOF
Riegl	Riegl LMS-Z210	1998	330H 80V	150	12,000	±25 mm	13	900	TOF
	Riegl LMS-Z210i	2004	360H 80V	400	12,000	5 mm (±25 mm single shot)	13	900	TOF
	Riegl LMS-Z420i	2003	360H 80V	350 - 1,000	8,000	±10 mm	16	NIR 905- 1,550	TOF
Trimble	Mensi GS100	2001	360H 60V	100	5,000	±5 mm	13.6	532	TOF
	Trimble GS200	2003	360H 60V	200	5,000	±2 mm	12.8	532	TOF
	Trimble GX 3D	2005	360H 60V	200 - 350	5,000	±3 mm @ 100	12.2	532	TOF
Zoller + Frohlich GmbH	Z+F Imager 5006i	2008	360H 310V	79	500,000	±6.5 mm @ 25 m	14	Visible	PS
	Z+F Imager 5010	2010	360H 320V	187	1,016,027	≤1 mm	9.8	1,500	PS

FONTE: Idrees *et al.*, 2016.

Do ponto de vista histórico, os levantamentos a laser foram inicialmente utilizados em cavernas para documentar os registros rupestres (EL-HAKIM *et al.* 2004)

e mesmo replicar o ambiente, como da Caverna Altamira, em projeto iniciado em 1988. Para os autores, os levantamentos por varredura a laser em ambientes subterrâneos seguem um fluxo de trabalho relativamente comparável com os ambientes externos: planejamento, coleta de dados, filtragens e registros das nuvens de pontos, geração de malha, pós-processamento (redução de dimensionalidade e edição da malha) e divulgação. A total ausência de luz e os espaços confinados seriam os fatores de diferenciação mais notáveis. Por fim, fazem considerações acerca das disciplinas que estão se beneficiando com o escaneamento 3D, Arqueologia, Geomorfologia, Ecologia, Paleoclimatologia, Paleontologia, Geotecnia e a Educação, além dos desafios a serem tratados, como o processamento de grande volume de dados, a integração de dados de fontes diversas, a integração de imagens às nuvens de pontos e o desenvolvimento de pacotes para geovisualização.

A complexidade da geometria das cavernas é um fator reconhecido que dificulta o seu mapeamento, razão do emprego do método de mapeamento tradicional, mesmo que este possibilite um baixo nível de detalhamento e consuma tempo considerável na sua execução. De forma alternativa, levantamentos com o TLS permitem a aquisição de milhões de pontos representados por coordenadas 3D, numa alta densidade e realizado em minutos. Vantagens e desvantagens no uso desses métodos são analisadas por Gallay *et al.* (2015), particularmente em cavernas complexas e extensas como a [Caverna Domica](#), localizada na Eslováquia. O TLS permite fazer o levantamento de locais de difícil acesso ou mesmo inacessíveis, no entanto, enfrenta os desafios em se processar grande quantidade de dados provenientes dos levantamentos e gerar superfícies através destes. Outro grande desafio se refere à acessibilidade e deslocamentos nos espaços subterrâneos, o que impossibilita do TLS se tornar um método universal para mapeamento de ambientes complexos e suplantando o método tradicional, especialmente em condições extremas.

Os autores destacam o fato de que a complexidade da caverna ocasiona a necessidade de um maior número de estações de varredura para a captura integral e redução de oclusões. O fluxo de trabalho proposto consiste em quatro etapas maiores, partindo da coleta de dados e mapeamento preliminar, passando pelo escaneamento a laser, pós-processamento e georreferenciamento e a visualização. Como resultados, são apresentados dados acerca dos 1600 m de galerias levantadas durante cinco dias, envolvendo 327 estações, resultando numa nuvem de 11.9 bilhões

de pontos e RMSE total de 4,18 mm, obtidos com o apoio de pontos de controle por alvos do tipo esferas metálicas. A acurácia obtida no registro dos escaneamentos e o alto nível de detalhe proporcionado pelo método resultaram na captura de detalhes morfológicos que não podem ser obtidos com o mapeamento tradicional, úteis às interpretações espeleogenéticas.

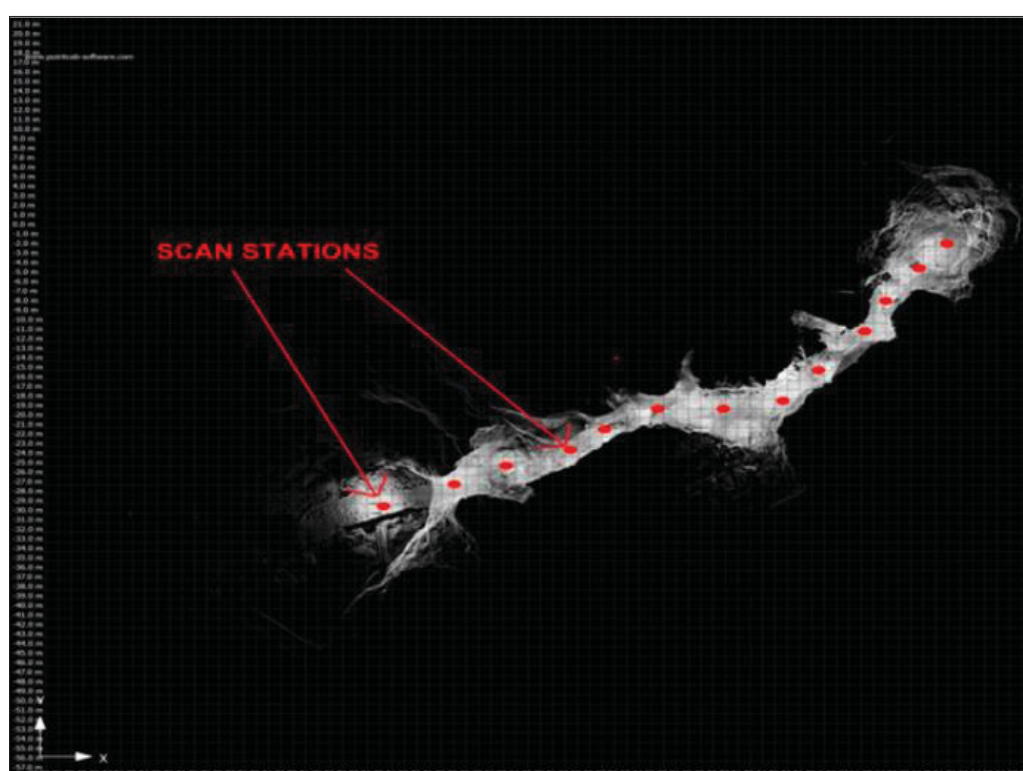
Uma outra pesquisa voltada à obtenção de dados de feições morfológicas para a caracterização espeleogenética de uma cavidade por TLS foi realizada por Silvestre *et al.* (2015) durante os estudos da [Caverna Algar do Penico](#), localizada em Portugal. Para tanto, foram desenvolvidos dois algoritmos para detectar as extremidades de estalactites e para extrair curvas de nível e uma plataforma para visualização das malhas 3D na Web. Segundo os autores, todo o projeto foi desenvolvido com um pequeno número de soluções computacionais como Python, MeshLab, X3D, WebGL e X3DOM. Estes atestam a aplicabilidade do TLS em cavidades subterrâneas, mesmo as de geometria complexa, de difícil acesso e ausência total de iluminação. Mas que, no entanto, alguns problemas surgem do volume de dados coletados, das áreas com oclusões e *gaps* nas nuvens de pontos.

A documentação de sítios históricos tem se beneficiado com os métodos de levantamento atuais, além das formas de divulgação através da Web. Hoffmeister *et al.* (2015) utilizaram o TLS em uma abordagem integrada para a documentação e análise do interior e do entorno da [Caverna Ardales](#), localizada no sul da Espanha, um importante sítio geoarqueológico. Os modelos 3D da caverna e do seu entorno foi integrado a um Sistema de Informações Geográficas - SIG, além de dados geoarqueológicos, utilizados no cálculo da espessura do teto (de 8 a 48 m de espessura), a fim de tentar localizar outras possíveis entradas. Um levantamento de alta resolução (0.1 milímetros por pixel) de gravuras rupestres foi realizado, com possíveis representações de flamingos. Os autores destacam que o tamanho do instrumento não parece ser compatível com espaços muito estreitos, necessitando de pelo menos 2m de distância de um alvo e que problemas ainda precisam ser resolvidos, a exemplo do armazenamento, troca, controle de qualidade e metadados dos modelos 3D, tanto quanto os problemas específicos de cada método.

Considerando que as cavernas são ambientes frágeis e podem sofrer com os impactos humanos advindos da atividade turística, mapas com alto nível de detalhe são necessários para o ordenamento da utilização do espaço. Com base nessa

premissa, Yakar *et al.* (2016) realizaram um levantamento com TLS numa caverna na Turquia, sendo que o objetivo deste estudo era avaliar a capacidade da varredura por scanner terrestre em produzir modelos tridimensionais das cavernas na tentativa de prover soluções para os problemas propostos. Informações sobre o tipo de sensor, alcance e acurácia são apresentadas, além de uma série de vantagens e áreas de aplicação, além de problemas advindos da geometria complexa e de espaços muito restritos, fatores a serem considerados quando da sua utilização (FIGURA 25).

FIGURA 25 - ESTAÇÕES DE VARREDURA DE UMA CAVERNA NA TURQUIA.



FONTE: Yakar *et al.*, 2016.

O TLS tem permitido o levantamento de tetos altos em cavernas, propiciando outras formas de mapeamento subterrâneo com nível de detalhe e acurácia sem precedentes, vindo a dar suporte a pesquisas geomorfométricas, numa combinação de dados dos meios epígeo e hipógeo. Numa demonstração dos benefícios do mapeamento de alta resolução e modelagem 3D no entendimento da paleohidrografia, Gallay *et al.* (2016) realizaram um outro levantamento por TLS da Caverna Domica, localizada na Eslováquia com 327 estações registradas de forma semiautomática. E para a realização do cálculo das espessuras do teto em relação à topografia externa,

foi feito um aerolevanteamento por LiDAR que resultou num MDT com resolução de 1cm/px. Este trabalho visou o registro dos paleocanais no teto da cavidade, evidência de atividade paragenética numa determinada fase de evolução da cavidade, uma vez que os paleocanais se desenvolvem sob um regime hidrológico específico. Mais do que isso, esta pesquisa pretendeu apresentar uma metodologia para a obtenção de informação morfométrica dos paleocanais usando um modelo 3D de alta resolução e análises geomorfológicas.

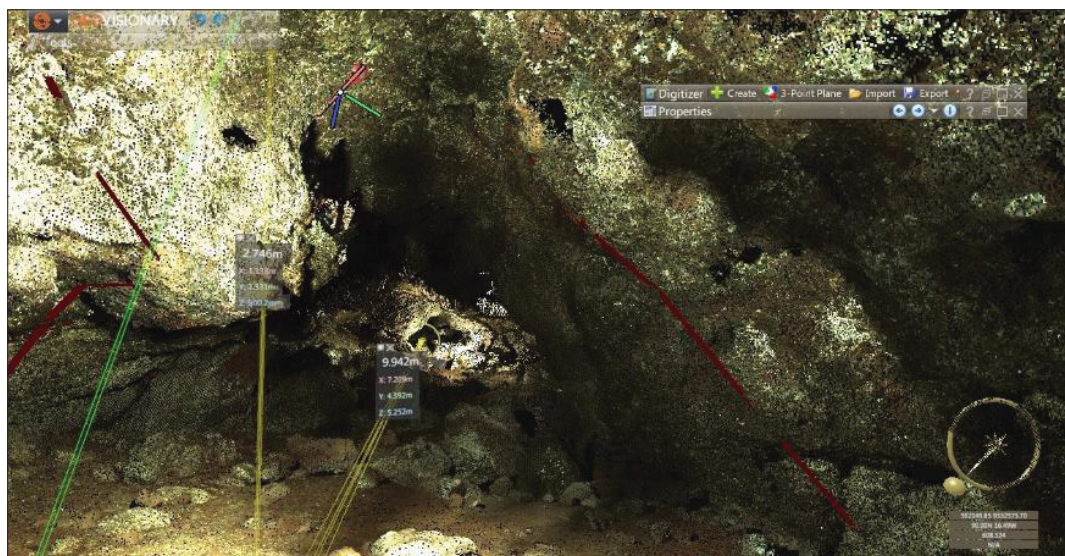
Os resultados apontam a facilidade em se realizar as medidas dos canais através dos MDT que, combinado aos métodos de modelagem digital 3D para a reconstrução de superfícies, tornam possível de se derivar propriedades geomorfológicas da cavidade. Os dados levantados, associados a estudos prévios sugerem uma evolução multinível em alternância a fases de fluxo hídrico gerando incisões e acúmulo de sedimento. Estas incisões são o resultado de fases de atuação da paragenese durante a formação dos tetos, sendo dado importante na compreensão dos processos de gênese e evolução da cavidade.

No Brasil, particularmente em Minas Gerais e no Pará, uma série de levantamentos por varredura a laser vem sendo feita por mineradoras por exigência legal nos processos de licenciamento ambiental. No entanto, desconhece-se os detalhes e a qualidade destes levantamentos, disponíveis para consulta apenas no órgão ambiental dos estados. Sua aplicação é limitada pelo alto custo de utilização (ARAÚJO *et al.* 2015) e condições adversas do ambiente subterrâneo (ARAÚJO, 2016). Em sua dissertação de mestrado, este autor abordou o levantamento de parâmetros geomecânicos de uma caverna em Carajás, Estado do Pará por TLS e o emprego da Realidade Virtual - RV na identificação e mensuração das estruturas geológicas (FIGURA 26).

Para o autor, a RV “permite a visualização e interação de ambientes que se pretende analisar em tempo real utilizando arquivos de pequeno formato”. A partir desta interação com o ambiente virtual, pode-se levantar parâmetros físicos da rocha em diferentes pontos da cavidade e daí realizar a classificação geomecânica da cavidade. O resultado são os mapas temáticos da cavidade com a classificação do Índice de Qualidade da Rocha (RQD) obtido por interpolação IDW e os modelos de classes geomecânicas. Para o autor, as pesquisas com o uso de RV para avaliação de dados geotécnicos é ainda incipiente no Brasil e mesmo no exterior, mas que

apresenta grande potencial de utilização ao permitir atividades antes só possíveis em campo e destaca algumas desvantagens, como a necessidade de treinamento técnico para uso do software, disponibilidade de equipamento compatível com o uso do software, necessidade de iluminação bem distribuída e um maior número de estações para evitar oclusões.

FIGURA 26 – EXTRAÇÃO DE PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DA CAVERNAS EM FORMAÇÃO FERRÍFERA (N4E-0026) LOCALIZADA EM CARAJÁS, PA.



FONTE: Araújo, 2016.

Ambientes subterrâneos são comumente caracterizados por uma morfologia complexa ou por grandes áreas e às vezes precisam ser levantados e mapeados com alta resolução e nível de detalhe, dada alguma necessidade específica. Este nível de detalhamento permite identificar estruturas geológicas como falhas e fraturas, assim como obter valores de direções e inclinações, incluindo locais de difícil acesso visando a compreensão da gênese e evolução do desenvolvimento da cavidade. Neste sentido, Pukanská *et al.* (2017) avaliaram diferentes métodos de levantamento de estruturas morfológicas em cavernas, como com o TLS, fotogrametria de curta distância e por *Image Scanning (IS)* na [Caverna Belianska](#), Eslováquia.

Os resultados desta comparação ressaltam o fato de o levantamento a laser poder ser tomado como referência por fornecer os dados mais acurados. A fotogrametria de curta distância gera resultados similares em termos de acurácia, a um menor custo, com textura fotográfica, desde que as condições de iluminação

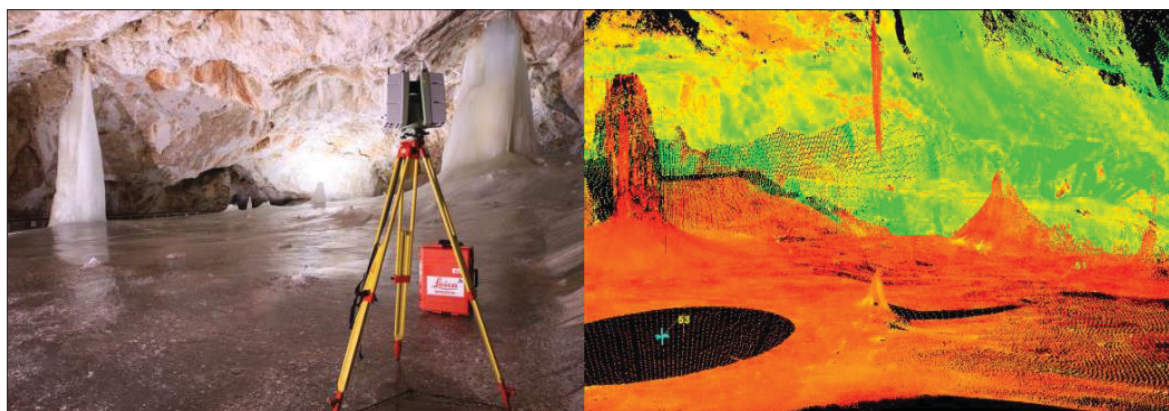
sejam respeitadas, tanto quanto os processamentos dessas imagens. Os piores resultados em termos de acurácia e qualidade geral nessa análise couberam ao método fotogramétrico *Image Scanning*. Por fim, concluem que, uma vez que os métodos de levantamento possuem vantagens e desvantagens, não é possível afirmar que haja um método definitivo. Cada espaço subterrâneo possui suas características e estas devem ser levadas em conta quando da escolha de um em específico.

Atualmente, várias cavernas eslovacas vêm sendo documentadas por métodos modernos, o que motivou Bartoš *et al.* (2018) a avaliarem as possibilidades das tecnologias de levantamento para o seu mapeamento, além de contribuir na criação de regras para o mapeamento espeleológico de alto nível de detalhe e acurácia. Desde 2011 sua equipe vem realizando levantamentos em diversas cavidades, de *shows caves* a cavernas fechadas ao público: Dobšinská Ice Cave (2011 e 2012), Medvedia Cave (2013), Dúpnica Cave (2013), Ochtinská Aragonite Cave (2014), Belianska Cave (2014). A caverna de gelo [Dobšinská](#) foi levantada por escaneamento a laser visando a modelagem digital das alterações no volume do preenchimento por gelo, mais por questões de manutenção das estruturas de visitação e segurança aos turistas do que por questões ambientais (FIGURA 27).

Trabalhos futuros empregando levantamentos fotogramétricos e a comparação destes para com as malhas geradas por nuvem de pontos por varredura a laser serão realizados de forma a avaliar a acurácia dos modelos gerados por laser, uma vez que este pode não refletir exatamente a superfície do gelo, dada possível penetração no gelo. A [Caverna Dúpnica](#) foi documentada em alta resolução na expectativa de subsidiar interpretações de caráter geoespeleológico a partir do registro de falhas e fraturas, incluindo medidas de direção e mergulho das camadas até em áreas inacessíveis. A caverna de aragonita [Ochtinská](#) possui morfologia variada, com desenvolvimento labiríntico, grande quantidade de cúpulas, profundos ou rasos canais no teto, nichos. A gruta tem importância reconhecida pela riqueza e variedade de depósitos de aragonita, criado sob condições hidroquímicas e climáticas específicas em cavidades subterrâneas fechadas. Por fim, a caverna Belianska, com desenvolvimento horizontal de 3.829 m e profundidade de 168 é iluminada desde 1896. O levantamento da Caverna Belianska representou principalmente a varredura a laser terrestre em três partes principais da caverna, conhecidos como Pipe Dome, Musical Hall e Discoverer's Dome. O TLS foi novamente utilizado, gerando 31

estações de varredura e nuvem contendo aproximadamente 200 milhões de pontos. Posteriormente, a nuvem de pontos foi usada para gerar malhas, extrair seções verticais e perfis longitudinais de partes individuais da caverna. Ainda que seja empregado o termo mapeamento, os autores não apresentaram os mapas finais das cavidades compostos a partir das extrações vetoriais dos modelos 3D gerados.

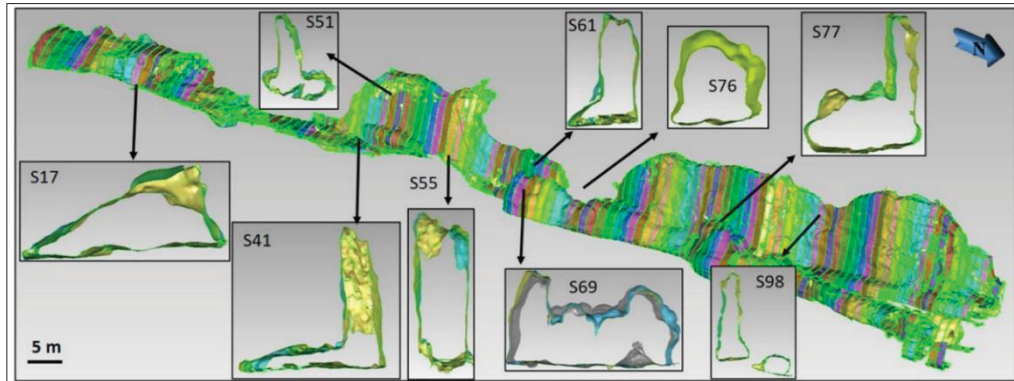
FIGURA 27 – VARREDURA A LASER DA CAVERNA DE GELO DOBŠINSKÁ E A NUVEM DE PONTOS FINAL.



FONTE: Bartoš *et al.*, 2018.

Ainda na linha dos levantamentos 3D enquanto subsídio às análises geomorfológicas e espeleogenéticas, Fabbri *et al.* (2017) utilizaram um FARO Laser Scanner CAM2 Focus3D para a modelagem da caverna Grotta A em alto nível de detalhe através de 16 estações de escaneamento para um total de 150 m de desenvolvimento. O modelo 3D das paredes permitiu realizar medidas morfométricas em diferentes ambientes da cavidade, além de calcular volumes e distinguir as zonas de ocorrência de cúpulas, condutos freáticos e diques de basalto (FIGURA 28). Análises da rugosidade das paredes permitiram o reconhecimento de morfologias como os megascallops, formas de dissolução diferencial e crostas minerais. Essas observações permitiram discernir entre diferentes processos de carstificação e fases espeleogenéticas, destacando a importância da condensação-corrosão no alargamento da passagem da caverna de forma quantitativa.

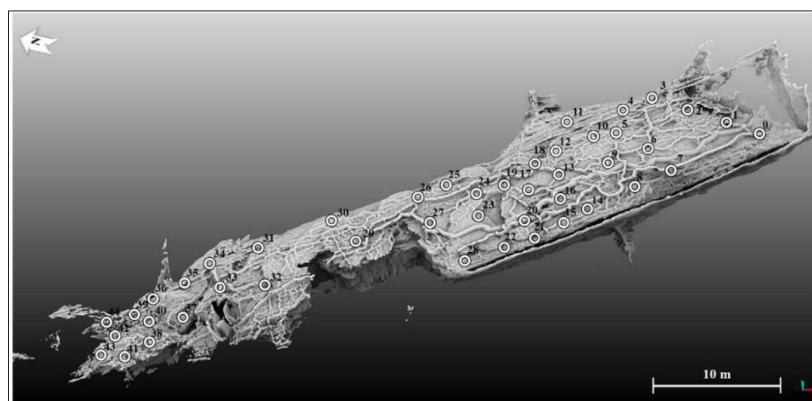
FIGURA 28 - LEVANTAMENTO TOTAL DA CAVERNA GROTTA A SUBDIVIDIDO EM 134 SETORES ORTOGONAIS DE 1 M. DIFERENTES PERFIS DE SEÇÃO TRANSVERSAL COM DIFERENTES ELEMENTOS MORFOLÓGICOS SÃO DESTACADOS NAS INSERÇÕES.



FONTE: Fabbri *et al.*, 2017.

Levantamentos por TLS e por fotogrametria foram realizados na numa pequena gruta no norte da Itália e foram comparados na capacidade de mapear elementos morfológicos em pequena e média escala. Esses levantamentos permitiram a reconstrução de estágios da evolução de morfologias resultantes de processos paragenéticos, como os canais no teto e pendentes e sua relação com a morfologia, depósitos clásticos, espeleotemas e elementos estruturais. Para Waele *et al.* (2019), a combinação do TLS e da fotogrametria pode ser utilizada para se estudar e medir morfologias em escalas milimétricas a centimétricas em abordagens geomorfológicas, revelando as condições hidrológicas de evolução desses ambientes, a exemplo da [Caverna Ca' Castellina](#).

FIGURA 29 – VISTA DO TETO DA CAVERNA CA' CASTELLINA COM A INDICAÇÃO DAS 44 ESTAÇÕES DO TLS.



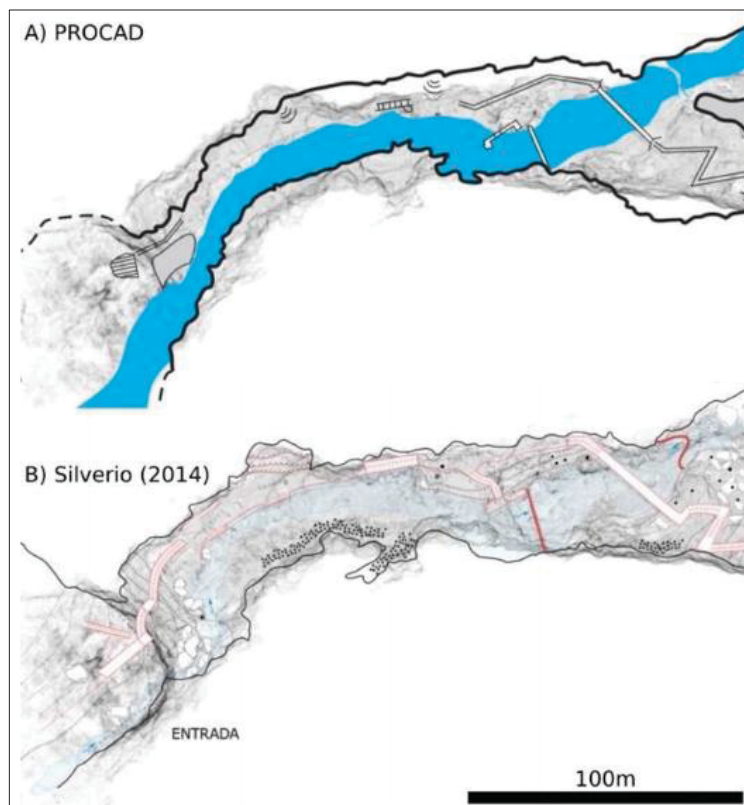
FONTE: Waele *et al.*, 2017.

Pesquisas acadêmicas com a utilização da varredura a laser de cavernas ainda são incipientes no Brasil, estando muito mais associadas a processos de licenciamento ambiental de empreendimentos minerários. Como exemplo de trabalho acadêmico, pode-se citar os trabalhos de Grohmann *et al.* (2019), que realizaram o escaneamento a laser do setor turístico da [Caverna do Diabo](#). Esta caverna se localiza no Parque Estadual Caverna do Diabo e é gerida pela Fundação Florestal, sendo uma das mais conhecidas cavernas do Brasil, é a maior caverna do Estado de São Paulo em desenvolvimento e única com infraestrutura para o turismo de massa, havendo iluminação elétrica, escadarias e passarelas (SILVERIO, 2014).

Este projeto teve o objetivo de produzir um modelo tridimensional da parte turística da Caverna do Diabo com uso do TLS que, uma vez georreferenciado, permite comparações com mapas espeleológicos de trabalhos anteriores (1964, 1998, 2013 e 2014). O levantamento foi realizado a partir de 36 varreduras registradas a partir das esferas padrão, que geraram uma nuvem de 1.15 bilhões de pontos. As esferas utilizadas enquanto pontos de controle tiveram suas coordenadas definidas a partir de levantamento topográfico com Estação Total que tomaram duas estações de GNSS instaladas na área externa. Uma edição manual da nuvem foi feita com a intenção de se remover os pontos originados da presença e circulação de turistas e de gotículas de água em suspensão. Na sequência foi feita a simplificação da nuvem empregando um espaçamento de 5 cm entre os pontos, de forma a facilitar o processamento e a manipulação desta, agora com 17 milhões de pontos.

A sobreposição do mapa espeleológico do Projeto Caverna do Diabo - PROCAD (1998) ao modelo 3D mostrou haver diferenças que refletem as limitações técnicas de instrumentos da época, quanto também de uma parcela de subjetividade (FIGURA 30). Tais diferenças foram minimizadas em relação ao mapeamento de 2014, onde o emprego da Estação Total gerou maior detalhamento e precisão dos limites dos condutos. A nuvem obtida a partir da primeira decimação (17 milhões de pontos) foi novamente simplificada para 1.000.000, 500.000, 250.000 e 50.000 pontos e os volumes calculados tiveram pouca variação, enquanto os tamanhos dos arquivos caíram significativamente. Trabalhos futuros preveem a realização de novas varreduras para a complementação das áreas com oclusões e mesmo a ampliação do modelo da cavidade, devendo ser utilizado para a implementação de passeios virtuais.

FIGURA 30 - COMPARAÇÃO ENTRE A NUVEM DE PONTOS DA CAVERNA DO DIABO PARA COM OS MAPAS ESPELEOLÓGICOS DO PROCAD (A) E SILVERIO (B).



FONTE: Grohmann *et al.* 2019.

A [Caverna Ochtiná](#), localizada na Eslováquia, é uma ocorrência geológica, geomorfológica e mineralógica singular conhecida no mundo todo. Formada em lentes de calcário cristalino do Paleozóico, parcialmente metamorfizados e alterados em ankerita e siderita, seu desenvolvimento é de apenas 300m. Foram levantados por TLS, os condutos, corpos d'água, passarelas, tanto quanto as flores de aragonita, numa nuvem de 121 milhões de pontos gerada a partir de 54 varreduras e georreferenciada a partir de estações localizadas no exterior e entrada da cavidade. Alguns setores foram levantados por fotogrametria de curta distância para geração de modelos para comparação com o modelo 3D do scanner, tendo apresentado desvio padrão de 2 a 6 mm. Segundo Pukanská *et al.* (2020), as análises dos detalhes da comparação entre os dois métodos confirmam que a nuvem de pontos do levantamento fotogramétrico é significativamente mais densa e permite que a superfície do modelo seja mais detalhada e suave do que por TLS, tendo a vantagem

de prover dados em formato RGB para cada ponto. Neste novo mapeamento de detalhe, criou-se uma plataforma para um estudo genético e morfológico mais detalhados, dando suporte à tomada de decisões nas questões de proteção ambiental e em uso turístico.

Walters et al. (2020) apresentam problemas advindos do uso do TLS em grande cavernas usando os resultados dos levantamentos da [Caverna Škocjanske](#) como exemplo. Esta caverna, Patrimônio Cultural declarado pela UNESCO, tem 6 km de desenvolvimento e desnível de mais de 145 m e está inserida no projeto de levantamento dos 10 maiores salões de cavernas do mundo. Neste projeto foi utilizado um scanner Riegl VZ-400, escolhido pela sua robustez e alcance de cerca de 400m, tendo utilizado estações externas de referência para obtenção das coordenadas para os pontos de controle, num total de 370 estações de varredura e nuvem de 8.3 bilhões de pontos, consumindo 250 GBytes de espaço de armazenamento.

De forma a conectar as feições da superfície para com as feições da cavidade, foi realizado um voo com um VANT para levantamentos fotogramétricos e por LiDAR ao longo de uma dolina de colapso. Na comparação destes resultados para com o mapeamento tradicional anterior (2015), os autores verificaram que os dois levantamentos coincidiram muito bem, o que reforça a acurácia de ambos os métodos. O volume calculado a partir do modelo 3D de 6.13 milhões de m³ coincide razoavelmente com cálculos anteriores de 5 milhões de m³.

Os problemas identificados não se resumem ao transporte de equipamentos, principalmente em situações de passagens estreitas, verticais ou grandes e longas passagens (FIGURA 31). Para os autores, é necessária a manutenção do rigor científico, necessitando de disciplina para a manutenção dos padrões no levantamento, mesmo quando os espeleólogos estejam com frio, fome ou cansados. Grande espeleotemas criam zonas de sombra, gerando a necessidade de um maior número de estações, sendo que algumas áreas serão impossíveis de serem escaneadas. É virtualmente impossível escanear em cores uma grande caverna.

FIGURA 31 - VARREDURA A LASER DA CAVERNA ŠKOCJANSKE.



FONTE: Walters *et al.*, 2020.

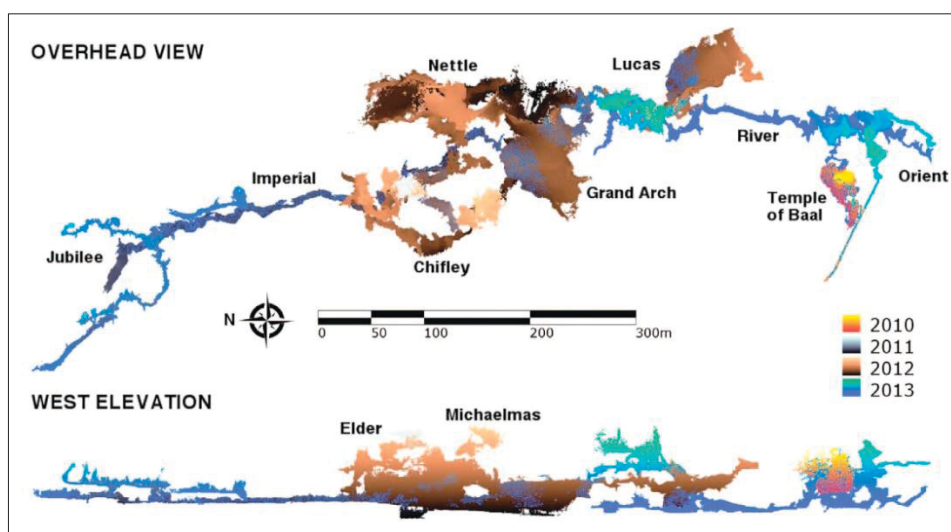
Os erros são pequenos em situações em que se possa fechar um *loop*, mas que podem se tornar significativos em longas passagens. A varredura de longas distâncias deve ser evitada porque os erros podem se tornar significativos. A digitalização 3D é um processo caro, tanto em despesas iniciais, manutenção e tempo necessário para processar os dados, sendo que o valor deve ser correlacionado com os requisitos do usuário. Outros métodos podem ser menos dispendiosos, mas não fornecerão os detalhes cartográficos tanto quanto a varredura a laser.

2.4.1.2 - SISTEMA DE MAPEAMENTO MÓVEL (MMS)

Ainda que se considere que o estado-da-arte dos métodos de levantamento e mapeamento de cavernas seja o escaneamento a laser terrestre, este é limitado pelo fato das medidas serem tomadas de estações estáticas, o que tende a diminuir a eficiência do processo, tanto quanto por ocasionar oclusões e “buracos” (ZLOT *et al.*

2014). Como alternativa, pesquisadores têm utilizado sistemas de mapeamento móvel - MMS, onde um laser scanner portátil é carregado por um simples operador enquanto caminha, escala ou rasteja em uma cavidade. Aparentemente tendo realizado o primeiro levantamento desta natureza aplicado em ambientes subterrâneos, os autores apresentaram a aplicação desta tecnologia em dois sistemas das **cavernas Jenolan** na Austrália (FIGURA 32). Segundo estes, o uso aparentemente limitado dessas tecnologias em cavernas se justifica pelo alto custo dos equipamentos, tanto quanto pelo peso, tamanho e fragilidade em relação às características do ambiente subterrâneo. E definem o mapeamento móvel enquanto uma técnica através do qual as medições do ambiente são realizadas enquanto se move continuamente através dele.

FIGURA 32 - NUVENS DE PONTOS DO SISTEMA DE CAVERNAS JENOLAN PROJETADAS EM PLANTA E PERFIL LONGITUDINAL COM A DIFERENCIAÇÃO DOS QUATRO LEVANTAMENTOS DAS VISITAS DE 2010, 2011, 2012 E 2013, NUM TOTAL DE MAIS DE 2,7 BILHÕES DE PONTOS.



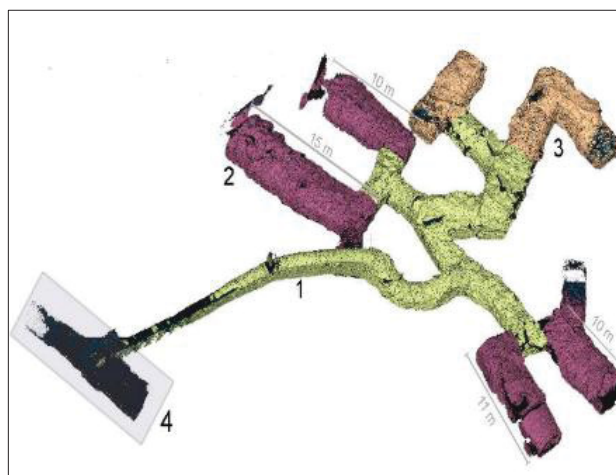
FONTE: Zlot *et al.*, 2014.

Soluções comerciais existentes são caras e exigem o uso do GNSS para o posicionamento, podendo se utilizar de várias plataformas como carros, VANTs, barcos. As aplicações na mineração têm gerado um mercado e contribuído na transição para o mapeamento móvel em ambientes subterrâneos, numa combinação de mobilidade, versatilidade e facilidade de manuseio que resultam numa maior eficiência na coleta de dados e menor ocorrência de oclusões e buracos. E por ser um processo automatizado, elimina os erros humanos inerentes às técnicas por levantamento manual. Os movimentos do sensor são detectados por uma unidade de

medida inercial (IMU) que provê medidas de velocidades angulares e acelerações lineares, de forma a estimar a trajetória do scanner. Pequenos erros na forma de *drifts* podem ocorrer com o aumento da trajetória, necessitando de algoritmos para sua correção.

A varredura terrestre por laser tem se mostrado uma ótima opção para o registro de superfícies complexas em alta resolução mesmo em ambientes de baixa luminosidade, normalmente necessitando de várias estações. Uma alternativa é a utilização de um sistema de mapeamento móvel como relata Farella (2016), que apresenta a aplicação deste sistema com um GeoSlam Zeb1 na [Grotta di Seiano](#) em fortificações militares da Primeira Guerra Mundial, ambas na Itália (FIGURA 33). No primeiro estudo de caso, devido ao comprimento da galeria e à falta de características geométricas bem definidas em sua parede, eram esperados erros no alinhamento.

FIGURA 33 – FORTIFICAÇÕES SUBTERRÂNEAS DA I GUERRA MUNDIAL: GALERIA DE CONEXAO (1), BATERIA DE ARTILHARIA (2), QUARTOS (3), CONEXÃO COM A TRINCHEIRA (4).



FONTE: Farella, 2016.

Na segunda parte, a pesquisa focou em procedimentos adequados para a representação tridimensional e visualização de passagens subterrâneas complexas. O instrumento, apto a fazer o registro *outdoor* e *indoor*, não registra cores e nem informações de intensidades e foi selecionado pela sua portabilidade, facilidade de uso e possibilidade de operação sem uso de sinal de GNSS. No levantamento dos 800 m do túnel o RMSE foi de 9,44 m, provavelmente por erros na identificação dos centros dos alvos dada a baixa resolução e nível de ruído do instrumento e/ou deformação dos blocos adquiridos. Em suma, ainda que o mapeamento móvel possa

registrar estruturas complexas, há a necessidade de pós-processamento para checar a precisão e confiabilidade dos levantamentos. E caso haja necessidade de informação textural, a fotogrametria deverá ser utilizada em complemento. A velocidade constante no levantamento é fator crítico e é aconselhável fazer um *overlap* de 20% entre as aquisições de dados consecutivas.

Lauterbach *et al.* (2019) se propuseram a analisar o uso de um sistema de mapeamento móvel de uma parte de um tubo de lava do vulcão [La Corona](#) na Espanha. O sistema, montado em uma mochila, foi avaliado segundo sua capacidade de otimização contínua durante o mapeamento (FIGURA 34).

FIGURA 34 - A MOCHILA COM OS LASER SCANNERS RIEGL VZ-400 E VELODYNE VLP16 LITE.



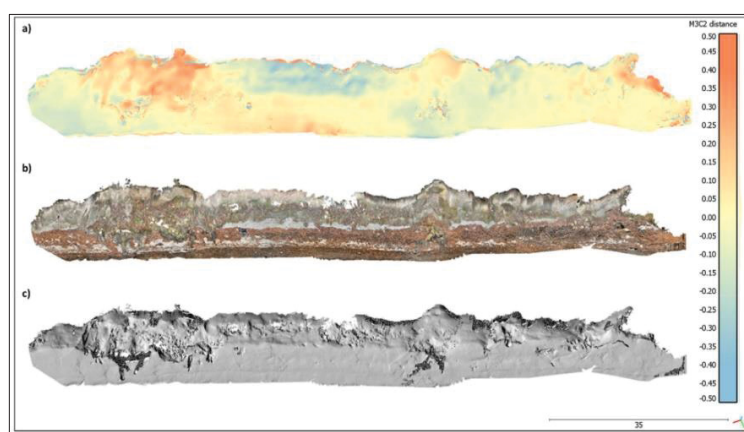
FONTE: Lauterbach *et al.*, 2019.

Um dos objetivos deste projeto era testar tecnologias para exploração e mapeamento em baixas condições de luminosidade, como os tubos de lava e terrenos acidentados e na estimação de trajetórias ou na otimização sequencial. Os terrenos e ambientes acidentados requerem um maior número de estações para se evitar oclusões no levantamento. Os *drifts*, já esperados, foram corrigidos e a precisão foi definida a partir de dados estatísticos, sendo que 95% dos pontos possuem erros de até 20 cm e 80% têm erros menores que 10 cm.

Lançados em 2020 pela Apple Inc., o Ipad Pro 2020 e do iPhone 12, rapidamente começaram a ser utilizados no mapeamento móvel de feições terrestres¹¹. E de forma a avaliar as características técnicas do sensor LiDAR destes aparelhos e da precisão dos levantamentos, Luetzenburg *et al.* (2021), realizaram o imageamento de um trecho de um penhasco costeiro na Dinamarca e compararam com um levantamento fotogramétrico da mesma área.

Os resultados do levantamento pelo LiDAR do Iphone e do Ipad resultaram em modelos de alta resolução e acurácia absoluta de +- 1 cm. Segundo os autores, a versatilidade no manuseio supera as limitações do alcance (5 m), tornando este dispositivo uma alternativa de bom custo-benefício com ampla possibilidade de aplicações nas geociências e na educação. Os autores destacam o fato do alcance ser um limitador ao levantamento de curta distância e de escala pequena à média, havendo também limitações em relação à autonomia. Destacam também todo o potencial de utilização em diversas áreas do conhecimento, assim como o fato de sua precisão não atingir o nível de um levantamento fotogramétrico.

FIGURA 35 - DISTÂNCIAS ENTRE A NUVEM DE PONTO DE REFERÊNCIA DO SFM MVS E A NUVEM DE PONTOS DO IPHONE CALCULADAS EM 5 MILHÕES DE PONTOS COM SOBREPOSIÇÃO TEÓRICA DE 75%; NUVENS DE PONTO REAMOSTRADO A 0,05 M DE ESPAÇAMENTO NOMINAL MÍNIMO (A); MODELO TEXTURIZADO DO IPHONE LIDAR (B); MODELO SOMBREADO POR IPHONE LIDAR (C);



FONTE: Luetzenburg *et al.*, 2021.

¹¹ Por ser uma tecnologia muito recente, a bibliografia é ainda escassa, no entanto é possível observar que modelos gerados por este dispositivo já vêm sendo disponibilizados no site Sketchfab, como esses exemplos: Heshikiya-Hijagama Cave (<https://skfb.ly/o9uQr>); Ermellino Cave (<https://skfb.ly/o8UpX>); Isoppo Cave (<https://skfb.ly/o8UpN>); Cueva de Torre (<https://skfb.ly/o9uQw>); King Arthur's Cave (<https://skfb.ly/ooGyQ>); Carn Euny Fogou (<https://skfb.ly/opOYG>); Indian Cave (<https://skfb.ly/oslKY>); Railway tunnel (<https://skfb.ly/6XzQy>). Acessado em 22 de março de 2022.

A representação do ambiente subterrâneo de uma maneira gráfica é uma das atividades mais trabalhosas da Espeleologia, sendo que os mapeamentos topográficos podem proporcionar resultados com a precisão necessária para a maioria das aplicações. No entanto, a disponibilidade de tecnologia LiDAR em dispositivos móveis abre novas possibilidades de representação 3D de cavidades pequenas, de forma simples e objetiva (JIMÉNEZ *et al.*, 2022 no prelo). A tecnologia LiDAR vem sendo implementada em dispositivos móveis da Apple com a finalidade de melhorar o processamento fotográfico e seus resultados, notadamente o foco e as fotos em situação de baixa luminosidade. Uma vez disponível a tecnologia, os desenvolvedores de aplicativos a estão utilizando para a geração de modelos 3D. Os autores se viram surpreendidos pela qualidade e pela simplicidade na utilização, além do tempo reduzido para o levantamento total de cavidades pequenas que vêm levantando na Espanha. O alcance ainda é consideravelmente limitado, restringindo a 5m, e os levantamentos em mais alta qualidade exigem muito do processador e memória, ocasionando aquecimento e diminuição da autonomia. Um bom resultado depende também da boa iluminação do local, tanto em termos de qualidade, quanto tempo. E pelo fato do controle do escaneamento ser feito visualmente pela tela do dispositivo, pode haver dificuldade na progressão, com tropeços e quedas. Os modelos gerados podem ser exportados em diversos formatos e carregados na página Sketchfab, o mais conhecido repositório de modelos 3D. Há, também, opções para visualização em Realidade Aumentada, o que poderá contribuir na divulgação do mundo subterrâneo.

Mas o mapeamento móvel não se restringe ao deslocamento terrestre. Tabib *et al.* (2020) utilizaram um VANT autônomo para o mapeamento de uma gruta nos EUA. Neste trabalho, os autores apresentam um método para levantamento de cavernas em completa escuridão, com um veículo aéreo não tripulado autônomo, equipado com uma câmera de profundidade para mapeamento (FIGURA 36). Para os autores, o mapeamento de cavernas é uma atividade que oferece muitos riscos, sendo os robôs autônomos podem reduzir essa exposição a riscos, sendo que o desafio no mapeamento de cavidades pequenas continua dadas as baixas frequências de operação e a inexistência de infraestrutura de comunicação. Como a topografia do ambiente pode não ser conhecida *a priori*, os operadores precisam receber *feedback* em tempo real dados de alta resolução que codificam passagens grandes e pequenas.

FIGURA 36 – SISTEMA DE EXPLORAÇÃO AUTÔNOMO EM OPERAÇÃO NO DINNING ROOM DA CAVERNA LAUREL.



FONTE: Tabib *et al.*, 2020.

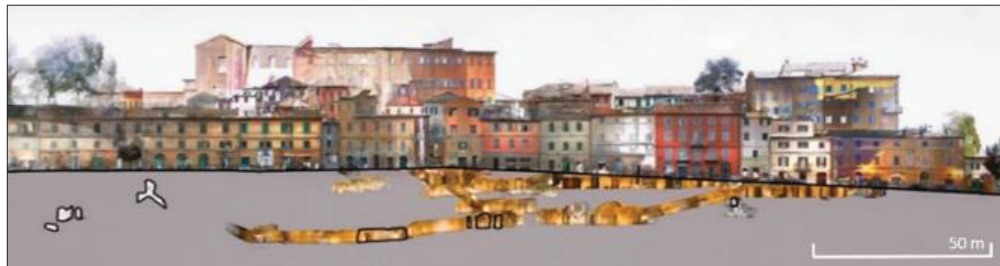
A partir desse *feedback*, os operadores transmitem orientação ao robô autônomo para priorizar certos acessos sobre outros. O planejamento de uma missão de exploração de um espaço desconhecido com um robô aéreo precisa satisfazer três requisitos: reduzir a entropia do mapa de uma área desconhecida, manter a operação livre de colisões e retornar planos de movimento em tempo real.

O registro do Patrimônio Cultural, que muitas vezes engloba espaços subterrâneos como cavernas e minas históricas, há muito vem se beneficiando com os métodos de levantamento, particularmente o TLS e o MMS. No mapeamento desses ambientes para fins de documentação, a principal necessidade é a obtenção de uma representação completa, confiável e detalhada dos espaços construídos e sua geometria (DI STEFANO *et al.* 2021). Os autores apresentam suas experiências de mapeamento em ambientes subterrâneos testando as diferentes soluções móveis portáteis para se obter uma modelagem 3D precisa e confiável. Os testes foram realizados na [Caverna Camerano](#), localizada na Itália, caracterizada pela complexidade volumétrica, más condições de iluminação e difícil acessibilidade (FIGURA 37). Para além de mostrar as diferenças nos instrumentos tecnológicos utilizados para levantamentos 3D, são discutidas as vantagens e as desvantagens dos três sistemas utilizados e fornecidas as melhores práticas e regras para a coleta de dados 3D.

Atualmente há uma variedade de tecnologias de aquisição de dados, mas muitas das atividades de levantamento estão sendo feitas com resultados inferiores aos inicialmente pretendidos, às vezes sem uma clara avaliação de qualidade. A seleção de um método de levantamento deve ser feita a partir do conhecimento técnico do método, devendo levar em consideração alguns requisitos. Agilidade: instrumentos pesados devem ser evitados em contextos subterrâneos dados os contratempos frequentes e baixa acessibilidade; Custo-benefício: os melhores resultados devem ser alcançados com custos razoáveis; Facilidade de uso: essas tecnologias são frequentemente gerenciadas por pessoal não especializado; Acessibilidade: o Patrimônio Cultural geralmente sofre uma falta generalizada de recursos, logo, soluções de baixo custo são preferíveis. A Caverna Camerano é um complexo de salões e galerias que se estende por 3 km e está localizado abaixo do centro histórico da cidade, sendo de origem totalmente antropogênica com registros mais antigos datando do ano de 1327.

Os levantamentos foram feitos com dois sistemas comerciais, o KAARTA Stencil 2-16 e o GeoSLAM Zeb Horizon e um protótipo, GuPro, baseado em fotogrametria. As nuvens de pontos dos três levantamentos foram utilizadas para avaliar a capacidade de mapeamento em diferentes espaços subterrâneos, usando um levantamento por TLS realizado em 2019 como referência. Análises métricas e visuais foram empregadas para avaliar os resultados demonstraram que todos os sistemas estão aptos a capturar rapidamente a geometria das cavidades, com erros variando entre 1 e 3 cm, ainda que algumas tecnologias sejam mais efetivas e menos sensíveis ao ambiente subterrâneo. Critérios como tempo de captura, densidade de nuvem de pontos, necessidade de iluminação, informação radiométrica, expertise, foram consideradas. A conclusão é de que os levantamentos com tecnologia LiDAR são mais adequados aos usuários não especialistas, enquanto que a solução fotogramétrica fornece uma reconstrução mais detalhada e completa, ainda que mais complexa na aquisição e no processamento. Enquanto a fotogrametria exige a iluminação de ambientes, o MMS tem o inconveniente de gerar *drifts* entre os cenários capturados. Uma análise das necessidades deve ser feita *a priori* para se decidir qual método deverá ser empregado.

FIGURA 37 – PERFIL LONGITUDINAL DOS LEVANTAMENTOS DO CENTRO DA CIDADE DE CAMERANO (ITÁLIA) E DAS CAVERNAS.

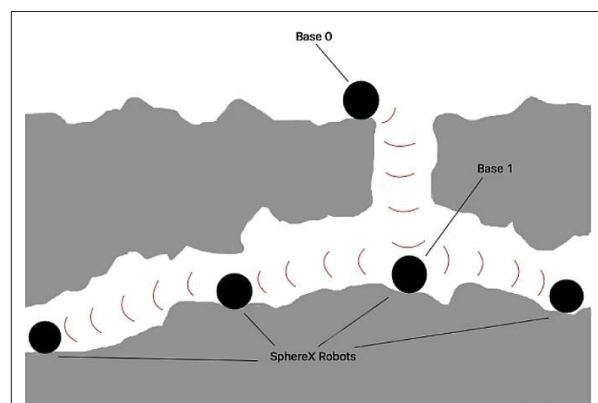


FONTE: Di Stefano *et al.*, 2021.

As imagens de alto detalhe da Lua e de Marte obtidas há pouco tempo revelam centenas de feições do tipo dolinas de colapso que podem ser entradas de cavernas remanescentes de tubos de lava. Nessas formações é possível que haja o registro geológico bem preservado de estruturas evidenciando antigos fluxos hídricos e a habitabilidade. E dadas as características do terreno não seria adequado utilizar veículos com rodas, motivo pelos quais Kalita *et al.* (2018) propõem a utilização de robôs esféricos. Cada um desses robôs esféricos teria a capacidade de saltar, rolar ou voar em curtas distâncias em baixa gravidade.

Neste trabalho, propõem técnicas para o mapeamento destas cavernas através de navegação localizada e cooperativa (FIGURA 38). Simulações realizadas mostram que é possível formar uma cadeia de conexão ao longo de uma determinada distância em um tubo de lava por um time de robôs SphereX.

FIGURA 38 - ESQUEMA DE ESTRATÉGIA DE LINK DE COMUNICAÇÃO ENTRE ROBÔS ESFÉRICOS AUTÔNOMOS.



FONTE: Kalita *et al.*, 2018.

Esforços também estão em andamento para realizar experimentos de campo para validar os resultados da simulação, sendo que o objetivo futuro é de incorporar os robôs em uma missão de superfície para a Lua, Marte ou asteroides.

Seguindo esta mesma abordagem de que cavernas podem oferecer abrigo a exploradores humanos e contém elementos para reconstrução do passado geológico ou ambiental, Husain *et al.* (2013) apresentam uma proposta em que um conjunto de robôs heterogêneos possam realizar atividade de mapeamento do ambiente de forma autônoma, sendo as tarefas designadas a partir da capacidade operacional. As tarefas são definidas para explorar, modelar e coletar amostras científicas, sendo que os robôs criam mapas online grosseiros e armazenam dados coletados para modelagem *offline* de alta resolução.

Esta abordagem de coordenação foi testada em campo em um local simulando uma caverna com terreno natural altamente não estruturado, bem como uma área de pátio ao ar livre. Os resultados iniciais são promissores para a aplicabilidade do *framework* multi-robô proposto para exploração e modelagem de cavernas planetárias, ainda que haja desafios a serem resolvidos, como a baixa largura de banda para comunicação espacial e a baixa capacidade computacional, que limitam a resolução de mapas e modelos construídos online. A solução é que os robôs armazenem dados à medida que exploram e transmitam lentamente os dados de volta aos operadores depois de concluir suas tarefas de exploração. Daí mapas de melhor resolução podem então ser gerados no pós-processamento.

Algumas soluções para agilizar os levantamentos dos ambientes subterrâneos são implementadas pela própria comunidade espeleológica, como no caso do Cave Atron (Mitchell *et al.*, 2017). Trata-se de um dispositivo portátil, com interface gráfica para usuário por *touch screen*, compacto e leve, com invólucro resistente à água e à poeira, contendo bateria recarregável, armazenamento de dados e porta USB para carregamento e download de dados (FIGURA 39). Trata-se de uma combinação de instrumentos de topografia e varredura a laser. Em um dos compartimentos fica alojado um scanner LiDAR, sendo que os dados podem ser facilmente revisados e pós-processados em um PC. O Cave Atron foi desenvolvido enquanto uma ferramenta completa para o mapeamento 3D de cavernas a partir da varredura a laser e geração de nuvem de pontos, incluindo a inserção dos nomes das estações e a plotagem da linha de caminamento. Funciona em três modos, capazes

de medir distâncias, azimutes e inclinações entre as estações no modo “Shot”, de realizar a varredura 3D no modo “Passage” ou fazer seções transversais, onde o dispositivo gira em torno de um ponto fixo no modo “Room”. A resolução é de alguns centímetros, obtida a partir de um caminhamento lento. Sua maior vantagem reside no fato de realizar a varredura em movimento, sem a necessidade de tripés ou equipamentos adicionais e de operação amigável, sendo uma produção de baixo custo, compacta e por dispor de um software para visualização dos dados quando em operação.

FIGURA 39 - TELA DA GUI DO CAVEATRON, INCLUINDO O MENU PRINCIPAL (ESQUERDA) E TELA DE RESULTADO DE MEDIDA (DIREITA).

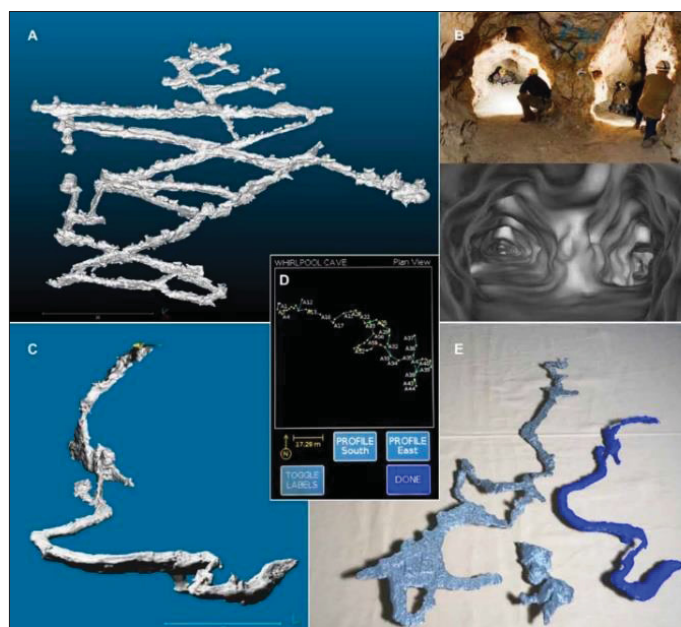


FONTE: Mitchell *et al*, 2017.

Este projeto parte dos princípios do faça-você-mesmo (DIY), sendo disponibilizado para a comunidade espeleológica e usa o Arduino Due como processador principal e bateria de Lítio com autonomia de sete horas de operação, mas com limitação de alcance em quatro metros. O invólucro é plotado em uma impressora 3D com plástico ABS, podendo ser operado em ambientes com lama e poeira. Quando no modo “shot”, caso ocorram problemas de movimento significativo ou grande variabilidade nos valores medidos, o disparo irá falhar, disparando um alerta por tom grave e exibição de mensagem. Os dados armazenados num cartão de memória são formatados em textos para o software Walls, um *freeware* disponível para processamento de dados topográficos. Um arquivo separado com os dados do LiDAR contém apenas dados de varredura minimamente processados, dadas as

restrições de capacidade do processador. A aplicação de filtro de ruído, suavização de dados e conversão em uma nuvem de pontos x, y, z são realizadas em pós-processamento usando um programa para Windows ou plataformas Mac chamadas “Caveatron Process”. Testes foram realizados em várias cavernas no sul do Texas, nos EUA, incluindo caminhamentos simples e rastejamentos em condutos, galerias, passagens estreitas, poços, molhadas e lamacentas, a uma taxa de 40m por hora, com bom desempenho em todas as situações (FIGURA 40).

FIGURA 40 - EXEMPLO DE DADOS DO CAVEATRON: A – CAVERNA ROBBER BARON, SAN ANTONIO, TX; B – INTERIOR DA CAVERNA ROBBER BARON E COMPARAÇÃO DE UMA FOTO E OS DADOS RENDERIZADOS; C – RENDERIZAÇÃO DA CRICKET CAVE, BOERNE, TX; D – GRÁFICO DE LINHA DA WHIRLPOOL CAVE EM AUSTIN, TX; E – MODELOS IMPRESSOS EM 3D DE WHIRLPOOL CAVE, CANYON WREN CAVE E CRICKET CAVE.

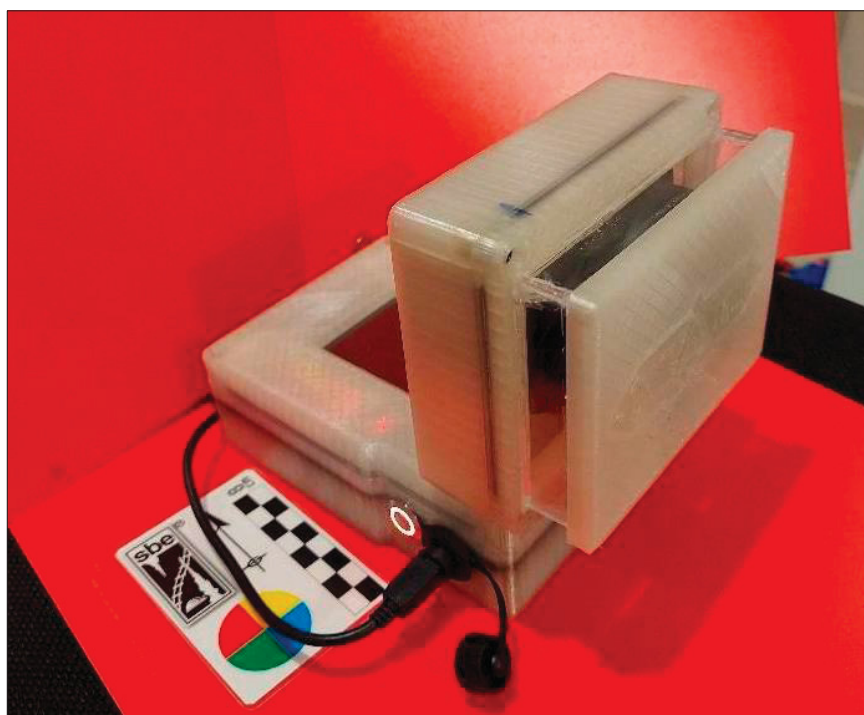


FONTE: Mitchell *et al*, 2017.

No Brasil, o Cave Atron foi recentemente produzido pelo [Espeleo Grupo de Brasília – EGB](#) (Magalhães *et al.* 2022), num projeto de montagem, experimentação e internalização junto aos grupos espeleológicos brasileiros. O dispositivo tem se mostrado como uma alternativa acessível e viável para a representação tridimensional de cavernas, permitindo sua representação em bloco-diagrama e a extração vetorial de seções de galerias e condutos, permitindo o cálculo de variáveis espeleométricas, incluindo o volume. O projeto contou com o financiamento da Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE por processo de edital, iniciado em 2020 e atualmente passando por processo de testes de funcionalidades e validação. Para tanto, foi constituído um

grupo de trabalho interno do EGB e o acompanhamento de discussões junto à comunidade internacional envolvida no desenvolvimento do instrumento. A expectativa é que o instrumento seja adequado ao ambiente subterrâneo, devendo agilizar o processo de levantamento e melhora da sua precisão, minimizando a possibilidade de interrupção dos trabalhos por falhas técnicas ou limitações operacionais (FIGURA 41).

FIGURA 41 - MÓDULO CAVEATRON.



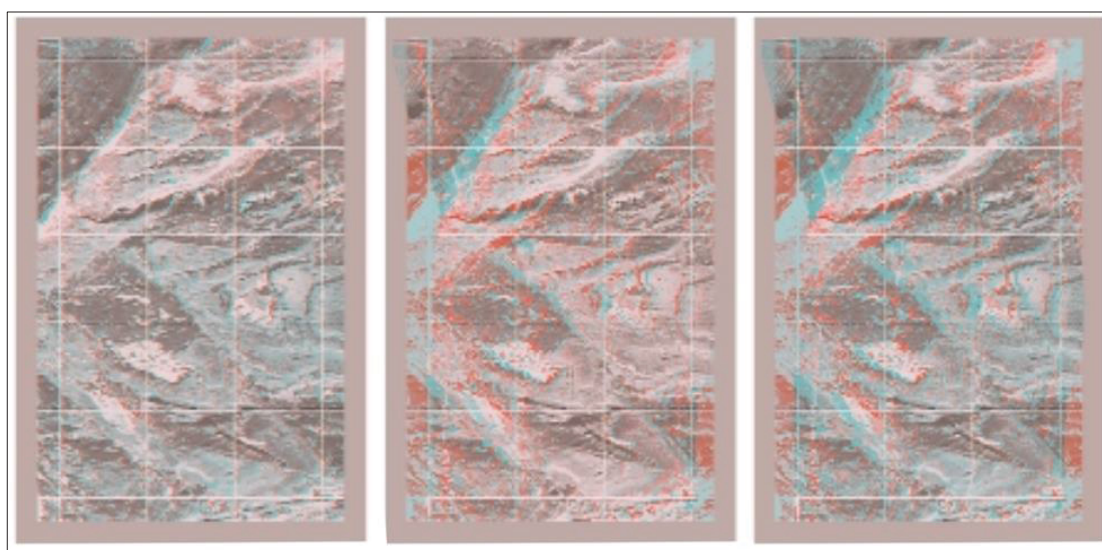
FONTE: Magalhães *et al.*, 2022.

2.4.2 - FOTOGRAMETRIA DE CURTA DISTÂNCIA

A tentativa de estabelecer um procedimento fotogramétrico aéreo para localizar as entradas de cavernas resultou na elaboração de anaglifos topográficos (FIGURA 42), representação estereoscópica do terreno que permite a obtenção de coordenadas X, Y e Z do sistema de [Cavernas Peña del Trillo](#), Espanha. Villasante (2002) utilizou essa abordagem para localizar e relacionar as entradas das cavidades com erros menores do que 10m. O método apresentado consistiu em cinco etapas, iniciado com a rasterização das fotografias aéreas, seguindo com a definição da orientação interior, agrupamento das fotos em pares estereoscópicos, aerotriangulação e obtenção das coordenadas XYZ em ambiente CAD. Para o autor,

o agrupamento de fotos em pares facilita a identificação de detalhes e dá maior precisão às medidas, sendo os anaglifos a forma mais cômoda de visualização. Ainda que não esclareça como foram obtidos os dados de exatidão posicional dos anaglifos, o autor considera que os resultados foram melhores do que o esperado.

FIGURA 42 - ANAGLIFOS DA ÁREA DE PESQUISA REPRESENTANDO A RUGOSIDADE DO TERRENO (ESQ.), RELEVO INTERPOLADO (CENTRO) E RELEVO TOTAL (DIR.).



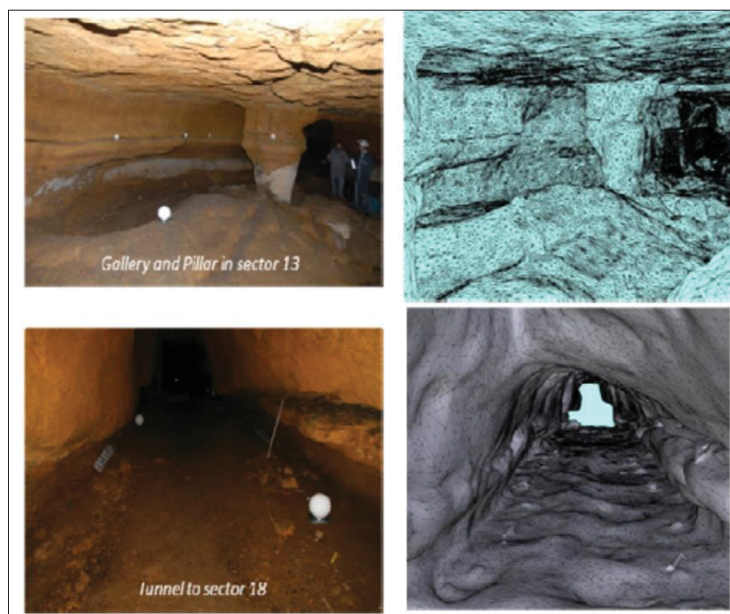
FONTE: Villasante, 2002.

Tendo como objetivo a geração da representação geométrica e modelo 3D fotorrealista da combinação de nuvens de pontos e imagens fotogramétricas, tanto para visualização quanto para fins de documentação de alta precisão, Grussenmeyer, *et al.* (2010) apresentaram o fluxo de trabalho adotado. Os trabalhos foram realizados na [Caverna “Les Fraux”](#), Dordonha, França, descoberta em 1989, correspondente à Idade do Bronze e com uma rede de galerias de várias centenas de metros. O artigo está focado nas técnicas de medição tridimensional sem contato visando a documentação 3D completa dos elementos estruturais da caverna (FIGURA 43) e de detalhes da arte rupestre. A maior parte da arte está gravada na argila e segue desenhos lineares, esquemáticos e geométricos. Para os arqueólogos, a documentação e registro iniciados em 2008 devem contribuir para a indexação precisa dos levantamentos das imagens dos vestígios, bem como elementos estruturais e esculturas; devem garantir a compatibilidade de indexação dos dados entre os diferentes grupos de pesquisadores envolvidos na escavação e garantir o

georreferenciamento de qualquer tipo de objeto nas diferentes partes da gruta. Para tanto, diferentes técnicas baseadas em varredura a laser terrestre, Fotogrametria Digital e Sistema de Imagem Espacial.

O fluxo de trabalho apresentado é iniciado por levantamento geodésico para estabelecimento dos pontos de controle (esferas e alvos codificados), seguindo-se pela varredura a laser terrestre, pelo levantamento fotogramétrico com câmera Reflex calibrada, levantamentos de detalhe da arte rupestre por e panorâmicas esféricas 360° adicionais. Os resultados finais se referem a disponibilização de modelos em formatos que possam ser manuseados pela maioria dos parceiros envolvidos, o PDF 3D.

FIGURA 43 - EXEMPLOS DE MODELOS 3D DO VISUALIZADOR PDF-3D (IMAGENS À ESQUERDA E MODELOS CORRESPONDENTES À DIREITA).

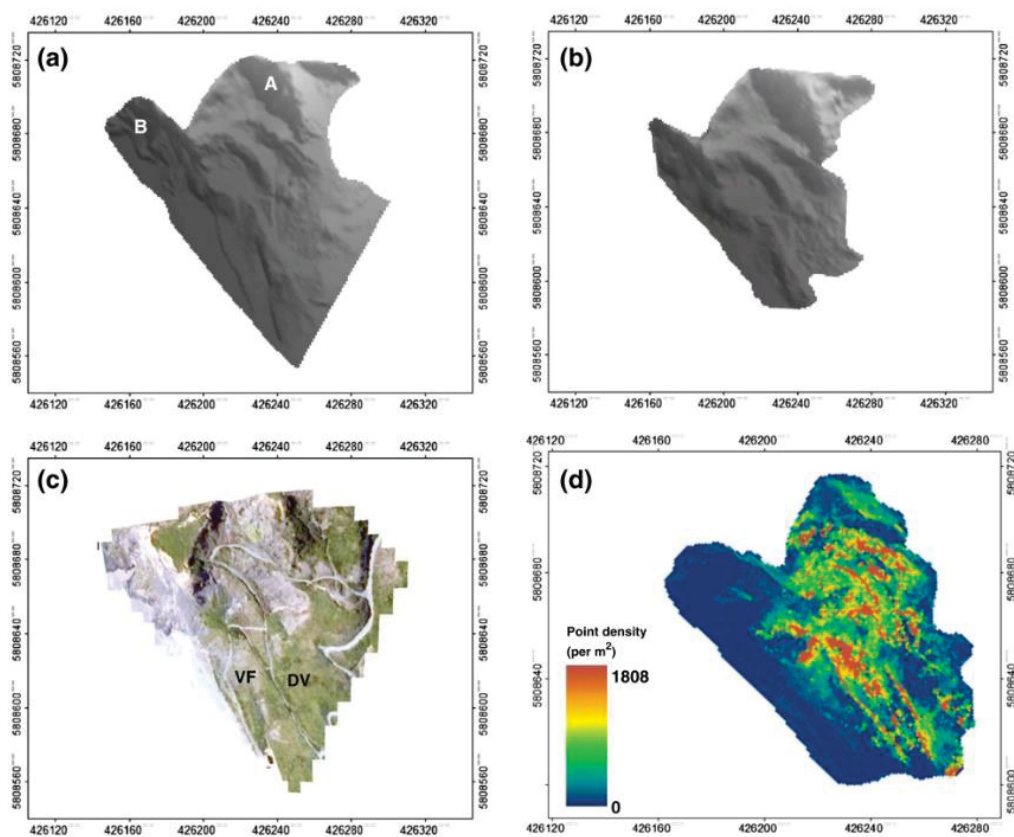


FONTE: Grussenmeyer *et al.*, 2010.

Westoby *et al* (2012) destacam características e vantagens do método SfM em levantamentos topográficos. Segundo os autores, trata-se de um método efetivo e de baixo custo para aplicações nas Geociências, contrapondo-se aos altos custos de capital e logísticos para levantamentos topográficos de alta precisão por empresas especializadas. Destacam-se, neste contexto, a dificuldade de acesso e características do terreno, o que torna impraticável o uso de plataformas de menor custo e portáteis, como a varredura a laser terrestre ou GNSS. A alternativa proposta se refere a uma técnica fotogramétrica revolucionária para obter conjuntos de dados

de alta resolução em uma variedade de escalas, denominados '*Structure from Motion*' (*SfM*). Os autores descrevem o SfM enquanto um método capaz de estabelecer a posição e a geometria de fotos de forma automática e simultânea utilizando-se do *Bundle Adjustment* iterativo e altamente redundante a partir de várias imagens com deslocamentos e sobreposição (FIGURA 44).

FIGURA 44 - MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE CONSTITUTION HILL USANDO (A) TLS E (B) SFM; (C) FOTOGRAFIA AÉREA DO LOCAL; E (D) MAPA DE DENSIDADE DE PONTOS. SISTEMA DE COORDENADAS UTM ZONA 30N.



FONTE: Westoby *et al.*, 2012.

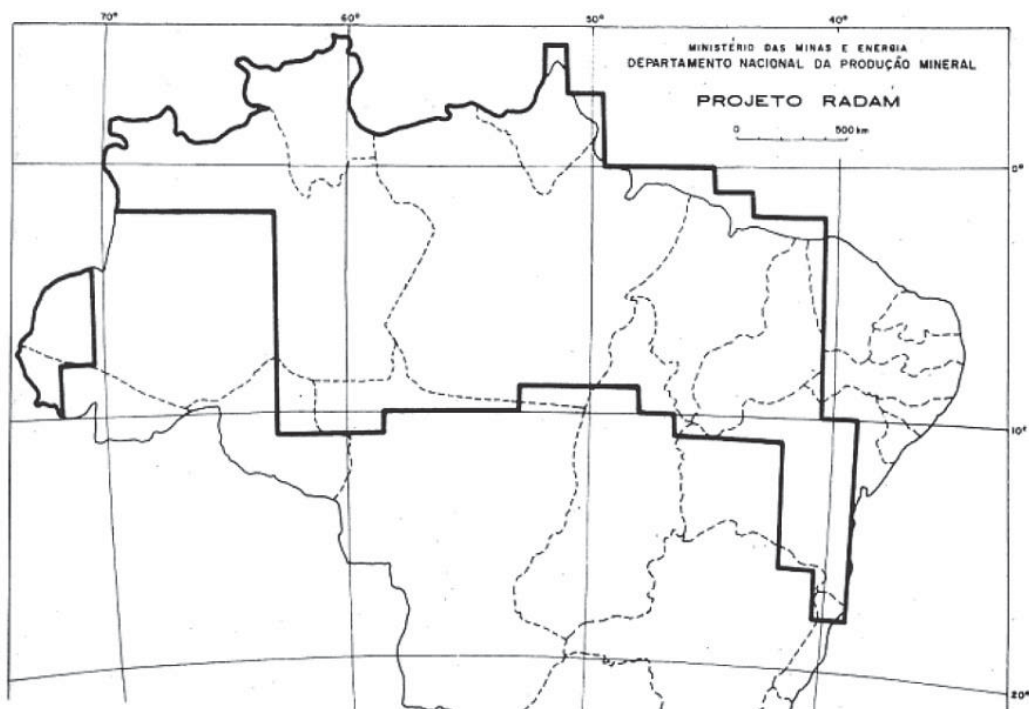
Diferentemente dos métodos tradicionais de fotogrametria, o SfM não necessita do posicionamento e dos parâmetros externos das fotos e nem pontos de apoio em solo para a reconstrução da cena. As correspondências dos pontos-chave determinam a orientação e posicionamento da câmera, reconstruídas usando uma transformação de similaridade, enquanto a minimização de erros é obtida usando uma solução não linear por mínimos quadrados. Por fim, a triangulação é usada para estimar as posições dos pontos 3D e reconstruir a geometria da cena, fixada em um sistema de

coordenadas relativas. Automatização total deste processo, desde a extração dos ponto-chave, para a reconstrução precisa da geometria da cena é uma clara vantagem do método SfM sobre as abordagens fotogramétricas digitais tradicionais.

Após uma introdução da técnica, seguida da apresentação do fluxo de trabalho para a geração de modelos digitais de elevação de alta resolução gerados a partir de conjuntos de fotos obtidos por câmera digital convencional, os autores avaliam o método empregado a partir da comparação de um modelo fotogramétrico com um modelo similar obtido usando laser terrestre. Westoby *et al.* (2012) consideram que a comparação entre os modelos revelou que a precisão vertical em escala decimétrica pode ser alcançada usando SfM mesmo para locais com topografia complexa e com variadas coberturas de terra. Exemplos de aplicações de SfM são apresentados para três formas de relevo contrastantes de escalas variadas, incluindo um penhasco costeiro rochoso exposto, uma barragem de morena rompida e uma crista rochosa esculpida. Por fim, afirmam que a técnica SfM representa um grande avanço no campo de fotogrametria para aplicações em geociências. E que resultados e experiências indicam ser um método barato, eficaz e flexível para a captura de topografias complexas.

A evolução do uso da Fotogrametria no Brasil é o tema de um trabalho de Silva (2015), merecendo destaque pelo panorama histórico proporcionado, ainda que não esteja diretamente associado ao levantamento de cavernas. O artigo trata do desenvolvimento da fotogrametria entre o início e meados do século XX, época de grande atividade por conta das duas guerras mundiais e a experiência recente com a Fotogrametria Digital, abordando a evolução das câmeras, restituidores e das aeronaves. O autor destaca as diversas experiências brasileiras que contaram com a participação direta de entidades públicas (DSG, SUDENE, CONCAR, PPGCG, IBGE) e privadas (SARA, VASP, Aerofoto Cruzeiro do Sul, e aborda as mudanças de conceitos e paradigmas ocorridos em função dos processos automatizados próprios da fotogrametria. Destaca, também, que o Brasil acompanhou o desenvolvimento ocorrido no exterior e se mostrou mesmo como pioneiro em alguns levantamentos, como o Projeto RADAM, dispondo das mais novas tecnologias para sua execução (FIGURA 45).

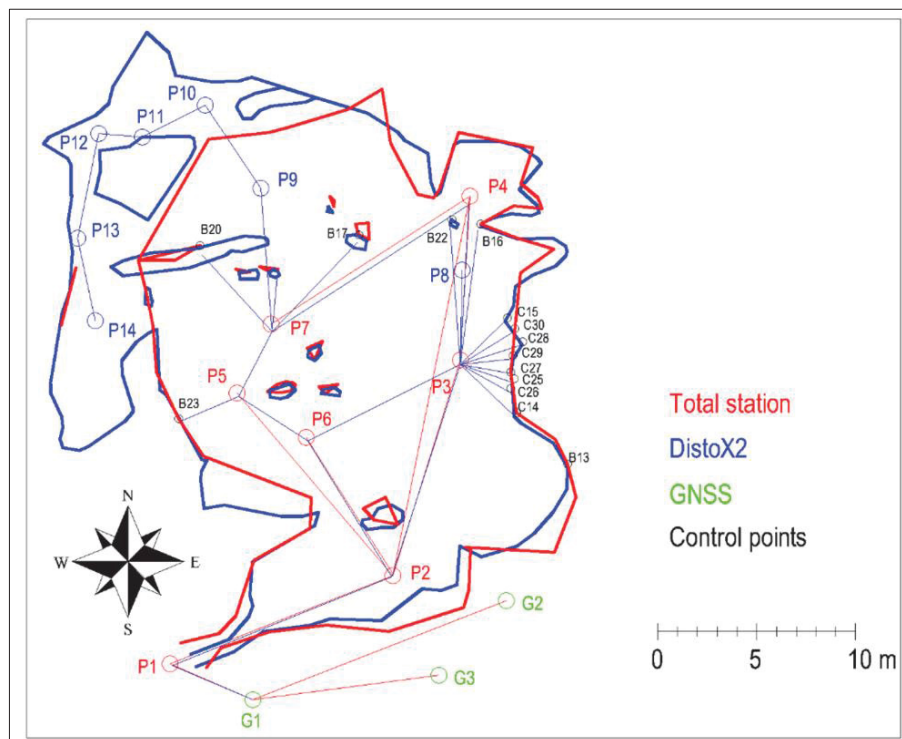
FIGURA 45 - ÁREA COBERTA PELO PROJETO RADAM.



FONTE: Silva, 2015.

Uma investigação sobre as possibilidades de aplicação de diferentes instrumentos e métodos de levantamento em ambientes subterrâneos de uma caverna da Croácia foi realizada por Redovniković *et al.* (2016). Neste trabalho, foram realizados levantamentos fotogramétricos com câmera Canon Powershot SX220, por estação total Topcon Cygnus KS 103 e com o sistema DistoX, estando referenciados a três estações localizadas na área externa obtidas com GNSS Trimble R 10. Foram comparadas as diferenças entre os levantamentos feitos com uma estação total e com a DistoX e o RMSE foi de 2 cm, tanto para os dados tratados no software Compass 5.18, quanto no Therion (FIGURA 46). Outra comparação foi feita a partir do levantamento fotogramétrico, que utilizou nuvens de pontos referenciadas pela TS e DistoX e Therion, tendo apresentado um RMSE de 1,7 cm evidenciado pelo software Cloud Compare.

FIGURA 46 - PLANTA BAIXA DA CAVERNA TOPOGRAFADA COM O SISTEMA DISTOX2 E MAPEADA COM O SOFTWARE THERION (AZUL) E PLANTA BAIXA OBTIDA COM ESTAÇÃO TOTAL (VERMELHO).



FONTE: Redovniković *et al.*, 2016.

Os autores concluem que os resultados indicam que a acurácia das coordenadas obtidas com a DistoX é satisfatória para as necessidades de mapeamento de cavernas, com as vantagens de alcançar locais que uma TS não conseguiria e ter um custo reduzido. No que se refere aos levantamentos fotogramétricos, afirmam que o método é plenamente aplicável a este tipo de ambiente, dependendo de iluminação para sua realização. Em função do tempo necessário para os levantamentos e para os processamentos, levantamentos fotogramétricos seriam mais adequados a partes de cavernas, não sendo adequados a grandes sistemas.

A Fotogrametria de Curta Distância tem permitido a geração de modelos 3D e de outros produtos cartográficos como os mosaicos de ortofotos, modelos digitais de superfície, propiciando novas formas de registro, representação, análises e divulgação dos resultados (SIMÕES, 2019). Neste artigo, foi demonstrada a geração de mapas espeleológicos digitais e de cálculos de variáveis espeleométricas a partir da modelagem fotogramétrica parcial da [Gruta dos Fugitivos](#), localizada no Parque

Estadual de Ibitipoca, Minas Gerais. Para tanto, utilizou de procedimentos para a extração vetorial automática dos contornos da cavidade e da edição vetorial de feições de interesse sobre os mosaicos de ortofotos e do modelo digital de superfície do piso da cavidade (FIGURA 47).

FIGURA 47 - EDIÇÃO DE LAYOUT NO AUTOCAD MAP 3D VISTO EM PLANTA.



FONTE: Simões, 2019.

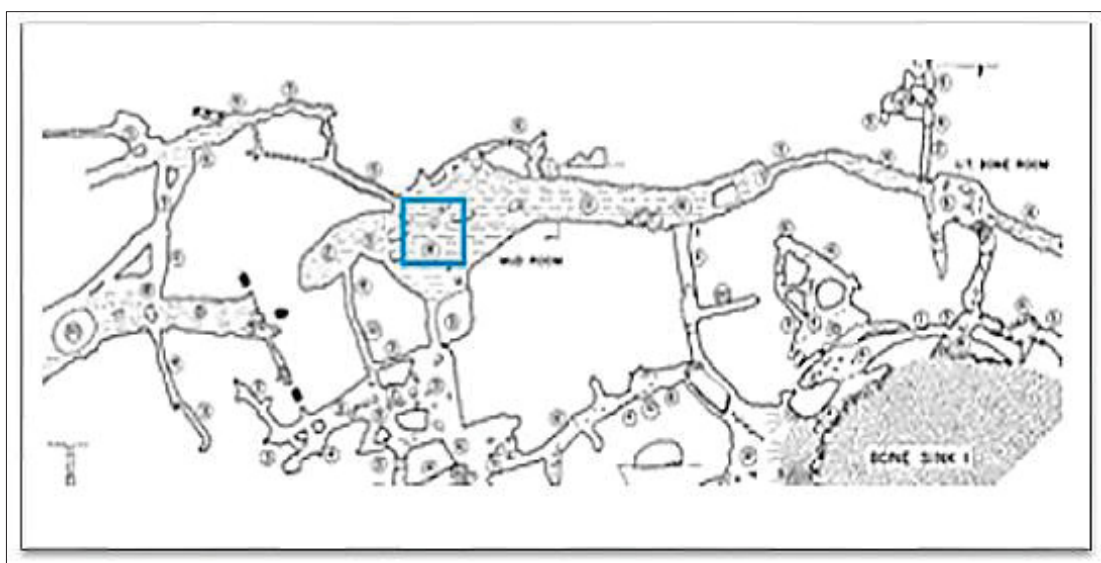
O resultado foi a proposta de uma nova metodologia de geração de mapas espeleológicos com respectivo fluxo de trabalho, incluindo o cálculo das variáveis espeleométricas. De forma a avaliar visualmente os resultados, o modelo 3D foi sobreposto ao mapa espeleológico topográfico feitos pelo [Grupo Pierre Martin de Espeleologia – GPME](#) e [Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas – GBPE](#), tendo apresentado notável correspondência. Para desdobramentos futuros, propõe, além de aprimoramentos no fluxo de trabalho, a avaliação da precisão geométrica do modelo 3D gerado.

Ainda que os levantamentos por LiDAR tenham se tornado um método popular e preciso de mapeamento e que pode ser utilizado para análises de modelos tridimensionais, estes podem se tornar tediosos e mesmo impraticáveis quando aplicados a locais remotos e/ou confinados. Quando este método se torna ineficiente ou inapropriado para uma investigação, a alternativa é a Fotogrametria, sugere Sepulveda *et al.* (2020).

Neste artigo, os autores avaliam a acurácia e a praticidade do mapeamento e modelagem 3D do ambiente subterrâneo de cavernas no Texas, EUA (FIGURA 48), utilizando-se de câmeras de *smartphones* em conjunto com softwares e aplicações de modelagem tridimensional. Seu uso permite a experiência de portabilidade e a coleta de dados em espaços reduzidos dentro de cavernas e a tomada de medidas preventivas para minimizar os distúrbios ecológicos. O levantamento fotogramétrico resultou em 500 fotos do salão da caverna, sendo processados no software Pix4D. O modelo resultante foi importado para a plataforma de jogos da Unity Engine. Tal plataforma se trata de um kit de desenvolvimento que contém bibliotecas e componentes úteis para a produção de games, sendo utilizada neste contexto para a navegação e manipulação do modelo.

Presume-se que a melhoria das câmeras de *smartphones* ocorrida nos últimos anos tenha permitido que estes possam ser utilizados em levantamentos fotogramétricos em ambientes subterrâneos com relativo nível de qualidade quando comparadas com as câmeras Digital Single Lens Reflex e com precisão em nível centimétrico. Esta provável tendência não é acompanhada de produção bibliográfica correspondente, seja por ser uma abordagem recente, seja pela paralisação mundial das atividades espeleológicas em função da pandemia de COVID 19.

FIGURA 48 - VISTA EM PLANTA DA *INNER SPACE CAVERN*, ONDE O LEVANTAMENTO FOI REALIZADO.



FONTE: Sepúlveda *et al.*, 2015.

QUADRO 5 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS CONJUNTOS DE DADOS EMPREGADOS.

	<i>Seq.</i>	<i>Device model</i>	<i>Resolution (px)</i>	<i>No. selected frames</i>	<i>Device orientation</i>
<i>Saranta Kolones</i>	1	Huawei P9	1920x1080	152	L/P
	2		1920x1080	154	L/P
	3		1920x1080	210	L/P
	4	OnePlus One	1920x1080	117	P
	5		1920x1080	105	P
	6		1920x1080	59	P
	7		1920x1080	44	P
	8	Samsung S6	3840x20160	84	L
	9			54	L
	10			56	P
<i>Piazza Duomo</i>	1	LG Nexus 5X	1920x1080	64	L/P
	2	Samsung Galaxy Alpha	640x480	91	L/P
	3	SonyZ5	1920x1080	74	L
<i>Caffe Italia</i>	1	LG Nexus 5X	1920x1080	175	L/P
	2	Samsung Galaxy Alpha	640x480	218	L/P
	3	SonyZ5	1920x1080	107	L/P

FONTE: Nocerino *et al.*, 2017.

Novas tecnologias de levantamento ou instrumentos parecem ser rapidamente adotados em áreas como o Patrimônio Cultural, posteriormente aplicados aos ambientes subterrâneos naturais. Nocerino *et al.* (2017) relatam os resultados da reconstrução 3D de estruturas arquitetônicas italianas utilizando-se de vários *smartphones* em levantamentos colaborativos e processamento em servidor baseado em nuvem. Para se avaliar a precisão dos modelos gerados (QUADRO 5), estes foram comparados a modelos fotogramétricos de referência com câmera

profissional e pontos de controle obtidos por método topográfico que apresentou um RMSE menor que 5 mm, através do software Cloud Compare e do *plugin* M3C2.

Num trabalho acerca da qualidade fotográfica entre uma câmera profissional e um *smartphone* de forma comparativa, Alessandri *et al.* (2019) realizaram o levantamento numa caverna italiana feito de forma simultânea e analisaram as nuvens de pontos registradas no software Cloud Compare (FIGURA 49). A análise comparativa tomou o levantamento com o *smartphone* como referência, por ter apresentado menor erro médio quadrático nos pontos de controle e foi aplicada uma transformação de Helmert para minimizar a distância entre os pontos. O fator de escala apresentado foi de 0.923. Analisados demais parâmetros estatísticos como média (-0.059m), desvio-padrão (± 0.312 m) e histograma de erros, foi constatado que a simples transformação de Helmert com variação de escala não é o suficiente para minimizar as diferenças de distâncias entre os dois modelos, havendo uma evidente distorção anisotrópica na lente da câmera profissional, não corrigida pelo processo de calibração do *software* executado. O modelo gerado pelas fotos tomadas com o *smartphone* apresentou os menores erros dos pontos de controle e escalas, o que sugere que quando uma alta precisão não é necessária e quando equipamentos caros não podem ser utilizados, um simples *smartphone* pode ser usado na modelagem de uma caverna.

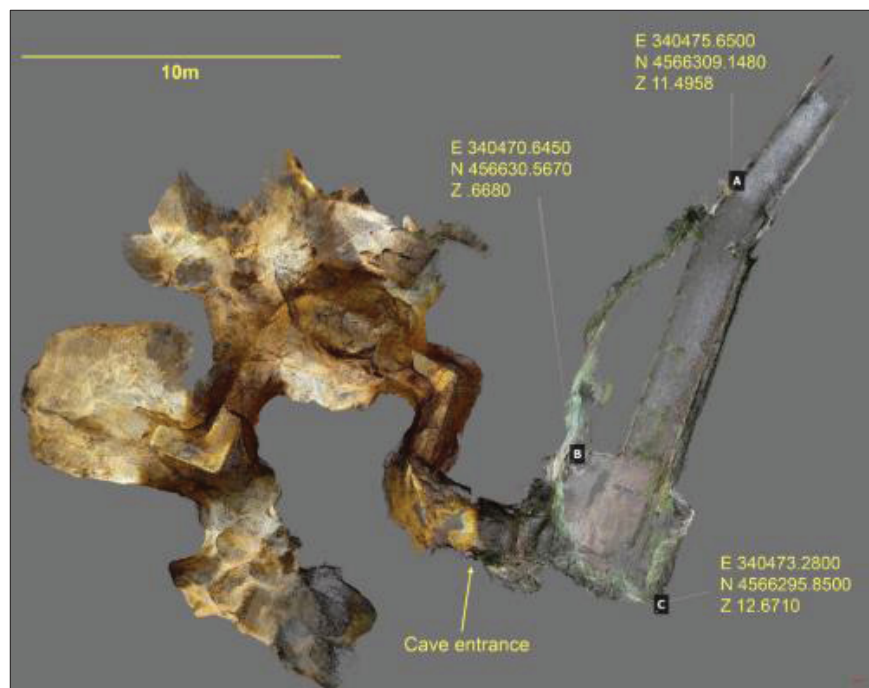
FIGURA 49 - O SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO ARTESANAL UTILIZADO NO LEVANTAMENTO.



FONTE: Alessandri *et al.*, 2019.

A modelagem e o georreferenciamento de estruturas espeleológicas complexas são uma questão desafiadora no campo da Geomática, muito em função das restrições de espaço e das condições de iluminação. De forma a tornar o levantamento uma atividade mais flexível e rápida, Alessandri *et al.*, (2020) propuseram um método com base na fotogrametria e no algoritmo SfM, que permitem obter um modelo tridimensional e georreferenciado de ambientes subterrâneos, preservando a integridade da cena. Utilizando-se de pontos de controle externos obtidos por GNSS e internos para o cálculo da deformação dos modelos de dois sítios arqueológicos italianos (FIGURA 50), a equipe parte da necessidade de se adotar um método que seja capaz de alcançar um alto grau de detalhamento além de prover uma solução automática e apresenta uma metodologia baseada na fotogrametria digital com uma câmera de baixo custo.

FIGURA 50 - NUVEM DE PONTOS DENSA FINAL DA CAVERNA GUATTARI COM AS INDICAÇÕES DOS PONTOS DE CONTROLE.



FONTE: Alessandri *et al.*, 2020.

No entanto, este método exige um operador especializado e vários programas para o tratamento dos dados num fluxo de trabalho definido, sendo mais adequado a espaços restritos que outros métodos como o TLS. Uma câmera e um smartphone

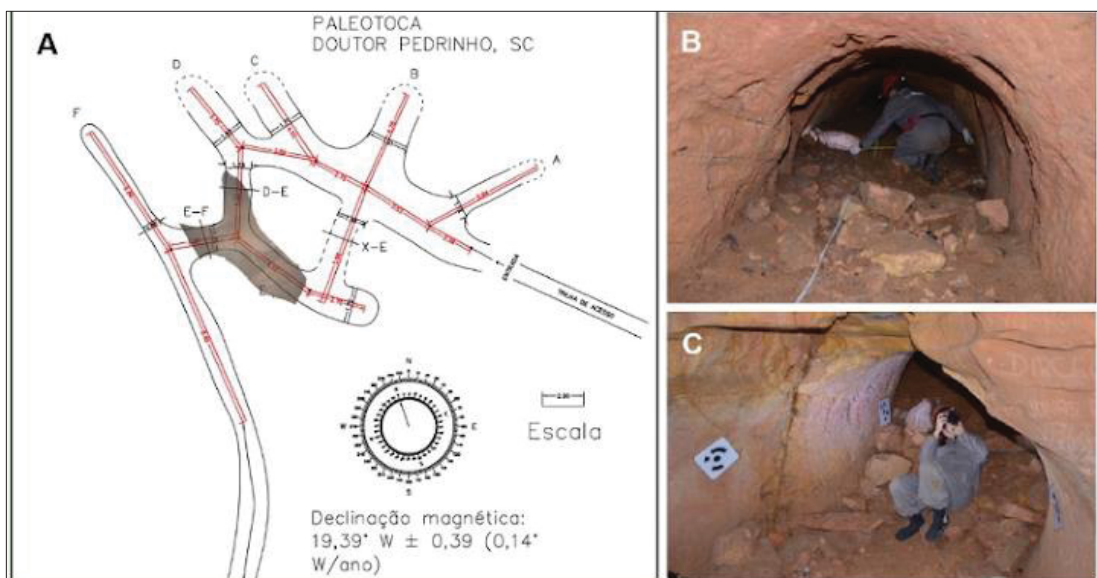
montados sobre uma mesma barra permitiram a simultaneidade da tomada dos vídeos, das quais foram geradas nuvens de pontos, posteriormente sobrepostas para se avaliar a precisão dos modelos, conseqüentemente dos instrumentos. O erro médio da câmera profissional (18cm) mostrou-se bem acima do erro médio do modelo gerado pelo *smartphone* (2cm), corroborando a hipótese do trabalho anterior de possíveis deformações na lente da câmera profissional não corrigidas no processo de calibração. Uma segunda leitura é de que as câmeras dos *smartphones* atuais estão boas o suficiente para a geração de modelos em que a precisão não seja o foco.

A utilização da Fotogrametria digital terrestre para a modelagem 3D da Gruta do Urubu, localizada em Coromandel - MG foi feita por Silva *et al.* (2020), tendo sido precedida por levantamento espeleotopográfico básico, realizado pelo método de poligonização e irradiações. Neste levantamento, foi possível realizar a representação da planta baixa e dos perfis dos salões e condutos principais, além da obtenção das coordenadas geográficas necessárias ao georreferenciamento do modelo 3D. O levantamento fotogramétrico foi realizado com uma câmera Canon SX170IS apoiada sobre tripé e também através de caminhamento paralelo aos eixos maiores e menores dos condutos e salões da caverna. Para a iluminação, foi utilizado o flash da câmera. Foram alinhadas 177 das 191 fotos registradas, contemplando apenas uma parte da cavidade. A geração do modelo 3D da cavidade resultou em uma nuvem de 30.198.1621 pontos e 671.068 faces, o que exigiu alta capacidade de processamento. Estão previstos novos levantamentos para a geração e comparação entre os modelos gerados e para subsidiar discussões sobre a melhor forma de utilizar a fotogrametria enquanto método de levantamento de cavernas.

Paleotocas são estruturas subterrâneas escavadas por preguiças-gigantes ou tatus-gigantes e apresentam feições de galerias, sendo utilizadas como abrigo, refúgio ou estivação. Paleotocas são icnofósseis e podem também ser classificadas como cavernas, com ocorrências apenas na América do Sul, tendo sido utilizadas por populações pré-coloniais. No Brasil, estão distribuídas principalmente no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, sendo conhecidas ocorrências no Paraná, Minas Gerais e Pará. As dimensões e o polimento das galerias, as marcas de garra no processo de escavação e as carapaças contribuem na identificação da espécie responsável pela abertura de uma paleotoca (AUDI *et al.*, 2021).

De forma a contribuir na identificação e preservação do patrimônio paleontológico e na disponibilização do acervo, foi realizado o levantamento fotogramétrico da paleotoca de Doutor Pedrinho (SC) com as câmeras Nikon D7000 e GoPro e iluminação externa (FIGURA 51). As medidas dos condutos e as marcas de garras duplas remetem à preguiça-gigante enquanto agente de escavação, classificada como *Megaichnos major*. O túnel E foi modelado a partir dos conjuntos de fotos das duas câmeras e os resultados foram comparados. Os autores consideram satisfatórios os resultados da modelagem, sendo que o modelo da Nikon ficou mais próximo da realidade, comparado o da GoPro e que a geração de modelos 3D a partir de imagens de boa qualidade permite registrar e divulgar as características detalhadas das paleotocas. Tal proposta se mostra inovadora e contribui na preservação e disseminação do conhecimento sobre icnofósseis, auxiliando na divulgação científica e na educação.

FIGURA 51 - PLANTA BAIXA DA PALEOTOCA DE DOUTOR PEDRINHO (A), COLETA DAS MEDIDAS DOS TÚNEIS (B) E LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO (C).

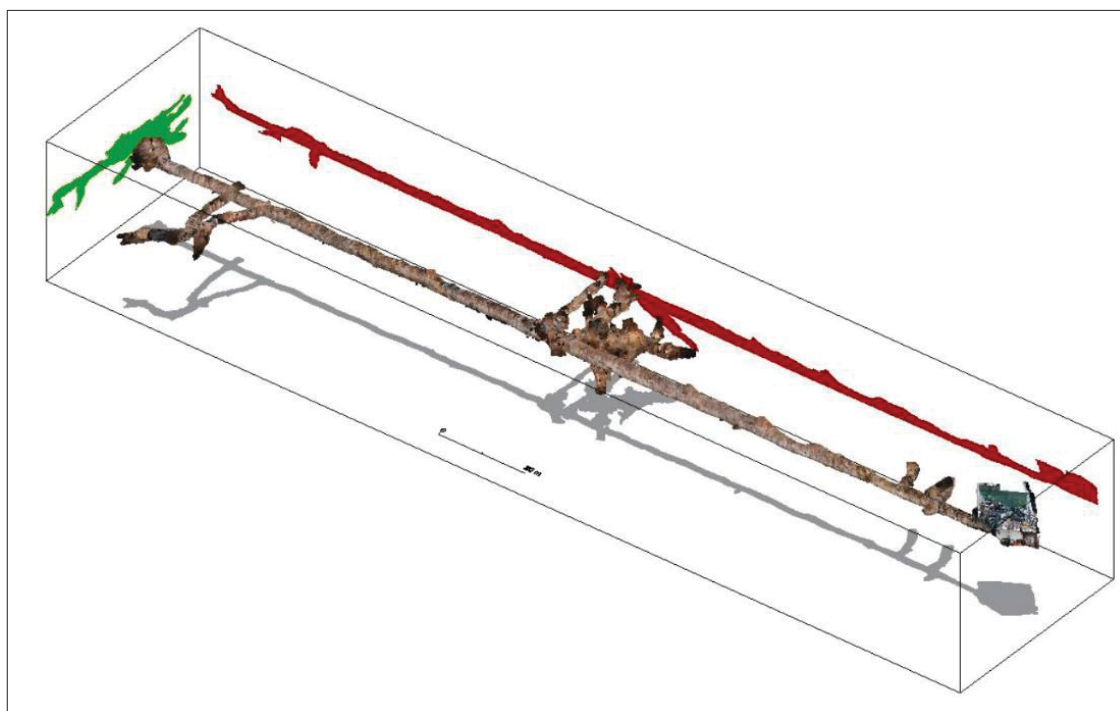


FONTE: Audi *et al.* 2021.

Dando continuidade aos levantamentos fotogramétricos de cavidades subterrâneas, Simões (2022) realizou a modelagem parcial da [Gruta dos Sete Salões](#), localizada no Parque Estadual dos Sete Salões, município de Santa Rita do Itueto e completa da [Mina do Veloso](#) (FIGURA 52), localizada em Ouro Preto, ambas em

Minas Gerais. Os levantamentos foram realizados visando a geração de mapas espeleológicos e o cálculo das variáveis espeleométricas, tendo sido produzidos, também, modelos subterrâneos integrados aos modelos de superfícies topográficas. Os modelos e mapas resultantes foram publicados em um repositório de modelos 3D, permitindo a navegação interativa em *smartphone* ou *desktop*. Os resultados das avaliações da precisão relativa dos modelos são apresentados, tendo dimensões centimétricas para a caverna e decimétricas para a mina, provavelmente causada por interferência magnética. A escala do modelo 3D da Mina do Veloso foi avaliada pela comparação das mensurações do desenvolvimento do conduto principal e de 14 cortes transversais, obtidas em campo e através do modelo e apresentou resíduos muito baixos. A baixa iluminação é tida como fator limitador para o processo de alinhamento das fotos e a homogeneidade tonal do piso acarreta um excesso de rugosidade ou buracos. Por fim, considera que a geração de mapas espeleológicos através da extração vetorial dos modelos 3D se apresenta enquanto método alternativo ao mapeamento convencional.

FIGURA 52 - PERSPECTIVA ISOMÉTRICA SW-NE DA PROJEÇÃO DA NUVEM DE PONTOS DO MODELO 3D DA MINA DO VELOSO (AO CENTRO) EM PLANTA BAIXA (CINZA), EM PERFIL VERTICAL LONGITUDINAL (VERMELHO) E CONTOURNO VERTICAL TRANSVERSAL (VERDE).



FONTE: Simões *et al.*, 2022. Disponível em <https://skfb.ly/op6Jn>.

2.4.3 - MATTERPORT

Matterport é um sistema de aquisição de imagens, processamento em nuvem e de funções para a realização de *tours* virtuais. O sistema é operado pela ITeleport, uma empresa especializada em Realidade Virtual voltada à criação de visitação virtual a espaços reais (FARIA *et al.*, 2019). Para tanto, utiliza-se de uma câmera com sensores infravermelhos para a captura da profundidade dos dados associada a uma câmera RGB com capacidade de recobrimento de 360° do plano horizontal e 300° no plano vertical, com alcance de cerca de 5m em ambientes de iluminação média.

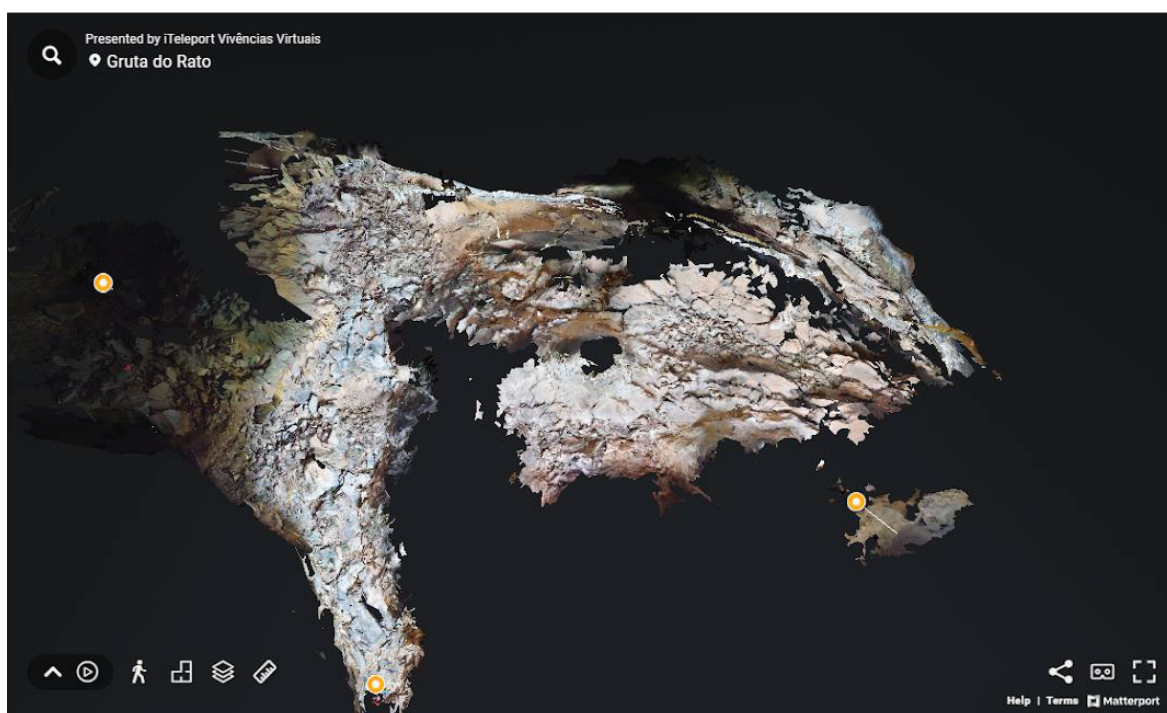
A capacidade de utilização do Matterport em levantamentos arqueológicos foi avaliada por Shults *et al.* (2019) durante pesquisas na mina de cobre histórica localizada no Estado do Michigan, EUA. Um dos objetivos deste projeto foi dar suporte à Quincy Mine Hoist Association (QMHA), uma organização voluntária, a preservar e restaurar a história da mina através da utilização de um modelo 3D de alta resolução e detalhe.

Antes da realização do levantamento, a câmera Matterport foi calibrada através da comparação das coordenadas obtidas com um scanner Faro, tendo sido detectado um erro sistemático significativo a ser contabilizado durante o processo. A conclusão foi de que apesar de ter uma boa qualidade fotorrealística, o Matterport tem um baixo nível de acurácia, com cerca de 80 mm em plano horizontal e 150 mm em plano vertical, ou de 0.3 a 3% em termos de fator de escala, havendo forte correlação com a distância. Os autores destacam que esta tecnologia não necessita de grande suporte geodésico e que o tempo médio gasto no levantamento de uma estação varia entre 2 a 3 minutos, sendo bastante simples a sua operação.

No Brasil, esta tecnologia vem sendo utilizada para levantamentos de cavernas e geração de passeios virtuais, como no caso da Gruta do Rato (FIGURA 53), localizada no município de Jequitibá, MG. Esta cavidade carbonática, pesquisada por Peter Lund no século XIX, teve sua área iluminada levantada em 2018, sendo a primeira a utilizar desta tecnologia em território nacional. Segundo Faria *et al.* (2019), a divulgação de espaços através dos passeios virtuais constitui-se em ferramenta de promoção da inclusão social por ser acessível a pessoas com dificuldades de locomoção ou de recursos financeiros para viagens, numa experiência realística possibilitada pela tecnologia 3D. Tais espaços podem ser visualizados, inclusive, com o auxílio de óculos 3D, contribuindo na divulgação do patrimônio espeleológico.

Faria *et al* (2019) ressaltam que este método de levantamento permite a produção de plantas baixas e exportação do modelo para softwares de edição, podendo complementar ou mesmo substituir a etapa de topografia de cavidades. No entanto, tem o inconveniente de necessitar de iluminação integral para o levantamento do interior das cavidades.

FIGURA 53 - LEVANTAMENTO DA GRUTA DO RATO POR TECNOLOGIA MATTERPORT.



FONTE: : <https://portal.iteleport.com.br/tour3d/gruta-fantastica-rato/>.

Acessado em 18 de janeiro de 2023.

Além da Gruta do Rato, o levantamento por Matterport foi realizado por outra equipe na **Gruta Bonita**, localizada no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, norte de Minas Gerais, não tendo resultado em publicação. Outras experiências de levantamentos de cavernas por Matterport podem ser acessadas através do site da própria empresa¹².

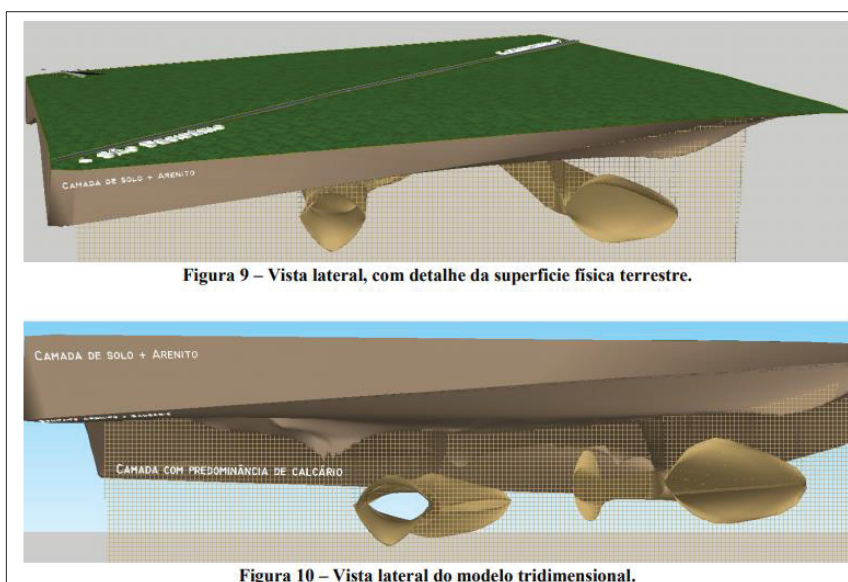
¹² Disponível em <https://matterport.com/discover/collection/q8w2zw4ohMZ>, acessado em 30 de novembro de 2022.

2.4.4 - MÉTODOS GEOFÍSICOS

Segundo Gallay *et al.* (2015), métodos geofísicos são úteis para detectar espaços subterrâneos vazios, mas provêm pouca informação espacial de detalhe para a geração de uma mapa espeleológico dados os baixos níveis de detalhe do método.

Levantamentos geofísicos visam prover informações relativas à subsuperfície, usualmente na avaliação da disponibilidade ou vulnerabilidade de aquíferos, riscos geotécnicos (CHALIKAKIS *et al.*, 2011), no mapeamento litoestrutural (GAMA *et al.*, 2019) ou na delimitação de cavidades (MLENEK *et al.*, 2017) (FIGURA 54). Métodos geofísicos são utilizados desde a década de 60, tendo ganhado maior expressividade nos últimos anos dados os desenvolvimentos tecnológicos, redução dos custos, simplificação dos procedimentos de campo e melhor interpretação dos dados. No entanto, dadas as características do método, os perfis geofísicos não podem ser utilizados para a geração de mapas de detalhe, dada a baixa resolução do sinal que se degrada de acordo com a profundidade atingida.

FIGURA 54 - MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA CAVERNA BURACO DO INFERNO.

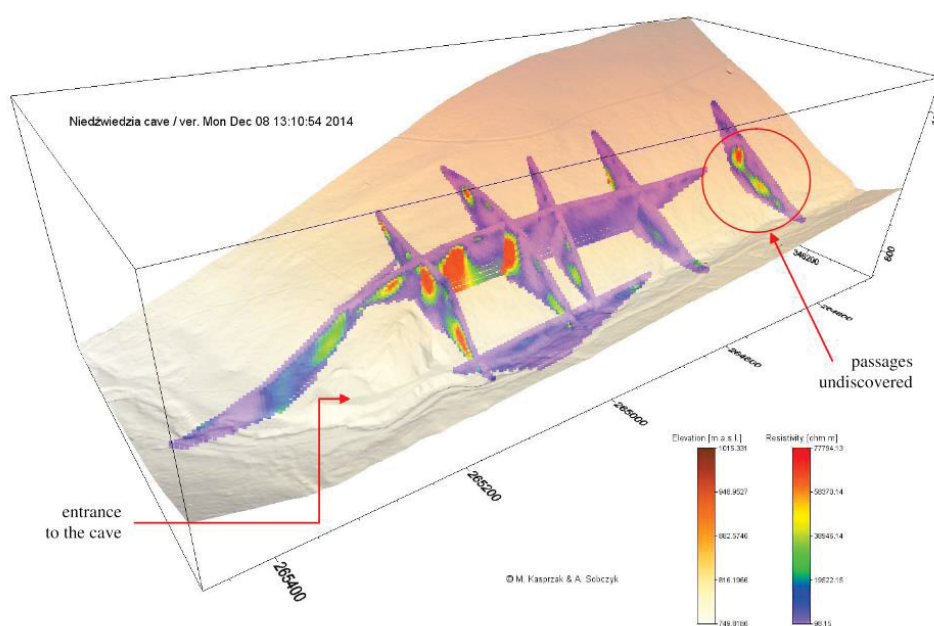


FONTE: Mlenek *et al.*, 2017.

Kasprzak *et al.* (2015) apresentam os resultados dos últimos estudos na área cárstica do vale Kleśnica, sudoeste da Polônia, onde foram empregados levantamentos geofísicos de superfície, MDT gerado por aerolevanteamento por LiDAR e mapeamento subterrâneo tradicional. Os levantamentos geofísicos foram realizados

por Ground Penetrating Radar – GPR e tomografia por eletrorresistividade bidimensional, sendo de fundamental importância para a identificação de vazios subterrâneos e da continuidade dos calcários cristalinos (FIGURA 55). Tais levantamentos revelaram três níveis de vazios cársticos na [Caverna Niedźwiedzia](#). Além disso, a lente de calcário cristalino contém numerosos vazios cársticos menores, constituindo o nível subterrâneo mais alto, com passagens ainda não descobertas. Sua espessura total é de menos de 100m e é sugerido que seus limites sejam revistos, dada a identificação de porções a leste e a sul, fora dos afloramentos já mapeados e representados nos mapas geológicos disponíveis. As maiores dificuldades encontradas nessa pesquisa se referem à exploração e mapeamento dentro da caverna, com inclinação $\geq 30^\circ$ durante os levantamentos geofísicos.

FIGURA 55 - IMAGEM TRIDIMENSIONAL DOS CONDUTOS CÁRSTICOS DETECTADOS POR TOMOGRAFIA POR RESISTIVIDADE ELÉTRICA NO VALE KLEŚNICA DESTACADOS EM CORES QUENTES.

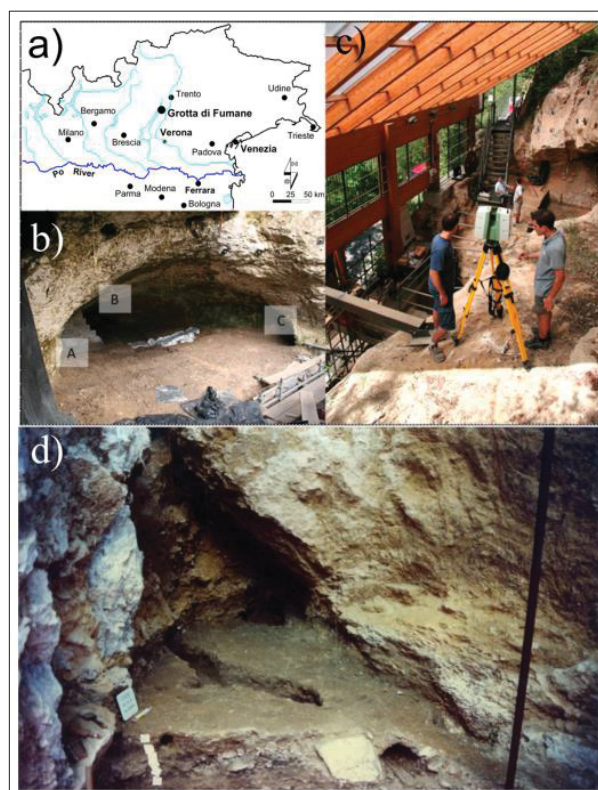


FONTE: Kasprzak, 2015.

Visando obter informações sobre os depósitos pleistocênicos da [Grotta de Fumane](#), arredores de Verona, Itália, Abu Zeid *et al.* (2019) utilizaram geomática integrada e levantamentos geofísicos. Ainda que raramente os métodos geofísicos sejam utilizados na pesquisa de sítios paleolíticos dada o baixo contraste dos vestígios, sendo de difícil detecção e disponibilidade de recursos, estes foram

aplicados visando a delimitação, avaliação da distribuição e espessura do depósito (FIGURA 56). A presença de numerosas camadas arqueológicas densamente compactadas e incontáveis vestígios de tamanho minúsculo tornam qualquer teste invasivo (poços de teste, sondagem) impraticável. Isso abre novos caminhos para a implementação de levantamentos geofísicos e topográficos integrados. Para tanto, foram utilizadas técnicas de varredura a laser e fotogrametria para a criação de um modelo digital tridimensional e de tomografia por resistividade elétrica para o mapeamento da distribuição de resistividade na superfície. De forma complementar, foram utilizadas medições sísmicas de estação única para fornecer uma confirmação indireta da espessura dos sedimentos por inversão da relação espectral experimental de microtremores, indicando áreas de maior interesse arqueológico. Essas informações orientaram as escavações de 2014–2017 e continuam fornecendo suporte para planejamento de longo prazo de intervenções futuras.

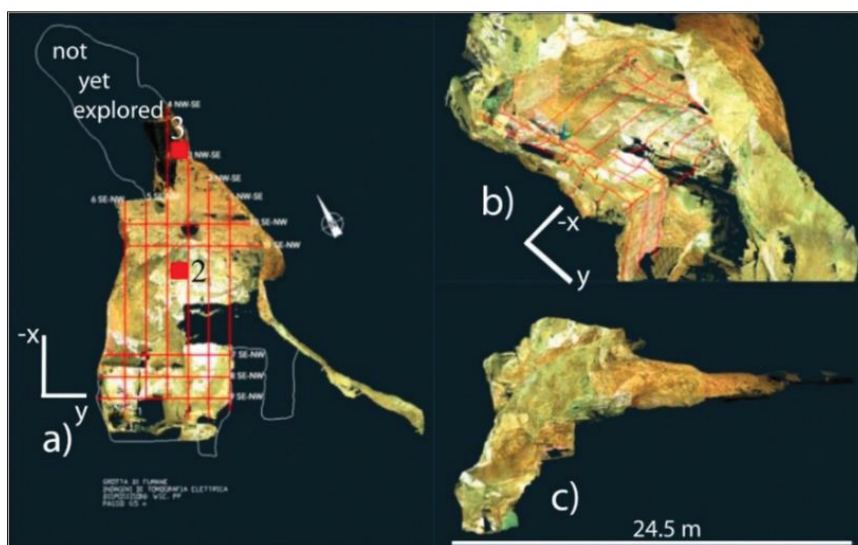
FIGURA 56 - LOCALIZAÇÃO DA CAVERNA FUMANE (NORTE DA ITÁLIA) (A); VISTA NORTE DA ENTRADA DA CAVERNA ONDE FOI REALIZADO O LEVANTAMENTO DO ERT (B); INSTANTE DA FASE DE COLETA DE DADOS DO SCANNER A LASER (C); E UMA PARTE DA ENTRADA DA CAVERNA DESENTERRADA DURANTE A ESCAVAÇÃO EM 1989 (D).



FONTE: Zeid, 2019.

Os autores concluem que a investigação geofísica provou ser bem-sucedida em mapear a morfologia da subsuperfície do leito rochoso, bem como fornecer informações sobre a natureza, espessura e volume dos sedimentos de preenchimento de uma forma completamente não destrutiva. Destacam as vantagens de curto prazo fornecidas pelos achados que dizem respeito à identificação de áreas com maior conteúdo de sedimentos. Já as vantagens de longo prazo se referem à expectativa de que a tendência continue com o uso combinado de ambos os métodos geofísicos (3D ERT e microtremores) e modelos digitais junto à comunidade arqueológica (FIGURA 57). Dado o tempo de execução das campanhas arqueológicas ser de longa duração, o georreferenciamento das informações coletadas durante esse processo permitirá a minimização de erros, sua imediata consulta, integração e correção. Nesse sentido, o modelo digital de caverna fornece uma estrutura tridimensional detalhada para posicionar corretamente as imagens referenciadas de tais vestígios e os resultados geofísicos, destacando estruturas cársticas relevantes e descontinuidades sedimentares que passariam despercebidas no processo dedutivo arqueológico. A integração em meio digital de informações de diferentes métodos é uma poderosa ferramenta de divulgação com impacto visual, favorável à disseminação do conhecimento e comunicação de resultados mais amplo, destacando a importância dos sítios pré-históricos na explicação da história e evolução do ser humano.

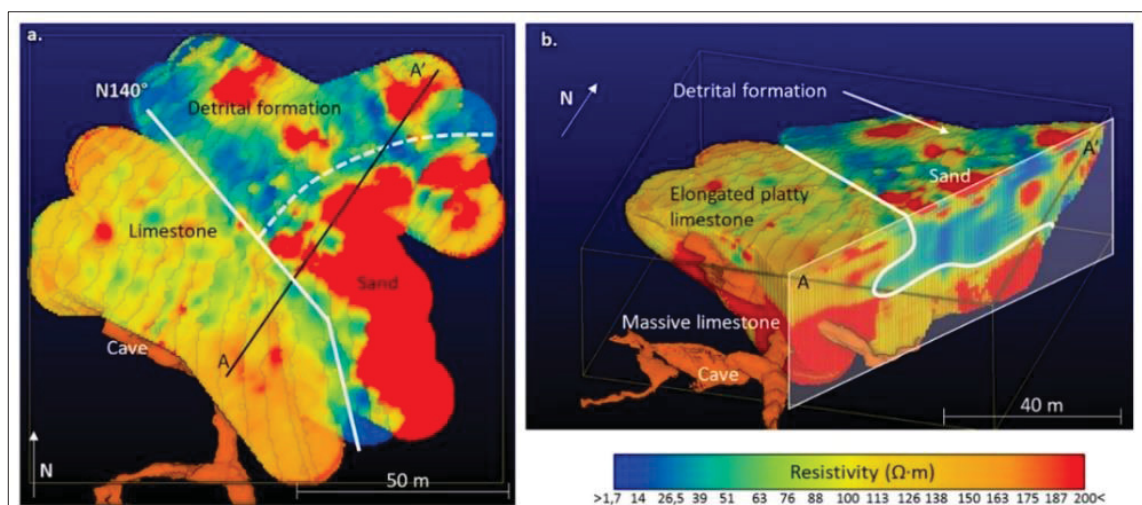
FIGURA 57 - VISTA EM PLANTA DOS PERFIS DE ERT (LINHAS VERMELHAS) (A); VISTA 3D DOS PERFIS DA ERT E MODELO TOPOGRÁFICO DA GRUTA DE FUMANE (B); FOTO DO MODELO TOPOGRÁFICO (C). QUADRADOS VERMELHOS: POSIÇÃO DE DOIS DOS TESTES HVSR.



FONTE: Zeid, 2019.

Considerando que o estudo das feições cársticas sob uma cobertura detrítica é difícil de ser obtido com ferramentas tradicionais pontuais, Verdet *et al* (2020) propuseram o emprego da modelagem geoestatística 3D de dados ERT (Electrical Resistivity Tomography) para descrever feições cársticas em subsuperfície (FIGURA 58). O estudo de caso foi realizado no sítio cárstico de entorno da caverna de Lascaux, na França e utilizou um modelo 3D para definir os limites entre o afloramento de calcários e sedimentos, constituídos por uma escarpa, pináculos e lapiezamento encontrados sob a formação detrítica de areia argilosa. A combinação da tomografia por eletrorresistividade (ERT) com observações geomorfológicas e geológicas *in situ* permitiu uma melhor delimitação estratigráfica entre calcários de forma não destrutiva. Neste trabalho foram utilizados dois eletrodos emissores (corrente) e dois eletrodos receptores (potencial), sendo a diferença de potencial medida nos terminais dos eletrodos receptores. O modelo geoestatístico considerou os dados geológicos juntamente aos perfis geofísicos 2D e foi gerado no software Isatis® e segue uma sucessão de etapas como a geração de variogramas, validação cruzada e Krigagem. O trabalho resultou na identificação de elementos cársticos encobertos como pináculos, escarpas, lapiás e saliências, assim como na delimitação das litofácies dos calcários. E afirma que o contraste de permeabilidade entre essas duas formações pode favorecer os fluxos hídricos observados na entrada da caverna.

FIGURA 58 - MODELO GEOESTATÍSTICO 3D DA GRUTA DE LASCAUX INTERPRETADO A PARTIR DOS LEVANTAMENTOS POR ERT; (A) VISTA EM PLANTA DOS LIMITES DA SUPERFÍCIE; (B) VISTA DE SUL MOSTRANDO A ESTRUTURA INTERNA DO MACIÇO.



FONTE: Verdet *et al.*, 2022.

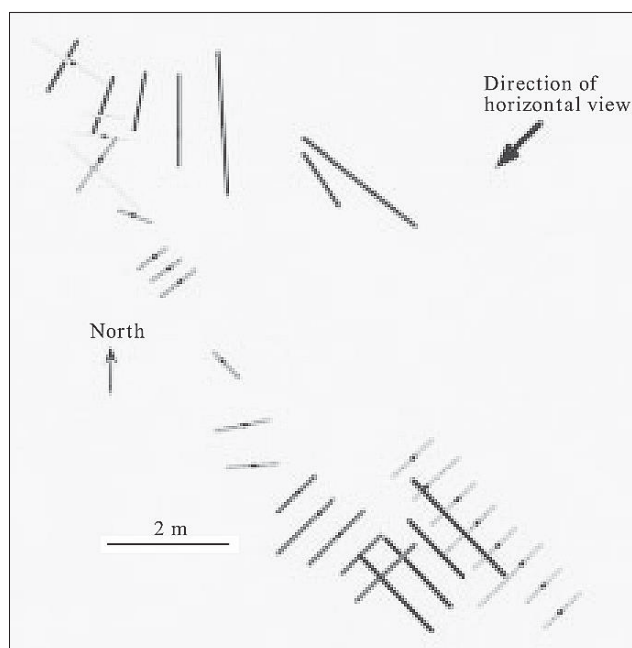
2.4.5 - LEVANTAMENTOS POR SONAR

Levantamentos de condutos subterrâneos secos e, mais comumente submersos através de sonares vêm sendo executados há algumas décadas ao redor do Mundo, não tendo sido identificado seu uso no Brasil. Seu emprego requer recursos na pesquisa, treinamento, construção do veículo, implantação de sensores, dispositivos de comunicação e programas para tratamento dos dados. Tais necessidades restringem sua utilização, ainda que haja vasto potencial de uso na exploração e conexão de cavidades submersas.

A forma mais comum de levantamento de cavidades é através do mapeamento topográfico que, no entanto, não permite um nível de detalhamento compatível com pesquisas paleontológicas e arqueológicas. Esse problema pode ser contornado ao se utilizar o sistema automatizado baseado em sonares, como o descrito por Sellers *et al* (1998), sendo razoavelmente rápido e capaz de reproduzir perfis, numa abordagem que permite uma reconstrução 3D completa e precisa para visualização posterior. Ainda que haja vários instrumentos para se calcular a distância de um objeto a um determinado ponto, as ondas sonoras são uma alternativa adequada para detecção de alcance onde a precisão exata não é necessária (Gibson, 1991a *apud* Sellers, 1998).

Nesta pesquisa, os autores utilizaram um sistema de levantamento onde um emissor de ultrassom rotativo foi montado de forma que o feixe varresse as paredes de uma caverna na Inglaterra em um plano vertical. O sistema é capaz de calcular a distância da parede ao emissor em qualquer ponto desta varredura radial e assim é capaz de calcular o perfil da caverna neste plano. Ao mover o emissor através do sistema de cavernas, um conjunto de perfis é construído como uma sequência de fatias. Essas fatias podem ser remontadas em um programa CAD para reconstruir a forma 3D do sistema de cavernas (FIGURA 59). Testes preliminares mostraram que o protótipo poderia identificar ecos de paredes a mais de 10 m de distância em condições ideais, com precisão de 5 cm.

FIGURA 59 - VISTA EM PLANTA DO CONJUNTO DE PERFIS VERTICAIS DIMENSIONADOS E ORIENTADOS CORRETAMENTE NO AUTOCAD.



FONTE: Sellers *et al.*, 1998.

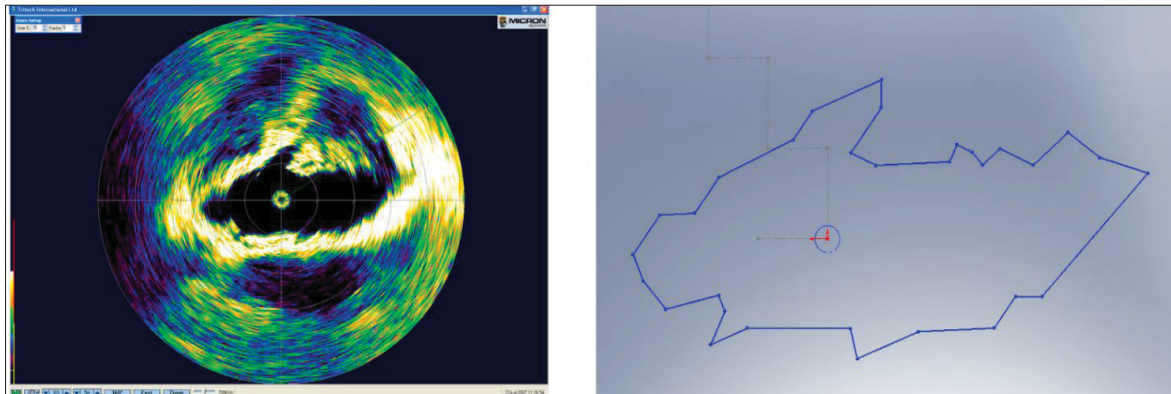
O maior objetivo da expedição à [Caverna Wakulla 2](#), localizada na Flórida, foi de realizar o seu mapeamento completo de forma automatizada através de um sistema em que 32 transdutores sonares foram alocados radialmente no nariz de um *scooter* guiado por mergulhadores desenhado especificamente para este projeto (Ende, 2001) para o levantamento 3D. De forma a registrar a exata posição e orientação do aparelho, foi utilizada uma unidade de medida inercial (IMU), onde os acelerômetros mediram as mudanças de velocidade e estas eram convertidas em distâncias cobertas desde um ponto de referência. Um código escrito em C permitiu o display, em 3D, do levantamento, visando o mapeamento da cavidade. Os dados foram armazenados internamente no instrumento e após o download em um laptop, foram convertidos de arquivos binários para o formato ASCII, representando tanto o formato dos condutos, quanto a trajetória do instrumento. Durante esse processo foram levantados 38 rádio localizações para servirem de pontos de referência para o ajustamento dos erros por *drifts* aos dados tridimensionais da caverna, considerando ser esta uma cavidade de apenas uma entrada, sem poligonais fechadas que permitissem a correção dos erros. Como resultado, o sonar delineou a passagem com grande precisão e detalhe, em nível centimétrico, sendo possível em função do uso

das estações rádio localizadas, que apresentaram um erro máximo de $\pm 0,25$ m. Um total de 10.000.000 de pontos foram levantados, resultando em 6.409 m de desenvolvimento.

Um método de modelagem com o uso de um veículo pilotado remotamente equipado com um sonar, sensor de profundidade e uma bússola eletrônica foi apresentado por Stipanov *et al.* (2008) nos trabalhos de mapeamento da caverna Vilina Spilja, localizada em Montenegro. O resultado foi um modelo digital 3D da parte explorada da caverna, utilizado para uma estimativa acurada do volume e fluxo de água. Esta caverna encontra-se submersa mesmo em períodos mais secos do ano, havendo interesse das autoridades locais na exploração de recursos hídricos. O objetivo desta missão foi explorar a parte desconhecida da cavidade e realizar o seu mapeamento integral a partir da delimitação de cortes transversais a cada poucos metros (FIGURA 60). Este trabalho foi dificultado por condutos estreitos e rochas cortantes, tendo causado muitos emaranhados de cabo durante a operação. Com o *software* SolidWorks®, foi feita a modelagem do conduto a partir dos 36 cortes transversais levantados, sendo criada uma superfície entre cada par de cortes, resultando num corpo sólido representando o modelo digital 3D da cavidade, base para o cálculo do volume. Considerando que as seções foram digitalizadas manualmente e que há algum erro associado ao sensor, testes foram feitos para avaliar possível interferência magnética da bússola em um tanque e várias varreduras num mesmo local foram realizadas. Disto concluem que a reverberação sonora e o multipath não afetaram as medições de forma significativa. A desvantagem deste método reside na sua natureza incremental, uma vez que o comprimento do cabo solto é usado para se medir as distâncias, permitindo um rápido acúmulo de erros. A amarra não é sempre idealmente esticado para que a medição seja tão precisa como poderia estar usando um sistema de posicionamento.

Como nenhum sistema de posicionamento acústico pode ser aplicado aqui, o erro de medição só pode ser diminuído com o uso de um IMU para posicionamento. No entanto, este método de mapeamento leva cerca de 1 hora por 100m de caverna e, portanto, uma IMU de qualidade não acumularia qualquer erro de medição significativo. Para os autores, uma plataforma ideal para este propósito seria um ROV de 6 graus de liberdade com uma IMU integrada para posicionamento e estabilização.

FIGURA 60 - EXEMPLO DE SEÇÃO TRANSVERSAL (À ESQUERDA) E A VETORIZAÇÃO MANUAL (À DIREITA).



FONTE: Stipanov *et al.*, (2008).

Experiências recentes têm ressaltado a evolução de um veículo pilotado remotamente em levantamentos por sonar de cavernas submersas. Richmond *et al.* (2020) e Siegel *et al.* (2022) apresentaram o SUNFISH® (FIGURA 61), um veículo autônomo, leve, controlável com seis graus de liberdade. Este sistema apresenta uma grande manobrabilidade, característica fundamental para a aquisição de dados e construção de mapas com detalhes até então impossíveis.

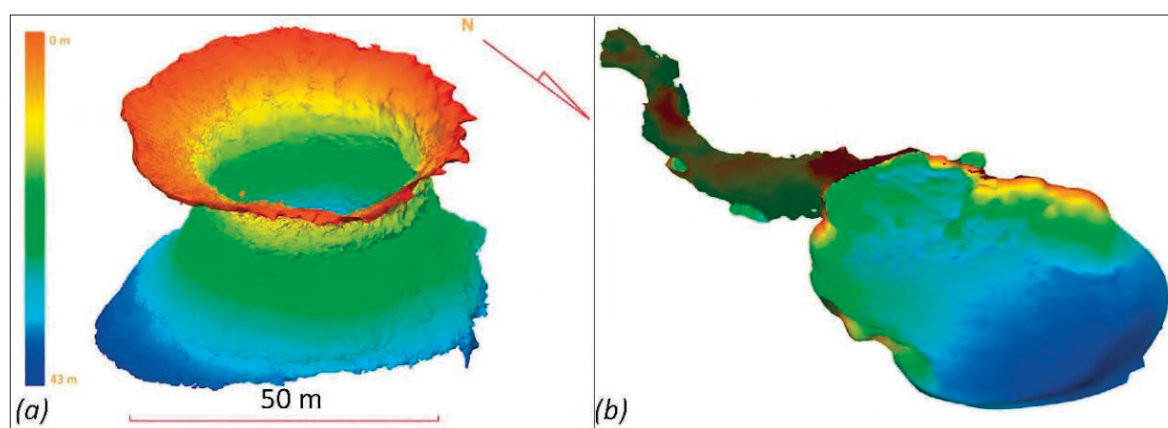
FIGURA 61 - SUNFISH® AO LADO DE UM MERGULHADOR.



FONTE: Modificado de Richmond *et al.*, 2020.

Os sensores embarcados permitem uma variedade de tarefas operacionais para pesquisa, inspeções, exploração e mapeamento de cavernas submersas de geometria complexa. A geometria da cavidade é utilizada em tempo real como referência a um motor de localização e mapeamento simultâneos (SLAM), vindo a corrigir erros de navegação através de algoritmos com comportamento de AI, de modo a responder de forma independente, mesmo em territórios ainda não explorados, a uma variedade de situações análogas às experimentadas por mergulhadores. Testados, primeiramente, no sistema de cavernas de [Peacock Springs](#), os comportamentos de exploração e recursos de mapeamento do SUNFISH® vem sendo utilizados em outros locais, [Gruta de Hudson](#) (FIGURA 62), na Flórida, nas grutas de [Harasib](#) e [Dragon's Breath](#) no norte da Namíbia e cavernas marinhas na Califórnia.

FIGURA 62 - LEVANTAMENTO DA CAVERNA HUDSON (A) E CAVERNAS SEAL COVE (B) REALIZADO PELO SUNFISH®.



FONTE: Modificado de Richmond *et al.*, 2020.

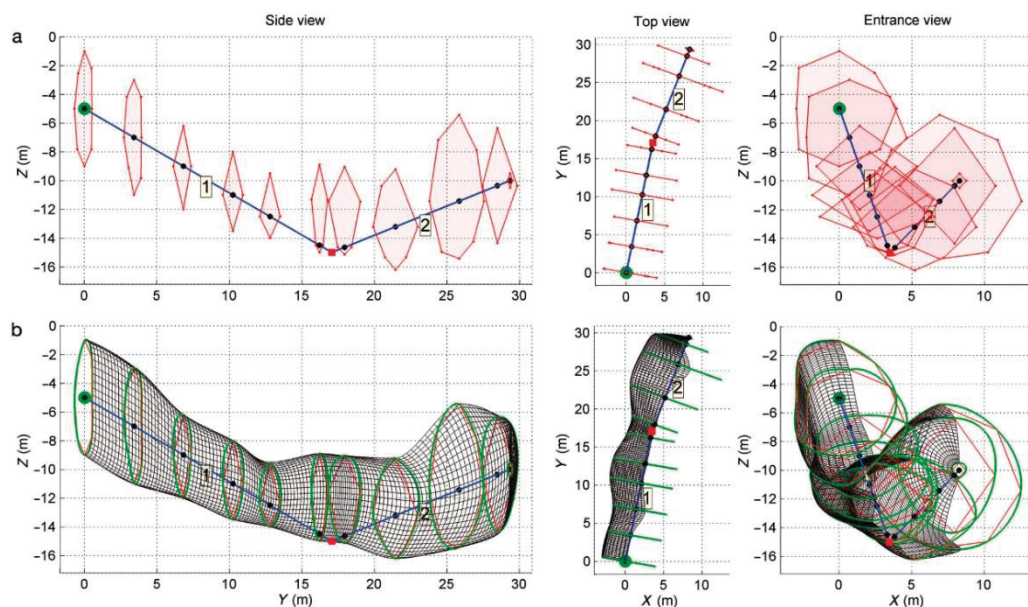
O mapeamento de locais como cavernas marinhas submarinas ou semi-submersas é essencial quando se estuda a distribuição espaço-temporal de assembléias sésseis. Daí que a aquisição das medidas topográficas necessárias é uma atividade desafiadora, visto que o mapeamento subaquático é realizado em espaços reduzidos, com restrição de tempo ou visibilidade limitados. Em estudo conduzido por Gerovasileiou *et al.* (2013), um método rápido e econômico para o mapeamento tridimensional e visualização de cavernas marinhas simples a ser implementado por dois mergulhadores usando uma linha de mergulho, uma ecossonda portátil de baixo custo e equipamento de mergulho padrão é apresentado.

No método proposto, os dados de origem são particularmente compactos e projetados para facilitar a aquisição subaquática e o pós-processamento é executado automaticamente pelo software personalizado que o acompanha. A saída é um modelo tridimensional em escala da caverna pesquisada, que pode ser visualizado a partir de qualquer orientação específica. Este modelo pode ser fatiado para representar os padrões de zonação horizontal de conjuntos bentônicos ou usado para extrair estimativas aproximadas da área da seção transversal de uma passagem. O método pode auxiliar o desenho amostral de estudos ecológicos com alocação mínima de recursos de mapeamento e auxiliar na avaliação de características topográficas que possam afetar a distribuição espacial da biota marinha. O esquema de mapeamento proposto foi testado, experimentalmente, em condições de campo em três cavernas marinhas localizadas no Mar Egeu do Norte.

Os processamentos e a visualização dos dados foram executados no MATLAB, sendo os dados de entrada os dados topográficos medidos (FIGURA 63). Três etapas são necessárias ao processo, sendo a primeira a reconstrução da geometria da cavernas baseada nas medidas; a interpolação dessas medidas para a criação da base para a malha 3D e a visualização do modelo final. Todas as etapas são automatizadas, não requerendo intervenção do usuário.

O método apresentado fornece um esquema de mapeamento adaptável para produzir uma representação realista do ambiente subaquático de maneira rápida e econômica. Como demonstrado pelos ensaios de campo, o método é aplicável tanto para cavernas marinhas totalmente ou semi-submersas, exigindo um pequeno número de mergulhos dedicados e equipamentos disponíveis. Os modelos 3D resultantes podem ajudar na avaliação de características topográficas características ou morfologia geral da caverna que podem determinar a composição observada e a distribuição espacial da biota marinha. A representação 3D destes locais fornece uma base para o monitoramento de cavernas individuais ao longo do tempo e potencializa a divulgação de resultados científicos para uma comunidade mais ampla. A ecossonda portátil fornece um meio para a aquisição de distâncias radiais, podendo ser facilmente substituída por uma fita métrica em setores de cavernas onde a morfologia da parede dificulta as medições acústicas.

FIGURA 63 - MAPEAMENTO RÁPIDO DE UMA CAVERNA SUBAQUÁTICA. (A) CORDA de REFERÊNCIA PARA O SISTEMA DE COORDENADAS (LINHA AZUL) E AS MEDIÇÕES DE SEÇÃO TRANSVERSAL EM INTERVALOS LONGITUDINAIS (LIMITES VERMELHOS). (B) ENTRADA DA CAVERNA (MARCADOR VERDE).



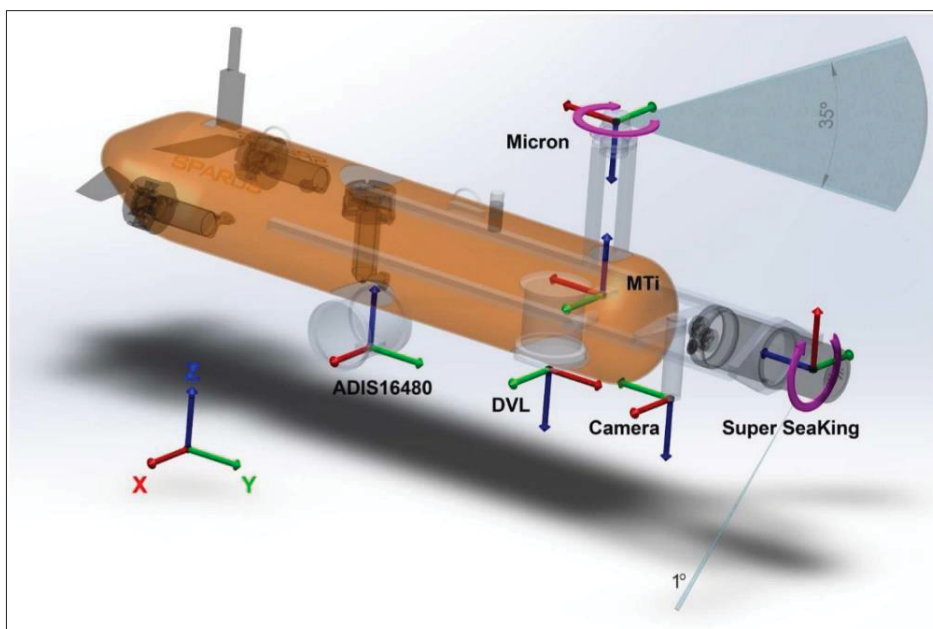
FONTE: Gerovasileou *et al.*, 2013.

O artigo de Mallios *et al.* (2017) descreve um conjunto de dados coletados com um veículo subaquático autônomo testado no ambiente complexo de cavernas subaquáticas. Embora seja uma importante área de estudo, há poucas pesquisas publicadas sobre localização simultânea e mapeamento (SLAM) em ambientes subaquáticos confinados, principalmente pelas dificuldades inerentes à realização dos experimentos. O veículo foi equipado com dois sonares para detectar simultaneamente as superfícies horizontais e verticais das cavernas, além de um registro de velocidade Doppler, duas unidades de medida inercial, um sensor de profundidade e uma câmera montada verticalmente que capta imagens do fundo do mar para validação em pontos específicos (FIGURA 64). O ensaio foi realizado em julho de 2013, guiado por um mergulhador humano para contornar a navegação autônoma em um ambiente complexo. A trajetória do veículo foi projetada para conter vários fechamentos de *loop*, útil para testar algoritmos SLAM.

Para validação do algoritmo, o conjunto de dados incluiu seis cones de trânsito como pontos de referência facilmente distinguíveis nas imagens e com distancias conhecidas. A posição relativa dos cones pode ser encontrada extraindo os *timestamps* dos quadros de vídeo onde os cones aparecem mais próximos do centro

da imagem e comparar com os *timesteps* da trajetória. O deslocamento relativo entre o cone e o referencial do veículo pode então ser encontrado usando a câmera existente. No plano vertical, os deslocamentos são registrados com medições absolutas do sensor de pressão com precisão centimétrica. Os autores acreditam que seu experimento e os dados disponibilizados possam ser úteis para outros investigadores na área da exploração autônoma em ambientes subaquáticos confinados.

FIGURA 64 - POSIÇÃO RELATIVA DOS QUADROS DO SENSOR EM RELAÇÃO AO QUADRO DO VEÍCULO.



FONTE: Mallios, 2017.

2.5 - ERROS E AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

2.5.1 - ERROS

Dadas as características do ambiente cavernícola como a morfologia extremamente variável, desníveis, blocos, corpos d'água, argila, partículas em suspensão, gotejamentos, dificuldades no caminhamento, número de estações, comprimento das visadas e tipos de instrumentos utilizados, entre outras, é de se esperar que haja erros consideráveis no mapeamento topográfico de cavernas (TABELA 1).

TABELA 1 - TIPOS DE ERROS, CLASSIFICAÇÃO E FORMAS DE MINIMIZAÇÃO.

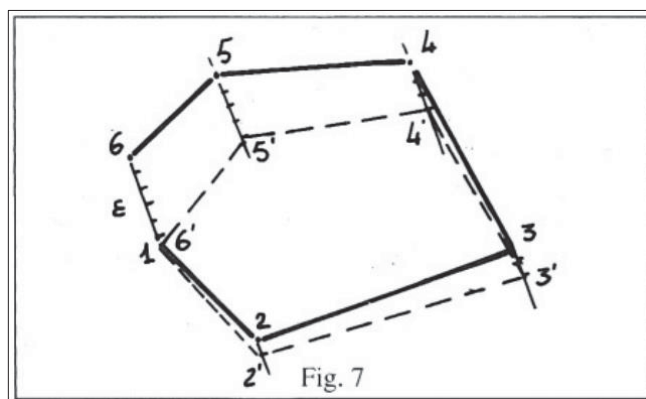
TIPO	ERRO	MINIMIZAÇÃO
Aleatório	Posicionamento da estação externa por GNSS	Uso de RTK
Aleatório/Grosseiro	Erro de leitura do Alfa C, Azimute e distância	Uso de instrumentos mais preciso (DistoX2);
Aleatório/Grosseiro	Anomalia magnética	Testar o magnetismo da rocha
Aleatório/Grosseiro	Centragem da bússola	Posicionar estações em superfícies adequadas
Grosseiro	Erro de posicionamento do Ponto 0	Observar o posicionamento
Grosseiro	Erro de leitura da HT	Verticalizar a medida
Grosseiro	Erros de leituras laterais	Ortogonalizar a medida
Grosseiro	Inversão de leitura da agulha	Observar informações técnicas do instrumento
Grosseiro	Erro de atribuição de unidades	Checar o setup da trena a laser
Grosseiro	Erros na elaboração de croquis	Tomar medidas auxiliares
Grosseiro	Deslocamento estações topográficas	Uso de estação fixa
Grosseiro	Erros de anotação	Concentração
Grosseiro	Erros de digitação	Realizar conferência dos dados
Grosseiro	Perda de dados	Backup
Grosseiro/Sistemático	Erro de escala do croqui	Anotar com clareza
Grosseiro/Sistemático	Erro de escala no escalímetro	Anotar com clareza
Sistemático	Instrumento descalibrado	Calibrar e ajustar o instrumento

FONTE: Elaborada pelo autor, 2022.

Ainda que não sejam desconhecidos dos topógrafos de cavernas os erros inerentes às topografias, sua avaliação pressupõe o conhecimento teórico e levantamentos com poligonais fechadas ou, ainda, enquadradas. Raras exceções, os topógrafos de cavernas no Brasil não possuem formação em Topografia, sendo que o aprendizado se dá de forma prática nos trabalhos de campo voltados a mapeamentos espeleológicos e nem sempre é tratado de forma conceitual em escritório. Isso não parece ser diferente em outros países e para minimizar este

desconhecimento, entidades espeleológicas vem divulgando trabalhos com essa temática, como no caso da apostila de Topografia Espeleológica da *Federación Española de Espeleología*¹³ (RIUS, 1992). O autor afirma que em toda topografia é fundamental conhecer o grau de precisão em que se trabalha que, no entanto, quase nunca são realizadas poligonais fechadas, devendo-se buscar aproximações (FIGURA 65). A representação gráfica da distribuição dos erros aleatórios em função das suas magnitudes e frequências é a conhecida curva de Gauss e estes podem ser compensados por métodos de ajustamento de observações.

FIGURA 65 - EXEMPLO DE POLIGONAL FECHADA ONDE O PONTO 6 DEVERIA COINCIDIR COM O PONTO 1, SENDO O SEGMENTO E O ERRO ASSOCIADO.



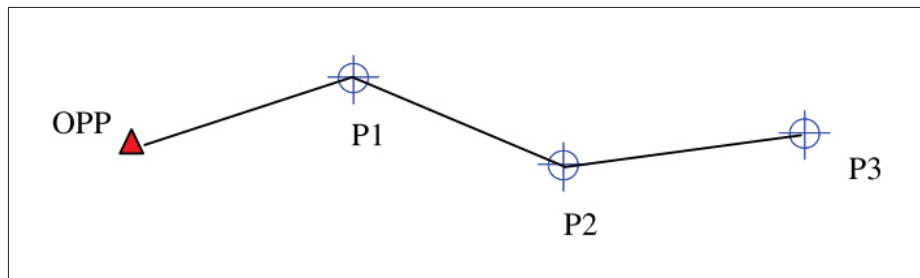
FONTE: Rius, 1992.

Para Fish (1999), erros nos levantamentos são um dos problemas mais importantes a serem considerados pelos topógrafos de cavernas uma vez que tem implicações na precisão dos mapas e no design de softwares de topografia (FIGURA 66). Para o autor, erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros ocorrem pelo fato de ser impossível de se obter medições absolutamente perfeitas a cada vez que se lê uma bússola, inclinômetro ou trena. Os efeitos dos erros aleatórios são geralmente pequenos e podem ser tratados usando técnicas estatísticas. Os erros sistemáticos ocorrem quando há um erro constante e fixo sendo aplicado aos dados e podem ser corrigidos simplesmente subtraindo uma constante dos dados através de fórmulas específicas (VEIGA *et al.* 2012). Os erros grosseiros são erros fundamentais no

¹³ Atualmente Confederación de Espeleología Y Cañones. Disponível em: [HTTPS://CEC-ESPELEO.COM/](https://cec-espeleo.com/). Acessado em 27 de fevereiro de 2023.

processo de levantamento, geralmente causados por ação humana. São erros no processamento ou registro de dados de pesquisa e o que os torna tão importantes é o fato deles poderem produzir erros grandes e imprevisíveis.

FIGURA 66 - ERROS NUMA POLIGONAL ABERTA, SITUAÇÃO COMUM EM LEVANTAMENTOS ESPELEOLÓGICOS.



FONTE: Veiga *et al.*, 2012.

Para Palmer (2002), um bom mapa da caverna mostra como é a caverna e como se localizar a partir deste, sendo a precisão um problema secundário. A minimização dos erros grosseiros passa pela escolha do melhor instrumento que, na visão de Palmer, é a bússola Brunton montada sobre tripé, devendo-se atentar à duas diretrizes: que as leituras devam ser feitas por operadores experientes ao menos por duas vezes, livre de distrações e que o instrumento deva estar devidamente calibrado. Os erros resultantes apresentam valores de 0.05%, o que atesta a relativa precisão do instrumento.

FIGURA 67 – ALVO COM ILUMINAÇÃO SOBRE CABEÇA GIRATÓRIA.



FONTE: Palmer, 2002.

Ortiz *et al.* (2010) atentam para o fato de que a única forma de se conhecer a magnitude dos possíveis erros cometidos em uma poligonal é a realização de uma poligonal fechada, sendo que o erro se trata da diferença entre um valor medido e um valor de referência. Devem ser consideradas também a confiabilidade dos instrumentos e as condições gerais em que a medida é realizada. O autor destaca que a questão principal é conhecer a magnitude desses erros e verificar se estão dentro de um intervalo de confiança admissível, podendo ser de causas instrumentais, ambientais ou humanas. Destaca também que o valor mais provável de uma medida é a média aritmética das medidas efetuadas nas mesmas condições, o que seria algo bem incomum de se adotar em mapeamentos de cavernas, à exceção de trabalhos de testagem de instrumentos ou em situações que exigem alta precisão. Em testes de fechamento de poligonais em cavernas da Espanha com o uso da DistoX e do software Auriga em que obteve um erro de 0.14% em uma poligonal de 1969, Ortiz (2010) apresenta o conceito de índice de qualidade de fechamento de poligonal enquanto o quociente entre o erro relativo e o erro esperado, considerando-se a precisão dos instrumentos.

Nas últimas décadas o interesse acerca das fontes de erros e formas de ajustamento tem aumentado em função da disponibilização de vários *softwares* para *desktop* e *app* para dispositivos móveis junto à comunidade espeleológica com esta funcionalidade, como é o caso do Compass¹⁴, Auriga¹⁵, Topodroid¹⁶, Walls¹⁷ entre outros (ORTIZ, 2012). A utilização de software permite agilizar a construção do mapa sobre a tela do dispositivo, permite a coleta de dados e transferência via Bluetooth e o tratamento dos erros através de algoritmos de Ajustamento pelo método dos mínimos quadrados.

Grosso modo, o nível de precisão e detalhamento servem para avaliar se um determinado mapa se presta a uma determinada função e podem ser classificados a partir de graduações como a UIS ou BCRA.

¹⁴ Disponível em: <https://www.fountainware.com/compass/>.

¹⁵ Disponível em: <https://auriga.top/>.

¹⁶ Disponível em: <https://sites.google.com/site/speleoapps/home> .

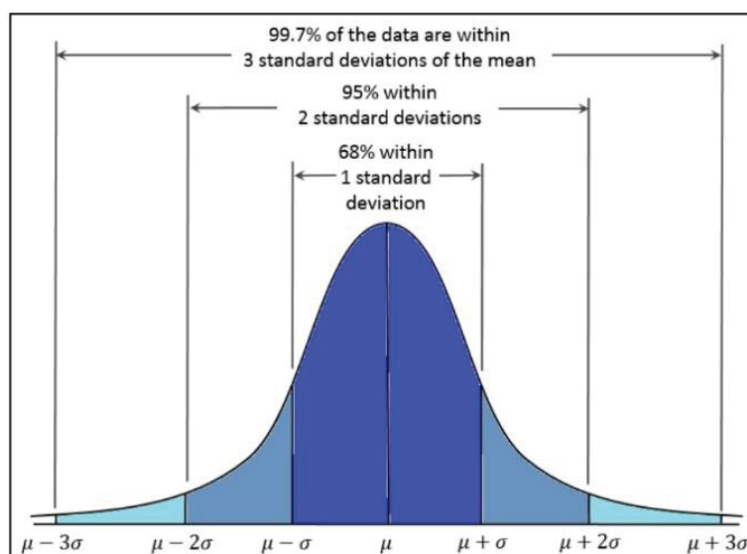
¹⁷ Disponível em: <https://www.texasspeleologicalsurvey.org/software/walls/tsswalls.php>.

2.5.2 – AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

No meio subterrâneo, as dificuldades na realização de medidas com maior precisão pelo método topográfico convencional são potencializadas pelas características do ambiente, pela destreza do operador e pela relativa baixa precisão nominal das bússolas mais utilizadas, Brunton e Suunto, geralmente de $\pm 0,5^\circ$ e leitura mínima de $\pm 1^\circ$. Desta forma, os procedimentos técnicos e instrumentais diferenciam a topografia subterrânea da topografia de superfície. Esta realidade está em processo de mudança em função da introdução de novos instrumentos, os já citados DistoX e BRIC4, ainda numericamente restritos em território nacional.

Tais condições de operação acarretam erros grosseiros, aleatórios e sistemáticos, reconhecidamente inerentes ao processo de levantamento topográfico, mas que devem ser identificados por análises estatísticas para a avaliação da sua distribuição e magnitude e ajustá-los para que se conformem a condições geométricas exatas ou outras restrições (GHILANI, 2018). Este autor afirma que nenhuma medida é exata, que toda mensuração contém erros, que o valor verdadeiro de uma observação não pode ser conhecido e que a exata dimensão de um erro não pode ser conhecida. Para contornar esta condição, opta-se pela obtenção do melhor valor possível para uma grandeza a partir de observações redundantes e pela obtenção da incerteza do melhor valor obtido, ou erro aparente (KLEIN *et al.*, 2018). Os erros aleatórios de levantamentos topográficos seguem uma distribuição normal (FIGURA 68).

FIGURA 68 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL E PRINCIPAIS INTERVALOS DE CONFIANÇA.



FONTE: Klein *et al.*, 2018.

De forma a minimizar as incertezas associadas às observações, pode-se utilizar o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), que possibilita a estimação da solução mais provável em função da amostra observada e também a qualidade dessa solução. O MMQ é um dos procedimentos mais utilizados no ajustamento de informações em que o número de observações é redundante e o sistema de equações é inconsistente devido aos erros de mensuração, sendo amplamente difundido e aceito na Geodésia (DALMOLIN, 2002; KLEIN *et al.*, 2011), caracterizado por minimizar a soma do quadrado dos erros aleatórios, ponderados pelos respectivos pesos das observações (GHILANI *et al.*, 2012). Para tanto, o número de observações deve ser maior que o número de parâmetros que se deseja ajustar, possibilitando uma solução única e exata (KLEIN *et al.*, 2018, *op. cit.*). Para Ghilani (2018), as vantagens no uso do MMQ para o ajustamento de observações é que este é o método de ajustamento mais rigoroso, que pode ser aplicado com maior facilidade que os demais, permite uma rigorosa análise pós-ajustamento e pode ser usado para planejar um levantamento. No entanto, Klein (2018., *op. cit.*) destaca o fato de que o MMQ, não é um estimador robusto, sendo sensível à presença de erros grosseiros, que podem ser absorvidos no processo de ajustamento e que poderão afetar a solução. Para tanto, deve-se aplicar algum método de controle de qualidade ao ajustamento, teste *Data Snooping* ou análise de covariância e das elipses de confiança.

No Brasil atual, o ajustamento de observações ainda não é tema amplamente conhecido pela comunidade espeleológica, seja pelo perfil do espeleólogo, pelas dificuldades de implementação dos algoritmos, ou pelas características morfológicas predominantes das cavernas: padrões de desenvolvimento lineares, meandrantas, geralmente de pequenas dimensões. Tais características resultam num menor emprego de poligonais fechadas, raramente poligonais enquadradas, sendo incomum a realização de medidas redundantes, condições que não permitem a realização de um ajustamento. Caso haja a necessidade de ajustar poligonais, este é feito com o auxílio de softwares de topografia espeleológica, que realizam o procedimento sem maior necessidade de conhecimento teórico do tema pelo operador. Nos EUA, por exemplo, o mapeamento de grandes cavernas labirínticas exigiu esforços no entendimento dos princípios teóricos e na implementação do uso do ajustamento

através da programação e adoção de softwares topográficos desde, pelo menos, a década de 70 do século passado, tendo refletido numa literatura espeleológica específica ao tema¹⁸.

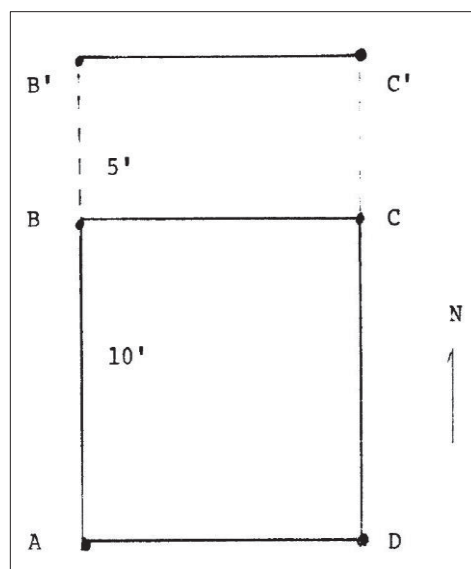
Numa análise de erros em levantamentos de cavernas, Crowl (1984) define os tipos e as fontes de erros, conceitua precisão e acurácia e disserta sobre o fechamento de poligonais. Segundo o autor, em uma série de artigos publicados em um informativo espeleológico em 1974 ele já alertava para o fato de que os espeleólogos possuem pouco conhecimento destes termos e de como essas fontes e tipos de erro afetam a acurácia de um levantamento. Segundo ele, os espeleólogos usam, incorretamente, os erros de fechamento de poligonal como indicadores da acurácia, resultado dos erros acumulados nos segmentos de um levantamento e fechamento de poligonal. Segundo o autor, *Loop Closure* se trata da distância absoluta entre dois pontos referentes a uma mesma estação (discrepância), sendo o fechamento de poligonal relativo definido como o valor do fechamento dividido pela distância total dos segmentos da poligonal. Desta forma, os espeleólogos assumem que um bom fechamento de uma poligonal significa um levantamento totalmente acurado. Mas na sua perspectiva, isto é apenas uma indicação de que a acurácia do levantamento se refere a um ponto em particular, sendo que em outros pontos a acurácia poderá ser maior ou menor do que entre os pontos de um fechamento de poligonal. Para exemplificar a questão, o autor apresenta uma figura em que considera a realização de observações entre o ponto A e B como tendo 10', equivocadamente medida como 15'. Entre B e C com 10' e entre C e D também com 10', medido equivocadamente como 15'. Considerando que erros aleatórios podem ocorrer em quaisquer direções, alguns dos erros podem ocorrer em direção ao norte e outros ao sul (FIGURA 69) e tenderão a serem compensados. Desta forma, apesar dos erros associados às medições das distâncias, dá-se o fechamento de uma poligonal. No entanto, as chances de um erro particularmente grande ser compensado exatamente por outro grande erro, ou uma série de pequenos erros, são bastante remotas. Por fim, adianta que num próximo artigo desta série¹⁹ iria discutir o tratamento numérico de fechamentos de uma poligonal e a dificuldade operacional, uma vez que os

¹⁸ A exemplo da revista *Compass and Tape*, editada entre 1983 e 2010 pela Seção de Cartografia e Levantamentos da National Speleological Society, disponível em <https://sacs.caves.org/c-t/index.html> e acessado em 4 de março de 2023.

¹⁹ Não foram localizados tais artigos na revista *Compass and Tape*.

procedimentos adotados à época distribuíam o erro pela distância, quando na realidade os erros deveriam ser distribuídos pelos ângulos.

FIGURA 69 – EXEMPLO DE FECHAMENTO DE POLIGONAL COM ERRO ASSOCIADO.



FONTE: Crowl, 1984.

Desenvolvedor do software Compass²⁰, Larry Fish escreveu uma série de artigos a respeito de erros, da aplicação do MMQ no fechamento de poligonais e problemas identificados, sobre fechamento simultâneo *versus* o sequencial e atribuição de pesos aos *loops*. A utilização de computadores para realizar o tratamento de dados topográficos de cavernas permitiu a Fish (1996) manusear e processar uma massa de dados considerável. Ao analisar dados de levantamentos da Caverna Groaning ele percebeu que grandes erros de fechamento de poligonais não se relacionavam ao acúmulo de erros randômicos, mas eram devidos a erros grosseiros como leitura invertida da agulha da bússola ou erros de digitação. Tais erros grosseiros deixavam uma espécie de assinatura no fechamento de poligonais, sendo que levantamentos de alta qualidade permitem sua identificação facilmente e em caso de levantamentos menos precisos, erros grosseiros tendem a ser

²⁰ O software Compass teve seu desenvolvimento iniciado em 1979 e foi disponibilizado para o sistema operacional Windows em 1994. É o software de tratamento de dados topográficos de cavernas mais utilizado e teve sua última atualização em 5 de dezembro de 2022, versão 5.22. Disponível em: <https://www.fountainware.com/compass/>. Acessado em 5 de março de 2023.

mascarados pelo acúmulo dos erros aleatórios. Segundo o autor, o fechamento de poligonais se faz por rotinas que calculam o melhor ajustamento para o azimute, inclinação e distâncias, sendo essas apresentadas neste artigo na forma de linhas de programação, não tendo ainda feito referência ao MMQ.

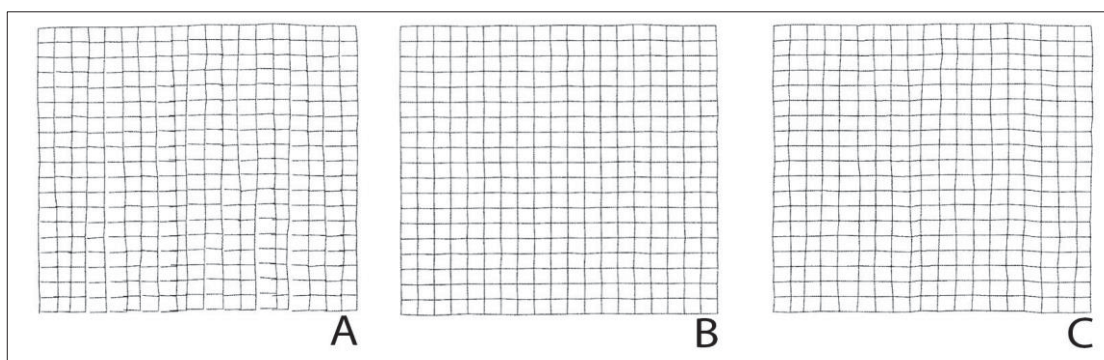
Num artigo seguinte (FISH, 1997) o autor discute problemas do método dos mínimos quadrados para o fechamento de poligonais e afirma que muitos espeleólogos presumem que a melhor forma de fechar as poligonais é através de um algoritmo baseado nos Mínimos Quadrados/Equações Simultâneas, LSSE em inglês. Para ele, o fato deste algoritmo estar baseado em métodos estatísticos e ser amplamente utilizado por topógrafos de superfície e ser considerado efetivo para o propósito, ninguém considerou a possibilidade de que possa haver imperfeições quando aplicado a levantamentos de cavernas.

O autor considera o método poderoso em diversos casos em que se trabalhe sobre os erros aleatórios distribuídos, mas não para o fechamento de poligonais de topografias de cavernas, dada a ocorrência de erros grosseiros que podem ser absorvidos pelo algoritmo. Tais erros são os mais difíceis de se lidar porque são inconsistentes e são extremamente comuns em topografias de cavernas. Assim, o MMQ por equações simultâneas distribuirá os erros de forma mais ou menos uniforme nas poligonais boas e nas ruins, contaminando as boas poligonais com os erros das ruins. Desta forma, o autor considera que o LSSE foi desenhado especificamente para tratar de erros aleatórios, sendo o melhor método para essa função e que fecha todas as poligonais de forma simultânea, mas que apresenta problemas com a presença de erros grosseiros. Para contornar esse problema, o algoritmo deve ser desenhado de forma a haver controle independente sobre como o programa ajusta cada observação, implementando um “fator de confiança” às poligonais boas e ruins. Mas daí surge um novo problema, uma vez que sempre haverá medidas compartilhadas por poligonais boas e ruins e a forma com que se fecha essas poligonais tem um profundo efeito na acurácia das estatísticas desses levantamentos. Para resolver a questão, o autor propõe um método capaz de lidar com erros grosseiros, com erros aleatórios e com a mistura de ambos, sendo que o mais importante é proteger os bons fechamentos dos erros dos maus fechamentos. Daí o próximo passo é fechar as poligonais de uma forma que haja segregação entre as melhores e as piores e que as melhores sejam executadas primeiro. A vantagem da abordagem sequencial sobre a simultânea é de

que aquela preserva a acurácia das melhores poligonais, ao mesmo tempo que isola os erros grosseiros. Estes são indicados através da análise dos desvios-padrão, sendo que erros de poligonais que excedem dois desvios-padrão tem 95% de chance de serem grosseiros.

Uma comparação entre os métodos de fechamento de poligonais simultâneo e sequencial foi feita por Thrun (1998), que afirma que muitos dos programas de tratamento de dados topográficos de cavernas utilizam do MMQ simultâneo, sendo uma exceção o Compass, que se utiliza do fechamento sequencial. Em relação à afirmação de Fish (1997) de que a maior vantagem do método sequencial é que ele previne a contaminação dos melhores fechamentos pelos piores, Thrun faz duas objeções ao ajustamento sequencial, uma que ele descarta informações e a outra se refere à quantidade excessiva de ajustamentos que pode ser deslocada para a última seção a ser ajustada. Para tanto, fez uma série de testes a partir de grids quadrados de 20x20 células onde foram adicionados erros aleatórios às observações e ajustados segundo os dois métodos nos softwares CMAP e COMPASS (FIGURA 70). Os resultados obtidos com esses experimentos, tanto de forma gráfica quanto pela análise dos desvios-padrão de distâncias, azimutes e inclinação indicam que o software COMPASS obteve os piores resultados. Para o autor, precisa ser enfatizado o fato de que quanto maior a rede, mais o processo de ajustamento sequencial aumenta os erros randômicos e faz algumas considerações críticas ao software, além de ressaltar as qualidades do CMAP, software por ele desenvolvido.

FIGURA 70 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DADOS NÃO AJUSTADOS (A), AJUSTAMENTO PELO SOFTWARE CMAP (B) E PELO SOFTWARE COMPASS (C) NUM GRID DE 20 X 20.

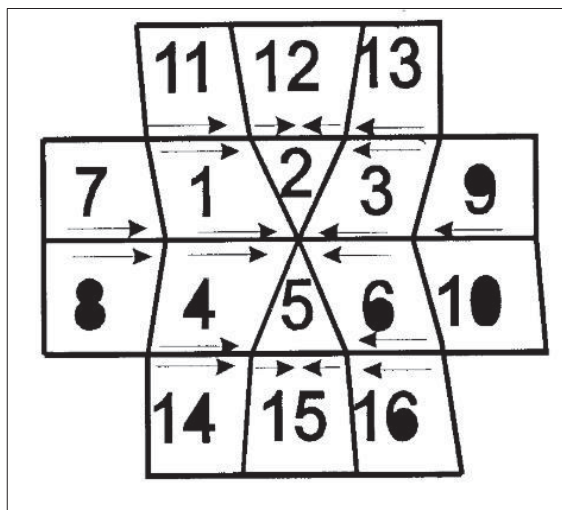


FONTE: Modificado de Thrun, 1998.

Em resposta às questões apontadas por Thrun (1998), Fish (1998) inicia as refutações das críticas argumentando que os dados simulados não são aleatórios e apresentam padrões, significando que os erros originais foram concentrados ao longo das colunas. Para os testes serem válidos, os erros deveriam estar uniformemente e randomicamente distribuídos nos 20 *loops*. Considerando que a visão humana é sensível a diferenças sutis em padrões visuais e que estes poderiam não ser evidência conclusiva da não-aleatoriedade dos dados, o autor realizou uma série de testes para avaliar sua aleatoriedade. Os resultados demonstraram não serem randômicos através de autocorrelação. Na sequência, afirma que Thrun utilizou o desvio-padrão enquanto medida de qualidade dos dados dos fechamentos de poligonais, sendo que este mede a variabilidade de um conjunto de dados em particular. Para Fish, com o uso do método sequencial, espera-se que o desvio-padrão aumente, uma vez que com o ajustamento, poligonais boas ficam melhores e poligonais ruins ficam iguais ou piores. Isso significa dizer que a diferença entre os erros menores e os maiores tenderá a ficar maior e que o desvio-padrão não é uma forma correta de se medir a qualidade do fechamento de poligonais. Para tanto, deve-se atentar à informação de como cada poligonal individual é fechada, sendo esta informação a mais precisa sobre a qualidade de partes específicas dos dados.

Uma outra incorreção nas análises da performance do COMPASS se refere aos erros grosseiros, sendo considerado que estes têm pouca influência na propagação de erros para outras poligonais, o que não é corroborado por Fish. Um erro grosseiro pode se espalhar para 16 poligonais adjacentes, como pode ser visto na (FIGURA 71). Em cavernas reais com poligonais longas, os efeitos da propagação podem influenciar uma grande parte desta. E em cavernas pequenas, a propagação pode ter efeitos catastróficos na acurácia dos dados. Uma das últimas observações sobre o artigo de Fish se refere ao fato de que o fechamento sequencial de poligonais pelo Compass propaga os erros grosseiros. Fish ressalta que tal imperfeição foi corrigida numa nova versão do Compass e que o problema é do software, não do método de ajustamento empregado.

FIGURA 71 - PROPAGAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS POR POLIGONAIS ADJACENTES.



FONTE: Fish, 1998.

Em resposta às críticas feitas por Fish (1998), Thrun (1999) tece várias considerações acerca das diferenças entre os métodos de fechamento de poligonais simultâneo e o sequencial. Para ele, a comparação entre os métodos de ajuste de fechamento de poligonais não requer um bom gerador de números aleatórios para a realização de testes, não podendo ser atribuído a este, o mau desempenho do ajuste sequencial. O autor afirma não estar tão preocupado com a forma como erros grosseiros são tratados, sendo que um software decente os identificaria e os mapeadores de cavernas corrigiriam os dados brutos. E que se tivesse que tratar um levantamento com erros grosseiros, preferiria tomar a decisão em vez de aceitar a escolha arbitrária de algum programa de computador, numa clara crítica ao COMPASS. Em relação à propagação de erros, questiona a afirmação de Fish de que o MMQ distribui os erros grosseiros uniformemente em todos os loops e argumenta que os testes realizados mostram que um erro se reduz consistentemente um ou dois loops de onde ele ocorre. Por fim, considera que o ajuste sequencial das melhores poligonais é uma ideia que parece boa, mas que infelizmente não se mostrou melhor do que mínimos quadrados para redes pequenas e pior para redes grandes. Para ele, o software COMPASS contamina poligonais com erros de poligonais anteriores e ignora medidas que conectam as já fechadas.

Mais discussões sobre o uso do fechamento de poligonais pelo MMQ são trazidas por Fish (1999b), que destaca artigos que enfocaram o software COMPASS,

por ele escritos, como uma forma de provar a eficácia dos mínimos quadrados. No decorrer dessas discussões, o autor recebeu uma série de *insights* de John Halleck, um estudioso dos princípios matemáticos utilizados em levantamentos. Ao contrário do que pensara, de que os problemas eram devidos a falhas nos próprios mínimos quadrados, Halleck apontou que esses problemas se deviam, na verdade, ao fato de que a maioria dos programas de topografias em cavernas faz uso dos Mínimos Quadrados incorretamente. Os algoritmos de muitos programas de levantamentos topográficos de cavernas se baseiam num artigo de Schmidt et al., (1970), que se trata de uma introdução ao tópico de ajustamento pelo MMQ em que o nível de simplificação fez a técnica imprópria para tratar de erros grosseiros. O problema se refere à forma com que trata os pesos nas equações do MMQ, uma forma de compensar as partes dos levantamentos onde os dados são muito imprecisos. Esta técnica assume que observações mais longas terão erros maiores e assim atribui os pesos de acordo com o comprimento das visadas e não pela análise da qualidade dos fechamentos das poligonais, como deveria ser. Para o autor, a chave para a atribuição correta dos pesos é a comparação entre os erros preditos com os erros obtidos (covariância) uma vez que um erro excede o predito pode ser um erro grosseiro, devendo ser atribuído um menor peso, o que viria a diminuir a prioridade no processo de fechamento de poligonais.

Há muita confusão na comunidade espeleológica a respeito do ajustamento de dados em levantamentos de cavernas, sendo que alguns programas incorporaram erros conceituais na elaboração de algoritmos. Halleck (1999) cita algumas razões, como o pouco tempo, falta de motivação ou mesmo a oportunidade de espeleólogos fazerem cursos teóricos detalhados de topografia. Assim, acabam absorvendo o que foi possível de entender da literatura disponível, ou seja, simplificações para a facilitação do entendimento. Desta forma, não é incomum que dois programas que afirmam fazer uma solução de "mínimos quadrados" para o problema do ajustamento produzam respostas dramaticamente diferentes. E ainda que resolvam corretamente algum problema simplificado, não declaram as simplificações e não testam os dados que violam essas simplificações. Grandes mudanças nos pesos normalmente não produzem resultados que parecem muito diferentes a olho nu. E se mesmo a atribuição errônea desses pesos não faz com que as passagens se movam para locais estranhos, há uma sensação de que os pesos são menos importantes do que são.

No entanto, essas questões não podem ser negligenciadas uma vez que o ajustamento correto pode fornecer muita informação estatística útil sobre um levantamento, o que pode contribuir na identificação de erros sistemáticos. No processo de linearização, em que os valores de distância, azimute e inclinação são reduzidos a um vetor que representa a mudança em X, Y e Z, ponderações são feitas, resultando na resolução não de um problema real, mas de algo próximo a ele. Isto não se aplica a situações em que a solução está próxima dos dados originais, mas sim quando os levantamentos apresentam grandes erros. Como um teste de validação em nível profissional quase nunca é feito, os programas às vezes não têm verificações para saber se a solução linearizada é boa o suficiente. No entanto, se o cuidado correto for tomado, qualquer programa que resolva problemas de mínimos quadrados lineares pode ser usado para resolver o problema de mínimos quadrados ponderados linearizados completos. A análise de mínimos quadrados fornece números estatísticos sobre quão bem os dados correspondem ao modelo, desde que verificados. Muitos programas de levantamento de cavernas não se preocupam em verificar e geralmente não fornecem esses dados estatísticos. Por fim, destaca que os espeleólogos, por se restringirem às leituras de trabalhos realizados em cavernas, acabarão com uma terminologia diferente da dos agrimensores, profissionais que lidam com esses problemas há muito mais tempo.

A maioria dos softwares de levantamento de cavernas faz o fechamento de poligonais usando a técnica dos “mínimos quadrados”, sendo muito importante que os usuários entendam o que esse termo implica e as condições sob as quais sua utilização torna-se válida. Além disso, é importante saber que existem outras opções disponíveis. Na prática, quase qualquer método de fechamento de *loops* geralmente produzirá pontos que, na ausência de erros, serão semelhantes. Na escala de um mapa de caverna típico, seria necessário um olhar atento para perceber a diferença entre os resultados dos vários métodos (HALLECK, 2005). Neste artigo, o autor fornece uma introdução rápida às duas classes de métodos de fechamento de poligonais comumente usados em topografias espeleológicas: esquemas orientados a *loop* e os métodos por mínimos quadrados. No primeiro caso, antes do advento dos computadores, os topógrafos realizavam análises de fechamento de poligonais e faziam o ajuste de rede pelo método de “fechamento dos melhores *loops* primeiro”. Várias técnicas são descritas na literatura para este fim, como a “regra dos

compassos”, “regra da cadeia”, “método de Bowditch” e “modificação de Barda do método de Bowditch”, sendo que alguns destes demonstraram ser equivalentes a mínimos quadrados em muitos casos. Os métodos orientados a *loop* não são tão flexíveis quanto os mínimos quadrados, mas têm algumas habilidades que os mínimos quadrados não têm. Por exemplo, existem fórmulas publicadas bem conhecidas que, dado um *loop* conhecido por ter um erro angular, fornecerão a distância de cada ponto ao erro provável. Existe outro procedimento publicado que pode, no mesmo caso, dar a direção de cada ponto até o provável erro. Mas há uma grande diferença entre ajustar um único *loop* e ajustar uma rede. O método mais comum de aplicar métodos orientados a *loops* é chamado de “melhores *loops* primeiro”. Isso envolve apenas encontrar os *loops* com o melhor fechamento e ajustá-los primeiro e fazer o ajuste dos *loops* posteriores não alterar nenhum que já tenha sido ajustado. Isso não quer dizer que todos os programas “orientados para *loop*” fazem isso, mas apenas que o método permite essa abordagem.

O método dos mínimos quadrados produz o modelo matematicamente “mais provável” em relação aos dados registrados. É o método mais geral de lidar com erros de qualquer tipo de rede e quase qualquer tipo de restrição que pode ser agrupada de forma significativa (como pontos de GNSS). O método usa um sistema linear de equações de rede e faz as seguintes suposições: os erros são distribuídos aleatoriamente; existem apenas erros aleatórios e não erros sistemáticos; os prováveis limites de erro nas medições são conhecidos e as ponderações foram produzidas com base neles. Se essas premissas forem atendidas, os resultados são os valores mais prováveis para a rede ajustada. Essas localizações são obtidas a partir de médias ponderadas com base na magnitude esperada dos erros aleatórios. No entanto, o método é computacionalmente mais exigente, sendo comum a simplificação do método, o que faz com que ele não tenha mais as garantias matemáticas originais. Os textos que tratam do ajustamento denominam o método “usual” de “ajuste por observação” e a versão que usa as restrições de *loop* é chamada de “ajuste por condições”. Não importa qual método seja usado, se for implementado corretamente, todas as soluções com os mesmos pesos produzirão matematicamente os mesmos resultados finais. O autor conclui que escolher um método de fechamento

de poligonais não é tarefa fácil. Todos os métodos têm pontos bons e ruins e fazer uma escolha de um método equivale a fazer uma “guerra religiosa”, ou seja, as alternativas são desconsideradas.

2.6 - PROJETO CARTOGRÁFICO

Não houve resultados nas pesquisas acerca de projetos cartográficos para o mapeamento espeleológico em portais de periódicos. Buscou-se, então, trabalhos de referência com esta temática aplicadas ao mapeamento em geral, passíveis de apropriação pela pesquisa em curso.

Os mapeadores de caverna, em geral, não possuem formação em Cartografia, motivo de desconhecerem a necessidade de elaboração de um projeto cartográfico, inexistindo estudos aprofundados sobre cartografia espeleológica (LOTT, 2014). O aprendizado do fazer um mapa espeleológico ocorre através da experiência em campo e em escritório, pela transmissão do conhecimento entre membros de um grupo, por apropriação de estilos dos mais diversos trabalhos publicados ou por contribuições individuais.

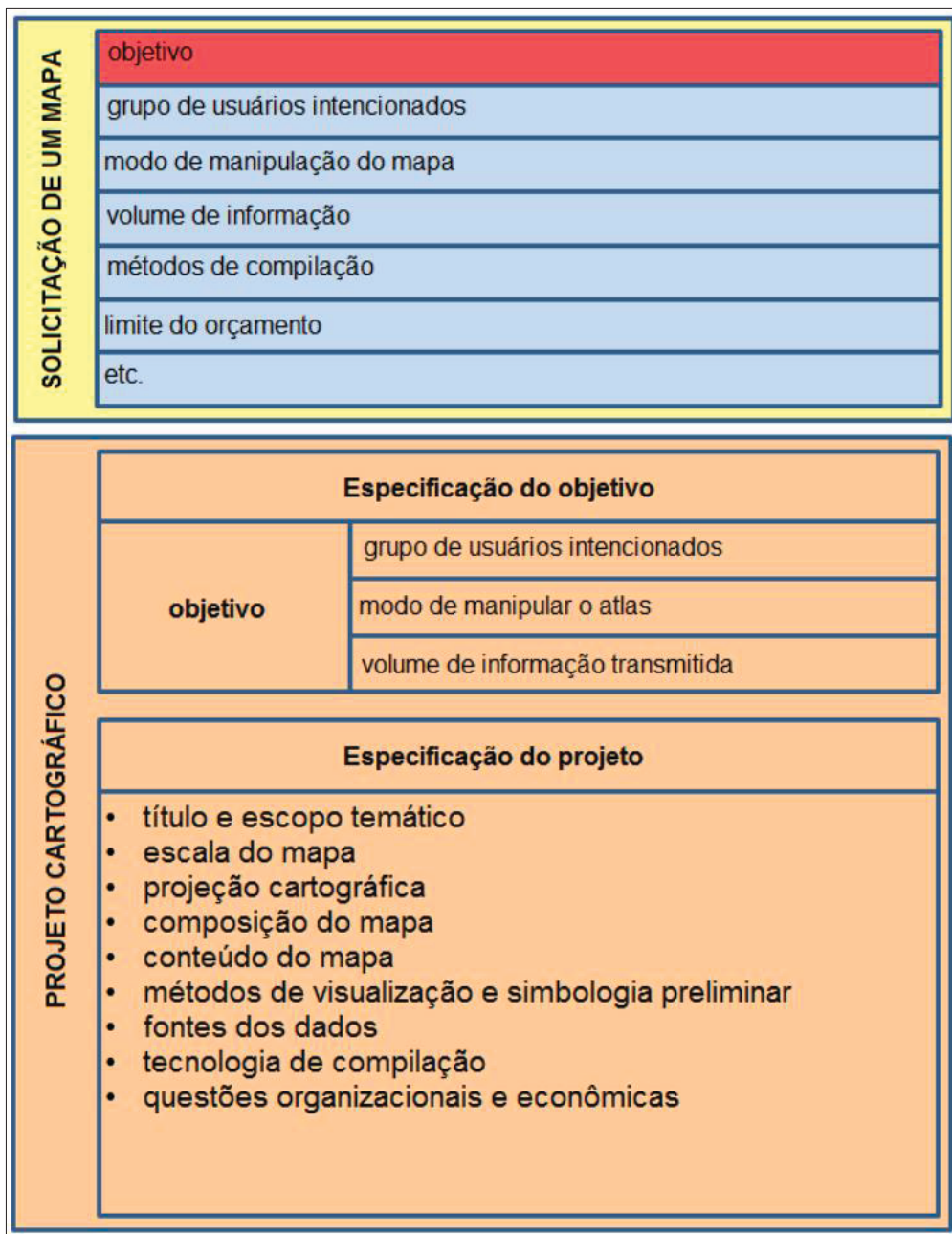
A atual tecnologia da informação tem influenciado o fazer cartográfico: a compilação de mapas e diferentes produtos de softwares. A disponibilidade de acesso a esses softwares e produtos cartográficos permite que essa compilação possa ser feita por não cartógrafos. Sem o conhecimento cartográfico os produtos gerados podem não alcançar uma das principais funções do mapa, que é fornecer informação verdadeira (VOZENILEK, 2014) (FIGURA 72).

Um projeto cartográfico é um instrumento que tem por finalidade promover a comunicação cartográfica. A definição dos conteúdos a serem representados e mesmo o quanto um cartógrafo pode interferir nesta definição são aspectos importantes no projeto uma vez que se relacionam ao conhecimento dos perfis de usuários e as suas necessidades, o que pode tornar a comunicação cartográfica mais eficiente (SLUTER, 2007).

Focar as necessidades do usuário, tanto quanto o nível de seu desenvolvimento intelectual, enquanto variáveis no processo e ter o entendimento dos usos que serão destinados são das tarefas iniciais da construção do projeto cartográfico, enfatiza a autora. Definidas as bases cartográficas de cada mapa, pode-

se definir as escalas, o tamanho do mapa, necessidade de articulações, reduções ou generalizações, a linguagem e a construção de cada mapa.

FIGURA 72 - EXEMPLO DE SOLICITAÇÃO DE CONTRATAÇÃO DE UM MAPA E UM PROJETO CARTOGRÁFICO.



FONTE: Vozenilek, 2014.

Para Vozenilek (2014), “O projeto cartográfico é a agregação de todos os processos mentais realizados pelo cartógrafo durante a fase do processo cartográfico

correspondente à sua abstração sobre a representação cartográfica que está criando”. A execução de um projeto cartográfico passa, necessariamente, pelas fases de definição do propósito, pelo esboço do mapa e pela compilação do mapa e deve considerar que a manipulação de um mapa envolve um tempo de observação, uma forma (papel ou digital) e as condições em que o mapa será visto. O aspecto inicial a ser considerado num projeto cartográfico é o propósito do mapa, devendo também ser considerados o conteúdo, simbologia, cores, rótulos, generalização cartográfica e, por fim, a composição gráfica do mapa.

A proposta de padronização da documentação espeleológica brasileira através do cadastro, mapeamento e espeleometria feita pela Comissão de Cadastro e Espeleometria da SBE é o que mais se aproxima do que poderia ser um projeto cartográfico. Neste documento são definidos conceitos, métodos de medição, informações a serem inseridas no mapa espeleológico e indicação de convenções, com texto baseado num “levantamento e análise dos métodos e técnicas espeleométricas utilizadas no Brasil” (SBE, 1991). Dada a evolução das técnicas de levantamento e das representações cartográficas desde sua elaboração, faz-se necessária sua revisão e adequação ao cenário atual, considerando que não existe padronização nas formas de levantamentos, no tratamento dos dados topográficos, na simbologia, convenções e no *layout* do mapa espeleológico.

Uma certa atualização deste conteúdo foi feita pelo CECAV (2016) por ocasião do IV Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental. No tópico 3 desta publicação são apresentadas considerações sobre os trabalhos, os potenciais e estratégias de prospecção espeleológica, os cadastros existentes, zoneamento, tratamento dos dados, graus de precisão e detalhamento da topografia, métodos de medição e espeleometria. Este documento teve como fim a capacitação de profissionais espeleólogos atuantes em processos de Licenciamento Ambiental, não sendo uma proposição para a comunidade espeleológica.

2.7 - AUTOMATIZAÇÃO DE LEVANTAMENTOS GEODÉSICOS

Nesta pesquisa, a Automatização pode ser entendida enquanto um princípio operacional próprio da Cartografia Digital e se refere à busca da otimização da construção de um mapa espeleológico a partir da substituição dos processos manuais por automatizados em ambiente digital. O princípio de adoção de procedimentos

automatizados visa aumentar a produtividade, disponibilizar projeções cartográficas, possibilitar a simbolização, a avaliação de uma impressão, facilitar a divulgação dos resultados pela internet, representar maior quantidade de informações espaciais, derivar mapas, criar mapas de difícil realização por métodos convencionais, gerar maior precisão, automatizar as rotinas repetitivas e, conseqüentemente, reduzir custos. O pleno emprego deste princípio esbarra na escassez de pessoal qualificado, necessidade de maior investimento inicial, mudanças de rotinas de trabalho e necessidade de tempo de maturação para adaptação e apropriação.

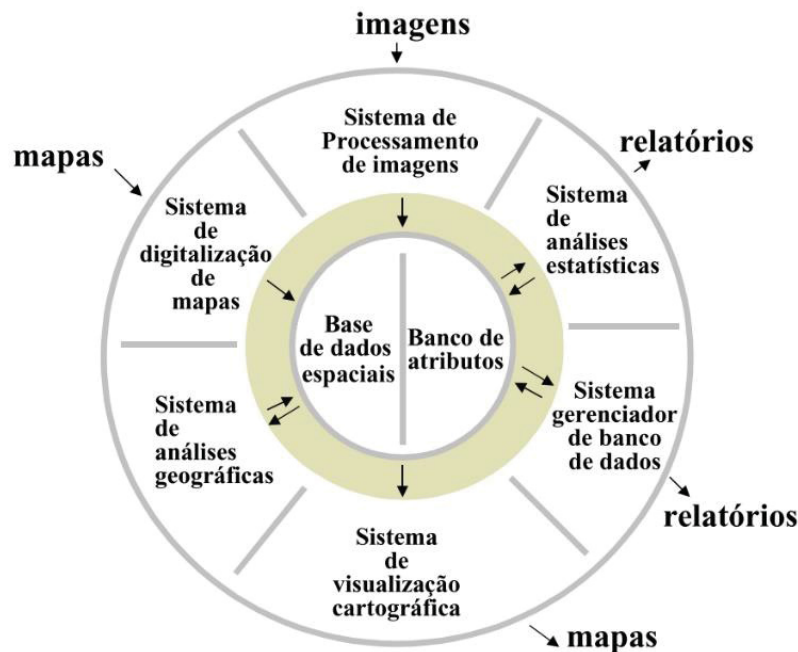
Davis Júnior (1997) destaca a aproximação entre a Cartografia Digital e o SIG e a complexidade de se produzir produtos cartográficos neste ambiente em função das limitações de software naquele momento. Neste artigo, o autor apresenta tipos de dificuldades encontradas no processo de automatização da cartografia a partir de bases de dados geográficos, utilizando-se o exemplo do projeto de mapeamento do município de Belo Horizonte em atendimento à Lei de Parcelamento, Ocupação e Uso do Solo. Partindo-se de base de dados geográficos já existentes a ser compatibilizada com as novas informações da exigência legal, destaca-se a necessidade de revisão completa de algumas classes devido à baixa qualidade no que se refere à forma de representação digital. Outros dados referentes especificamente à Lei, tiveram de ser produzidos.

A automatização da produção cartográfica, ainda que muito beneficiada com o uso de um SIG não pôde ser plenamente alcançada uma vez que os procedimentos do SIG não estavam totalmente desenvolvidos àquela época. Ainda que o *software* de *desktop mapping* utilizado permitisse a ordenação de camadas, a utilização de máscaras para textos, fontes do tipo *True Type*, escolha de cores, geração de *layout*, visualização de plotagem e elaboração de mapas temáticos, algumas desvantagens foram detectadas. O baixo grau de automatização das interações, notadamente na geração de um *workspace* para cada folha, requereu a utilização da programação em linguagem C. A inconstância nos tamanhos dos caracteres quando utilizados em escalas diferentes e as limitações quanto ao tamanho e quantidade dos arquivos gerados e limitações de edição.

Uma série de características é apresentada pelo autor enquanto desejáveis num SIG ideal, reconhecendo, no entanto, que este sistema ainda não existe. E que mesmo que existam alguns módulos complementares para a finalização de mapas

Para o autor, um sistema de Cartografia Digital é constituído por um conjunto de ferramentas (programas e equipamentos) que tem a finalidade de converter, armazenar e visualizar os dados espaciais sendo, basicamente, um CAD especializado (FIGURA 74). Destaca, também, o fato de que apesar do termo cartografia automatizada ser empregado para referenciar o conjunto de técnicas e procedimentos utilizados na cartografia assistida por computador, todo o processo requer a participação de trabalho manual.

FIGURA 74: ESQUEMA DA COMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS, INCLUINDO A CARTOGRAFIA DIGITAL.



FONTE: Soares Filho, 2000.

A automatização de levantamentos topográficos pode ser verificada em diferentes etapas de trabalho, sendo utilizados equipamentos eletrônicos como estações totais e níveis digitais para a realização de medidas, armazenamento em dispositivos de memória, realização de cálculos em programas que permitem ajuste de poligonais, cálculos de áreas e suporte ao desenho (VEIGA *et al.*, 2001). Esta evolução tecnológica tem permitido que os levantamentos sejam feitos de forma mais ágil dada a mobilidade e rapidez na coleta e processamento dos dados, sendo que o grau de automatização irá variar de acordo com os equipamentos utilizados. A automatização do registro dos dados coletados, por exemplo, iniciada na década de

60 do século XX, permitiu a realização e gravação de milhares de medidas em dispositivos diversos, eliminando a necessidade de um anotador e minimizando a ocorrência de erros grosseiros. Os programas internos das estações totais permitiram a realização de cálculos ainda em campo, sendo variável de acordo com a marca e modelo do equipamento, com destaque para o cálculo de coordenadas e o ajuste de poligonais.

Os autores destacam que a falta de suporte técnico e treinamento faz com que muitos usuários deixem de utilizar boa parte dos recursos dos equipamentos que utilizam. As funções de cálculos automáticos das estações totais podem ser agrupadas em três categorias genéricas e se referem às funções de inicialização do equipamento, funções do tipo COGO, funções para locação de pontos em campo, estação livre, cálculo de áreas, determinação de elevações, entre outras. Mas ainda que estes cálculos possam ser feitos em campo, é destacada a ausência de uma interface gráfica que permita a visualização do desenho. Os softwares utilizados são divididos em módulos com funções específicas, sendo o básico, responsável pelos cálculos e fechamento de poligonais; um módulo de transformações de sistemas de coordenadas; um módulo CAD para a elaboração de desenhos; módulo MDT, para traçados de curvas de nível e cálculos de volume.

É destacada, também, a automatização da coleta de dados a partir de computadores portáteis a caneta, a serem acoplados às estações totais ou receptores GPS, o que permitiria a realização de levantamentos de dados, processamento e elaboração dos desenhos em campo. As características básicas deste equipamento seriam a interface, as funções de levantamentos, ferramentas CAD e módulo para SIG. Tais características permitem a organização e visualização dos dados diretamente na tela, facilitando a elaboração do desenho e identificação de omissões e erros de levantamento, evitando retrabalho e aumentando a produtividade. Como desvantagem, os autores destacam as dificuldades em se trabalhar com este tipo de equipamento em campo no que se refere ao apoio para digitação, edição do desenho, entre outras. A esse sistema de mapeamento, foi proposto o nome de Sistema para Mapeamento Automatizado em Campo ou SMAC.

As transformações ocorridas na ciência cartográfica em função da introdução dos microcomputadores entre os anos 50 a 70 possibilitaram o início do processo de automatização do desenho. Neste momento a Cartografia Analógica passa a ceder

espaço ao Geoprocessamento, apoiado em hardware e *software* capazes de integrar informação alfanumérica e gráfica, em suporte à Cartografia Digital. Neste processo de automatização do desenho cartográfico, novas possibilidades de simbolização foram permitidas pelos softwares, vindo a substituir a linguagem cartográfica tradicional (RODRIGUES, 2010).

O autor atribui à Cartografia Geomorfológica a condição de ser um recurso gráfico na representação das relações dos processos pretéritos e atuais do relevo em seus diversos aspectos genéticos, cronológicos, morfológicos, morfométricos e dinâmicos. Argumenta que novas técnicas metodológicas dão suporte à tendência atual do mapeamento ser realizado considerando os interesses e necessidades de um planejamento ambiental. E de forma a abrir discussões e propor soluções para a promoção da uniformização da simbologia adotada pela cartografia geomorfológica, ressalta a carência de modelos e convenções cartográficas otimizadas e a disponibilidade de linhas especiais nos softwares utilizados. Dada essa necessidade, propõe o uso do AutoCAD para o desenvolvimento de simbologia de acordo com o sistema ITC para levantamentos geomorfológicos (VERSTAPEN *et al.*, 1975 *apud* RODRIGUES, 2010), na expectativa de diminuir a carência nos estudos e desenvolvimentos de linhas especiais enquanto simbologia do mapeamento geomorfológico. Às possibilidades abertas pelo uso de sistemas CAD há de se considerar que a flexibilização das atividades da cartografia facilitou a disseminação de estilos sem padrões definidos, argumenta o autor. A utilização das “*linetypes*” especiais geradas no AutoCAD possibilitou maior agilidade e versatilidade, vindo a confirmar a hipótese acerca dos benefícios proporcionados por essa abordagem (QUADRO 6).

A automatização da produção de mapas topográficos digitais de alta qualidade do Estado de São Paulo na escala 1:25.000 realizada pelo Instituto Geográfico e Cartográfico - IGC foi o foco do trabalho de Romanholi *et al.* (2015). Os autores abordam os desafios de fornecer novos mapas para usuários exigentes e do fato de haver uma ligeira perda do apelo artístico em relação aos mapas anteriores. E com o objetivo de melhorar a entrega dos produtos, os autores propuseram mudanças no fluxo de trabalho do projeto, passando de um design de mapa baseado em CAD e de elaboração excessivamente manual para um ambiente GIS de produção em massa baseados em bancos de dados vetoriais e raster contínuos e continuamente

atualizados. O novo fluxo de trabalho permitiu a impressão de mapas de forma semiautomatizada, permitindo a entrega de produtos formados por uma camada de base de ortoimagem mais hidrografia e camadas de relevo, de forma a agilizar a disponibilização dos produtos.

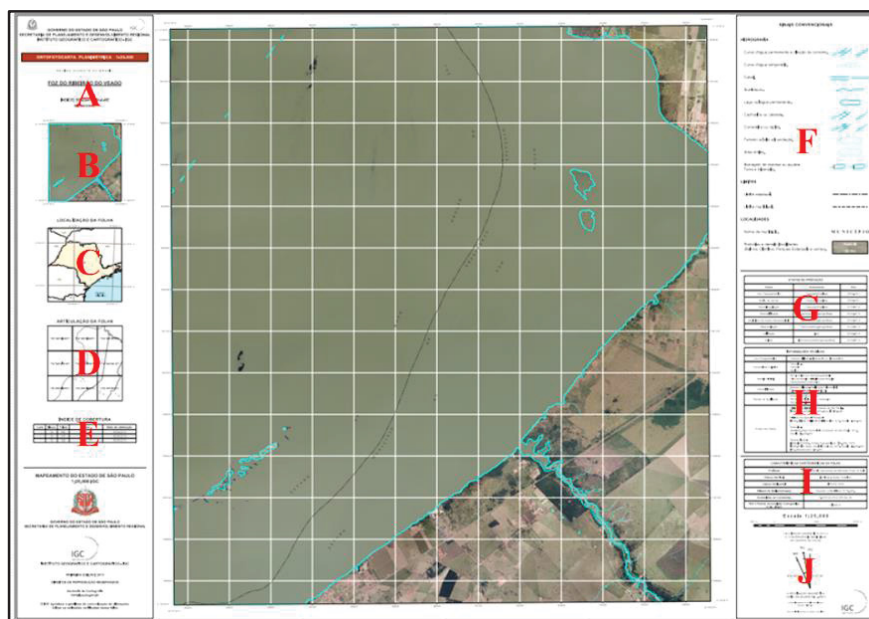
QUADRO 6 - LINHAS DESENVOLVIDAS PARA UTILIZAÇÃO NA CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA A PARTIR DOS PADRÕES DE SÍMBOLOS LINEARES PROPOSTOS PELO SISTEMA ITC ENTRE OUTROS.

Tipos	Linetype	Aparência	Representação Gráfica
Simples	Borda_Eros_Moderado	_ _ _	Formas estruturais do tipo mergulho e direção.
	Borda_Eros_Empinado	_ _ _	Formas estruturais do tipo mergulho e direção.
	Escarpamento	_ _ _ _ _	Formas estruturais do tipo escarpamento.
	Ruptura_de_Falha	_ _	Modelado de aplanamento de dissecção e/ou dissolução.
	Ressalto	_ _ _ _	Modelado de aplanamento de dissecção e/ou dissolução.
Complexa	Escarp_Falha_Menor	_f_ _ _ _ _ f_	Formas estruturais do tipo escarpamento de falha menor.
	Linha_de_Falha	f - - - f	Formas estruturais do tipo escarpamento de falha provável.
	Falhamento	_△_△_	Formas estruturais do tipo escarpamento de cuesta erodida.
	Borda_Patamar_Estrut	_□_□_□_	Formas de origem denudacional.
	Borda_Patamar_Kárstico	_J_ J_	Formas de origem de dissolução (Karsik).
	Borda_Eros_Horizontal	+ + + +	Formas estruturais do tipo mergulho e direção horizontal.

FONTE: Rodrigues, 2010.

A transição dos formatos de mapas de 1:10.000 para 1:25.000 gerou a necessidade de alteração do *layout* das ortofotocartas, que seguem as diretrizes estabelecidas pelas [Especificações Técnicas para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais \(ET-PCDG\)](#) do Exército Brasileiro (FIGURA 75).

FIGURA 75 - NOVO MODELO DE ORTOFOTOCARTA ADOTADO PELO IGC.



FONTE: Romanholi, 2015.

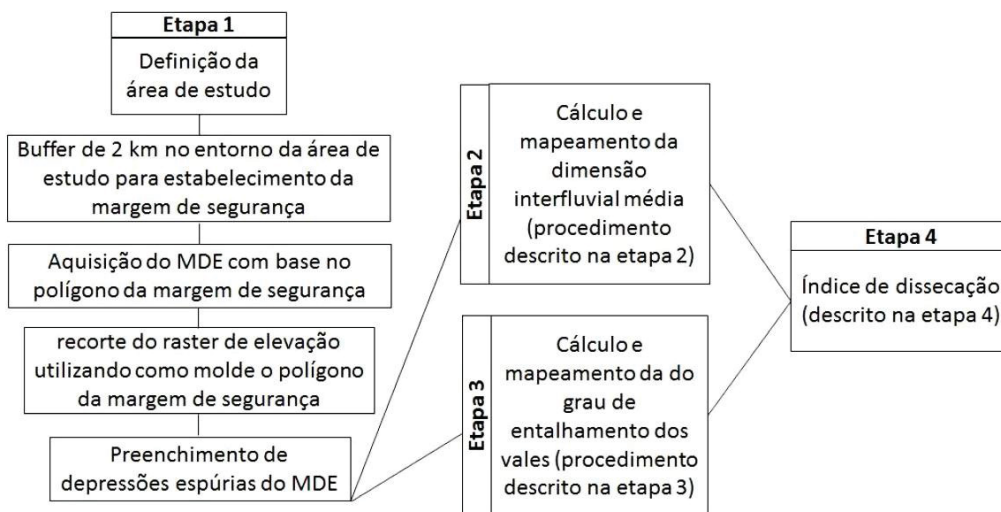
A alteração do fluxograma de geração de ortofotocartas para quadrículas de 1:25.000 pressupõe a utilização de outros produtos como as ortoimagens, hidrografia vetorial, MDT e as ortofotocartas. E para superar as dificuldades na produção cartográfica, o IGC passou a utilizar o software ArcMap® que conta com ferramentas com procedimentos semiautomatizados, baseados em páginas de dados dinâmicos oferecidas pelo *software*. O layout de ortofotocarta foi produzido com as ferramentas do *software* ArcMap® e foi elaborado de forma idêntica ao que era feito em CAD. Utilizando-se de quadros de dados, foram vinculados os quadros da miniatura, localização e articulação ao quadro de dados principal da ortofotocarta. Tal método é totalmente automatizado, anulando a possibilidade de erros e incoerências na articulação desses elementos feitos por meio convencional. De forma automatizada foi feita a geração das linhas de grade e a inserção das coordenadas marginais, alcançando resultado estético equivalente oferecido pelos *softwares* CAD. E a programação de um código em Python auxiliou o processo de exportação das cartas. Para os autores, os resultados das mudanças no fluxo de trabalho se mostraram positivos na utilização do ambiente SIG para a produção cartográfica, validação e armazenamento de dados espaciais em um banco de dados corporativo.

Numa apostila contendo os Fundamentos Teóricos de Geotecnologias, em especial a Cartografia Digital, Santos *et al.* (2016) afirmam que esta deve ser vista como um recurso alternativo de se lidar com dados espaciais e não apenas como um processo de automatização de procedimentos manuais. Tal recurso pode ser utilizado na espacialização da realidade de uma dada área de interesse em tempo real, já que se baseia na computação e tem a capacidade de gerar reproduções da realidade geográfica de forma precisa, atualizável, dinâmica e interativa. A forma de ver o mundo real se faz na forma de camadas, sendo que cada uma representa um aspecto da realidade. Os autores argumentam que os Sistemas de Informação Geográfica - SIGs têm muitos componentes da Cartografia Digital e estão aptos a analisar dados com referências espaciais e envolvem muitos outros procedimentos além da elaboração de mapas digitais (TAYLOR, 1991 *apud* SANTOS *et al.*, 2016).

Em relação ao processo de projeto gráfico e os componentes gráficos dos mapas, os autores destacam sua importância, uma vez que a comunicação cartográfica depende do estudo conjunto de diversas variáveis gráficas como linhas, tons, cores e padrões e se beneficiam de processos automatizados para a apresentação.

Índice de dissecação do relevo se refere a uma análise morfométrica que avalia o nível de entalhamento de um vale e a dimensão interfluvial média (GUIMARÃES *et al.* 2017) possui diversas aplicações como a segmentação do relevo, análise da relação da morfogênese e pedogênese e a vulnerabilidade ambiental. A geração desse índice de forma analógica é dispendiosa e está sujeita a erros de interpretação. Em ambiente digital, ainda hoje não existe um método totalmente automatizado para sua geração, sendo o objetivo desta pesquisa apresentar uma rotina para a realização dos cálculos de índices de dissecação do relevo de forma automatizada para cada pixel a partir de um MDT. Para tanto, foram realizados processamentos de dados no software ArcGIS 10.2® de uma área entre os municípios de Lençóis e Andaraí, na Chapada Diamantina, BA considerando as quatro etapas necessárias para sua execução: tratamento e preparação do MDT; mapeamento do grau de entalhamento dos vales; mapeamento da dimensão interfluvial média e cálculo dos valores de dissecação do relevo (FIGURA 76).

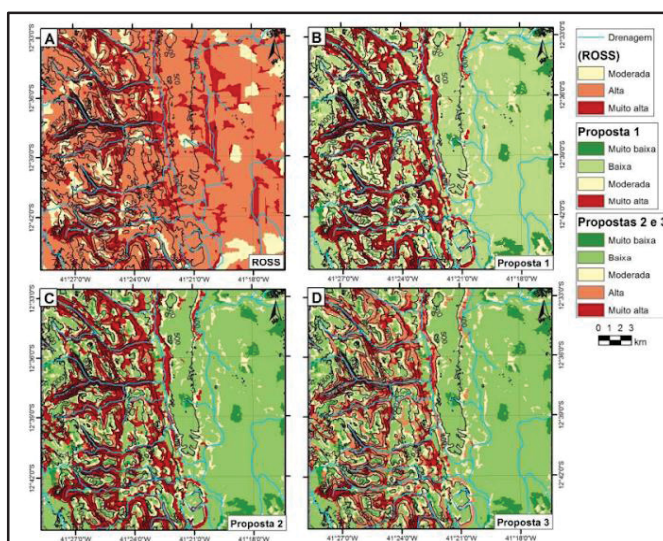
FIGURA 76 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA O MAPEAMENTO DO ÍNDICE DE DISSECAÇÃO.



FONTE: Guimarães, 2017.

Os diversos procedimentos das etapas foram descritos por Guimarães *et al.* (2017), que consideram que os resultados demonstram a adequação do processo de mapeamento proposto, sendo facilitado pelos procedimentos automatizados no ambiente SIG. E ainda que extenso, consideram que houve redução do tempo de execução quando comparado com o processo analógico, podendo ser aplicado por outros softwares, dada a trivialidade das funções (FIGURA 77).

FIGURA 77 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS PARA O MAPEAMENTO DO ÍNDICE DE DISSECAÇÃO, SENDO QUE OS RESULTADOS MAIS ADEQUADOS SE REFEREM À PROPOSTA 3.



FONTE: Guimarães, 2017.

2.8 - COMPARAÇÕES ENTRE NUVENS DE PONTOS

A comparação entre nuvens de pontos pode ser realizada usando técnicas de análise de dados, análises visuais e estatísticas e podem ser feitas em nuvens obtidas por métodos diferentes, pelo mesmo método em tempos diferentes, por instrumentos ou algoritmos diferentes. A comparação entre uma nuvem de uma a varredura por laser e uma fotogramétrica permite avaliar a qualidade geométrica do modelo fotogramétrico, enquanto comparações entre nuvens multitemporais permitem a quantificação das alterações de uma superfície, útil em monitoramentos. Uma nuvem analisada por diferentes algoritmos pode trazer informações sobre acurácia, tempo de processamento, densidade de pontos, volume e qualidade visual, enquanto a comparação entre nuvens geradas por instrumentos diferentes permite comparar as características destes.

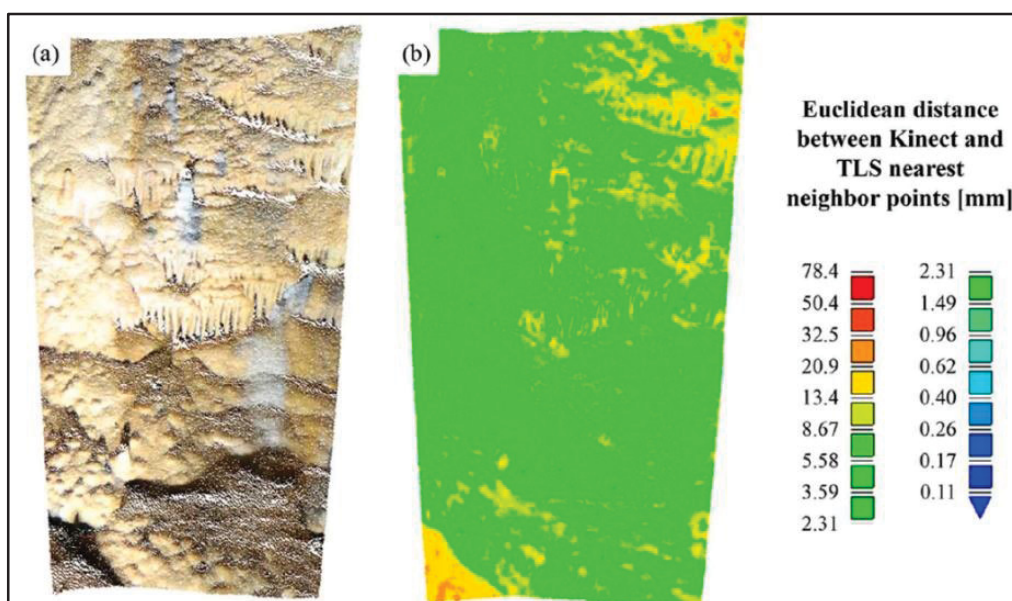
Vários trabalhos abordam a comparação entre nuvens de pontos nas Geociências, como Wilkinson *et al.* (2016) que comparou os resultados entre TLS e SfM na modelagem de afloramentos rochosos, Riquelme *et al.* (2017) no registro das descontinuidades e estabilidade de acamamentos rochosos inclinados e Bishop *et al.* (2019) em levantamentos de mina subterrânea de calcário. Fahle *et al.* (2022) analisaram as nuvens de levantamentos por TLS e por SLAM em situações de monitoramento geotécnico subterrâneo. Visando comparar a evolução da taxa de retração de falésias, Amaro *et al.* (2021) compararam nuvens de pontos levantadas por TLS na forma de Modelos Digitais de Elevação – MDE's gerados por diversos interpoladores. Na construção civil, Moon *et al.* (2019) realizaram a comparação entre os dados provenientes de levantamento aéreo por RPA e por TLS em situações de grande movimentação de terra em construções, enquanto Ferreira *et al.* (2020) compararam o volume de material a ser transportado numa obra viária utilizando, também, esses dois métodos de levantamento.

No que se refere aos levantamentos em ambientes subterrâneos, as nuvens de pontos 3D densas estão sendo cada vez mais utilizadas como conjuntos de dados de entrada altamente detalhados. Os sensores de baixo custo lançados já há alguns anos permitem o acesso a novos campos de pesquisa e facilitam a aquisição de dados 3D para uma gama mais ampla de aplicações. E para analisar as diferentes características de espeleotemas usando nuvens de pontos 3D adquiridas com o dispositivo de jogo Microsoft Kinect, Hämmerle *et al.* (2014) utilizaram um

levantamento com um LiDAR terrestre com o instrumento Riegl VZ-400 como referência na Caverna Dechen, na Alemanha. O Microsoft Kinect é uma câmera de luz estruturada originalmente desenvolvida como dispositivo de entrada para jogos, sendo um conhecido sensor de baixo custo para aquisição de dados, de fácil manuseio, portátil e eficiente em relação à configuração, calibração e pós-processamento. Este estudo teve por objetivo a comparação entre nuvens de pontos 3D de espeleotemas para extração de parâmetros morfométricos adquiridos pelo Kinect e por dados de referência TLS. Os levantamentos foram realizados junto a uma estalagmite de cerca de 2,65 m de altura e uma parede recoberta por escorrimento de calcita de cerca de 4m de altura, mostrando várias características das superfícies, secas e molhadas. O Kinect consiste num projetor que emite um padrão de infravermelho (IR) no comprimento de onda de 830nm, uma câmera IR que detecta o padrão de retorno e um algoritmo que extrai informações de profundidade por meio da deformação do padrão IR nas superfícies dos objetos. A comparação para com os dados de referência do LiDAR de parâmetros morfométricos como diâmetros de objetos em diferentes alturas e volume fornecem informações de grande interesse para a espeleologia no que se refere à evolução e crescimento dos espeleotemas.

A capacidade do Kinect de detectar estruturas de superfície natural usando o aplicativo KinFu é investigada pela derivação de modelos de diferença dos dados Kinect e TLS. A distância euclidiana entre os pares de pontos após o registro das duas fontes de dados diferentes é de 13 mm em média. Para a estalagmite, a maioria das áreas mostra diferenças menores que 10 mm, indicando alta concordância entre os dois conjuntos de dados, mas em áreas com inúmeras características sutis e curvas, os desvios entre os dois sensores aumentam até 30 mm. Para a área com o escorrimento, apenas pequenos desvios sistemáticos menores que 10 mm foram identificados (FIGURA 78). Os autores concluem que a aquisição baseada no Kinect é bastante adequada para capturar superfícies semelhantes a paredes, onde a diferença entre TLS e Kinect é da ordem da precisão de profundidade nominal do sensor nas distâncias dadas ao objeto. Mas os registros derivados do Kinect diferem significativamente dos dados TLS no caso de capturar objetos 3D altamente curvos, como as estalagmites, por exemplo.

FIGURA 78 – DIFERENÇA DA DISTÂNCIA EUCLIDIANA ENTRE O LEVANTAMENTO POR TLS E POR KINECT.



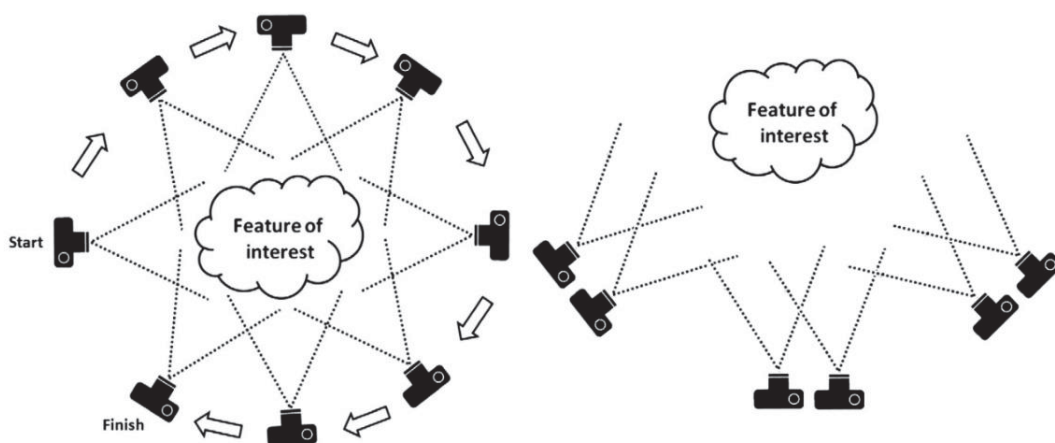
FONTE: Hämmerle *et al.*, 2014.

Pukanská *et al.* (2017) apresentaram as possibilidades atuais de levantamento de estruturas morfológicas subterrâneas por varredura a laser terrestre e aos métodos de fotogrametria digital de curto alcance - *Structure from Motion (SfM)* e *Image Scanning (IS)*, métodos mais frequentemente usados para obtenção de dados espaciais nos últimos anos. O objetivo deste trabalho foi o de destacar o uso dessas tecnologias modernas na captura das características morfológicas importantes do espaço subterrâneo, não apenas em termos de precisão, mas também de geometria através de comparações entre suas nuvens de pontos. Para tanto, foram selecionados locais específicos da Caverna Belianska, um monumento natural turístico protegido da Eslováquia, dadas suas características morfológicas, acessibilidade e iluminação existente. Marcos geodésicos implantados na calçada de concreto foram utilizados como referenciais para a varredura a laser feita com uma *Leica Scan Station 10*, sendo as nuvens de pontos tratadas no software *Leica Cyclone*. O *Image Scanning (IS)* e o *Structure from Motion (SfM)* foram escolhidos enquanto métodos fotogramétricos e foi utilizada uma câmera *Pentax K5* e lente *SMC DA* e tripé e software *RealityCapture®* para o processamento.

Na comparação entre as nuvens de pontos, o primeiro quesito foi a textura fotográfica, ausente na varredura a laser, que retorna o valor de intensidade do sinal

refletido. No *SfM* foi destacada a alta qualidade com alto nível de integridade, baixo ruído e textura fotográfica de qualidade. Para o *IS*, avaliou-se que possui o mesmo nível de qualidade da textura do *SfM*, mas com maior nível de ruído e áreas com dados ausentes. Considerando a distância no imageamento e as dimensões da área de interesse, os dados da varredura a laser atingiram mais nível de precisão geométrica, mas os autores consideram que os modelos fotogramétricos podem atingir precisão semelhante à varredura a laser, desde que sejam respeitadas as condições corretas de geração de imagens e pós-processamento. Os desvios entre os dados de todas as três nuvens de pontos foram comparados entre si por meio de modelos de diferença gerados na nuvem de pontos 3D no software de processamento de malha CloudCompare 2.6.0 usando o plug-in “M3C2 distance” (LAGUE *et al.*, 2013 *apud* PUKANSKÁ *et al.*, 2017), que pode ser usado para determinar distâncias diretamente entre duas nuvens de pontos. Os desvios obtidos para o *IS* demonstram não ser um método adequado para esse tipo de levantamento. Entre o *SfM* e a varredura não foi possível com clareza qual dos dois seja mais adequado para levantamentos em ambientes subterrâneos, havendo vantagens e desvantagens a serem consideradas.

FIGURA 79 - DIFERENÇA NO IMAGEAMENTO ENTRE O MÉTODO SFM (ESQ.) E IMAGE SCANNING (DIR.).



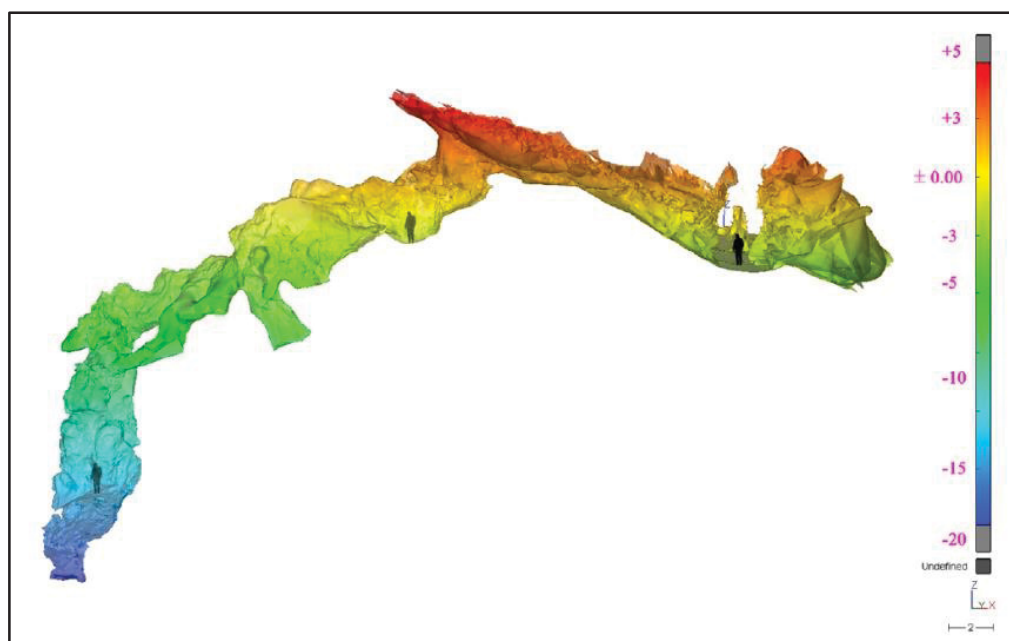
FONTE: Westoby *et al.*, 2012 *apud* Pukanská *et al.*, 2017.

Uma avaliação da efetividade operacional e problemas críticos de um sistema de mapeamento móvel baseado em SLAM denominado ZEB da GeoSLAM™ foi realizada por Sammartano *et al.* (2018). Essa tecnologia de mapeamento 3D portátil

tem se consolidado enquanto solução portátil para mapeamento de curto alcance, principalmente de espaços internos de edifícios fechados ou ambientes subterrâneos naturais, além de túneis ou minas. Uma série de testes foi realizada em dados de levantamento de estruturas arquitetônicas complexas, incluindo uma mina subterrânea medieval chamada *Bucca della Faina*. Para avaliar a acurácia e conteúdo informativo de nuvens de pontos do ZEB em diversas configurações, resultando numa proposta de método de validação. O método de validação proposto segue a abordagem endossada pela avaliação do erro quadrático médio (RMSE) e avaliação da análise de desvio de nuvens de pontos entre dados baseados em SLAM e nuvens de pontos geradas por métodos de medição mais precisos, utilizadas como referência. Deve ser destacada a capacidade dos sistemas móveis de cobrir grandes complexos em diferentes escalas e com a possibilidade de integração com outras diferentes técnicas de medição podem ser uma contribuição significativa na documentação multiescala de sítios com características arquitetônicas elaboradas.

Os resultados indicam que o sistema ZEB da GeoSLAM™ é eficaz na obtenção de nuvens de pontos precisas e ricas em conteúdo informativo, tanto em soluções autônomas quanto em casos de aplicações combinadas com abordagens de pesquisa multisensor. Atualmente, o principal problema na aplicação desta tecnologia é a falta de informação radiométrica. Mas os benefícios reais do sistema portátil, ainda que possua alguns pontos críticos devem ser destacados. Sua eficiência no levantamento de espaços internos e conjuntos arquitetônicos, paisagísticos e arqueológicos articulados onde o posicionamento GNSS não está disponível. A rapidez, tanto na aquisição como no processamento das nuvens. A portabilidade e a praticidade em ambientes hostis. As verificações de alinhamento para configuração de *loop* e encerramento. Compatibilidade com as escalas de trabalho de 1:100 a 1:200, sendo que em escalas maiores as técnicas de TLS mostram-se mais adequadas. Pelas experiências relatadas na literatura e realizadas neste trabalho, o uso de métodos MMS deve ser primeiramente considerado e somente depois deve-se aumentar as informações apenas onde for necessário com métodos de alta escala mais precisos.

FIGURA 80 – PALETA DE CORES REPRESENTANDO A ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA PELO ZEBREVO DA MINA BUCCA DELA FAINA.



FONTE: Sammartano *et al.*, 2018.

As variações no volume de gelo em uma caverna podem ser consideradas um indicador das mudanças no regime hidrológico-climático de longo prazo na paisagem. Avaliar as mudanças no volume de gelo da caverna é uma tarefa desafiadora que requer monitoramento contínuo com base em mapeamento detalhado. No entanto, com as tecnologias atuais de levantamento como o LiDAR, é possível fazer registros acurados e que podem ser comparados numa série temporal para avaliar a dinâmica do gelo da caverna. Um exemplo dessa abordagem é o trabalho de Šupinský *et al.* (2022), que apresentam os resultados do monitoramento da dinâmica do gelo na caverna Silická l'adnica situada no carste da Eslováquia, iniciado no verão de 2016. Esta caverna é a única no mundo por suas acumulações permanentes de gelo formadas na menor altitude na zona de clima moderado.

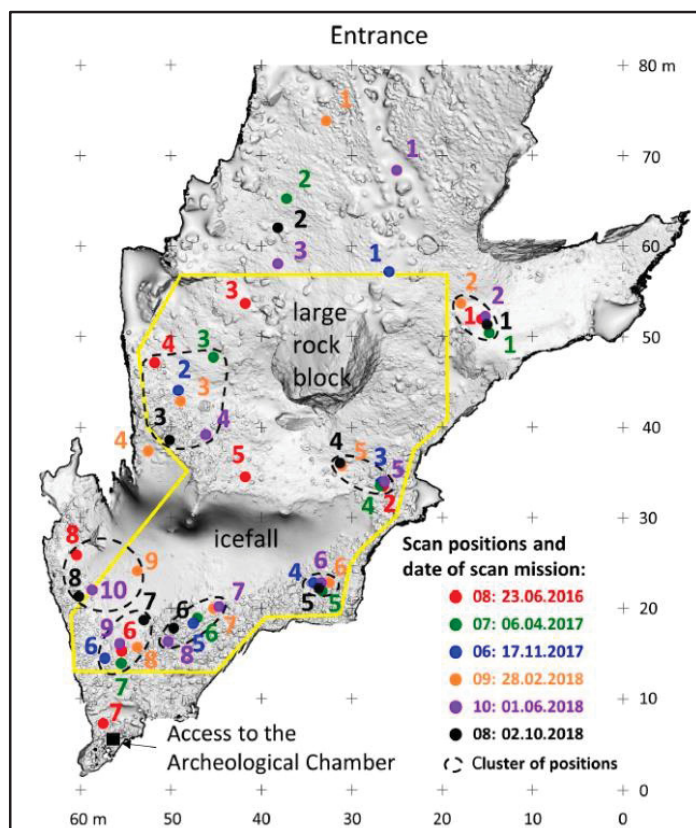
A avaliação do material fotográfico tem sido o método mais amplamente utilizado para monitorar a extensão do gelo e sua mudança. Outros métodos compreendem marcadores distribuídos e fixados no chão de gelo e/ou paredes da caverna, levantamento geodésico, datação absoluta e perfuração. Programas de monitoramento de detecção da dinâmica das acumulações de gelo em cavernas são raros. Se quantificar as mudanças das formações de gelo durante um determinado

período em alta resolução espacial pode melhorar a compreensão dessa dinâmica, o desafio está em definir o método pelo qual a topografia criomorfológica pode ser registrada de forma rápida, repetida e confiável.

O uso de TLS em cavernas de gelo é possível, sendo mais desafiador devido à superfície escorregadia, clima severo e propriedades físicas do gelo, que absorve uma parte considerável da energia infravermelha de ondas curtas normalmente usada por o scanner a laser (KAMINTZIS et al., 2018 apud ŠUPINSKÝ et al. 2022). Para tanto, os autores desenvolveram uma estrutura original de procedimento de registro com base na abordagem nuvem-a-nuvem seletiva e gerando um banco de dados de séries temporais. O aspecto inovador no método apresentado está em usar o teto da caverna sem gelo como o componente estável da cena digitalizada para registrar a série temporal. Dessa forma, foram identificadas e quantificadas as mudanças no gelo do fundo da caverna em ultra alta resolução e avaliadas a dinâmica da criomorfolgia com base em perfis verticais, mudanças da área e volume de gelo. Foi utilizado um scanner a laser terrestre VZ- 1000 por Riegl para adquirir representação 3D da superfície em ultra alta resolução, sendo as nuvens simplificadas, registradas, posteriormente convertidas em malhas e recortadas áreas de interesse (FIGURA 81).

Os modelos 3D resultantes foram subtraídos uns dos outros para calcular as alterações volumétricas, tendo sido usado o algoritmo M3C2 do software Cloud Compare e sobreposições das seções transversais do piso da caverna. Os resultados mostram que a mudança de volume de gelo durante o ano é contínua e podem ser observados processos repetidos de degradação e formação de gelo na caverna. A análise apresentada da dinâmica intersazonal do volume de gelo demonstra que houve uma diminuição significativa de gelo no período monitorado. No entanto, mais observações de longo prazo são necessárias para esclarecer os mecanismos por trás dessa mudança.

FIGURA 81 - DISTRIBUIÇÃO DAS POSIÇÕES DE VARREDURA DERIVADA DO MAPEAMENTO TLS. O POLÍGONO AMARELO MOSTRA UMA ÁREA DE INTERESSE (AOI) DEFINIDA PARA O CÁLCULO DAS MUDANÇAS NO ACÚMULO DE GELO.



FONTE: Šupinský *et al.*, 2022.

2.9 - REPRESENTAÇÕES EM 3D, SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS - SIG, GEOVISUALIZAÇÃO E TURISMO VIRTUAL

2.9.1 - REPRESENTAÇÕES EM 3D

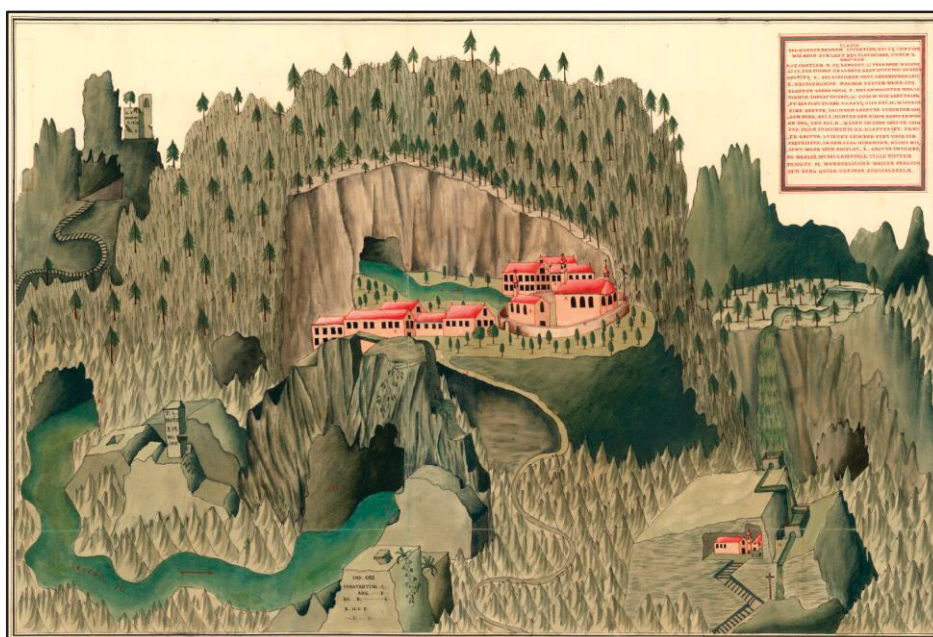
Representar a gruta equivale a criar uma imagem (uma fotografia, uma gravura, uma topografia) a partir de pontos de vista na qual as características internas do endocarste podem ser apenas parcialmente percebidas e descritas. A soma dessas percepções é usada para construir topografias, mapas e imagens, uma vez que, ao contrário da topografia externa, uma caverna pode nunca ser vista inteiramente. Isso resulta no fato de que cada representação de caverna é, portanto, uma construção parcialmente derivada de nossa percepção interna do sistema endocárstico. De fato, é necessário sair da caverna para propor uma imagem vista de fora a partir de uma

determinada posição e orientação e considerar que as escolhas de um topógrafo na representação a que ele se propõe, são fontes de diversidade (JAILLET *et al.*, 2019).

Em termos históricos, as técnicas de topografia de cavernas foram gradualmente formalizadas ao longo do tempo permitindo representações cada vez mais codificadas, detalhadas, mas igualmente variadas. Para os autores, entre o projeto de representação da gruta e a sua percepção pelo leitor há um espaço semelhante ao que existe entre a dualidade da realidade e a imaginação. E embora essas imagens tenham a função de dar suporte a interpretações e explorações científicas, ao mesmo tempo fascinam e estimulam a imaginação.

As primeiras representações de ambientes subterrâneos associavam vistas em perspectiva e desenhos em corte, como pode ser visto no exemplo do documento “*Plann der wunderbahren situation, bei St. Cantiam (...) durch Grotten*”, de meados do século XVIII (FIGURA 82), sendo representados tanto elementos subterrâneos, quanto elementos de superfície. Esta visão é bastante original e traduz bem a dificuldade de representar, num mesmo documento, todos os elementos constitutivos da paisagem cárstica.

FIGURA 82 - "PLANO DA MARAVILHOSA SITUAÇÃO, EM ST. CANTIAM, ASSIM COMO O CURSO DO RIO SERO, ATRAVÉS DE 3 GRUTAS (GEYER ČINNÝ, ENTRE 1751 E 1760)".



FONTE: Jaillet *et al.*, 2019.

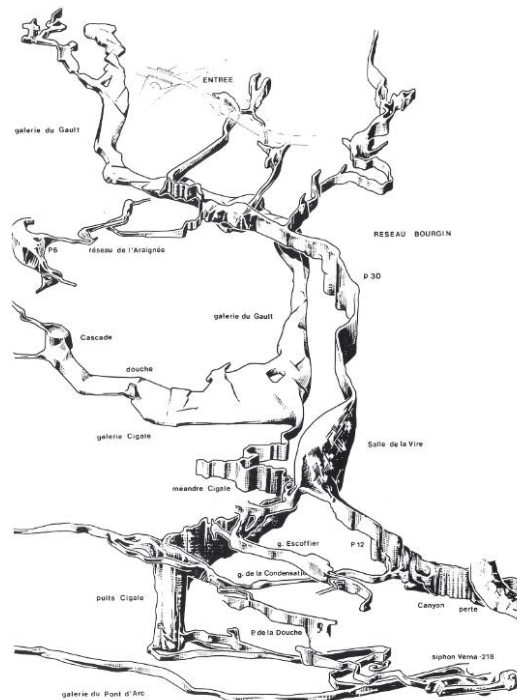
Em fins do século XVIII, os primeiros exploradores do mundo subterrâneo utilizaram a planta, cortes transversais e pouco a pouco os perfis dos condutos (SHAW, 1992 *apud* JAILLET *et al.*, 2019). Ao longo do século XIX as representações em planta, cortes e seções foram-se generalizando e substituíram as representações em vista cavaleira (JAILLET *et al.*, 2014), destacando-se a formalização da representação dos elementos implementadas por Martel (orientação, escala, legenda, seções, autoria, data, toponímia, etc.). O século XX é apenas a extensão desta codificação da topografia subterrânea, num processo de discretização do espaço subterrâneo onde se distingue o percurso (ou poligonal) do traçado topográfico (o desenho). A qualidade do percurso é considerada uma operação geométrica enquanto o detalhamento está, muitas vezes, ligado à sensibilidade do desenhista em representar os contornos e demais elementos da caverna mais ou menos corretamente (JAILLET *et al.*, 2019). A evolução gradual na qualidade e precisão dos mapas de cavernas pode ser percebida seguindo a sequência histórica de mapas da Caverna Mammoth, localizada nos EUA (SUTTON, 2017 *apud* WHITE *et al.*, 2019).

Entre as décadas de 1970 e 1980, são empregadas representações axonométricas de abismos, permitindo uma visualização tridimensional inspirada em padrões de desenho técnico ou industrial (FIGURA 83). Este tipo de representação é considerado como um complemento da topografia espeleológica, onde o principal interesse é facilitar a leitura. Apesar de bastante estética, a imagem sofre duas desvantagens, onde o ponto de vista é imposto pelo desenhista e a conservação dos ângulos não é respeitada (FAUCHER *et al.*, 1991 *apud* JAILLET *et al.*, 2019).

No Brasil, exemplos de representações em perspectiva não são tão comuns, mas remontam ao final década de 1960, como no caso da Gruta de Itaperuçu, no Paraná (FIGURA 85), da Gruta Lapa Nova de Vazante em Minas Gerais (REIS, 1968) (FIGURA 84) e de uma gruta hipotética realizada por Le Bret (1970) (FIGURA 86). Mais recentemente, temos as representações em blocos-diagrama (panorâmicas) de cavernas da região de Mambaí, Estado de Goiás (LINHARES, 2001) e da Gruta do Janelão, em Minas Gerais (CHABERT, 2003; IBAMA, 2005) (FIGURA 87 e FIGURA 88) como exemplos. Para Linhares (2001), a visualização através de representações tridimensionais como blocos-diagrama, onde as feições do interior e exterior da caverna são detalhadas “possibilitam um melhor entendimento científico, além de propiciar aos leigos, através da auto interpretação visual imediata, uma boa

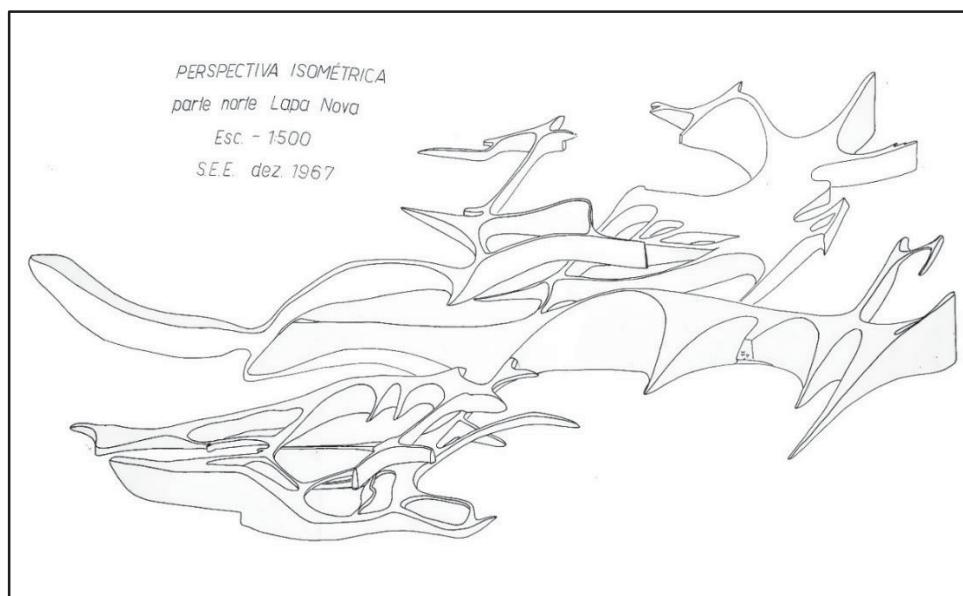
compreensão (*sic*) das feições ornamentais e do grau de dificuldade para visitação, bem como do desenvolvimento e equipamento necessário para determinado fim”.

FIGURA 83 - PERSPECTIVA AXONOMÉTRICA PRODUZIDA POR BERNARD PEIGNÉ DA PARTE SUPERIOR DE “LE TROU QUI SOUFFLE”.



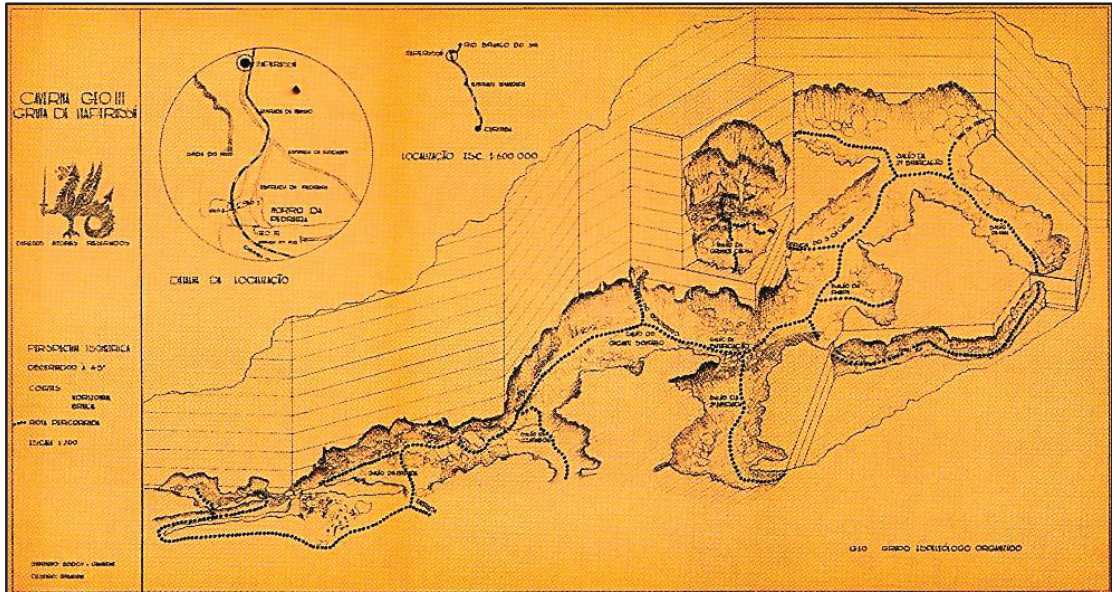
FONTE: Lismonde, 1991 *apud* Jaillet *et al.*, 2019.

FIGURA 84 – PERSPECTIVA ISOMÉTRICA DA LAPA NOVA DE VAZANTE, VAZANTE – MG.



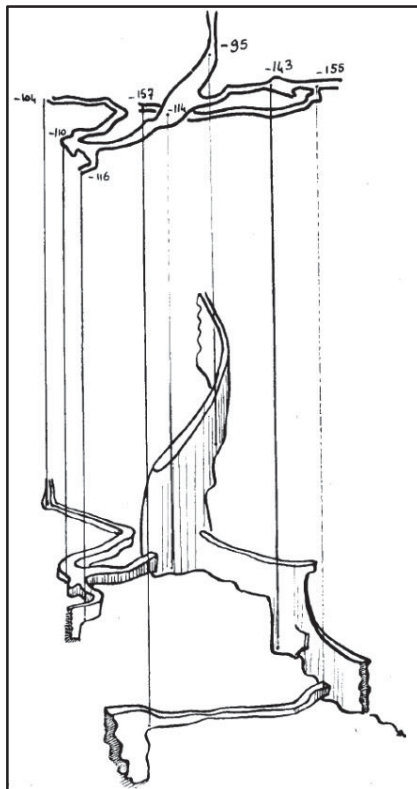
FONTE: Reis, 1968.

FIGURA 85 - REPRESENTAÇÃO EM PERSPECTIVA ISOMÉTRICA DA GRUTA DE ITAPERUÇU.



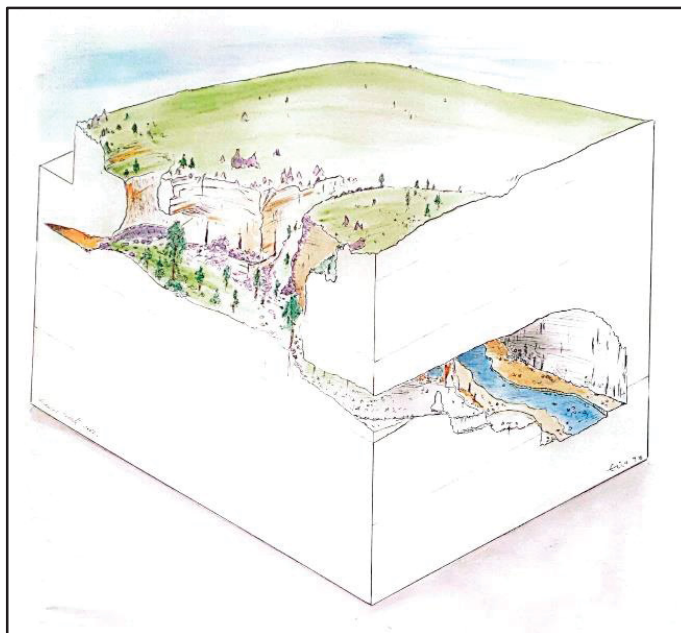
FONTE: Grupo Espeleológico Organizado – GEO, 196? *apud* Sessegolo *et al.*, 2006.

FIGURA 86 - REPRESENTAÇÃO EM PERSPECTIVA OBLÍQUA CAVALEIRA DE UMA GRUTA HIPOTÉTICA.



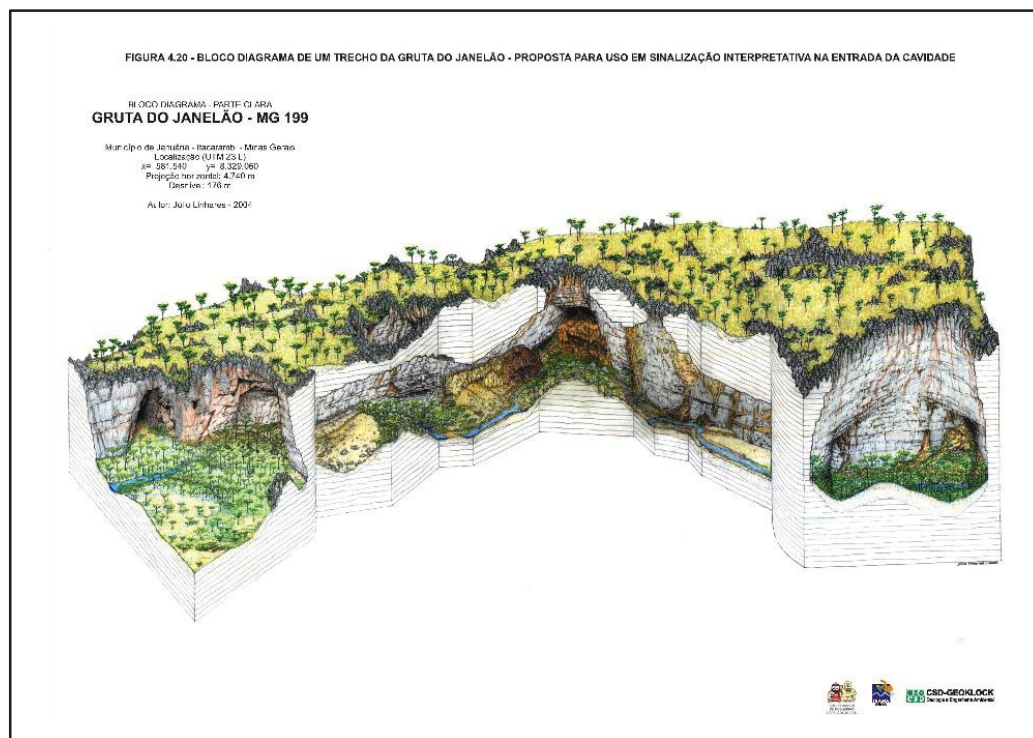
FONTE: Le Bret, 1970.

FIGURA 87 – BLOCO-DIAGRAMA DA GRUTA DO JANELÃO FEITO POR FRANÇOIS FEDERLÉ.



FONTE: Chabert, 2003.

FIGURA 88 - BLOCO-DIAGRAMA DA GRUTA DO JANELÃO. PARNA CAVERNAS DO PERUAÇU - MG.



FONTE: IBAMA, 2005.

Com o processo de informatização verificado a partir da década de 90 do século passado, inúmeros procedimentos puderam ser automatizados através de softwares dedicados ao tratamento dos dados topográficos, incluindo soluções para o fechamento de poligonais e propagação de erros de medição e de visualizações em perspectiva. Vários exemplos de modelagem 3D a partir de dados topográficos podem ser mencionados, como o apresentado por Ferrari *et al.* (2001), por Carvalho *et al.* (2016), por Cruz *et al.* (2017), Silvério *et al.* (2019) (FIGURA 89), Mantilla-Dulcey *et al.*, (2021), entre outros.

A partir do final do século XX, tecnologias de levantamento em 3D como a varredura a laser, a fotogrametria e levantamentos por Matterport, permitiram a novas formas de representação por nuvens de pontos ou malhas com textura fotográfica, resultando, às vezes, em verdadeiros clones digitais de cavernas. Para que esta classificação seja alcançada, o projeto deve atender a pelo menos três critérios: (1) integridade do projeto; (2) a malha deve estar completa e sem buracos e os triângulos do modelo TIN devem ser sempre dez vezes menor que o tamanho médio da malha da nuvem de pontos; (3) a texturização deve ser completa (colorimetria RGB) e os texels devem ser menores que os triângulos do modelo TIN. O 3D não é um objetivo em si, mas um passo em um projeto de documentação de cavernas. Métodos complementares como termografia, geofísica, tomografia elétrica ajudam a capturar novas imagens de cavernas e do relevo cárstico, vindo a aprimorar nosso conhecimento (JAILLET, 2022).

FIGURA 89 - MODELO TOPOGRÁFICO 3D DA GRUTA DO BOCÃO, P.E. DO IBITIPOCA - MG
PRODUZIDO PELO SOFTWARE THERION E VISUALIZADO NO SOFTWARE LOCH.



FONTE: Silvério *et al.*, 2019.

Enquanto os mapas bidimensionais apresentam as feições características como os condutos, cursos d'água, depósitos químicos e clásticos, os levantamentos 3D permitem uma melhor compreensão dos aspectos morfológicos, cruciais para o entendimento da gênese e evolução da cavidade. As representações em 2D são amplamente utilizadas dada a sua maior facilidade de criação e interpretação, sendo muito úteis para a navegação dentro da perspectiva científica, esportiva ou turística. No entanto, apresentam algumas desvantagens como a dificuldade de representação de vários níveis, de características litológicas e estruturais e variações topográficas do terreno. Por outro lado, as representações em 3D são mais precisas e detalhadas, permitindo uma visualização em ambiente virtual a partir de vários ângulos e em diferentes escalas, possibilitando uma percepção mais completa das características topográficas.

A criação de representações 3D pode ser mais complexa e demorada do que as representações 2D e pode exigir equipamentos e habilidades especializadas, além de ser mais desafiadora em função da complexidade do ambiente representado. Em suma, as duas formas de representação são igualmente importantes e podem ser utilizadas de forma complementar para a navegação ou estudo das características das cavidades representadas. A escolha de uma dessas formas de representação dependerá do contexto em que o mapa será utilizado, das necessidades do usuário, da expertise da equipe de mapeamento e dos instrumentos e recursos técnicos disponíveis. Como continuamos a visualizar as representações em 2D em artigos, livros e telas de computador geradas a partir de vistas 3D, mas agora com alta resolução e adaptadas às questões científicas, percebe-se que o 3D não é superior ao 2D. É apenas uma opção adicional, um meio complementar para estudar e visualizar cavernas e como todas as ferramentas, requer aprendizado e uso adequado (JAILLET *et al.*, 2022).

Jaillet *et al.* (2019) argumentam que as representações 2D e 3D são ferramentas importantes para a visualização da realidade, mas também podem criar imagens estereotipadas e simplificadas do ambiente. Ele conclui que é importante encontrar um equilíbrio entre a realidade e a imaginação na representação do ambiente cárstico e das cavernas, a fim de garantir uma representação mais completa e precisa do ambiente. Além disso, destacam que existe um certo paradoxo, em que um desenho estético facilmente apreendido é consenso e não é questionado, mesmo

se o caminhamento topográfico for impreciso. Uma poligonal matemática extremamente bem cuidada, mas sem cuidado quanto à riqueza pictórica não dará conta de certos aspectos sensíveis próprios de uma experiência de caverna. As tecnologias 3D produzem imagens espetaculares, cujo poder aniquila qualquer crítica quanto à sua precisão geométrica, ainda que muitos desses modelos 3D sejam produzidos apressadamente e sem controle de deformações geométricas.

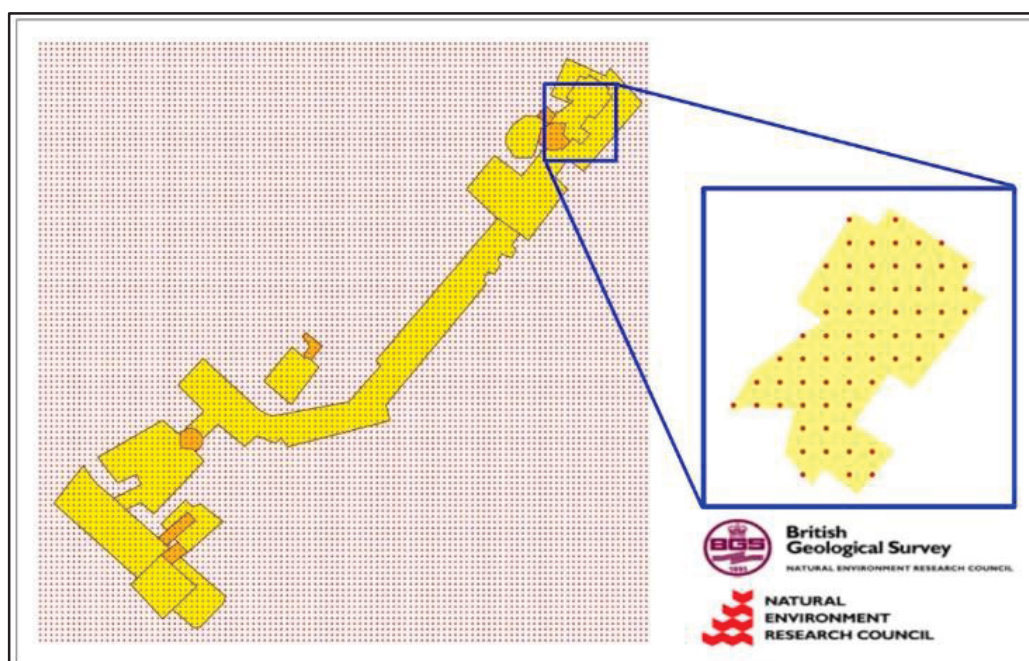
A representação 3D de cavernas em ambiente digital se iniciou com a utilização de vários softwares voltados ao tratamento de levantamentos de topográficos que, por sua vez, gerou a necessidade de maiores desenvolvimentos na visualização dos dados em tela, dificultada pela baixa capacidade computacional da época. Assim, esforços foram feitos dentro da comunidade espeleológica em desenvolver e propor formas e estruturas para a geovisualização de cavernas virtuais.

Nesse sentido, Patterson (2006) discorre sobre o desenvolvimento de procedimentos para armazenar e visualizar informações geográficas sobre cavernas, em particular aos dados das cavernas artificiais de Nottingham mantidas pelo British Geological Survey (BGS). Tratam-se de mais de 400 espaços subterrâneos artificiais escavados manualmente ao longo dos anos para servir a muitos propósitos, incluindo residências, depósitos, minas de areia e abrigos antiaéreos. Informações espaciais dessas cavidades foram armazenadas em arquivos com formato shapefile 2D e um sistema de consulta de banco de dados, tendo-se a expectativa de que essas informações se tornem recuperáveis em um formato tridimensional, objetivo da pesquisa. No entanto, a aparência bidimensional limitada e a falta de profundidade podem reduzir o realismo e dificultar o reconhecimento e o potencial de exploração de um local, requisitos essenciais se os modelos forem usados nas áreas de educação, arqueologia, geofísica ou planejamento.

No desenvolvimento deste estudo, o autor optou pelo conceito de representação do tipo “voxel”, uma técnica de subdivisão do espaço que possui a capacidade de armazenar caracteres em cada ponto, utilizando-se de células cúbicas regulares chamadas (voxels), algo como equivalente 3D de um pixel. Cada voxel pode ter valores binários ou numéricos associados e que podem representar algumas propriedades mensuráveis ou variáveis independentes. As vantagens de usar voxels em vez de superfícies baseadas em vetores incluem sua insensibilidade à complexidade da cena e do objeto, sua independência do ponto de vista e sua

capacidade de representar conjuntos de dados amostrados e simulados. As desvantagens desse método incluem o fato de armazenarem dados de forma discreta, causando perda de informações geométricas e precisão e necessitam de maior poder de processamento em relação a outras abordagens. Sobre a planta 2D em formato SHP foi colocada uma grade vetorial de pontos (FIGURA 90), representando o centro de um cubo voxel de 0,5m x 0,5m, usado para verificar se um voxel estava posicionado nos limites da cavidade. Inseridos os pontos de altimetria, foi possível ao programa armazenar com precisão a matriz de blocos 3D com diferentes níveis verticais. Para isso usou-se Visual Basic 6.0 para a implementação do Voxel Creator.

FIGURA 90 - GRIDE DE PONTOS SOBREPONTO AOS POLÍGONOS DOS DIVERSOS COMPARTIMENTOS.



FONTE: Patterson, 2006.

O programa permitiu exportar cada local como um arquivo VRML (Virtual Reality Modeling Language) (*.WRL), um produto muito mais útil com maior potencial de aplicação. Como desvantagem, destaca-se a própria estrutura de dados em que só se pode, no momento, observar vistas externas da estrutura da caverna, que conjugada à resolução grosseira dos dados, impede o exame de qualquer função potencial de 'walk-through'. Soluções de resolução múltipla podem, no entanto, fornecer uma resposta para uma visualização rápida e bem-sucedida em esforços

subsequentes de modelagem de cavernas de resolução mais altas, suavizando a aparência geométrica do modelo.

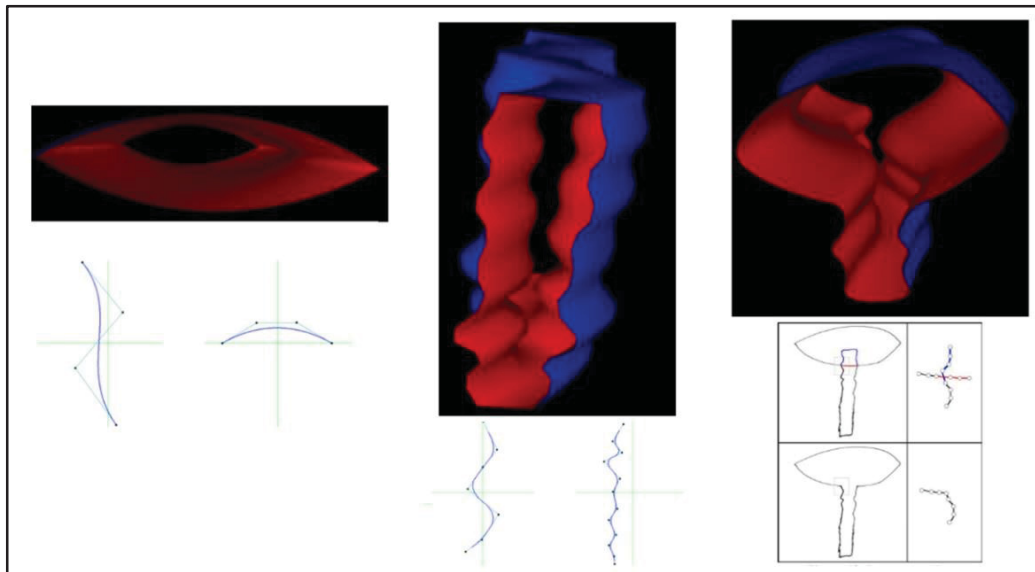
As cavernas possuem um longo histórico de uso em ambientes virtuais para fins de entretenimento, notadamente filmes e jogos de computador, mas ainda há poucos trabalhos de modelagem tridimensional no campo da espeleologia. E visando a realização de uma modelagem mais realista, faz-se necessário o entendimento dos processos de formação dessas cavidades, que refletem nas morfologias dos condutos e passagens. Partindo das curvas que representam falhas na rocha ou da ação de fluxos de água, é possível criar um modelo de nível de detalhe grosseiro para uma passagem. A crescente complexidade dos ambientes de jogos gera uma demanda por trabalho criativo em termos de texturas, modelos e mapas, que pode ser facilitado por processos de automatização ou por ferramentas mais amigáveis. Partindo desses princípios, Boggus *et al.* (2009) apresentam métodos para criar modelos 3D de passagens que, combinados, podem representar todo um sistema subterrâneo.

Modelos topográficos são dados limitados em termos de detalhamento, mas são suficientes e adequados para o uso em softwares que usam modelos poligonais a partir desses dados levantados. E ainda que esses modelos forneçam mais informações visuais do que um mapa, o nível de detalhe não é suficiente para o uso em ambientes virtuais de abordagem realista. Enquanto as passagens freáticas são formadas abaixo do lençol freático e tendem a se alargar com o tempo num plano horizontal, cavernas vadosas tendem a se desenvolver verticalmente. E dada a variabilidade da atividade hidrológica, formas combinadas podem se formar pela alternância da circulação hídrica. Tais premissas são importantes para efeito de modelagem de passagens, realizadas a partir de superfícies e curvas Bezier ou B-Spline (FIGURA 91).

Os espaços subterrâneos naturais são estruturas importantes de suporte aos estudos geomorfológicos, sendo que estes têm demandado a realização de levantamentos tridimensionais em alto nível de detalhe. Tal necessidade tem contribuído para a intensificação da realização de pesquisas centradas nas técnicas computacionais para a representação 3D desses modelos. Idrees *et al.* (2019), propõem uma nova abordagem de modelagem avançada para a reconstrução 3D realista das superfícies de uma caverna. Algoritmos para a reconstrução de

superfícies geralmente empregam malha triangular 3D numa estrutura topológica que atribuem as coordenadas xyz de entrada em uma malha poligonal regular composta de vértices, arestas e faces.

FIGURA 91 - MORFOLOGIA DE CONDUTOS SEGUNDO SUA GÊNESE: CONDUTO FREÁTICO (ESQ.), CONDUTO VADOSO (CENTRO) E CONDUTO COMBINADO (DIR.).



FONTE: Modificado de Boggus *et al.*, 2009.

Em função das limitações na capacidade de processamento dos dados em um PC em face do grande volume de dados, usualmente se procede com uma reamostragem dos dados de forma a tornar possível sua conversão em uma malha poligonal baseada em tetraedros de Delaunay. O resultado é uma verdadeira geometria 3D de uma modelagem de superfície, mas em baixa resolução. Como alternativa, os autores introduzem o conceito de modelagem 3D texturizadas com base em dados geométricos e valores de intensidade numa varredura de resolução total. Na sequência, realizam análises comparativas, sendo que os processamentos foram realizados a partir dos levantamentos com um scanner a laser Faro Focus3D na Caverna Gomatong, localizada nas Filipinas, com 244.000 pontos/s, resultando em 6,09 bilhões de pontos de um total de 203 varreduras. O registro das nuvens foi feito no software FARO SCENE 5.5 usando o algoritmo de ponto iterativo mais próximo (ICP). O erro médio quadrático foi de 4,4mm, seguindo-se com a limpeza filtragem de ruído e outliers e exportação em duas escalas de resolução em formato ASTM E57, sendo um para a geração da malha e o outro para o modelo 3D texturizado. O primeiro

conjunto foi reamostrado espacialmente adotando-se uma distância de 5cm entre os pontos e foi processado no software Meshlab 1.3.4 BETA utilizando-se do algoritmo Poisson Surface Reconstruction na construção da malha 3D. O resultado foi um modelo digital em nível grosseiro. O segundo conjunto empregou a varredura de resolução total e foi realizada a renderização 3D texturizada no Autodesk ReCap 360. Como vantagem desta abordagem, destaca-se que o modelo 3D texturizado de alta resolução permite a medição precisa de detalhes finos da superfície, com precisão de até 1 mm. Modelos texturizados com imagem de intensidade em tons de cinza permitiram a identificação de detalhes finos das rochas encaixantes, pássaros e morcegos, gravuras rupestres, entre outros. E o passeio virtual realizado revelou muitas feições erosivas freáticas e epifreáticas, além de superfícies antigas e mais recentes, que demonstram os processos evolutivos da cavidade. Por fim avaliam as vantagens e desvantagens dos métodos utilizados em termos de eficiência do processamento dos dados, da visualização em 3D, interatividade e representação dos recursos geomorfológicos, sintetizados na TABELA 2.

TABELA 2 - COMPARATIVO ENTRE O MODELO DE MALHA E O MODELO 3D TEXTURIZADO.

	Fatores considerados	Modelo de Malha	Modelo 3D Texturizado
	Tempo de processamento	Razoavelmente curto. Algumas horas	Várias horas a dias para o carregamento, indexação e renderização dos dados dos pontos.
	Interatividade com o modelo	A interação com o modelo é eficiente e em tempo real	A interação é muito mais lenta
	Navegação	A navegação é restrita a um padrão específico	Oferece modos de navegação dinâmicos e múltiplos, como visualizações reais e em 3D
	Realidade Virtual	Não é possível	Fornece visualização realista de alta resolução
	Detalhes/ identificação do recurso	Com pontos xyz esparsos, apenas a morfologia geral da caverna é representada.	Recursos micro, meso e macro podem ser identificados e medidos no modelo
	Morfometria	Mais adequado para medições quantitativas (volume, área de superfície de passagem, desenhos de perfil e corte, distâncias, inclinações, etc.)	Não é eficiente para medidas quantitativas

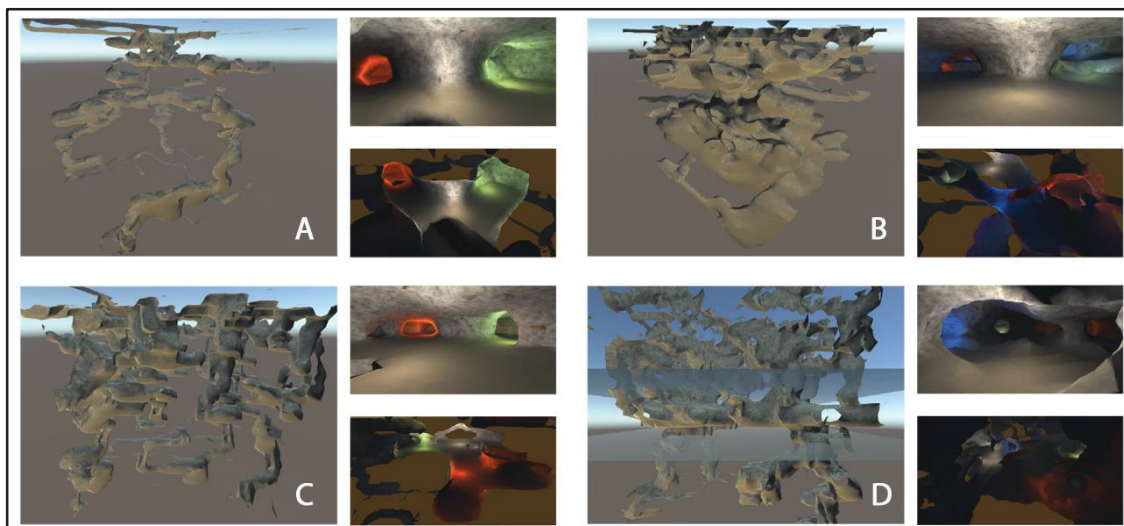
FONTE: Traduzido de Idrees *et al.*, 2019

Seguindo os princípios da geração de cavernas virtuais com aparência natural em 3D, Franke *et al.* (2022) apresentam um método que inclui a rede de condutos, a morfologia dos condutos, a aparência da superfície das paredes e espeleotemas, como as estalactites e estalagmites. Esta proposta se baseia em estruturas de dados projetados em grade, de forma a lidar adequadamente com o desafio de representação em diferentes escalas de cavernas. A implementação do método permitiu a demonstração de que cavernas cársticas virtuais de diferentes morfologias podem ser geradas com tempo computacional e requisitos de memória praticáveis, podendo ser visualizados e percorridos interativamente. Ainda que tais procedimentos estejam mais ligados ao fenômeno de gamificação, a comunidade espeleológica poderá se beneficiar dos resultados de pesquisas dessa natureza, sendo perfeitamente factível a reconstrução digital de cavernas existentes. Este trabalho contribui nos processos de modelagem e visualização de cavernas ao propor um método de geração processual eficiente e realista, passíveis de serem visualizadas e percorridas interativamente com base na plataforma de jogos Unity Engine (versão 2019.4.11), com implementações em C# 6 (.NET Framework versão 4.7.1).

Uma propriedade particular do método proposto é considerar os preceitos espeleológicos na gênese e evolução de cavernas de ambientes cársticos, ou seja, processos formativos que determinam as morfologias a partir da modelagem de fluxos hídricos e erosão. Essas variáveis do processo de evolução cárstica se referem à simulação do fluxo de água, seus níveis e resistência, velocidade e desaceleração, rotas de circulação hídrica, concentração de ácidos carbônicos e temperatura da solução. Para tanto, os trabalhos são divididos em quatro etapas. Na primeira etapa é realizada a geração de uma região cárstica com suas cavidades naturais. Segue-se com o alargamento dos condutos por erosão mecânica e dissolução química. A terceira etapa se refere à geração de uma representação de parede poligonal do volume da caverna adequada à visualização interativa no contexto do desenvolvimento de jogos. Por fim, é realizada a geração dos espeleotemas de forma individual, em escala e com textura apropriada. Os resultados corroboram a ideia de que o conceito é capaz de gerar estruturas que se assemelham a cavernas reais, sendo que a forma da caverna pode ser controlada pelos parâmetros cársticos e pelos parâmetros de influência do fluxo de água e seus efeitos (FIGURA 92), à exceção do

padrão ramiforme, controlado por ácido sulfúrico, parâmetro não considerado no método proposto, mas que será considerado em trabalhos futuros.

FIGURA 92 - EXEMPLOS DE PADRÕES DE DESENVOLVIMENTO DE CAVERNAS CARBONÁTICAS: RAMIFICADA RETILÍNEA (A); ANASTOMOSADA (B); EM REDE (C) E ESPONJOSA (D).



FONTE: Modificado de Franke *et al.*, 2022.

Uma vez que os dados topográficos passaram a ser tratados com softwares específicos, permitindo a geração de modelos 3D e a sua visualização, ou mesmo com a utilização de dados 2D na forma de mapas ou dados cadastrais, os levantamentos espeleológicos passaram a ter o suporte dos Sistemas de Informação Geográfica - SIG para a sua documentação. Tal sistema mostra-se muito útil à espeleologia uma vez que permite a integração e visualização de informações diversas em um único ambiente digital, tais como dados topográficos, hidrológicos, geológicos, entre outros, além de permitir a criação de modelos tridimensionais das cavidades e a visualização de sua representação espacial (SZUKALSKI, 2002). Baseia-se no fato de que muitos dos dados e informações que precisamos usar têm uma localização geográfica inerente e estão relacionados espacialmente, sendo que o SIG fornece as ferramentas analíticas para ajudar a entender a distribuição espacial da informação geográfica e modelar suas interações, podendo vir a encontrar padrões e relacionamentos anteriormente não reconhecidos.

2.9.2 - SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS – SIG

Os Sistemas de Informações Geográficas vêm sendo utilizados sistematicamente em diversas abordagens da pesquisa espeleológica como no gerenciamento de dados cadastrais (SIMÕES *et al.*, 2003; ROCHA *et al.*, 2018); na modelagem e análises espaciais de terrenos cársticos e manejo de cavernas (PHELAN, 2002; DESPAIN *et al.*, 2002; MCNEIL *et al.*, 2002; WU *et al.*, 2008; ARTUGYAN *et al.*, 2015; MORENO-GÓMEZ *et al.*, 2019; BENANI *et al.*, 2022), no desenvolvimento de mapas preditivos (HORROCKS *et al.*, 2002); na integração de fontes de dados de Sensoriamento Remoto e cartografia espeleológica (HUNG *et al.*, 2002); em análises hidrogeológicas (STONE *et al.*, 2002; Glennon *et al.*, 2002); em monitoramentos climáticos (JHA *et al.*, 2020), em impactos de visitação (HALE, 2007), na avaliação microbiológica aérea de cavernas turísticas (BERCEA *et al.*, 2018) e em biodiversidade (SALEM, 2003). São também pesquisadas as estruturas de banco de dados (GAO *et al.*, 2008), análises espaciais de artefatos arqueológicos em cavernas (MOYES, 2002), entre outros exemplos.

Considerando os aspectos técnicos e teóricos na sistematização de um banco de dados geográfico em ambiente SIG enquanto suporte às pesquisas espeleológicas, Albert (2017) discute a utilização desta ferramenta visando uma melhor compreensão e gestão dessas formações geológicas. Considera que os artigos de caráter metodológico sobre a análise de dados de cavernas concentram-se em aspectos teóricos e não nos aspectos práticos do processamento de dados.

Para o autor, é de suma importância a coleta de dados precisos e confiáveis sobre as cavernas, incluindo sua localização, dimensões, características físicas e geológicas, bem como informações sobre a fauna e a flora que habitam esses ambientes, incluindo os vestígios arqueológicos. Os levantamentos resultam em dados e arquivos que refletem as condições de uma caverna num dado momento, sendo que estas podem ter mudado desde a época da última pesquisa. Além disso, argumenta que qualquer tipo de levantamento ocasiona impactos no ambiente subterrâneo e a utilização de dados levantados e sistematizados podem contribuir para a sua minimização. O artigo também destaca os desafios envolvidos na coleta de dados em ambientes subterrâneos e as limitações técnicas dos equipamentos de coleta e diferentes técnicas utilizadas para coletar dados em cavernas são apresentadas, como a fotogrametria, a varredura a laser e a medição direta e

apresenta exemplos de como esses dados podem ser incorporados em um SIG. Enquanto levantamentos topográficos permitem a geração de modelos 3D paramétricos, a varredura a laser ou a Fotogrametria de Curta Distância permitem a geração de modelos realistas. Os dados espaciais devem ser submetidos a análises de qualidade de dados, considerando a existência de vários tipos de erros, independentemente dos métodos de levantamento empregados, que vão de fechamento de poligonais em levantamentos topográficos aos erros de registro manual em varreduras a laser. Em geral, tal controle é feito a partir de análises estatísticas na comparação entre os dados existentes e novas medições tomadas para controle.

Por fim, o autor discute os benefícios da utilização de dados de cavernas em um SIG, como a possibilidade de criar e atualizar mapas precisos e tridimensionais, facilitando a gestão e conservação desses ambientes, além de permitir a análise da relação entre as cavernas e outros elementos do ambiente, sendo que os levantamentos devem ser precedidos de intenso trabalho de planejamento e documentação das atividades desenvolvidas.

Seja para o estudo de uma flora e fauna especializadas, para o entendimento de processos geológicos, para o aproveitamento turístico, monitoramento das alterações da superfície topográfica e impactos como a poluição, é importante que se façam sistemas de modelagem complexos das cavernas e que estes mostrem as relações espaciais dos processos. Tarsoly (2006) descreve o desenvolvimento de um sistema de informação geográfica (SIG) para gerenciar esses dados, que inclui um banco de dados georreferenciado, uma interface de usuário e ferramentas de análise. Além disso, discute os desafios envolvidos na criação de um sistema de informação para cavernas, como a falta de padronização nos métodos de coleta de dados e a necessidade de integração com outras bases de dados ambientais. Em conclusão, o autor destaca a importância da conservação das cavernas, não apenas por causa de sua beleza natural e valor científico, mas também por causa de sua importância para a biodiversidade e para a manutenção do ciclo hidrológico. Ele descreve as ameaças enfrentadas pelas cavernas, como a poluição, a destruição do habitat e a exploração turística inadequada, e discute como o sistema de informação pode ser usado para promover a conservação desses ambientes e entende ser, o sistema de informação geográfica, uma ferramenta útil para esse fim.

Reinhart (2017) discute a importância de contextualizar mapas de cavernas como informações geoespaciais para uma melhor compreensão e gestão dessas formações geológicas. O artigo apresenta a situação atual das cavernas na Indonésia, incluindo a falta de informações precisas sobre sua localização e características, a falta de coordenação entre diferentes agências governamentais e a exploração turística inadequada. O autor argumenta que a falta de informações precisas sobre as cavernas dificulta a gestão e a conservação desses ambientes e destaca a importância de coletar e gerenciar dados precisos e confiáveis. Como exemplo, apresenta um estudo de caso que ilustra como os mapas de cavernas podem ser contextualizados como informações geoespaciais, incluindo a coleta de dados sobre a sua localização, dimensões, geologia e hidrologia, bem como informações sobre a fauna e flora que habitam esses ambientes. O autor descreve como esses dados foram integrados em um sistema de informação geográfica (SIG), que permite a análise espacial dos dados e a criação de mapas tridimensionais das cavernas. Ele discute como esses mapas podem ser usados para gerenciar e conservar as cavernas na Indonésia, incluindo a identificação de áreas de maior risco de degradação ambiental e a orientação das atividades turísticas para áreas menos sensíveis (FIGURA 93). Por fim, é destacada a importância da coleta e gerenciamento de dados precisos e confiáveis para uma gestão eficaz e sustentável desses ambientes, seja na Indonésia e em outros lugares e argumenta que os mapas de cavernas podem ser uma ferramenta valiosa para alcançar esse objetivo.

FIGURA 93 - ESQUEMA DE INFORMAÇÃO GEOESPACIAL.



FONTE: Traduzido de Reinhardt, 2017.

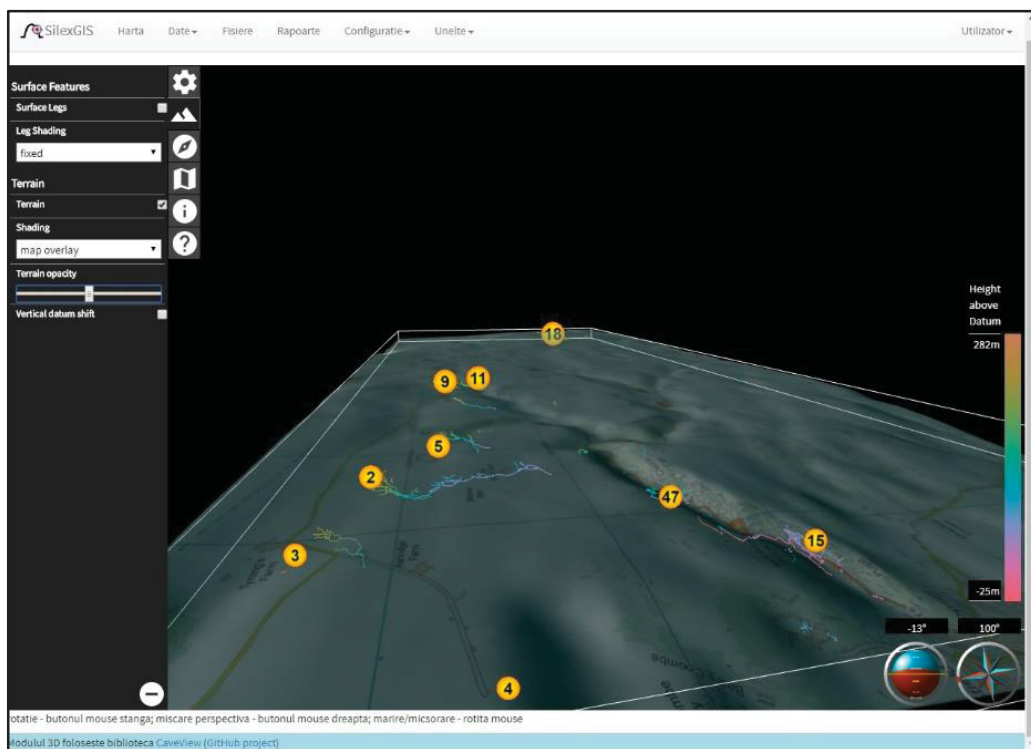
Uma visão geral das aplicações, tendências e direções da realidade virtual (RV) e sistemas de informação geográfica (SIG), não necessariamente relativas a aplicações espeleológicas, é dada por Haklay (2002). Segundo o autor, a combinação

dessas tecnologias pode proporcionar uma experiência imersiva e interativa para o usuário, permitindo uma melhor visualização e compreensão de dados geoespaciais. São discutidas várias aplicações da RV e SIG, incluindo visualização de dados geográficos, modelagem 3D, planejamento urbano, gestão ambiental e treinamento em simulação. E é destacado como a RV e o SIG podem ser usados para fornecer informações espaciais precisas para a tomada de decisão em várias áreas, incluindo gestão de recursos naturais, saúde pública e defesa. O autor também discute as tendências emergentes na RV e SIG, incluindo a utilização de plataformas de realidade aumentada (RA) e dispositivos de rastreamento de movimento para uma experiência ainda mais imersiva. Ele discute como a tecnologia está se tornando cada vez mais acessível e como a integração com outras tecnologias, como inteligência artificial e internet das coisas (IoT), está transformando a maneira como os dados geoespaciais são coletados, analisados e visualizados. Por fim, o autor destaca as possíveis direções futuras da RV e do SIG, incluindo a utilização de interfaces cerebrais, avanços na interação humano-computador e a utilização de dados geoespaciais para criar ambientes virtuais cada vez mais realistas.

Pologea (2022) discorre sobre o [SilexGIS](#), uma aplicação web gratuita e de código aberto utilizada para o armazenamento e visualização de dados topográficos, geográficos e outros, associados a cavernas. Foi projetado como um SIG sendo que os usuários podem adicionar e visualizar informações geográficas em mapas dinâmicos da web do exocarste e de cavernas (FIGURA 94). O principal objetivo do SilexGIS é oferecer um sistema fácil de usar no qual se possa inserir informações obtidas na exploração e documentação de cavernas ou áreas cársticas, com abordagem espeleológica, mas facilmente adaptável a projetos ou pesquisas mais específicas. As vantagens dessa proposta se referem à acessibilidade do sistema por meio de um navegador da web e pode ser disponibilizado pela Internet ou em rede local, sendo colaborativo, fácil de instalar, seguro, autônomo e que não depende de outros pacotes de software complexos para a funcionalidade principal do SIG. Extensível, este sistema é capaz de importar dados de vários geoformatos e fontes, tornando-se assim principalmente dedicado a espeleólogos e também a usuários não técnicos. O autor destaca o fato de que o SilexGIS não está tentando substituir aplicativos dedicados ao mapeamento de cavernas ou processamento de dados de topografia de cavernas (Therion, Survex, Walls, Compass), mas serve para armazenar

e visualizar dados produzidos por esse aplicativo e pode funcionar de forma independente, sem a necessidade de instalar outros aplicativos SIG ou aplicativos de topografia ou levantamento para a maioria das tarefas. Finalmente, como tantos dados estão sendo registrados, é cada vez mais urgente organizá-los em bancos de dados que cresçam em conteúdo e distribuição (JAILLET, 2022a).

FIGURA 94 - INTERFACE DO SILEXGIS.



FONTE: Pologea, 2022.

2.9.3 - GEOVISUALIZAÇÃO

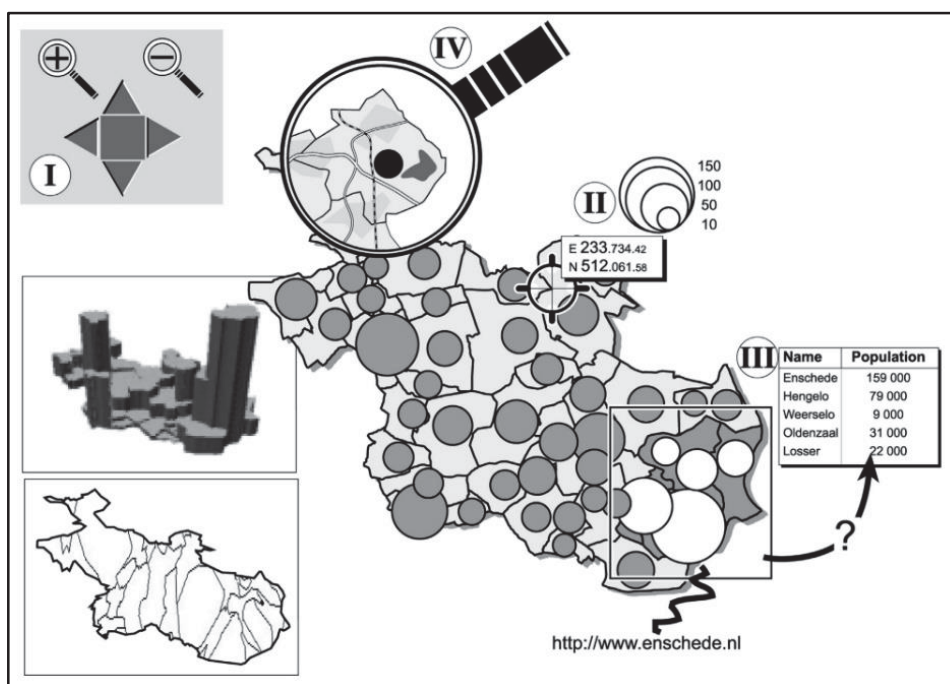
Geovisualização é uma técnica de visualização de dados geográficos que utiliza recursos gráficos para representar informações espaciais em diversas áreas e tem se mostrado cada vez mais importante na visualização de informações complexas. No contexto de representação de cavernas em 3D, a geovisualização pode ser uma ferramenta poderosa para a análise de dados geoespaciais em ambiente subterrâneo, considerando que a visualização em 3D permite a representação de informações tridimensionais de forma mais intuitiva e interativa, o que facilita a interpretação e análise dos dados. Uma vez criado o modelo digital em 3D, é possível utilizar técnicas de geovisualização para a análise e visualização de

modelos 3D, seja através de monitores, anaglifos ou óculos de RV. A geovisualização em 3D permite a exploração do ambiente subterrâneo sem a necessidade de deslocamento físico, em atividades de turismo, educação e pesquisa científica, por exemplo.

Kraak (2015) fez uma revisão abrangente sobre a visualização cartográfica e como ela pode ser usada para comunicar informações espaciais de forma eficaz, na forma de dados geográficos em mapas, gráficos e outros formatos visuais. O autor inicia o artigo discutindo o papel da visualização cartográfica na tomada de decisões e na comunicação de informações espaciais. Ele argumenta que a visualização cartográfica é uma ferramenta poderosa para comunicar informações complexas de maneira clara e acessível. São levantados os elementos-chave da visualização cartográfica, incluindo a escolha da projeção cartográfica, a seleção de simbologia e cores adequadas e a aplicação de técnicas de cartografia temática. O autor apresenta exemplos de mapas que ilustram esses conceitos, como mapas de densidade, mapas de relevo, mapas temáticos e mapas de fluxo. É discutida, também, a evolução da tecnologia de visualização cartográfica, incluindo o uso de sistemas de informação geográfica (GIS), mapas interativos na web e a crescente popularidade da visualização de dados (FIGURA 95). Ele destaca como a visualização cartográfica está se tornando cada vez mais acessível e como os usuários podem criar seus próprios mapas e visualizações usando ferramentas de software livre e de código aberto. Além disso, o autor discute o papel da visualização cartográfica em diferentes áreas, como planejamento urbano, gestão ambiental e monitoramento de desastres naturais. Ele apresenta exemplos de como os mapas podem ser usados para comunicar informações espaciais em cada uma dessas áreas.

Kraak (2015) conclui o artigo discutindo os desafios e oportunidades futuras na visualização cartográfica. Ele destaca a importância de criar mapas precisos e acessíveis para todas as pessoas, independentemente de sua formação ou habilidades e discute a necessidade de desenvolver técnicas avançadas de visualização para lidar com grandes conjuntos de dados e para criar mapas interativos cada vez mais sofisticados.

FIGURA 95 - FUNÇÕES CARTOGRÁFICAS EXPLORATÓRIAS: NAVEGAÇÃO (I); DISPLAY BÁSICO; (II) NAVEGAÇÃO E ORIENTAÇÃO; (III) PESQUISA; (IV) MULTI-ESCALA.



FONTE: Kraak, 2015.

O estado da arte das interfaces espaciais para visualização 3D e como elas podem ser usadas para melhorar a experiência do usuário na visualização de dados espaciais é apresentado por Besançon *et al.* (2021). O autor discute a importância da visualização 3D para entender dados espaciais complexos e como as interfaces espaciais podem melhorar a interação do usuário com esses dados. Na sequência é feita uma revisão dos tipos de interfaces espaciais disponíveis para visualização 3D, incluindo dispositivos de entrada, como mouse e teclado e dispositivos de saída, como monitores e projetores. O autor discute as vantagens e desvantagens de cada tipo de interface e como elas podem ser combinadas para criar uma experiência de visualização imersiva e envolvente. Destaca, também, o papel das tecnologias emergentes, como a realidade aumentada e a realidade virtual na visualização 3D e como elas podem ser usadas para criar experiências mais imersivas e interativas. Ele destaca exemplos de aplicativos que usam essas tecnologias, como aplicativos de turismo virtual e jogos de realidade virtual. Desafios e oportunidades na pesquisa de interfaces espaciais para visualização 3D são apresentados, como a necessidade de entendimento de como os usuários interagem com os dados espaciais e como as

interfaces espaciais podem ser projetadas para atender às suas necessidades. Ele também discute a importância de considerar fatores como acessibilidade, usabilidade e eficácia na criação de interfaces espaciais para visualização 3D.

Uma análise sistemática da literatura sobre as funções de visualização de softwares 3D e uma visão geral dos avanços no campo da visualização, bem como a identificação das tendências futuras e desafios para pesquisa futura são apresentadas por Müller et al., (2015). Uma introdução relativa ao campo da visualização de software em 3D, explicando sua importância na compreensão de sistemas de software complexos e na identificação de problemas de design e desempenho é feita pelo autor, seguindo-se com a descrição da metodologia usada na análise sistemática da literatura, incluindo a seleção de artigos relevantes, a extração de dados e a análise dos resultados. Começando com um conjunto de 4.386 publicações nas áreas de informação e visualização de software, foram identificados 155 artigos relevantes que lidam com visualizações de software 2D e 3D ou 3D. Esses artigos foram analisados quanto à dimensionalidade, aspecto, ano, método de avaliação. Os resultados dessa análise sistemática são apresentados em três seções principais: passado, presente e futuro. Na seção do passado, os autores descrevem as abordagens históricas para a visualização, incluindo o uso de diagramas e gráficos, bem como técnicas de modelagem em 3D.

Limitações dessas abordagens históricas e como elas foram superadas por técnicas mais avançadas de visualização também são discutidas. Na seção do presente, são apresentadas as técnicas atuais de visualização, incluindo as baseadas em modelos, as baseadas em gráficos e as baseadas em realidade virtual e aumentada. Tendências atuais no campo da visualização, incluindo a integração de técnicas de aprendizado de máquina e mineração de dados para melhorar a compreensão de sistemas de software complexos são apresentadas. Na seção do futuro, os autores discutem as tendências futuras na visualização de software em 3D, incluindo o uso de técnicas de visualização mais avançadas, como realidade virtual e aumentada e o uso de técnicas de inteligência artificial para automatizar a visualização de software em 3D. Os desafios futuros que precisam ser abordados, incluindo a necessidade de desenvolver métodos para avaliar a eficácia da visualização em 3D e a necessidade de desenvolver técnicas que sejam acessíveis para usuários com deficiência visual ou cognitiva.

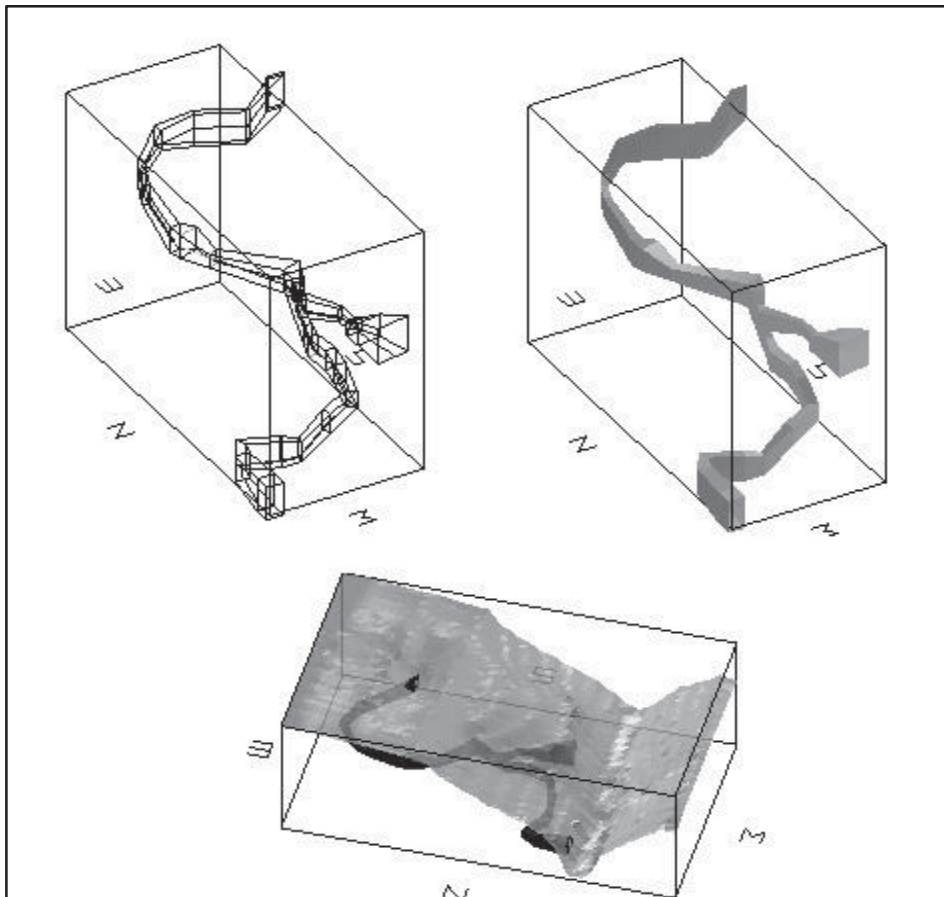
A apresentação de um entendimento claro do conceito de geovisualização em 3D e de uma estrutura sistemática para avaliar a sua utilidade em diferentes contextos são os objetivos do artigo de Bleisch *et al.* (2012) Após uma introdução à geovisualização em 3D e da descrição da sua importância na visualização e análise de dados geográficos complexos, os autores também discutem as diferenças entre a geovisualização em 2D e em 3D, enfatizando as vantagens da segunda. São, também, apresentadas técnicas de modelagem e renderização em 3D para representação de informações geográficas, assim como as características da geovisualização em 3D, incluindo a capacidade de visualizar a geometria e topologia espaciais, a possibilidade de interação e a capacidade de disposição de informações adicionais em camadas.

Os autores apresentam, então, uma estrutura sistemática para avaliar a utilidade da geovisualização em 3D a partir de três aspectos principais: usabilidade, eficácia e eficiência. A dimensão da usabilidade avalia a facilidade de uso da geovisualização em 3D, considerando fatores como a interface do usuário, a navegação, a legibilidade e a clareza das informações. A dimensão da eficácia avalia a capacidade da geovisualização em 3D para atender às necessidades do usuário e melhorar a compreensão das informações geográficas. A dimensão da eficiência avalia a relação entre a qualidade dos resultados obtidos e os recursos investidos na utilização da geovisualização em 3D. Exemplos de aplicação da estrutura para avaliar a utilidade da geovisualização em 3D em diferentes contextos são apresentados, como a gestão de desastres naturais e o planejamento urbano. Por fim, discutem como a estrutura pode ser usada para avaliar a utilidade da geovisualização em 3D em diferentes fases do processo de tomada de decisão, desde a coleta e análise de dados, até a comunicação de resultados.

No que se refere a trabalhos voltados à representação em 3D e visualização de cavidades em ambiente digital, vários são os trabalhos com essa abordagem. Ferrari *et al.* (2001) desenvolveram um sistema para a modelagem geométrica e análise de sistemas cársticos. O programa, que utilizava as tecnologias OpenGL e Microsoft Jet Database Engine, permitia a geração de um modelo 3D a partir dos dados topográficos e a visualização tridimensional dos condutos e de modelos digitais de superfície topográfica hipógea (FIGURA 96). Essa integração dos dados suportada por uma visualização tridimensional contribui para um melhor entendimento em

diversos estudos ambientais quando associada a uma base de dados e permite a modificação da posição do observador, havendo uma interface com posições pré-definidas e barras de rolagem para rotações em qualquer ângulo.

FIGURA 96 - SISTEMA SUBTERRÂNEO EM ESTRUTURA DE ARAME, COM OS POLÍGONOS PREENCHIDOS E SOB UMA SUPERFÍCIE.



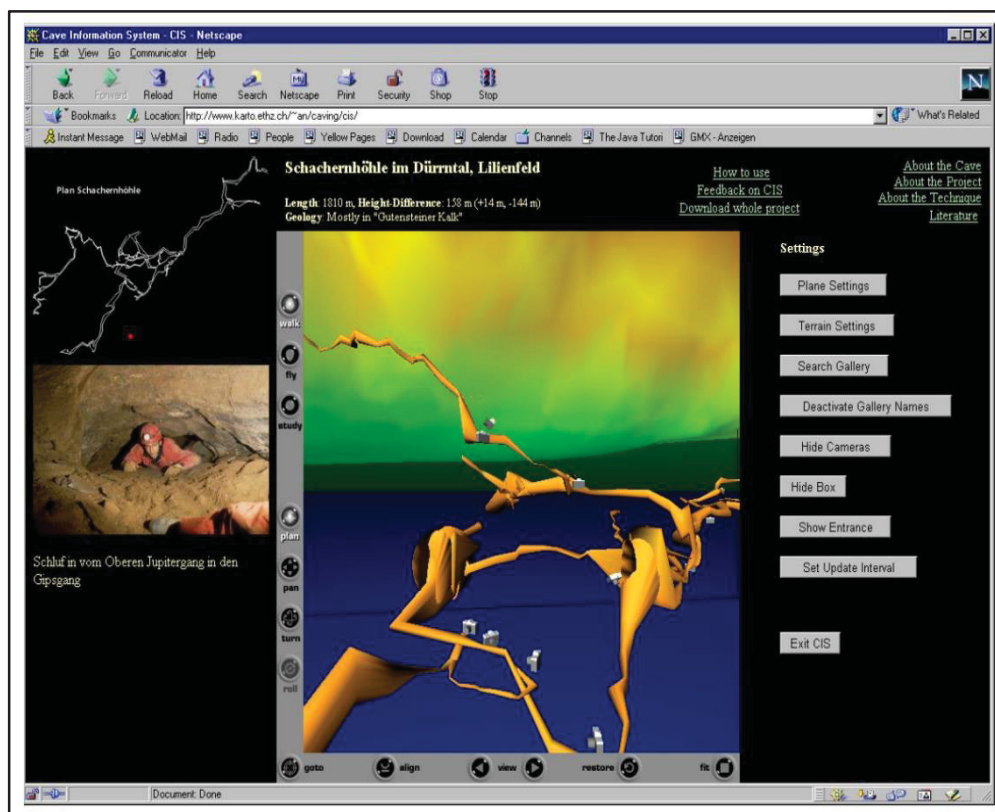
FONTE: Ferrari *et al.*, 2001.

Considerando que os sistemas cársticos e de cavernas são fenômenos tridimensionais complexos, realizar seu levantamento e visualização são operações que representam desafios para os cartógrafos, geomorfólogos, espeleólogos e especialistas em computação gráfica. Os autores, Heller *et al.* (2001) estão particularmente interessados em modelar terrenos, estruturas geológicas e feições subterrâneas, em cartografia de "inner-mountains" e em estabelecer sistemas de informação para documentar feições cársticas e de cavernas. Este trabalho trata da geração de mapas de cavernas 2D assistida por computador e apresenta uma

possível implementação de um sistema de informação de cavernas 3D. No entanto, enfatizam que nem um mapa 2D nem um modelo 3D são capazes de representar adequadamente a estrutura complexa dos sistemas de cavernas e sua geologia circundante. Para isso, há de se utilizar da combinação com observações em disciplinas relacionadas como a geologia, hidrologia, morfologia, pesquisa climática, entre outras. Dados geodésicos e cartográficos, juntamente com outros elementos, formam um complexo de um Sistema de Informação de Caverna. Os elementos SIC incluem dados espeleométricos básicos, descrições, direções e descrições de entrada, fotos e vídeos, relatórios de viagem, crônica de exploração, dicas para planejamento de viagem e equipamentos necessários, visualização e animação 3D, observações geológicas, flora, fauna e monitoramento meteorológico, observações hidrológicas, descobertas e amostras de laboratório, documentação de artefatos humanos, bibliografia e documentos históricos. O SIC é uma síntese de todas as informações disponíveis sobre objetos cársticos e de cavernas e é o objetivo de longo prazo de todos os esforços na documentação de fenômenos cársticos e cavernas relacionados.

Os autores argumentam que os algoritmos espaciais estão ficando melhores e mais poderosos e os sistemas de computação gráfica mais acessíveis. Partindo dessas melhorias, tentaram complementar os mapas tradicionais com um sistema interativo de informações de cavernas onde este seria usado em um ambiente de rede distribuído com muitos usuários e direitos de acesso diferenciados. Um banco de dados centralizado com acesso à web forneceria os dados mais recentes a todos os pesquisadores em uma região cárstica e de cavernas, como base para visualização online. Para tanto, foram utilizados recursos como XML, SVG, VRML, Javascript, Java, etc. A janela do navegador foi dividida em diferentes seções e possibilitou o acesso a informações gerais sobre a caverna, galerias e dados de pesquisa, vinculação de fotos e posições de câmera no espaço 3D, exibição/ocultação de elementos 3D (FIGURA 97). Considerando-se as limitações da Informática à época, avalia-se que os esforços se apresentaram como boas alternativas na manipulação dos dados espaciais, subterrâneos e de superfície.

FIGURA 97 – SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE CAVERNAS INTERATIVO EM FORMATO VRML.

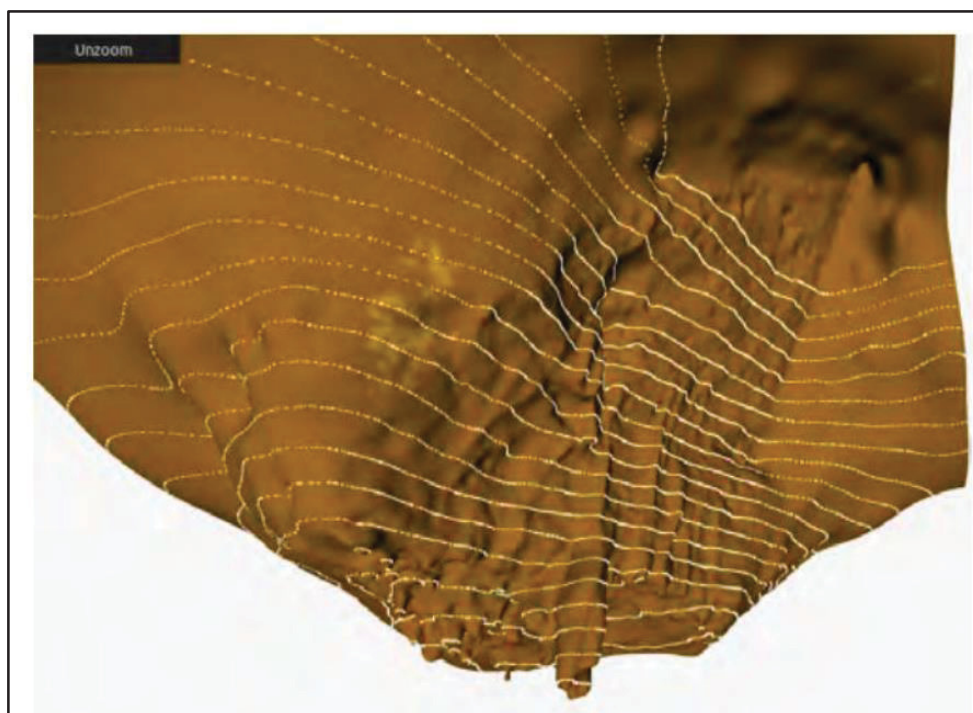


FONTE: Heller *et al.*, 2001.

Uma modelagem 3D feita por varredura a laser e o desenvolvimento de uma estrutura composta por um conjunto de ferramentas, bibliotecas e padrões para o desenvolvimento de procedimentos para a visualização de dados 3D na Web foram propostos por Silvestre *et al.* (2013). O objetivo principal era a identificação de estruturas geomorfológicas nas superfícies de uma caverna, sendo que a possibilidade de publicação de modelos 3D na Web é de interesse para o campo geoespacial. Para a disponibilização do modelo da caverna na Web, foi desenvolvida uma interface gráfica 3D onde os usuários puderam navegar e interagir com os modelos tridimensionais. Para este *framework* foram utilizadas as tecnologias X3D, WebGL e X3DOM que rodam nos navegadores Firefox, Google Chrome, Safari e Opera sem *plug-ins*. Sendo a identificação das estruturas geomorfológicas o objetivo deste trabalho, uma malha 3D foi gerada a partir de uma nuvem de 45 milhões de pontos obtida por uma varredura a laser utilizando-se de ferramentas de código aberto na caverna [Algar do Penico](#), localizada na região do Algarve, Portugal. Os trabalhos de modelagem incluíram o desenvolvimento de algoritmos para o reconhecimento e

posicionamento de estalactites para que pudessem fornecer informações sobre feições ocultas responsáveis pela geomorfologia cavernícola. A aquisição de dados no interior da caverna mostrou-se como uma tarefa bastante complexa devido aos acessos difíceis e ao ambiente de trabalho com muitas superfícies irregulares. Para a geração da malha triangular foi utilizado o software Meshlab e de seus algoritmos para a reconstrução de superfícies com a variante de pivô de bola (*Ball-Pivoting Algorithm*) e a reconstrução de Poisson. Os resultados subsidiaram estudos espeleogenéticos que visavam compreender a origem da gruta através de estudos da morfologia e de suas feições meso a micromorfológicas (FIGURA 98).

FIGURA 98 - VISUALIZAÇÃO NA WEB DA MALHA 3D DE ESTALACTITES E SUAS LINHAS DE CONTORNO.



FONTE: Silvestre *et al.*, 2014.

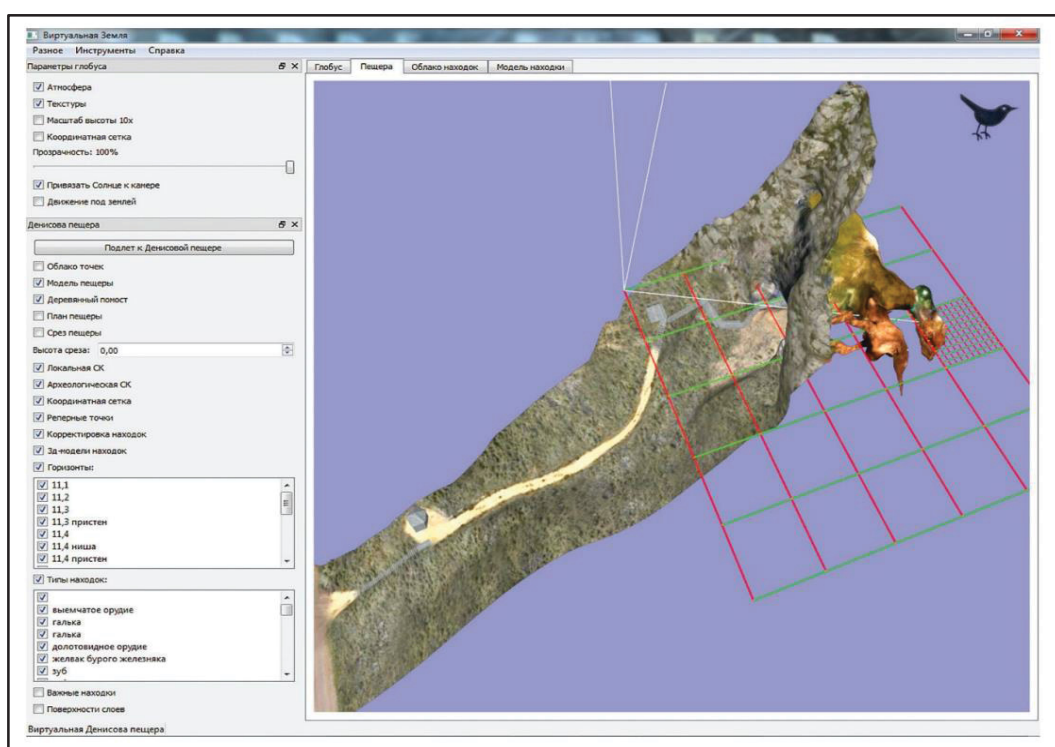
O estudo de Leonov *et al.* (2014) descreve a implementação do projeto “Um Modelo Virtual da [Caverna Denisova](#) nas Montanhas Altai”, projeto que inclui a elaboração de software para visualização interativa no espaço virtual da caverna, além de informações sobre este site único e visa resolver alguns problemas de pesquisa. Esta é a primeira tentativa russa de criar um modelo 3D virtual de uma caverna, sendo esta um dos principais sítios arqueológicos estratificados do norte da Eurásia, sendo

relevante para a compreensão da evolução da cultura paleolítica e seu ambiente. O termo 'arqueologia virtual' foi introduzido pela primeira vez em 1990 por P. Reilly, um pioneiro da aplicação de modelagem 3D e visualização em arqueologia (REILLY, 1990 *apud* LEONOV *et al.*, 2014). Os principais objetivos deste campo de pesquisa incluem a documentação 3D de objetos arqueológicos, sua reconstrução virtual, análise visual de dados, verificação de hipóteses, disponibilização de acesso à informação obtida e desenvolvimento de museus virtuais. O modelo 3D foi gerado a partir de varredura a laser em 37 estações que geraram uma nuvem de 50 milhões de pontos. A partir deste levantamento foi realizada a geração de uma malha e sua texturização a partir de levantamentos fotogramétricos. Para visualizar o modelo 3D criado da caverna, foi elaborada uma apresentação 3D interativa com software baseado em OpenSceneGraph, que suporta visualização mono e estereoscópica. Ele fornece visualização de uma nuvem de pontos, modelo 3D da caverna, modelos 3D de nós, modelos 3D de decks de madeira, trilhos e escadas (FIGURA 99), bem como visualização da distribuição espacial de achados em vários estratos arqueológicos. Além da função de cortes horizontais e seções verticais que permitem fazer planos precisos de toda a cavidade, o modelo também pode ser usado para verificação de esquemas arqueológicos existentes e criação de uma nova base topográfica. A apresentação também pode ser usada para navegações virtuais na caverna, algo especialmente importante para locais remotos e de difícil acesso e de alta relevância arqueológica.

Num artigo que apresenta um visualizador da Web de código aberto desenvolvido para levantamentos de varredura a laser terrestre (TLS) realizados em cavernas, Gede *et al.* (2015), apresentam um conjunto de panoramas esféricos mensuráveis e rotativos complementados com um mapa geral da [Caverna Béke](#) do Aggtelek Karst Plateau, no nordeste da Hungria. Ainda que esta ferramenta não seja um visualizador 3D real, possui a vantagem de não requerer nenhum hardware ou software especial para a visualização além de um navegador Web com suporte a WebGL. O visualizador inclui uma ferramenta para medições na nuvem de pontos e também uma ferramenta simples para extração de seção transversal (FIGURA 100). O aplicativo foi implementado usando *Pannellum*, um visualizador de panorama baseado em WebGL de código aberto e a estrutura de mapeamento da Web OpenLayers. Os [panoramas](#) podem ser complementados com anotações, hiperlinks

e organizados em “passeios panorâmicos” por meio de arquivos em formato JSON. O Pannellum não requer *plug-in* ou qualquer software adicional, pois é baseado em JavaScript e WebGL. O software suporta o uso de desktop, bem como telas sensíveis ao toque e o modo de tela cheia. Os trabalhos de campo resultaram no levantamento de 350 m dos mais de 7Km de desenvolvimento da caverna a partir de 32 cenas obtidas com o scanner a laser Leica ScanStation C10 e referenciadas a pontos de controle de levantamento geodésico anterior.

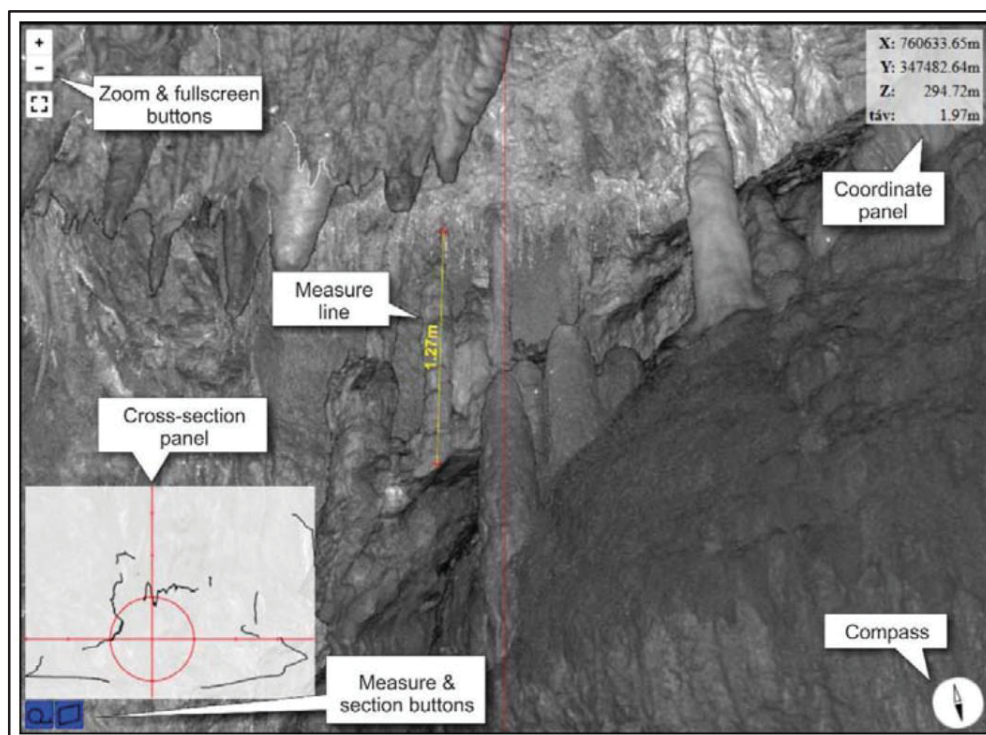
FIGURA 99 - INTERFACE DE USUÁRIO DO APLICATIVO.



FONTE: Leonov *et al.*, 2014.

Segundo os autores, os primeiros *feedbacks* mostram a utilidade da ferramenta para pesquisadores de temas relacionados à caverna, pois permitem o exame das cenas subterrâneas e a realização de medições em tela. Este visualizador é gratuito e de código aberto e pode ser adaptado para outros usos. E para facilitar seu uso, planejou-se adicionar mais flexibilidade à interface de programação do aplicativo e uma documentação detalhada para desenvolvedores, além de ferramentas para produzir os arquivos necessários, como as matrizes de distância e intensidade de vários formatos de nuvem de pontos.

FIGURA 100 – VISUALIZADOR DE FEIÇÕES DA NUVEM DE PONTOS.



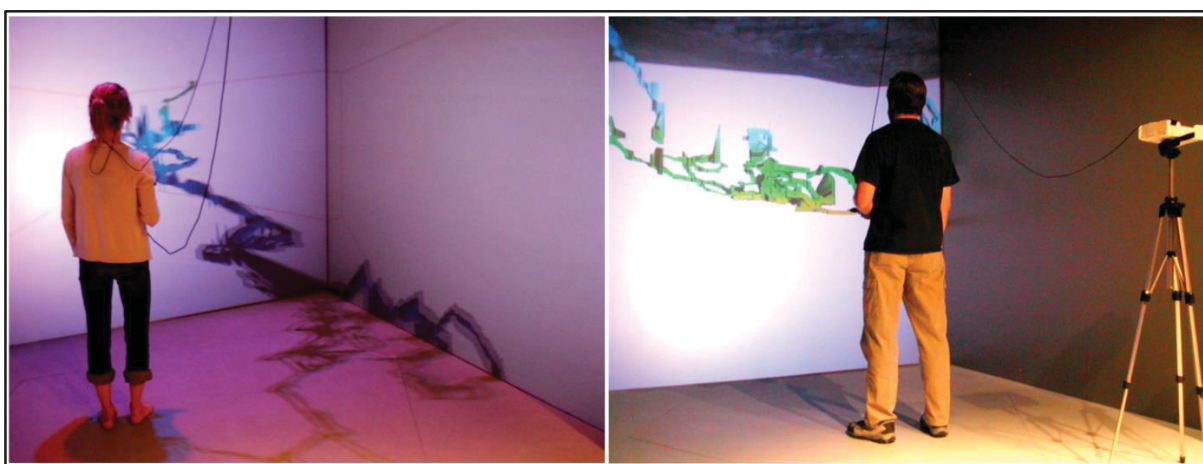
FONTE: Gede *et al.*, 2015.

É um consenso de ambientes virtuais imersivos propiciam uma experiência sensorial em um nível mais alto de compreensão espacial para estruturas 3D complexas, como as encontradas em sistemas de cavernas subterrâneas. Mas para testar essa hipótese, Schuchardt *et al.* (2007) realizaram experimentos com a visualização de cavernas a fim de determinar os benefícios da imersão para com estes modelos. Neste experimento, especialistas responderam a perguntas com dois níveis diferentes de imersão e os resultados mostram que, para certas tarefas, o sistema mais imersivo melhorou significativamente a precisão, a velocidade e a compreensão em relação ao ambiente não imersivo e que a visualização 3D em geral é uma boa correspondência para os dados da caverna subterrânea. Para tanto, foi desenvolvido um sistema imersivo de tecnologias de projeção para a visualização 3D de forma interativa. Este sistema é composto por dois modos com níveis de imersão maior e menor (FIGURA 101) sendo que os resultados da comparação entre estes possibilitassem testar a hipótese de que o sistema imersivo resultaria em melhor compreensão espacial e melhor desempenho. A definição de imersão adotada foi dada por Slater (2003 *apud* Schuchardt *et al.* 2007) e é entendida como o “nível

objetivo de fidelidade dos estímulos sensoriais produzidos por um sistema tecnológico”. Foi dado um treinamento de 10 min aos participantes em procedimentos de navegação e apontamento e após essa etapa, foram realizadas treze tarefas em cada condição de imersão. Depois de completar os dois conjuntos de tarefas, os participantes foram entrevistados com uma pesquisa de saída. Vinte e quatro especialistas de domínio (cavers) com experiência em espeleologia e topografia participaram do experimento, sendo seis do sexo feminino e nenhum deles tinha qualquer experiência com sistemas imersivos.

Avaliadas as resoluções das tarefas nos dois níveis de imersão através de análises estatísticas, os autores descobriram que a condição de alta imersão melhora significativamente a precisão e a eficiência em geral e para alguns tipos específicos de tarefas complexas que exigem pesquisa exaustiva e/ou julgamentos espaciais precisos. E concluíram que os níveis mais altos de imersão têm benefícios para a compreensão espacial, mas nem todas as tarefas espaciais requerem imersão adicional. Os usuários também preferiram o nível mais alto de imersão por acreditarem ser este mais útil.

FIGURA 101 - SISTEMA DE ALTA IMERSÃO COM QUATRO TELAS, ESTEREOSCOPIA E “RASTREAMENTO DE CABEÇA” (ESQ.) E DE BAIXA IMERSÃO COM TELA ÚNICA E NÃO ESTEREOSCÓPICA (DIR.).



FONTE: Schuchardt *et al.*, 2007.

Se há uma imagem que nunca deixa de fascinar, é a de uma caverna girando em 3D em uma tela de computador. E essa diversidade de usos de técnicas 3D que tem se desenvolvido ao redor do mundo mostra o interesse na sua utilização na

interpretação dos ambientes cársticos e das cavernas (JAILLET, 2022b), permitindo um melhor compartilhamento entre especialistas, mas também em direção ao público em geral. Porém, o nível de tecnicidade necessário para o estabelecimento dessas imagens 3D implica que uma pequena comunidade é realmente protagonista nessa produção pictórica, enquanto uma massa de pessoas são apenas espectadores passivos, prisioneiros das escolhas dos primeiros quanto às imagens produzidas. Em alguns casos, no entanto, a postagem de modelos 3D em plataformas de consulta gratuita como, por exemplo a [Sketchfab](#), [TurboSquid](#) e [CG Trader](#) oferecem ao espectador a oportunidade de se tornar novamente um ator na produção fotografada escolhendo seus próprios ângulos de visão, seus zooms, sua iluminação e, assim, produzir parcialmente suas próprias representações (JAILLET *et al.*, 2019).

2.9.4 - TURISMO VIRTUAL

A utilização de mundos virtuais ou de simulações em 3D pelas quais um avatar pode se deslocar está se tornando um meio comum para a exibição de produtos ou em treinamentos em novos ambientes. O artigo de Lipinski *et al.* (2013) descreve as etapas na produção da [simulação virtual em 3D](#) de Snowy River em [Fort Stanton Cave](#), Novo México. Um levantamento tradicional de cavernas e um mapa com seções transversais foram usados para produzir uma superfície em malha 3D das paredes da caverna usando o pacote de software Blender. A plataforma Unity3D foi usada para integrar um avatar na cena para visualizar a caverna (FIGURA 102). O Unity3D também foi usado para gerar notas pop-up educacionais com texto sobre cavernas e fotos de detalhe. O elemento de jogo foi adicionado para envolver os usuários, sendo que se pode assumir o papel de um espeleólogo virtual como um avatar e caminhar pelas extensões da caverna. Um modelo preciso da configuração da parede da caverna é texturizado com fotografias reais da caverna e o resultado simula a sensação de uma exploração. As etapas desse processo geral e as técnicas fotográficas desenvolvidas, incluindo atualizações recentes, são descritas em detalhe neste artigo. Em Caver Quest, há uma série de ícones nas paredes em que o usuário pode clicar e ver uma nota pop-up com uma descrição de informações científicas, históricas ou de proteção de cavernas relevantes para aquela área, bem como informações mais detalhadas e fotos. A simulação 3D também permite que cientistas com diversas áreas de especialização percorram e examinem a caverna sem precisar

estar lá pessoalmente. Isso abre a investigação científica da caverna para uma gama muito maior de especialistas, que de outra forma não conseguiriam acessar a caverna por falta de financiamento, falta de tempo, deficiências, idade, aptidão física ou acesso limitado devido a morcegos.

FIGURA 102 - AVATAR PERCORRENDO A CAVERNA DE FORT STANTON.

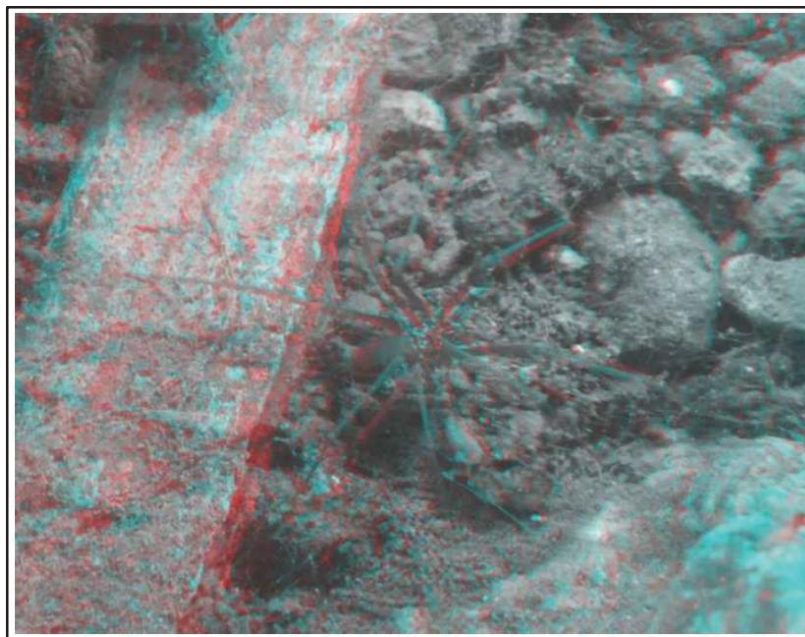


FONTE: <https://fscsp.org/CQ6/>, acessado em 04 de maio de 2023.

Um exemplo de trabalho de um tour virtual feito no Brasil é o de Custódio *et al.* (2014), que tiveram por objetivo a produção de um recursos de acessibilidade através de um CD-ROM para acesso ao turismo virtual na Toca da Raposa, localizada no município de Simão Dias, SE. Após pesquisas realizadas para subsidiar o projeto, foram realizados levantamentos fotográficos por duas duas técnicas: a QuickTime Virtual Reality (QTVR) e Estereofotografia (3D). A QTVR consiste no uso de projeções esféricas de imagens panorâmicas 360°. A Estereofotografia consiste na obtenção de duas imagens fotográficas tiradas em posições ligeiramente diferentes e depois combinadas, dando uma noção de profundidade à cena (MORATO, 2009 *apud* CUSTÓDIO *et al.*, 2014) (FIGURA 103). O CD-ROM utilizou uma linguagem clara e acessível e imagens com a realidade do ambiente da Toca da Raposa e os autores acreditam que tais iniciativas constituem um material complementar e se tornam uma

ferramenta para acesso ao espeleoturismo por pessoas que tenham necessidades especiais, como as de mobilidade reduzida.

FIGURA 103 - ANAGLIFO DE UMA ARANHA MARROM (LOXOSCELES SP.) ENCONTRADA NA TOCA DA RAPOSA, INCLUÍDA NO CD - ROM.

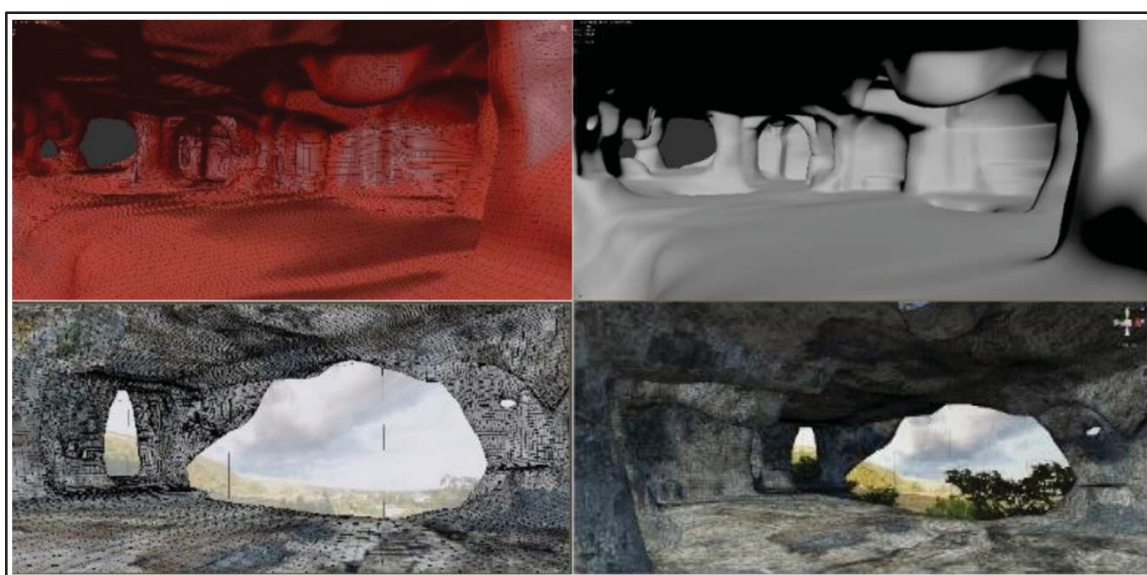


FONTE: Custódio *et al.*, 2013.

A documentação, modelagem e visualização de paisagens rochosas sempre foram particularmente importantes para comunidades científicas como a espeleologia. Além das informações métricas e geométricas altamente precisas, as informações visuais permitem a apresentação dos dados com alto nível de detalhe e realismo. E com a realidade virtual (RV), os usuários podem imergir em ambientes virtuais para explorar monumentos e outros locais de patrimônio cultural, facilitados pela maior acessibilidade destes sistemas. Partindo desses preceitos, Büyüksalih *et al.* (2020) desenvolveram uma pesquisa sobre a geração de um modelo 3D virtual das cavernas İnceğiz, em Istambul, numa colaboração entre a BİMTAŞ, uma empresa do Grande Município de Istambul, Turquia e o Laboratório de Fotogrametria e Escaneamento a Laser da Universidade HafenCity de Hamburgo, Alemanha. O objetivo foi desenvolver uma visualização imersiva e interativa em RV da caverna para o Sistema HTC Vive Pro VR. O artigo descreve todo o fluxo de trabalho, desde a aquisição dos dados até a visualização em RV. A partir da nuvem de pontos e fotografias foram feitos

processamentos em softwares como o 3D Max, Autodesk RECAP, ZMap, Geomagic Studio e os resultados inseridos no Unity Game Engine, que resultou na experiência de Realidade Virtual (FIGURA 104). No entanto, destacam que a transformação de modelos 3D em games permanece problemática, além de ser um processo demorado e, tecnicamente, uma tarefa difícil, mas um passo importante e inovador na preservação do patrimônio cultural para o futuro.

FIGURA 104 - PROCESSO DE MODELAGEM DA CAVERNA. GERAÇÃO DA MALHA (ALTO E ESQ.); RENDERIZAÇÃO (ALTO E DIR.); TEXTURIZAÇÃO NO 3D MÁX (ABAIXO E ESQ.) E COMPOSIÇÃO FINAL NA UNITY (ABAIXO E DIR.).



FONTE: Büyüksalih *et al.*, 2019.

O artigo de Tometzová *et al.* (2020) discute a aplicação de modelos digitais em 3D no desenvolvimento do Geoturismo, utilizando a Caverna do Urso na Eslováquia como estudo de caso. Geoturismo envolve a exploração de características geológicas e sua significância cultural e histórica. Os autores explicam como criaram um modelo 3D altamente detalhado, que permitiu aos visitantes experimentar a caverna virtualmente e aprender sobre suas características geológicas e história. Foram também discutidos os diversos benefícios do uso de modelos 3D na melhoria da experiência do visitante e o aumento da conscientização sobre o patrimônio natural e cultural. No geral, os autores argumentam que os modelos digitais em 3D têm grande potencial no desenvolvimento e na preservação de locais de patrimônio geológico e cultural. A criação de modelos digitais em 3D é uma técnica eficaz para preservar

locais de patrimônio natural e cultural e permitir o acesso a pessoas que, de outra forma, não poderiam visitar esses locais, seja por restrições financeiras, físicas ou temporais. Neste projeto, a Caverna dos Ursos foi levantada por uma Leica ScanStation C10 utilizando-se de 14 estações. A nuvem de pontos foi tratada inicialmente no software Leica Cyclone e depois no Cloud Compare 2.6.0, Bentley MicroStation PowerDraft V8i – SS2 e Bentley Pointools V8i. O artigo também destaca a importância da colaboração entre cientistas e turismólogos para identificar as áreas de interesse geológico e cultural, entender as necessidades dos visitantes e criar modelos digitais em 3D precisos e atraentes (FIGURA 105).

FIGURA 105 – MODELO 3D DA CAVERNA DO URSO.



FONTE: Tometzová *et al.*, 2020.

Como parte dos objetivos específicos desta pesquisa relativos à visualização de dados espaciais, estão sendo desenvolvidos estudos na utilização de modelos fotogramétricos de cavernas para a divulgação do Patrimônio Natural e Cultural brasileiros, através da geração de tours virtuais em cavernas e sítios arqueológicos em abrigos-sob-rocha. Os modelos estão sendo inseridos na plataforma Unreal Engine 5.3, o que permite a navegação com uma *avatar* em primeira ou terceira pessoas, (FIGURA 106) na tela de um *desktop* ou *notebook* ou com auxílio de um dispositivo de realidade virtual, numa experiência imersiva. A plataforma permite a

geração de arquivos para instalação em sistema operacional Windows e pode ser compartilhada através de um provedor virtual²¹.

Parte-se do princípio que a interação com um bem cultural pode despertar o sentimento de valorização, condição necessária para sua preservação. A democratização ao acesso por meio da Internet permite atingir um público potencialmente vasto, que não teria condições de fruir o bem real, mas que se torna acessível por meio virtual.

FIGURA 106 – PRIMEIROS EXPERIMENTOS EM NAVEGAÇÃO EM PRIMEIRA PESSOA NO TOUR VIRTUAL DA GRUTA DOS FUGITIVOS.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

²¹ O tour virtual encontra-se disponível no seguinte endereço: <https://mega.nz/folder/k19hEYKY#5jnmayidWzy27p7LZ0M-Xw> . Acessado em 11 de dezembro de 2023.

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida em etapas de laboratório, campo e laboratório, com foco no processo de automatização da construção de um mapa espeleológico (levantamento de dados e processos de representação) e no cálculo das variáveis espeleométricas a partir de modelos fotogramétricos.

Seu desenvolvimento se iniciou com a definição do problema, ou seja, da possibilidade de geração de mapas de alto nível de detalhamento e precisão a partir de modelos fotogramétricos, sendo uma alternativa ao mapeamento topográfico tradicional. Nesta fase foram pesquisados e indexados estudos correlatos que subsidiaram o suporte teórico e metodológico enquanto referencial para o seu desenvolvimento. De forma concomitante, foi constituído um banco de dados geográficos em ambiente SIG para a compilação de temas correlatos ao objeto de pesquisa a servir de ferramenta de planejamento e análise de dados espaciais

Uma segunda etapa foi destinada aos levantamentos em campo para coleta dos dados topográficos, geração de nuvens de pontos por escaneamento a laser e realização do levantamento fotogramétrico. As dificuldades de visualização e do estabelecimento de conexão topográfica entre o conduto superior e o conduto inferior foram avaliadas e optou-se por restringir os levantamentos e as análises ao conduto principal, único com aproveitamento turístico.

Novamente em laboratório, foram realizadas as etapas relativas ao tratamento dos dados topográficos, registro das nuvens de pontos do escaneamento a laser e pós-processamento do levantamento fotogramétrico, comparação geométrica dos modelos, extração vetorial, cálculos espeleométricos, geração de mapa espeleológico, avaliação dos resultados e as considerações sobre o método proposto.

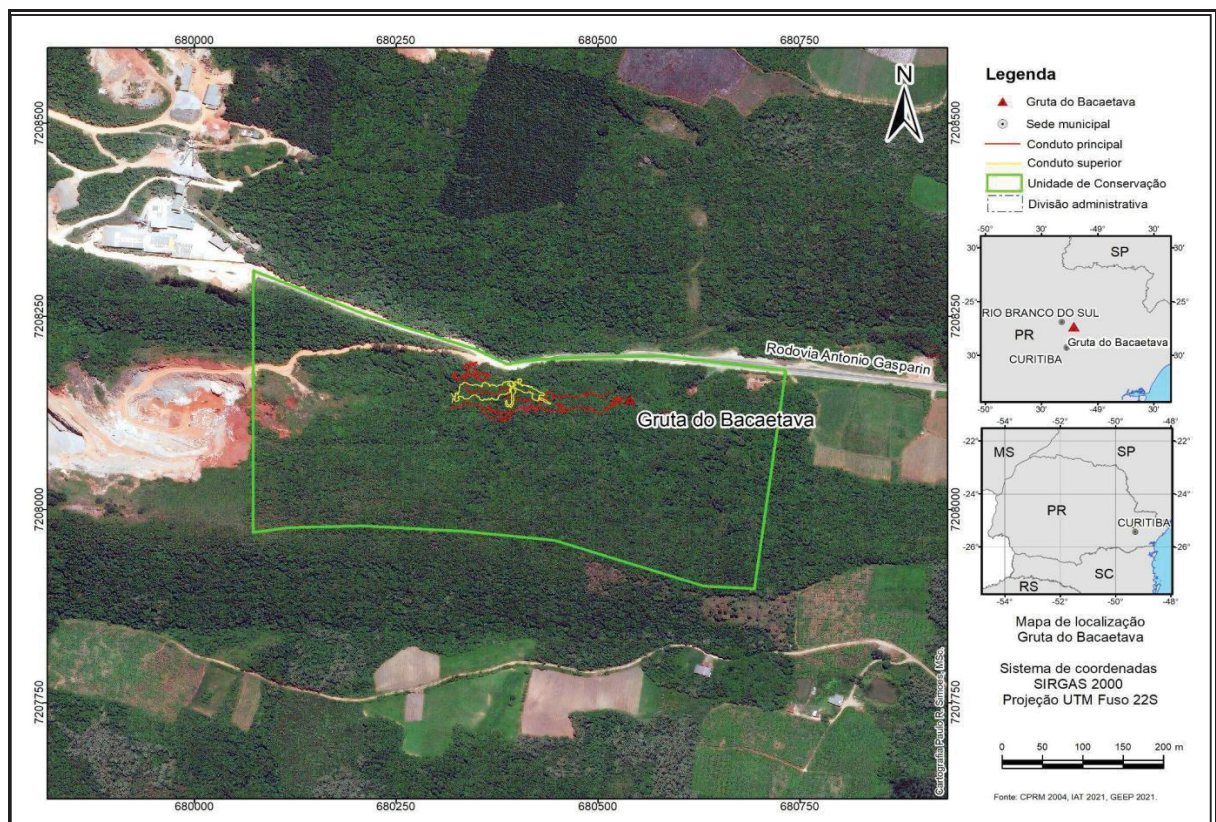
3.1 ÁREA DE ESTUDOS

Dado ao histórico de visitação, sua proximidade à cidade de Curitiba e facilidades de acesso, a Gruta do Bacaetava é uma das cavidades mais conhecidas do Estado do Paraná (SESSEGOLO *et al.*, 2001), sendo também uma das primeiras a serem mapeadas (ROCHA *et al.*, 2001). Atualmente encontra-se aberta à visitação e possui infraestrutura de apoio ao aproveitamento turístico, contando com recepção, sala de projeções, sanitários, áreas de lazer, sendo as visitas devidamente guiadas.

Localizada na porção norte de Colombo, município situado na porção leste do Estado e inserida na Região Metropolitana de Curitiba, a **Gruta do Bacaetava** é reconhecida enquanto patrimônio ambiental pela Lei nº 875 de 16/02/2004, que institui o Plano Diretor Municipal.

A gruta se insere na Unidade de Conservação Parque Municipal Gruta do Bacaetava, criado por decreto municipal e inaugurado em 13 de maio de 2000 (FIGURA 107). Com área de 173.502, 45 m², o Parque tem como objetivo a conservação de uma amostra do patrimônio espeleológico da região, recuperação da cobertura vegetal nativa, a proteção integral da fauna e da flora e demais recursos naturais, o fomento às atividades de pesquisa científica, recreação e educação ambiental.

FIGURA 107 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO PARQUE MUNICIPAL DA GRUTA DO BACAETAVA E DA GRUTA DO BACAETAVA, MUNICÍPIO DE COLOMBO - PR.



FONTE: Elaborado pelo autor, 2022.

Esta gruta foi selecionada para a realização dos trabalhos de levantamento propostos em função de sua proximidade à cidade de Curitiba, o que facilita o acesso

e pelo seu desenvolvimento relativamente pequeno e de fácil deslocamento, o que viabiliza o levantamento integral. Ademais, possui estruturas de visitação e um curso d'água perene, sendo de interesse avaliar o comportamento dessa feição nas nuvens de pontos dos métodos propostos. Por fim, possui um mapeamento de detalhe que poderá ser comparado ao mapa resultante desta pesquisa.

O carste do município de Colombo está inserido na Província Espeleológica Alto Ribeira (KARMANN *et al.*, 1979), caracterizada por abranger a região do rio Ribeira e seus tributários. O rio que deu nome à cavidade a corta na direção W-E (ROCHA *et al.*, 2001), sendo um afluente do rio Capivari, componentes do extremo meridional da bacia rio Ribeira do Iguape. As rochas calcárias do Grupo Açungui, Formação Capiru, predominam na área da bacia.

Esta área está localizada em zona subtropical e tem temperatura média anual de 16°C, com chuvas regularmente distribuídas numa pluviosidade de 1450 mm anuais (MAACK, 1981). A região é de clima temperado, úmido, definido enquanto Cfb segundo a classificação proposta por Koeppen-Geiger (ECOSSISTEMA CONSULTORIA AMBIENTAL, 2016).

Dadas as características das rochas carbonáticas da região em que se insere a gruta, sendo suscetível à dissolução em águas aciduladas, as dolinas, lapiás, sumidouros, ressurgências, cavernas, são as feições mais típicas.

O histórico da ocupação da região se remete ao século XIX, coincidente com a imigração europeia e o estabelecimento de colônias agrícolas e vilas que deram origem aos municípios de Bocaiúva do Sul, Colombo, Piraquara e Almirante Tamandaré (CANDIOTTO, 2007).

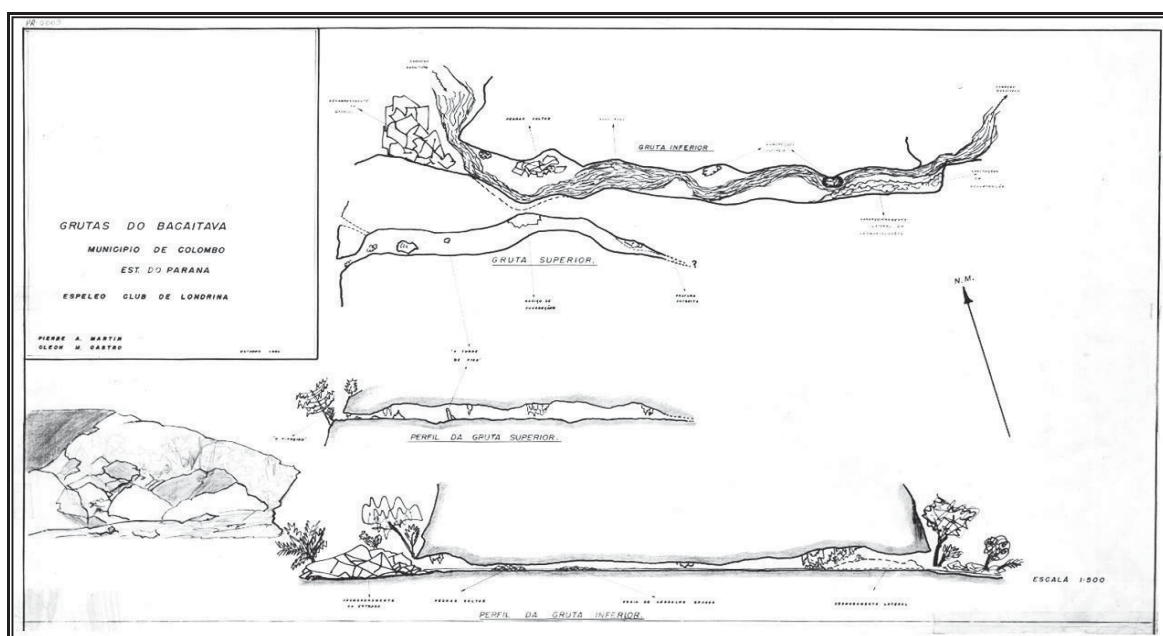
Segundo Martinhago (2015), a Gruta do Bacaetava pertenceu ao Sr. Antônio Gasparin, tendo sido doado o terreno da gruta para a Congregação da Paixão de Jesus Cristo – Província do Calvário. A inserção de uma imagem de Nossa Senhora de Lourdes pelos padres acabou por gerar peregrinações que partiam da Igreja Matriz de Colombo, em procissão. O fácil acesso e a proximidade do centro urbano resultaram em um fluxo crescente de fiéis e curiosos, tendo resultado na depredação das formações rochosas.

Mapeada em 1965 por Pierre Martin e Cleon Castro (FIGURA 108) e em 1976 por Guy Collet (COLLET, 1976) (FIGURA 109), foi remapeada em 1994 pelo Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná - GEEP-Açungui (FIGURA 110) em função da

identificação de uma conexão entre o conduto principal e o conduto superior e para dar suporte à implantação de infraestruturas auxiliares à visitação de acordo com as definições que subsidiariam do Plano de Manejo anos depois.

O mapa topográfico da gruta elaborado pelo GEEP-Açungui seguiu as orientações contidas nas Normas e Convenções Espeleométricas (SOCIEDADE BRASILEIRA ESPELEOLOGIA, 1991), elevando a precisão e detalhamento de 3C para 4D, segundo os critérios de classificação da UIS, tendo sido utilizadas trenas e bússolas.

FIGURA 108 - MAPA DA GRUTA DO BACAETAVA FEITO POR PIERRE MARTIN E CLEON CASTRO EM 1965.

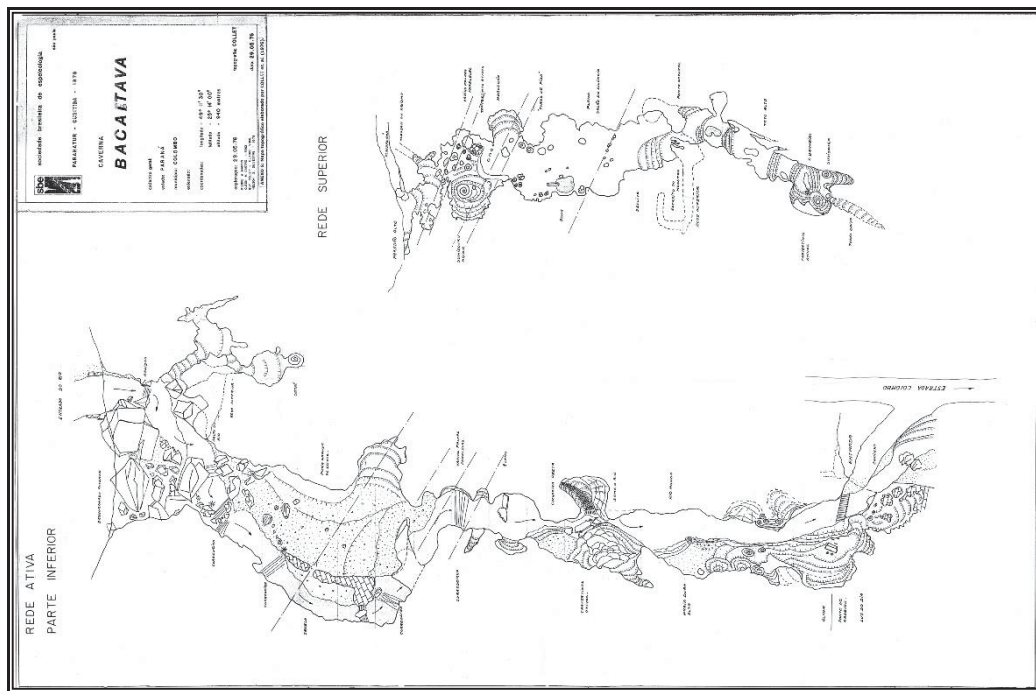


FONTE: Martin & Castro, 1965. Mapa cedido pelo Grupo Pierre Martin de Espeleologia - GPME.

Em termos morfológicos, trata-se de uma gruta de origem freática com padrão de desenvolvimento linear, perfil horizontal e cortes elipsoidais, com fraturas com padrões principais de medidas N30-40E e N10-20W. Tal morfologia se verifica em função do condicionamento estrutural da rocha hospedeira segundo os planos de acamamento e planos de fraturamento (SESSEGOLO *et al.*, 2006). Tal fraturamento, particularmente no teto da área do sumidouro, gerou certa instabilidade geotécnica, evidenciada pela grande concentração de blocos, constituindo uma área de risco, não sendo utilizada enquanto área turística. A evolução da cavidade se iniciou em regime

freático (ROCHA *et al.*, 2001), responsável pela abertura do conduto superior, sendo que o rebaixamento deste nível resultou na abertura do conduto principal, evoluindo para condições vadasas, registradas na galeria superior.

FIGURA 109 – MAPA DA GRUTA DO BACAETAVA ELABORADA POR COLLET ET AL., 1976.



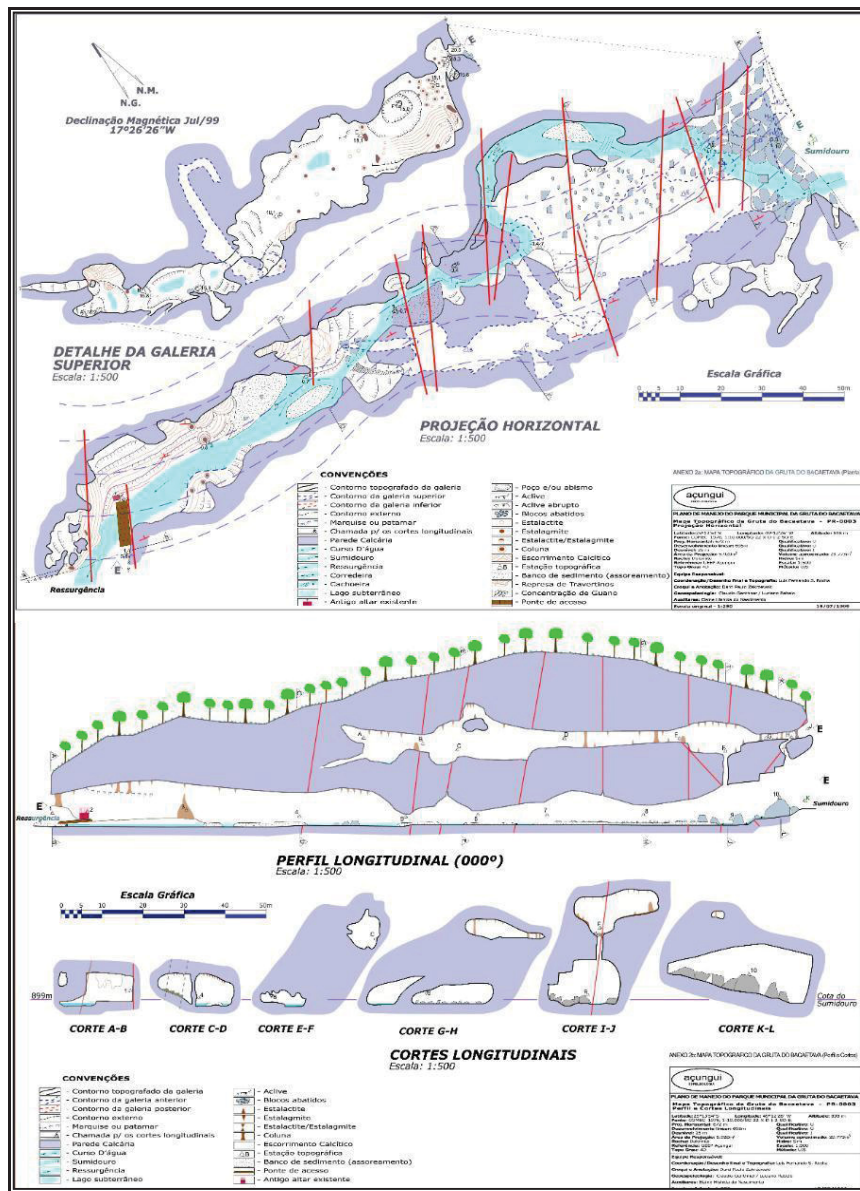
FONTE: Collet, 1976. Cópia de mapa cedida pelo GEEP-Açungui.

Os principais espeleotemas que ocorrem nesta gruta são estalactites, estalagmites, colunas, canudos de resfresco, travertinos, escorrimentos, coralóides, formados sob condições climáticas típicas e sob regime vadoso. Os processos de incasão, ou seja, abatimento de blocos ao longo das fraturas foram responsáveis pelo aumento do volume da caverna.

Os dados espeleométricos obtidos com o mapeamento do GEEP-Açungui resultaram em valores de 672m de projeção horizontal e 695m de desenvolvimento linear, com desnível de 25m. A partir da planta baixa foi calculada uma área de 5.920 m² e volume aproximado de 29.773 m³. Este mapeamento possibilitou a conexão topográfica entre os dois condutos, correlacionando a galeria principal e a superior. Este levantamento permitiu, também, dispor a infraestrutura de visitação e delimitar o roteiro turístico e estimar a espessura do pacote rochoso sobre o conduto superior entre 7 e 20m.

Para a pesquisa em curso, foi concedida autorização para atividades com finalidade científica n. 80072-1 em 04/10/2022 através de solicitação junto ao Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBIO, plataforma do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ANEXO 1).

FIGURA 110 - MAPA DA GRUTA DO BACAETAVA FEITO PELO GRUPO DE ESTUDOS ESPELEOLÓGICOS DO PARANÁ / GEEP-AÇUNGUI EM 1994.



FONTE: Rocha *et al.*, 1994. Mapa cedido pelo GEEP - Açungui.

3.2 MATERIAIS

Micro-computadores: PC com sistema operacional Windows 10, processador Intel® Core (™) i9-10900KF CPU @3.7 GHz, 64GB RAM DDR4, SSD SATA 240 GB, SSD

NVMe 240GB, HD 1TB, HD 1TB, placa de vídeo NVIDIA GeForce GTX 1660 Super e monitor LG 24MN43; Laptop com sistema operacional Windows 10, processador Intel® Core (™) i7-3630QM CPU @ 2.40GHz, 16GB RAM DDR3, SSD SATA 240GB, HD 500MB, placa de vídeo NVIDIA;

Equipamentos: Câmera fotográfica digital Nikon Coolpix P900, painéis de iluminação a LED; lanterna de cabeça Nitecore; lanterna de cabeça Scurion; pontos de controle codificados impressos em formato A4; escâner a laser Leica BLK 360; estação total Leica TCRA 1200, com precisão nominal de 2 mm + 2 ppm; tripé e mira, receptor GNSS;

Equipamentos de proteção individual: capacete, lanterna de cabeça e baterias, macacão, mochila, camelback, botas;

Softwares: 3D Reshaper 2018, [Adobe Photoshop](#), [Agisoft Metashape 2.0.1](#), [ArcGIS 10.8](#), [Autodesk AutoCAD 2019](#), [Autodesk InfraWorks 2024](#), [Autodesk RECAP 2022](#), [Cloud Compare v2.13 beta](#), [Cyclone Register 360](#), [Meshlab v2022.02](#), [Microsoft Office 2016](#), [Unreal Engine 5.3](#).

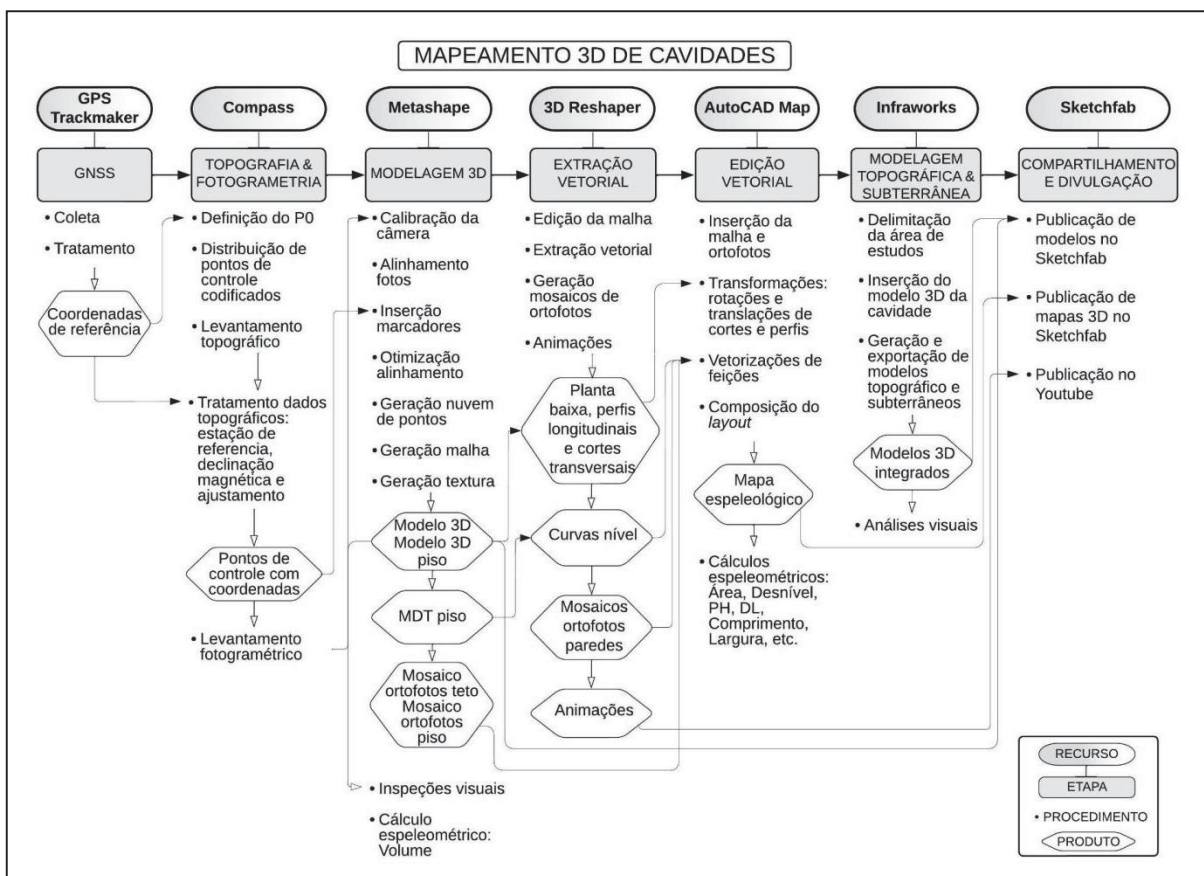
3.3 MÉTODOS

A seguir são apresentadas as etapas metodológicas de campo e escritório, desenvolvidas ao longo do trabalho para se atingir os objetivos propostos, estando baseadas em Simões (2022). Por se tratar do desenvolvimento de um método de mapeamento em uma cavidade, foi necessária a autorização do ICMBio através do Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBIO, que concedeu autorização para atividades com finalidade científica n. 80072-1 (ANEXO 1). Esta cavidade foi escolhida pela proximidade, acessibilidade, pouca extensão, morfologia pouco complexa, diversidade de feições, existência de corpos hídricos, uso turístico e estar dentro de uma unidade de conservação.

Uma tabela com a sequência de procedimentos para o posicionamento com GNSS, captura, pós-processamento, tratamento e análises de nuvens de pontos, extração e edição vetoriais, cartografia, cálculos espeleométricos e compartilhamento de dados sintetiza este item e encontra-se no ANEXO 5.

O projeto inicial previa o levantamento dos dois níveis da cavidade. Mas devido a dificuldades operacionais na interligação topográfica dos dois níveis em função do relevo extremamente acidentado e ocorrência de vegetação fechada, optou-se por restringir os levantamentos ao conduto principal. O conduto superior é área intangível da UC, não sendo utilizado para fins turísticos.

FIGURA 111 - FLUXO DE TRABALHO PARA GERAÇÃO DE MAPAS ESPELEOLÓGICOS A PARTIR DE MODELOS FOTOGRAMÉTRICOS.

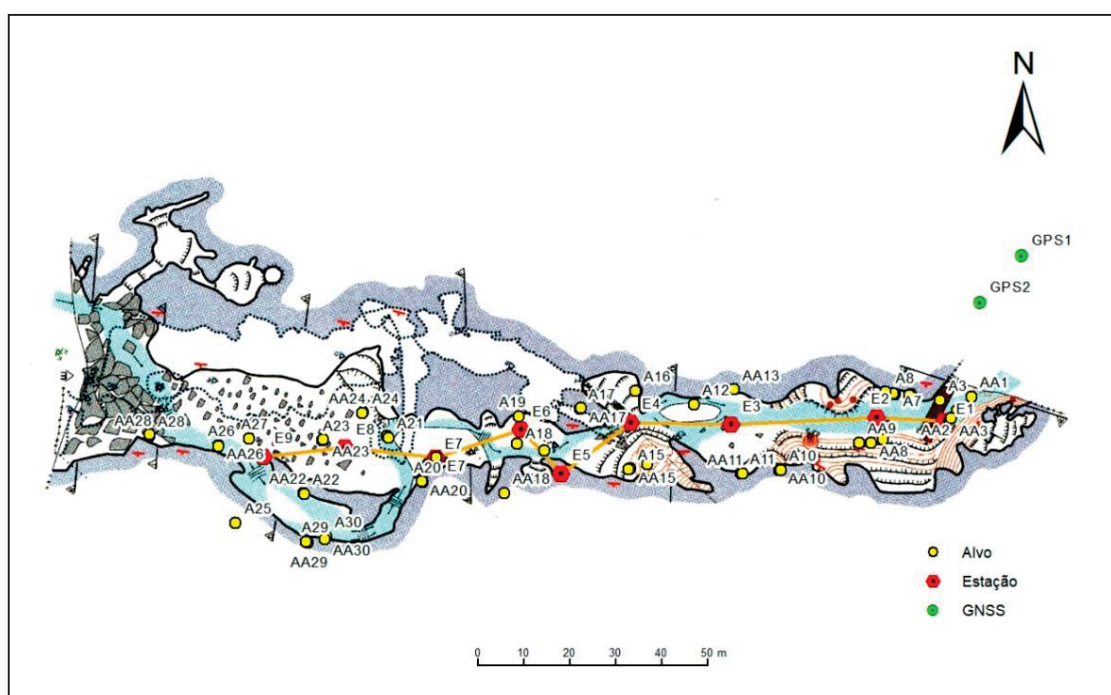


FONTE: Simões, 2022.

3.3.1 – CONSTITUIÇÃO DE BASE DE DADOS GEOGRÁFICOS EM SIG

A base de dados geográficos foi constituída em ambiente SIG utilizando-se do software ArcMAP 10.8, sistema UTM fuso 22S e *datum* SIRGAS 2000. Os temas incluíram os limites da UC, sistema viário, divisão administrativa municipal, modelo digital de terreno SRTM, curvas de nível com equidistância de 5 m, imagem de satélite ESRI MAXAR, além dos contornos da cavidade em planta. O mapa de 1994 foi georreferenciado e sua planta baixa serviu de referência para o posicionamento das estações topográficas e dos alvos codificados, assim como para a indicação das áreas recobertas pelos levantamentos fotogramétricos. Foram impressos diversos mapas em formato A4 para subsidiar os trabalhos de campo. Além disso foram produzidos os *layouts* do mapa de localização (FIGURA 107) e do projeto do mapa da Gruta do Bacaetava (ANEXO 3).

FIGURA 112 - DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES GNSS, ESTAÇÕES TOPOGRÁFICAS E ALVOS SOBRE PLANTA BAIXA DA CAVIDADE.



FONTE: Modificado de Rocha *et al.*, 1994.

3.3.2 – LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO

Os levantamentos fotogramétricos da Gruta do Bacaetava foram realizados nos dias 22, 25, 27 e 29 de maio e 03 de junho de 2023, resultando em um total de 12.874 imagens do piso, paredes, tetos e estruturas de visitação. Em função da maior necessidade de tempo para a captura das imagens, optou-se por realizá-lo antecipadamente ao levantamento topográfico e à varredura a laser, sendo posteriormente complementado com os conjuntos de imagens dos pontos de controle e respectivas coordenadas.

Foi feita a cobertura de todo o conduto principal da gruta em imagens perpendiculares e oblíquas às paredes, teto e piso, com distancias variando entre 2 a 10 m entre a câmera e o plano fotografado, com sobreposição mínima de 50%. Foi utilizada câmera fotográfica Nikon Coolpix P900 previamente calibrada no software Agisoft Metashape 1.8.3, com configuração em modo automático e iluminação auxiliar por *head lamps* [Scurion](#) e [Nitecore](#). As imagens foram armazenadas em formato JPG, com dimensões de 4608 x 3456 px, distancia focal de 4.3 mm, abertura de 2.8, ISO 400 e 24 bits. Optou-se por realizar um levantamento com número de fotos altamente redundante, procurando-se evitar a ocorrência de áreas oclusas, ou seja, não registradas fotograficamente.

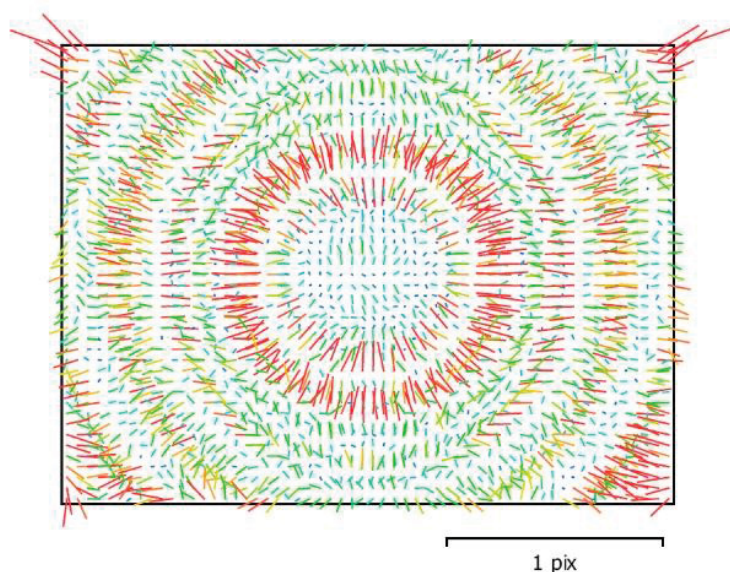
O levantamento fotogramétrico foi antecedido pela calibração da câmera com procedimentos do próprio software, que gerou os parâmetros intrínsecos de correção da distância focal (f), dos pontos principais (c_x , c_y), dos coeficientes de distorção radial (k_1 , k_2 , k_3) e dos coeficientes de distorção tangencial (p_1 e p_2) (FIGURA 113 e 114).

FIGURA 113 - PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DA CÂMERA NIKON P900.

F:	3311.33		
Cx:	-18.7655	B1:	0
Cy:	-24.1977	B2:	0
K1:	0.0022664	P1:	-0.00222
K2:	0.00306503	P2:	-0.00230716
K3:	0.00071287	P3:	0
K4:	0	P4:	0

FONTE: Relatório de processamento Agisoft Metashape, 2023.

FIGURA 114 – IMAGEM DOS RESÍDUOS DA CALIBRAÇÃO PARA A CAMERA NIKON COOLPIX P900.



FONTE: Relatório de processamento Agisoft Metashape, 2023.

3.3.3 – POSICIONAMENTO POR GNSS

Foram materializadas duas estações GNSS em ambiente externo (FIGURA 115) nas proximidades da entrada turística da cavidade a serem utilizadas de referência e para o transporte de coordenadas UTM (fuso 22S e *datum* SIRGAS 2000) para os alvos codificados por meio do levantamento topográfico com estação total.

O levantamento foi realizado empregando-se um receptor Hyper da Topcon e o processamento dos dados foi efetuado no método PPP (posicionamento por ponto preciso) empregando-se a solução disponibilizada pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) através do serviço on-line de processamento de dados GNSS²². Os pontos não foram rastreados simultaneamente visto a disponibilidade de apenas um receptor. No ponto 1 foi realizada uma ocupação de 2h 17 min. A frequência processada foi a L3 e os resultados para o ponto 1 (GPS 1) são apresentados na tabela 3.

²² Disponível em <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=processar-os-dados> e acessado em 25 de novembro de 2023.

TABELA 3 – COORDENADAS UTM OBTIDAS PARA O RASTREAMENTO DO PONTO 1.

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-25° 13' 54,5805"	-49° 12' 28,0789"	906,37	7208178.030	680528.467	-51
Na data do levantamento ⁵	-25° 13' 54,5716"	-49° 12' 28,0809"	906,37	7208178.305	680528.414	-51
Sigma(95%) ⁶ (m)	0,276	1,272	0,629			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA	
Fator para Conversão (m):	3,75	Incerteza (m): 0,07
Altitude Normal (m):	902,62	

FONTE: Luis A. K. Veiga, 2023.

Para o segundo ponto (GPS 2), a ocupação foi de 4h 6mim. Devido a duração do rastreio, suas coordenadas obtiveram melhor precisão. A frequência processada foi a L3. Os resultados para este ponto são apresentados na tabela 4.

Estes dois pontos foram usados como pontos de partida para o georreferenciamento da poligonal interna.

TABELA 4 - COORDENADAS UTM OBTIDAS PARA O RASTREAMENTO DO PONTO 2.

Coordenadas SIRGAS

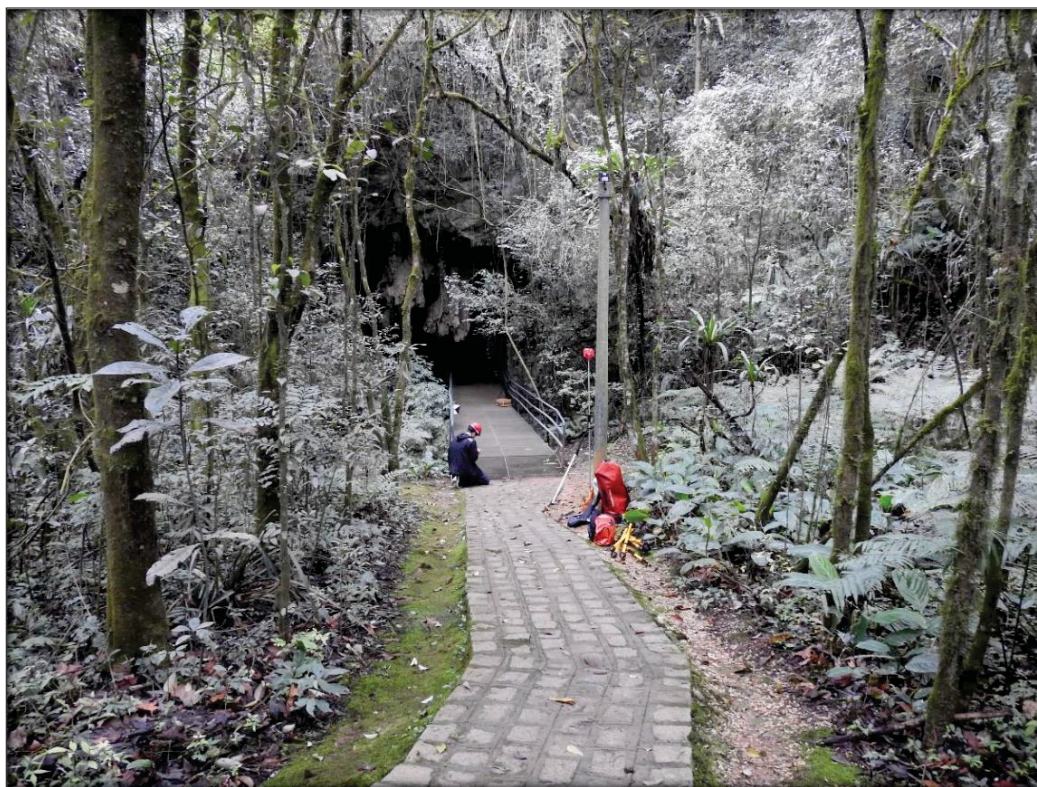
	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (É a que deve ser usada) ⁴	-25° 13' 54,9093"	-49° 12' 28,3933"	899,59	7208168.031	680519.533	-51
Na data do levantamento ⁵	-25° 13' 54,9004"	-49° 12' 28,3953"	899,59	7208168.306	680519.480	-51
Sigma(95%) ⁶ (m)	0,243	0,965	0,355			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA	
Fator para Conversão (m):	3,75	Incerteza (m): 0,07
Altitude Normal (m):	895,84	

FONTE: Luis A. K. Veiga, 2023.

FIGURA 115 – POSICIONAMENTO DE ESTAÇÃO GNSS NA BASE DO PRISMA NA ENTRADA TURÍSTICA DA GRUTA DO BACAETAVA.



FONTE: Fotografia do autor. Maio de 2023.

3.3.3 – DISTRIBUIÇÃO DOS ALVOS CODIFICADOS

Foram utilizados dois conjuntos de targets codificados, sendo o primeiro impresso em papel formato A4 para reconhecimento automático pelo software fotogramétrico e o segundo, para reconhecimento pelo software de registro de varreduras a laser com 25cm x 25cm sobre poliestireno, com triângulos alternadamente pretos e brancos (FIGURA 116). Os alvos foram distribuídos ao longo da cavidade, nas paredes e piso. Não foi feita a iluminação dos alvos para a varredura a laser na intenção de avaliar a resposta na identificação automática e visualização em infravermelho no software Leica Cyclone Register.

FIGURA 116 – EXEMPLOS DE ALVOS CODIFICADOS PARA REFERENCIA ESPACIAL AOS LEVANTAMENTOS FOTOGRAFÉTRICO E POR VARREDURA A LASER.



FONTE: Fotografia do autor. Maio de 2023.

3.3.4 – LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO POR ESTAÇÃO TOTAL

O levantamento topográfico de uma poligonal aberta foi realizado com a estação total Leica TCRA 1200 (FIGURA 117) visando o transporte de coordenadas UTM dos marcos geodésicos para os alvos codificados, de forma a estabelecer um sistema de referência espacial e fornecer a métrica necessária para a avaliação da precisão posicional das nuvens de pontos pelo método dos mínimos quadrados, implementado no software. Foram levantados 27 alvos para as varreduras a laser e 23 alvos para os levantamentos fotogramétricos a partir de nove estações topográficas e dois marcos geodésicos de referência.

O levantamento consistiu em uma poligonal aberta com nove pontos. Para o levantamento foi empregada uma estação robotizada que permite realizar séries de observações de forma automática. Para cada ponto foram realizadas três séries em pontaria direta (PD) e inversa (PI). Antes da execução das séries foi necessário indicar a posição dos pontos de Ré e Vante. Neste caso também foi empregada uma função de busca automática de alvos, o que facilitou o processo de medida em função da pouca visibilidade dentro da gruta.

Os dados posteriormente foram processados empregando-se o Programa Posição disponível no laboratório de Topografia Informatizada da UFPR (LATIN –

UFPR). Optou-se pelo cálculo de uma poligonal no plano UTM, já que estas coordenadas seriam usadas neste sistema de projeção.

Finalizado o levantamento topográfico, foi realizado o levantamento fotogramétrico complementar dos alvos codificados (Ver ITEM 3.3.2).

FIGURA 117 - LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO COM ESTAÇÃO TOTAL LEICA TCRA 1200, COM O SCANNER LEICA BLK 360 AO FUNDO.



FONTE: Fotografia do autor. Maio de 2023.

3.3.5 – VARREDURA A LASER TERRESTRE E REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS

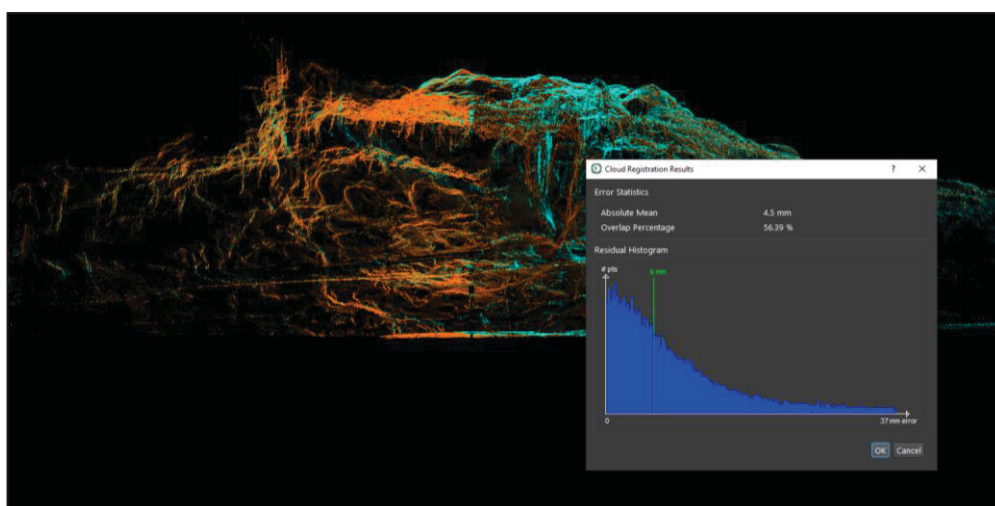
O levantamento por varredura a laser terrestre foi realizado nos dias 30 de maio e 06 de outubro de 2023, num total de 54 estações distribuídas ao longo do conduto principal da cavidade com o scanner Leica BLK 360²³. Este scanner tem a capacidade

²³ Especificações técnicas do BLK 360 estão disponíveis em <https://shop.leica-geosystems.com/leica-blk/blk360/blk360-g1-support>, acessado em 20 de outubro de 2023.

de realizar a varredura com alcance de 0,6 m a 60 m, com campo de visão de 360° na horizontal e 300° na vertical, com acurácia de 4 mm a 10 m e 7 mm a 20 m de distância e captura até 360.000 pontos por segundo em 3 min de operação. O primeiro conjunto de capturas foi feito concomitante ao levantamento topográfico e registrou os alvos codificados. O segundo foi necessário para o adensamento de algumas áreas e foi incorporado ao levantamento inicial. O scanner foi configurado em laboratório, tendo sido optada pela densidade média de pontos. Os trabalhos foram realizados por uma equipe de um topógrafo, um operador do escâner e dois auxiliares para o posicionamento dos alvos.

O pós-processamento foi iniciado com o software BLK Data Manager v2020.1.0, utilizado na conexão com o dispositivo e no download das nuvens de pontos em arquivos formato .blk para o PC. Uma vez criado o projeto, os arquivos .blk foram importados e foi criada uma grade regular com as capturas individualizadas. Daí foi feito o registro semiautomatizado de duplas de nuvens a partir de alinhamento visual manual em *Top View* e *Side View* (FIGURA 118) e da otimização e junção automáticas deste alinhamento preliminar. Ao conjunto de nuvens se dá o nome de Bundle.

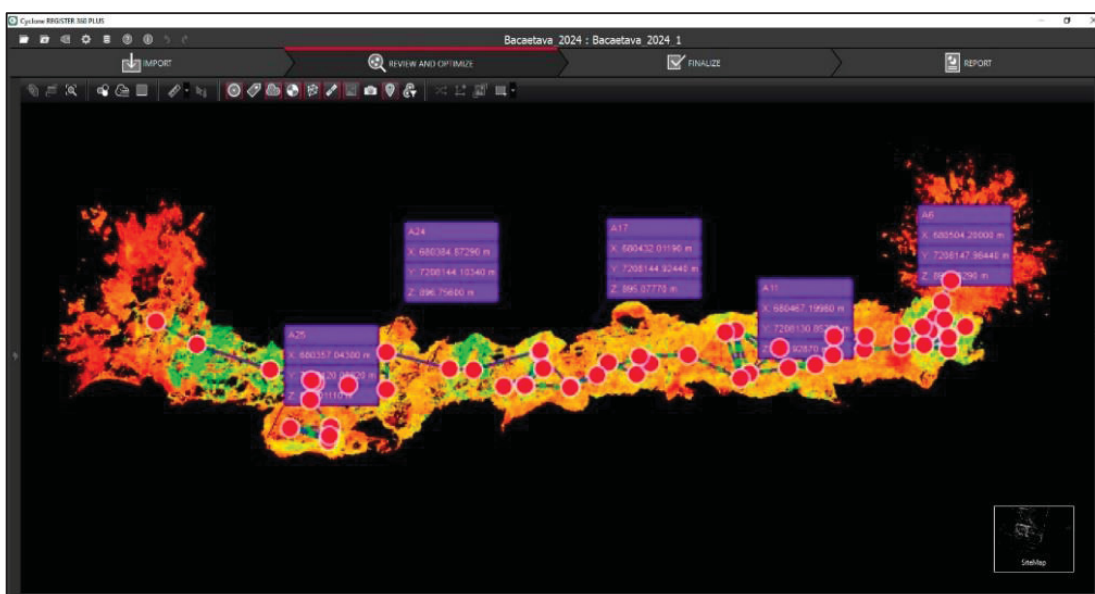
FIGURA 118 – EXEMPLO DE REGISTRO SEMIAUTOMATIZADO DE NUVENS DE PONTOS NO SOFTWARE CYCLONE REGISTER 360, ESTATÍSTICAS DE ERRO E PORCENTAGEM DE SOBREPOSIÇÃO.



FONTE: Elaborado pelo autor, 2023.

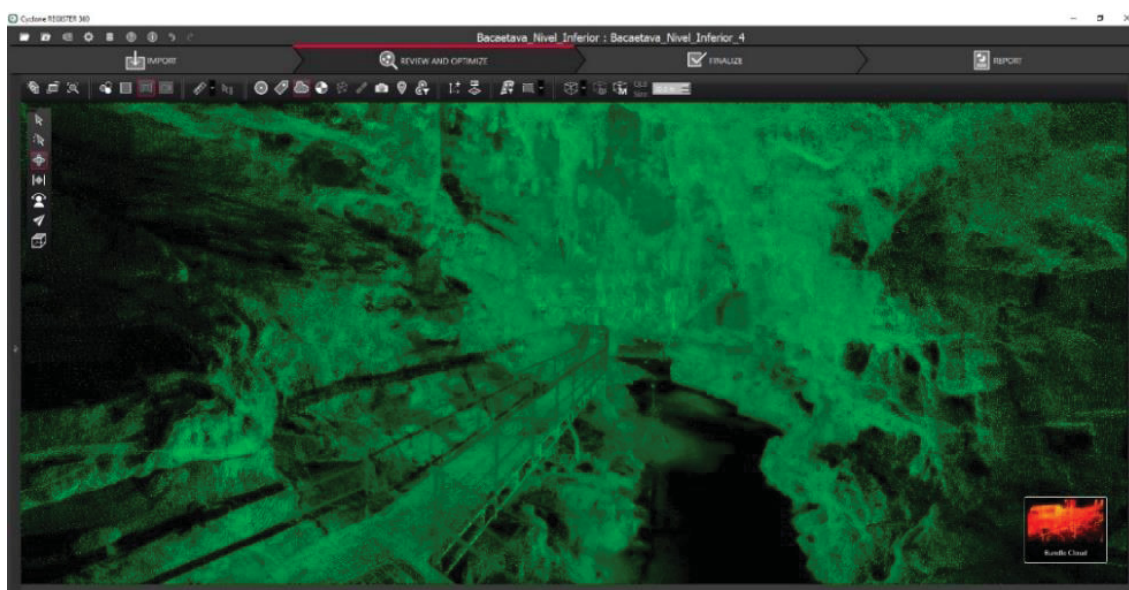
Finalizado o registro de todas as 54 nuvens e dos seus 164.134.822 pontos, foram avaliados os links com os maiores erros globais e foram revistos os registros semiautomatizados na expectativa de melhorar a precisão do conjunto. Feita esta otimização, procedeu-se com a identificação visual dos alvos no modo de visualização em Infravermelho – IR e foram inseridas as coordenadas UTM no centro geométrico de oito destes. Atribuídas as coordenadas, foi feita a avaliação dos erros dos links, sendo eliminados os que apresentaram valores acima de 12 mm, tendo restado os alvos A6, A11, A17, A24 e A25 (FIGURA 119). Uma vez que os erros se encontraram dentro de limites aceitáveis, os últimos procedimentos foram preencher as informações de certificação do processamento e indicar os formatos de arquivo para a exportação da nuvem de pontos. O relatório de processamento foi exportado em formato PDF e a nuvem de pontos (FIGURA 120) foi exportada em formato LAS.

FIGURA 119 - INTERFACE DO SOFTWARE LEICA CYCLONE REGISTER 360 COM A DISTRIBUIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE VARREDURA (EM VERMELHO) E DOS PONTOS DE CONTROLE (EM MAGENTA).



FONTE: Elaborado pelo autor, 2023.

FIGURA 120 - INTERFACE DO SOFTWARE CYCLONE REGISTER 360 COM NUVEM DE PONTOS POR VARREDURA A LASER DA GRUTA DO BACAETAVA.

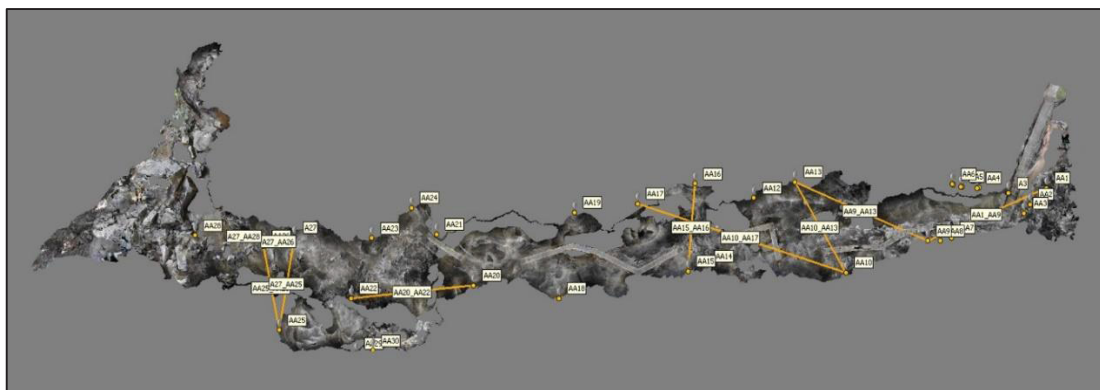


FONTE: Elaborado pelo autor, 2023.

3.3.6 - PÓS-PROCESSAMENTO DO LEVANTAMENTO FOTOGRAMÉTRICO

O pós-processamento foi realizado com o software Agisoft Metashape 1.8.3, seguindo o fluxo de trabalho para a geração do modelo 3D e dos demais produtos cartográficos. Iniciou-se com a avaliação visual de 12.874 imagens, eliminando-se as fora de foco, com baixa iluminação ou tremidas. Através do comando *Estimate Image Quality*, foi feita a avaliação automática da qualidade das fotos, sendo eliminadas as de pior qualidade. Máscaras foram aplicadas em áreas das imagens com vegetação, pontos de controle, pessoas e objetos. O alinhamento de 11.292 das 11.335 imagens selecionadas foi feito em alta resolução, em um único *chunk*, resultando numa nuvem de *tie points* com mais de 8.000.000 de pontos. Seguiu-se com a inserção dos marcadores nos 27 pontos de controle com respectivas coordenadas UTM e procedeu-se com a otimização do alinhamento, de forma a incorporar os pontos de controle e realizar o ajustamento dos parâmetros de calibração da câmera. Adicionalmente foram utilizadas 14 escalas como pontos de checagem, sendo as medidas entre dois alvos tomadas com trena a laser (FIGURA 121).

FIGURA 121 – MODELO 3D DO PISO COM OS PONTOS DE CONTROLE E AS ESCALAS DE CHECAGEM.



FONTE: Elaborado pelo autor, 2023.

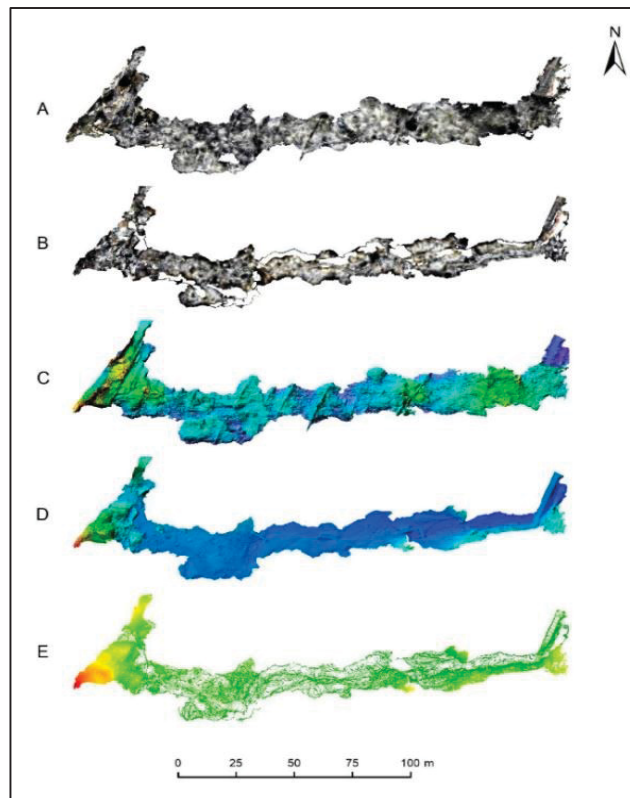
O resultado, por se encontrar dentro das expectativas, deu-se continuidade ao processamento. A geração da nuvem de pontos foi feita em qualidade média e filtragem de profundidade suave. A malha foi construída a partir dos *tie points*, superfície arbitrária (3D), contagem de faces alta, interpolação habilitada e foram calculadas as cores dos vértices. A textura foi gerada pelas imagens, sendo do tipo mapa difuso, modo de mapeamento genérico, modo de mesclagem do tipo mosaico e tamanho e contagem de 4096 x 2. Um segundo modelo 3D foi produzido para o piso da cavidade através de edição manual com visualização em modo sólido, de forma a facilitar a diferenciação entre paredes e pisos. E um terceiro modelo 3D foi gerado para representar o teto, utilizando os mesmos procedimentos de visualização e edição manual.

A partir dos modelos 3D do teto e do piso foram produzidos mosaicos de ortofotos com GSD de 1 mm (FIGURA 122 – A e B) e modelos digitais de superfície (FIGURA 122 – C e D) com GSD de 5 mm e sendo exportados em formato JPG e TIF. Dos modelos de superfície do teto e do piso (FIGURA 122 – E) foram extraídas curvas de nível com equidistância de 5 cm e exportadas em formato Shapefile. Estes produtos cartográficos serviram de base no processo de vetorização das feições espeleológicas de interesse.

A nuvem de pontos foi exportada em formato LAS para ter sua geometria comparada com a nuvem de pontos da varredura a laser terrestre. E por fim foi gerado um relatório de processamento e exportado em formato PDF, tendo seu conteúdo avaliado visando a validação do modelo 3D. Os modelos 3D, mosaicos de ortofotos,

modelos de superfície e curvas de nível foram exportados no sistema UTM 22S e *datum* SIRGAS 2000.

FIGURA 122 – PRODUTOS CARTOGRÁFICOS GERADOS A PARTIR DOS MODELOS FOTOGRAMÉTRICOS. MOSAICO DE ORTOFOTOS DO TETO (A); MOSAICO DE ORTOFOTOS DO PISO (B); MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DO TETO (C); MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DO PISO (D); CURVAS DE NÍVEL DO PISO (E).



FONTE: Elaborado pelo autor, 2023.

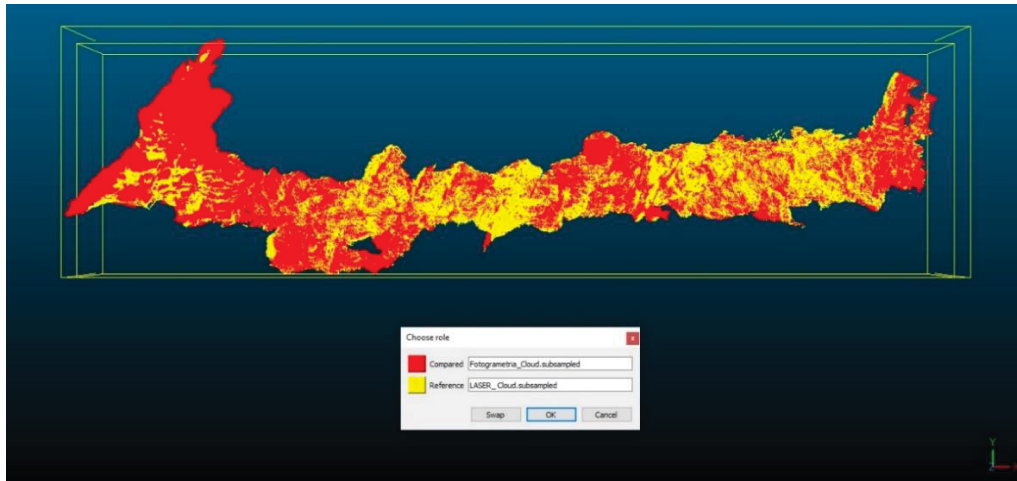
3.3.7 – COMPARAÇÃO ENTRE AS GEOMETRIAS DAS NUVENS DE PONTOS

A comparação automática entre as geometrias das nuvens de pontos fotogramétrica e por varredura a laser foi realizada no software Cloud Compare v2.13 alfa. Inicialmente foi feita a remoção manual de *outliers* de ambas as nuvens no software Agisoft Metashape 1.8.3, especialmente nas entradas devido à vegetação.

O cálculo das distâncias entre os pontos das nuvens foi feito através do comando *Compute Cloud/Cloud Distance*. Acionado o comando, foram definidas as funções de cada nuvem (FIGURA 123). A nuvem proveniente da varredura a laser foi utilizada como referência, sendo as distâncias computadas relativamente aos seus

pontos. A nuvem fotogramétrica foi definida enquanto a Nuvem Comparada, na qual as distâncias dos seus pontos foram computadas em relação à nuvem de referência.

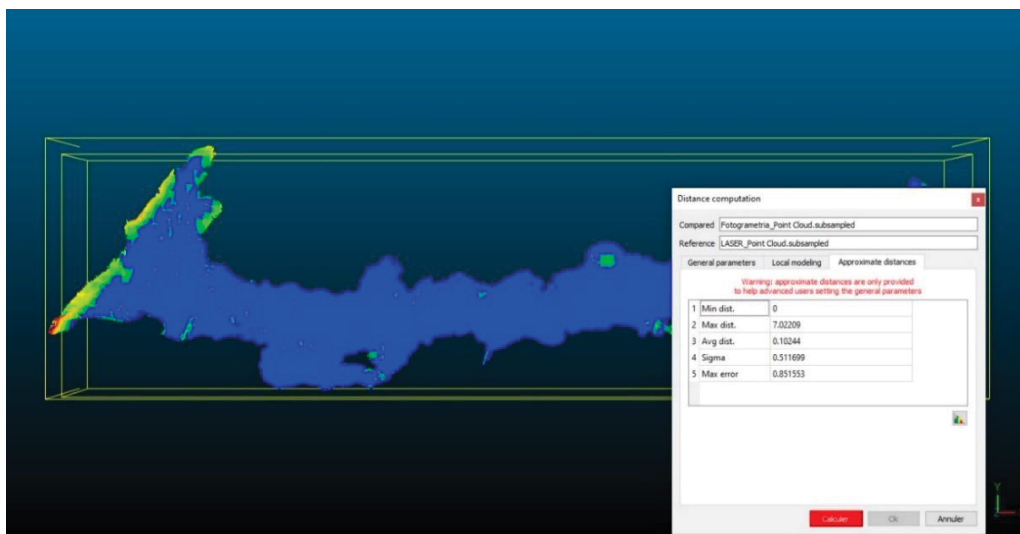
FIGURA 123 – DEFINIÇÃO DA NUVEM DE REFERÊNCIA (LASER) EM VERMELHO E NUVEM COMPARADA (FOTOGAMETRIA) EM AMARELO.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

Ao ser exibida a caixa de diálogo de cálculo de distância nuvem/nuvem foram apresentados os valores das distâncias aproximadas, cuja paleta de cores foi aplicada à nuvem comparada (campo escalar), sendo ocultada a nuvem de referência (FIGURA 124).

FIGURA 124 – NUVEM COMPARADA E DISTÂNCIAS APROXIMADAS.

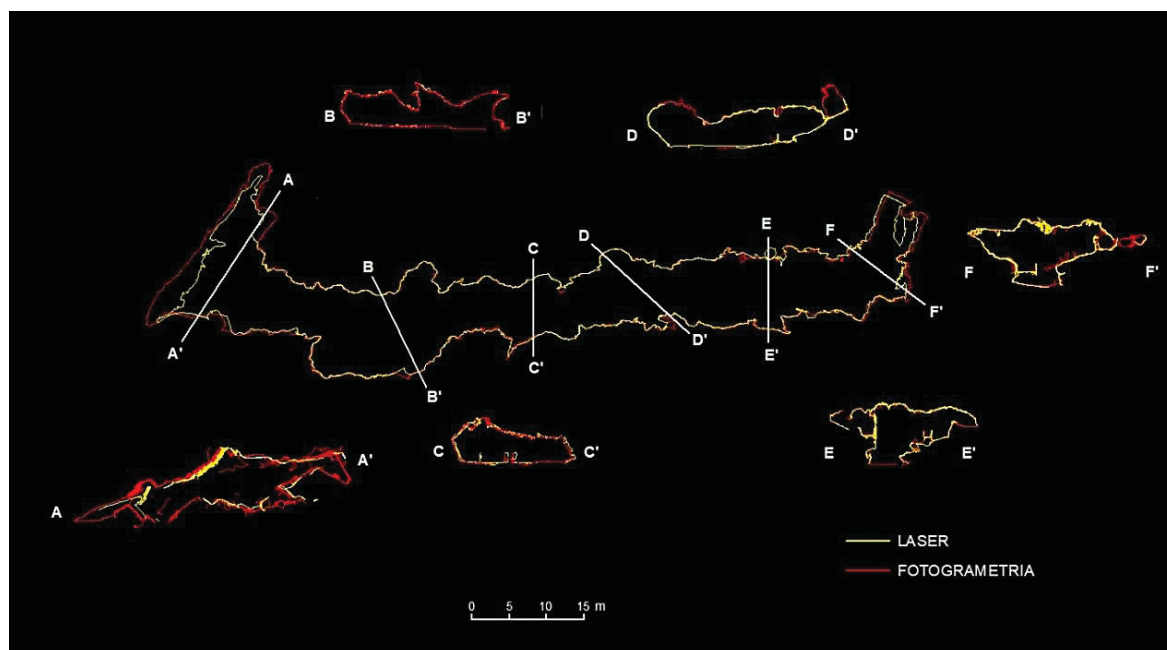


FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

Para o cálculo das distâncias reais foi definido o valor limite de 0,5 m para o parâmetro “máxima distância” após tentativas com valores diversos (abaixo de 7,02 m), sendo este o que apresentou os melhores resultados visuais e na geração das primeiras classes de distância com intervalo compatível com a precisão nominal do BLK 360. Demais parâmetros não foram alterados. O gráfico resultante com as oito classes de distâncias dos 106.169.924 pontos foi salvo em formato PNG e a tabela com os valores foi salva em formato CSV. Através da tabela com os resultados foi possível apresentar os resultados em termos de porcentagens, calculadas no software Microsoft Excel 2016 (QUADRO 7).

Foi feita, também, a comparação visual a partir da sobreposição dos vetores dos contornos em planta baixa e cortes transversais (FIGURA 125).

FIGURA 125 - COMPARAÇÃO VISUAL DOS VETORES DOS CONTORNOS VISTOS EM PLANTA BAIXA E CORTES TRANSVERSAIS EXTRAÍDOS AUTOMATICAMENTE DAS NUVENS DE PONTOS DA VARREDURA A ALSER (AMARELO) E NUVEM FOTOGRAMÉTRICA (VERMELHO).



FONTE: Elaborado pelo autor, 2023.

QUADRO 7 – PORCENTAGENS DAS CLASSES DE DISTÂNCIAS DA NUVEM COMPARADA EM METROS.

Class	Points	Class start	Class end	%
1	46.571.081	0,0000	0,0625	64%
2	9.531.940	0,0625	0,1250	13%
3	3.441.454	0,1250	0,1875	4,6%
4	2.250.674	0,1875	0,2500	3%
5	1.754.821	0,2500	0,3125	2,3%
6	1.324.378	0,3125	0,3750	1,8%
7	980.475	0,3750	0,4375	1,3%
8	7.356.338	0,4375	0,5000	10%

FONTE: Elaborado pelo autor, 2023.

3.3.8 – PROJETO CARTOGRÁFICO

O projeto cartográfico teve a função de tornar a comunicação cartográfica clara e inequívoca, servindo de referência para a elaboração de outros mapas espeleológicos com os mesmos métodos de levantamento. O projeto, ora proposto, segue uma elicitação de requisitos, considerando as necessidades do usuário, as circunstâncias de uso e os recursos disponíveis. Neste documento foram definidos quais elementos deveriam constar no mapa: título, nortes magnético e geográfico, escala gráfica, gride de coordenadas, escala numérica, dados de localização, dados espeleométricos, data de execução, grau de precisão e detalhamento, equipe, quadro de convenções, mapa de inserção. Definiu, também, a estrutura de apresentação (layout), as feições espeleológicas e suas simbologias, legenda, a inserção de QR Codes e Hiperlinks dos modelos 3D e os modelos digitais de superfície. O projeto foi feito apenas para o formato A4. Para os formatos A3 e A1 bastou configurar o formato da página no ArcMap 10.8 e adaptar o *dataframe* ao novo formato e exportar o resultado em formato JPG. Os quadros que sintetizam o projeto cartográfico encontram-se no ANEXO 2.

3.3.9 – CÁLCULOS ESPELEOMÉTRICOS

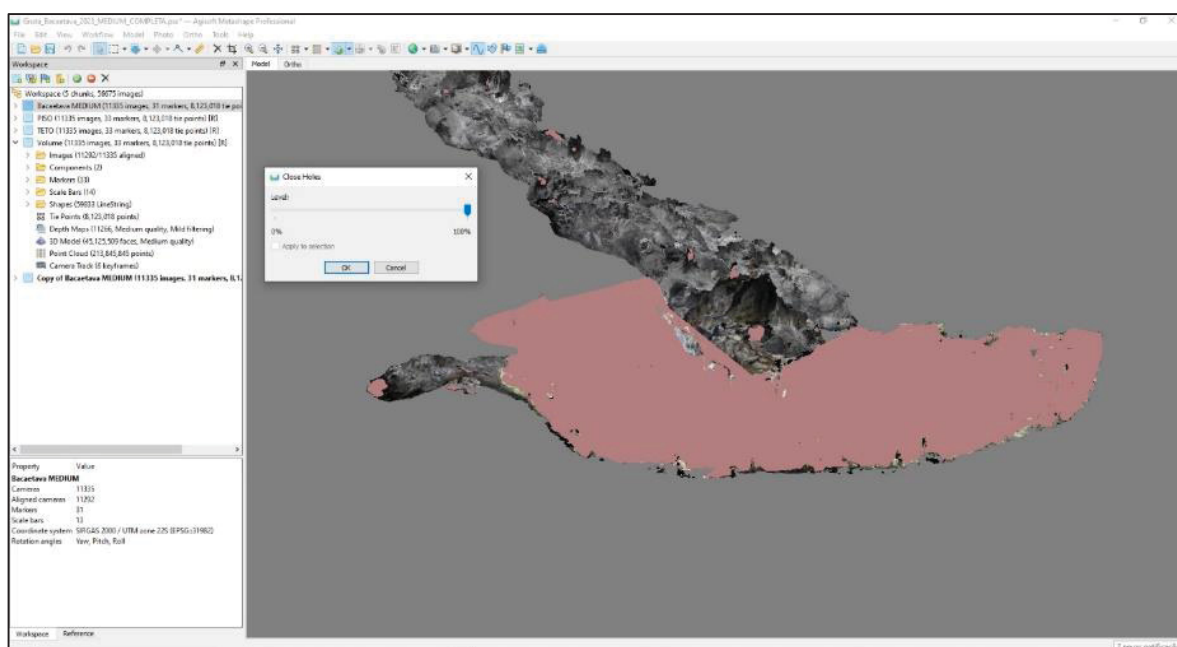
Neste estudo foram calculadas as variáveis convencionalmente utilizadas e algumas menos usuais, na expectativa de que possam contribuir na caracterização

geométrica e morfológica de cavidades. Os valores das variáveis espeleométricas são apresentados no Item 4.7.

O volume, medida de um espaço subterrâneo em metros cúbicos, é a variável que melhor expressa o tamanho de uma cavidade, sendo a medida do espaço fechado em metros cúbicos. Seu cálculo foi baseado no modelo 3D fotogramétrico, tendo sido utilizado o software Agisoft Metashape 1.8.3 na edição prévia no modelo 3D com a definição dos planos verticais nas entradas da cavidade, passando pelo ponto zero e no fechamento de todos os buracos na malha (FIGURA 126).

A geração de uma malha a partir da nuvem da varredura a laser foi implementada pelo software 3D Reshaper 18.0.8. No entanto, dada a quantidade de oclusões e o não retorno do sinal em locais com presença de água na superfície rochosa a malha não pôde ser plenamente fechada, o que impossibilitou o cálculo do seu volume. Procedimento equivalente foi tentado do software Cloud Compare 2.13 Alfa, também sem sucesso.

FIGURA 126 - FECHAMENTO DO PLANO VERTICAL NUMA DAS ENTRADAS DA CAVIDADE E DEMAIS BURACOS PARA O CÁLCULO DO VOLUME NO SOFTWARE METASHAPE.



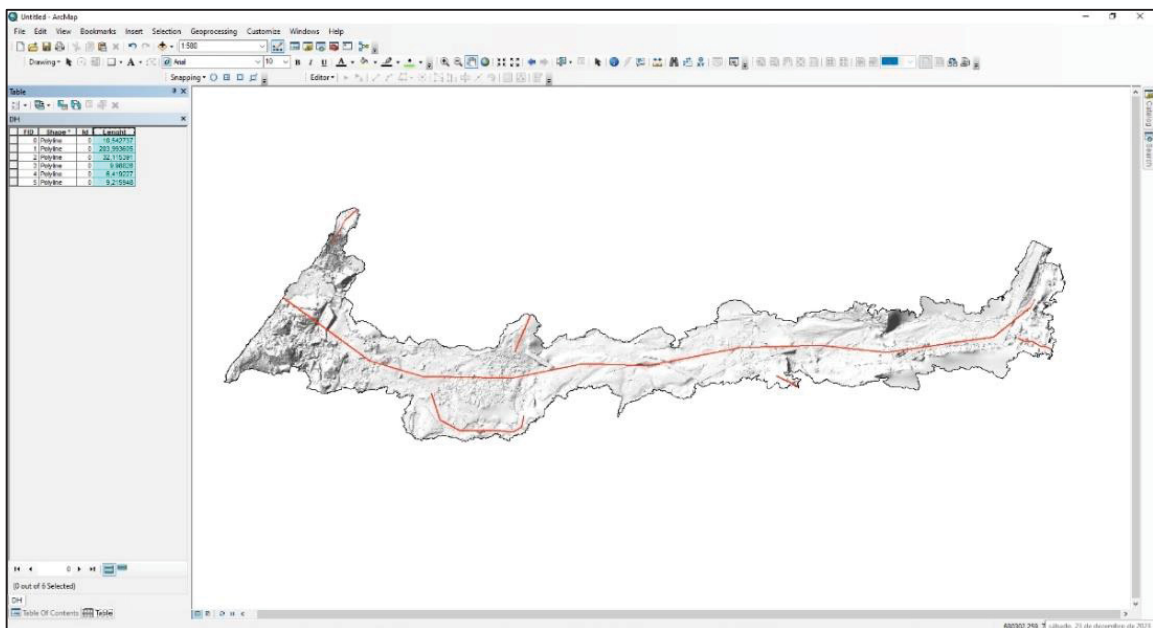
FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

A área e o perímetro do contorno externo da cavidade foram calculados a partir dos vetores extraídos no software 3D Reshaper e enviado ao AutoCAD 2019, sendo

utilizado o comando *Area*. O mesmo cálculo pode ser feito no software ArcMAP 10.8 após a conversão dos arquivos em formato DWG para SHP e adição de campos numéricos, devendo ser subtraídas as áreas do pilar e das colunas. Os mesmos procedimentos para a extração vetorial do contorno horizontal e cálculo da área e do contorno externo foram aplicados ao modelo 3D do piso.

A Projeção Horizontal – PH, ou seja, o desenvolvimento em projeção num plano horizontal dos segmentos contínuos ou descontínuos correspondentes às galerias ou salões, foi calculada pela somatória das polilinhas vetorizadas sobre o sombreamento sintético do modelo digital de superfície do software ArcMap 10.8 (FIGURA 127). Após a vetorização dos segmentos, criou-se um campo numérico onde os comprimentos foram calculados e a somatória foi feita pela função *Summarize*.

FIGURA 127 - VETORIZAÇÃO E SOMATÓRIA DOS SEGMENTOS DESCONTÍNUOS PARA O CÁLCULO DO DESENVOLVIMENTO EM PROJEÇÃO HORIZONTAL NO SOFTWARE ARCMAP 10.8.

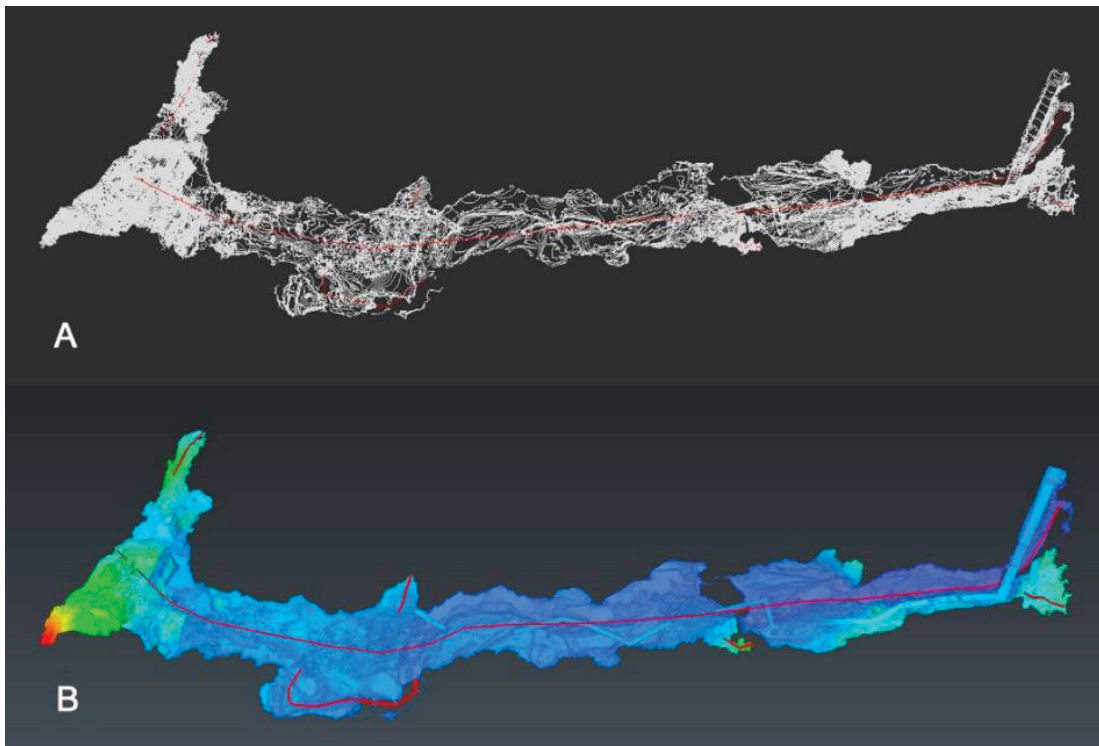


Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

O Desenvolvimento Linear – DL se refere à somatória dos segmentos contínuos ou descontínuos, considerando a inclinação da cavidade. E ainda que não faça muito sentido seu cálculo para uma cavidade tão horizontalizada quanto a Gruta do Bacaetava, a operação foi feita por se tratar de um procedimento pouco usual facilitado pela disponibilidade do modelo do piso da cavidade. Para tanto, foram

vetorizados os segmentos em *3D Polyline* da galeria sobre as curvas de nível no software AutoCAD (FIGURA 128 – A). De forma alternativa, foi feita a vetorização dos segmentos sobre o modelo 3D do piso no software 3D Reshaper (FIGURA 128 - B). Em ambos os casos os segmentos foram somados e foram obtidos os resultados.

FIGURA 128 – TRAÇADO DO DESENVOLVIMENTO LINEAR SOBRE CURVAS DE NÍVEL NO AUTOCAD (ACIMA) E SOBRE MODELO 3D DO PISO NO 3D RESHAPER (ABAIXO).



FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

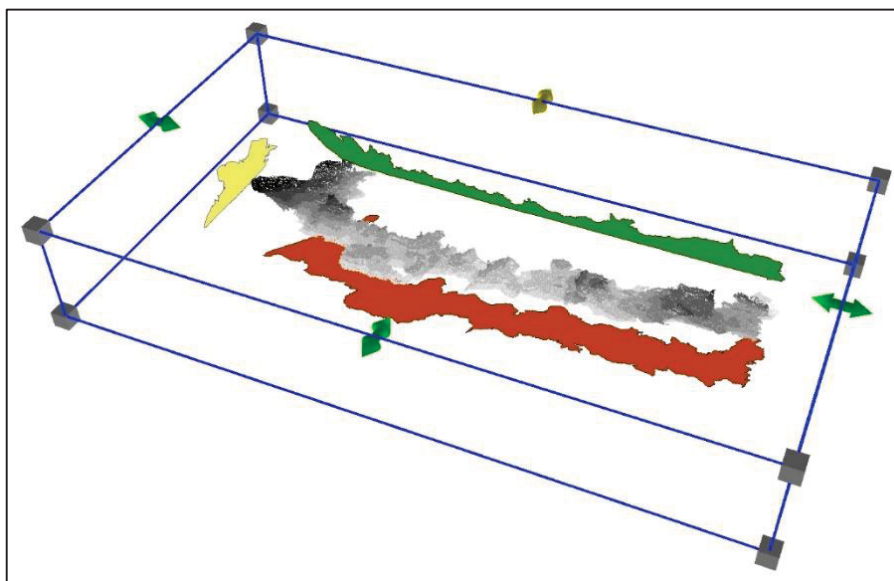
Assim como são calculadas a área e perímetro do contorno externo, o equivalente da projeção horizontal, foram calculadas as áreas e os perímetros da projeção vertical longitudinal e da projeção vertical transversal (FIGURA 129). Os valores foram obtidos a partir dos vetores extraídos no 3D Reshaper, exportados e fechados no AutoCAD, exportados para o ArcScene 10.8 e calculados através do comando *Calculate Geometry*.

O ponto zero foi definido no sumidouro da cavidade com o auxílio da visualização do modelo 3D, do mosaico de ortofotos e das curvas de nível com equidistância de 5 cm, sendo os mesmos procedimentos utilizados na definição do ponto mais alto e ponto mais baixo, todos representados no mapa. A partir das cotas

dos pontos mais alto, zero e mais baixo, foram calculados os desníveis positivo e negativo, assim como do gradiente hidráulico.

A área da lamina d'água, as passarelas e o circuito turístico foram vetorizados no software ArcMap 10.8 sobre o mosaico de ortofotos e tiveram sua área e comprimentos calculados.

FIGURA 129 - REPRESENTAÇÕES DAS PROJEÇÕES HORIZONTAL (EM VERMELHO), VERTICAL LONGITUDINAL (EM VERDE) E VERTICAL TRANSVERSAL (EM AMARELO) COM A NUVEM DE PONTOS FOTOGRAMÉTRICA AO CENTRO.



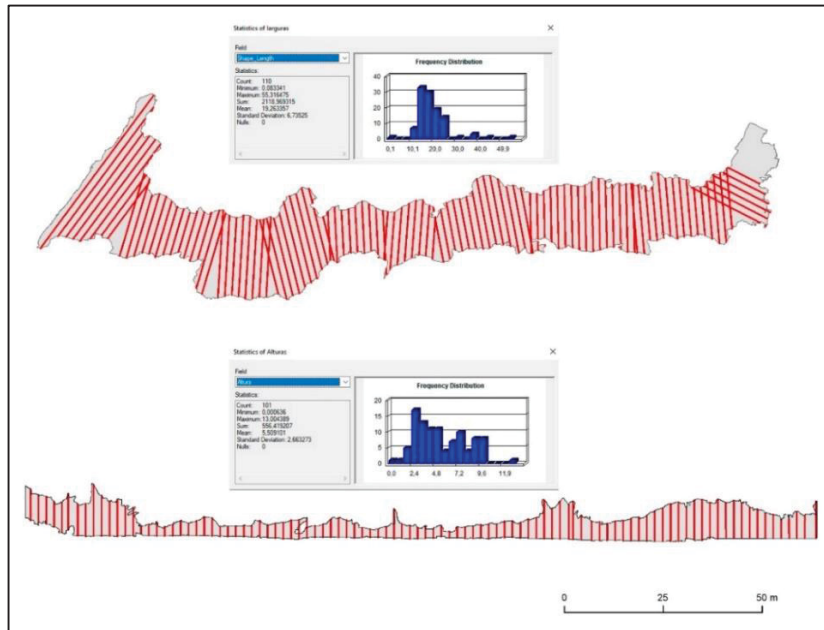
FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

Os dados estatísticos das larguras e das alturas (máxima, mínima e média) do conduto principal foram obtidos a partir da vetorização de linhas perpendiculares ao desenvolvimento com espaçamento de 2 m no software AutoCAD 2019. Exportado para o ArcMap 10.8, foi inserido um campo numérico e realizado o cálculo dos seus comprimentos através do comando *Calculate Geometry*. Neste campo foi utilizado o comando *Statistics*, que apresentou os dados na forma de um histograma de frequência dos comprimentos e respectivos dados numéricos (FIGURA 130).

Ainda que não esteja relacionada a tamanho, a Temperatura pode ser considerada uma variável espeleométrica por ser uma grandeza física que mede o grau de agitação das moléculas de um corpo ou meio, no caso, uma superfície. Desta forma, varreduras a laser tem a capacidade de representar a temperatura em cada ponto de uma nuvem, sendo particularmente de interesse para estudos climáticos,

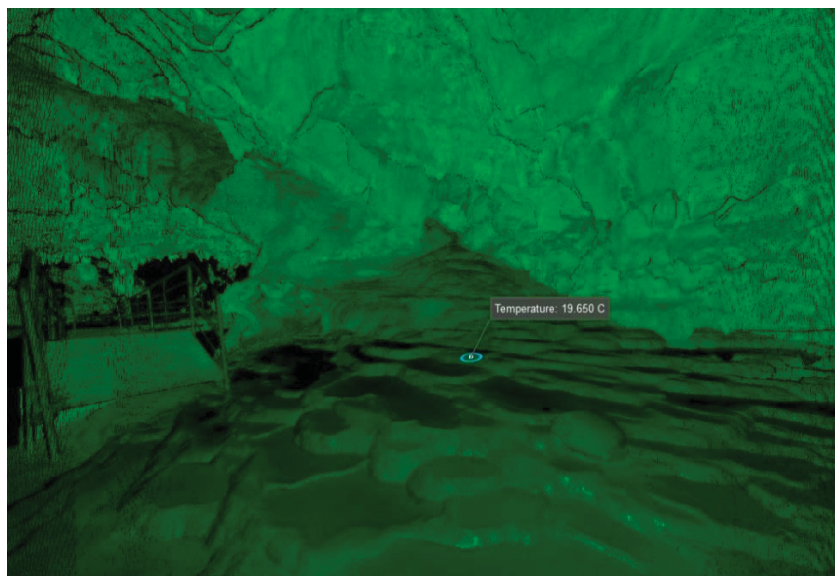
ambientais e bioespeleológicos. A título de exemplo, a figura FIGURA 131 apresenta a obtenção da temperatura num determinado ponto da cavidade.

FIGURA 130 – DADOS ESTATÍSTICOS DAS LARGURAS E ALTURAS DO CONDUTO PRINCIPAL DA GRUTA DO BACAETAVA.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

FIGURA 131 - OBTENÇÃO DA TEMPERATURA NUMA SUPERFÍCIE COM O SCANNER BLK LEICA 360.



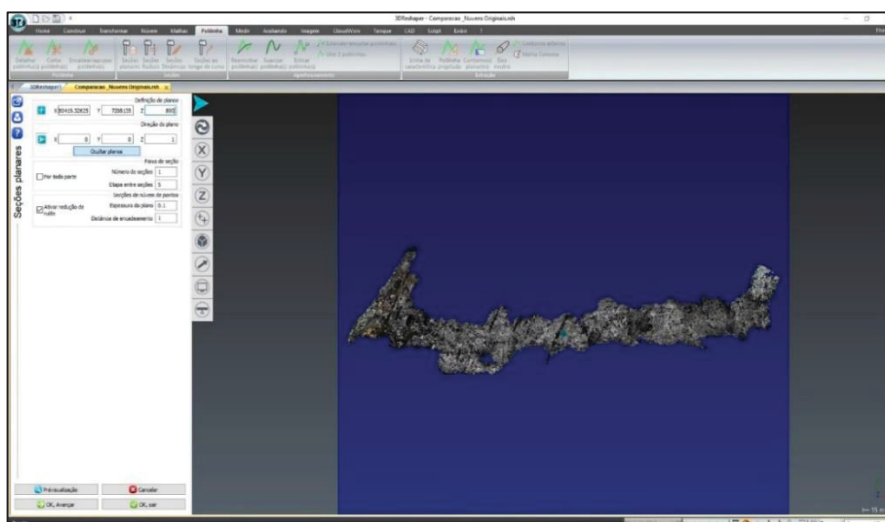
Fonte: Elaborada pelo autor, 2023.

3.3.10 – MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO POR MODELAGEM 3D

Nesta etapa foram geradas as camadas de informações com os elementos e feições espeleológicas obtidos por procedimentos automatizados e foi feita a composição do mapa com layout tradicional segundo o projeto cartográfico. As categorias espeleológicas se referem a contornos, espeleotemas, espeleogens, depósitos clásticos, estruturas de visitação, estruturas geológicas, corpos hídricos, além dos dados topográficos, alvos, entre outros. A composição do layout final foi realizada no software ArcMap 10.8, utilizando-se o sistema de referência UTM 22S, *datum* SIRGAS 2000.

Iniciou-se com a extração vetorial do contorno horizontal da cavidade, procedimento realizado no software 3D Reshaper com o modelo 3D em formato OBJ. Para tanto, foi utilizado o comando Polilinha > Extração > Contorno Externo e foi definido o plano de extração, perpendicular ao eixo Z (FIGURA 132). Este software tem a vantagem da interoperabilidade com o AutoCAD 2019, sendo que os vetores extraídos e selecionados puderam ser exportados para um arquivo aberto através do comando *Enviar para o CAD*, acessível com o botão direito do mouse. No AutoCAD 2019 os contornos do perfil longitudinal, cortes transversais, projeção vertical longitudinal e projeção vertical transversal extraídos foram rotacionados para o plano horizontal e transladados, sendo salvos em formato DWG.

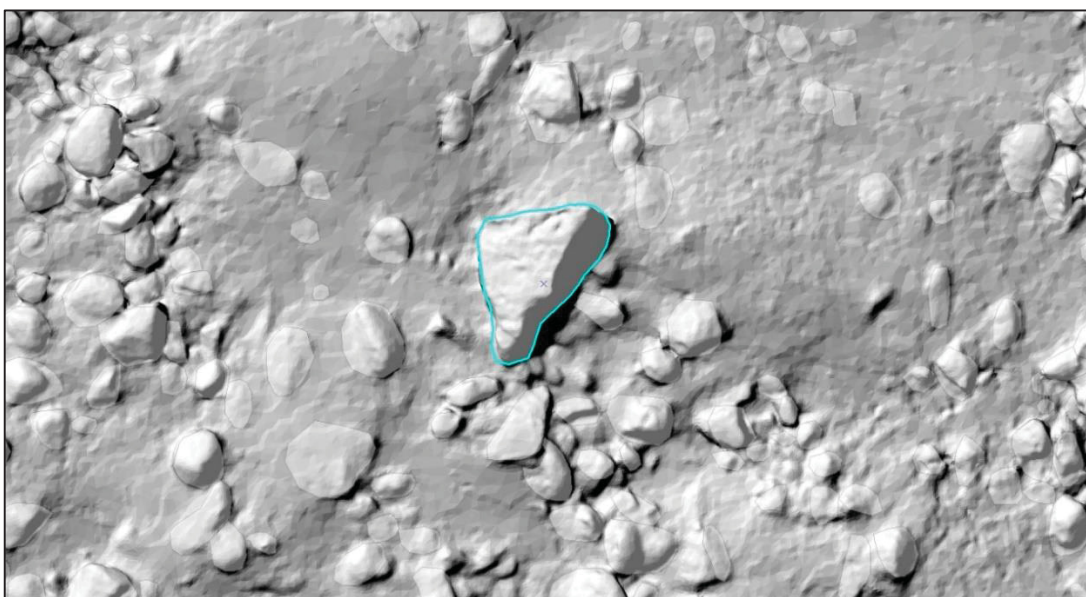
FIGURA 132 – INTERFACE DO SOFTWARE 3D RESHAPER NO PROCESSO DE EXTRAÇÃO VETORIAL DO CONTO RNO EXTERNO DA CAVIDADE.



Os procedimentos para a extração vetorial foram repetidos para o perfil longitudinal e cortes transversais, utilizando-se dos comandos Polilinha > Seções Planares e Polilinha > Seções Dinâmicas, tendo sido feita a retificação do perfil longitudinal no AutoCAD 2019. Dos modelos 3D do piso e do teto, previamente gerados, foram extraídos o contorno do piso e as curvas de nível com 5 cm de equidistância do piso e do teto.

A partir do mosaico de ortofotos e do modelo digital de superfície do piso que serviram de referência visual, ambos com GSD de 1 mm, foram vetorizados os limites do curso hídrico, os blocos, as passarelas, os pilares, as colunas, áreas com guano, os travertinos, as estalagmites, os contornos do teto e os abruptos no software ArcMap 10.8 sendo salvos em formato SHP. Por fim, foram vetorizadas as linhas de indicação das posições dos cortes transversais e do perfil longitudinal. Já o mosaico de ortofotos e o modelo de superfície do teto serviram de referência para a vetorização das áreas com as estalactites. Dada a alta resolução espacial desses produtos, as vetorizações puderam ser feitas em escala de detalhe, como 1:100, 1:50 e 1:20, a depender da feição espeleológica (FIGURA 133).

FIGURA 133 - PROCESSO DE VETORIZAÇÃO DE BLOCOS SOBRE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE EM ESCALA DE 1:20.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

Outros elementos utilizados na composição do mapa como as estações GNSS, as estações topográficas e sua poligonal, o circuito turístico, ponto mais alto, ponto zero e ponto mais baixo, foram definidos com o suporte das curvas de nível. Por último foi aplicado um polígono envolvendo os contornos em planta, perfil longitudinal e cortes transversais, representando a rocha encaixante.

Na composição do layout do mapa espeleológico foram utilizados elementos tradicionais como as representações em planta baixa, perfil longitudinal e cortes transversais, legenda, escala gráfica, escala numérica, indicação dos nortes magnético e verdadeiro, indicações dos cortes transversais e perfil longitudinal, grade de coordenadas, simbologia, espeleometria, mapas de inserção, método de levantamento, precisão, data e autoria. Foram utilizados elementos inovadores como os modelos digitais de elevação com escalas de cores, o modelo digital de elevação do piso em escala de cinza, QRcodes e hiperlinks dos modelos on-line (ANEXO 3).

A planta baixa foi disposta na porção central do espaço, com o perfil na parte superior e cortes transversais ao redor da planta baixa. Foram inseridos os QRcodes com respectivos hiperlinks e miniaturas no canto inferior esquerdo e modelos de superfície no canto inferior direito. Na coluna da direita foram dispostas a legenda, mapas de inserção e o carimbo com as informações textuais, incluindo a denominação, método de levantamento, sistema e classificação de precisão e detalhamento. Escala gráfica e escala numérica foram posicionados ao centro da porção inferior. Foram exportados os mapas em formato A4, A3 e A1 para impressão, em formato TIFF e PDF.

3.3.11 – INTEGRAÇÃO DO MODELO SUBTERRÂNEO AO TOPOGRÁFICO

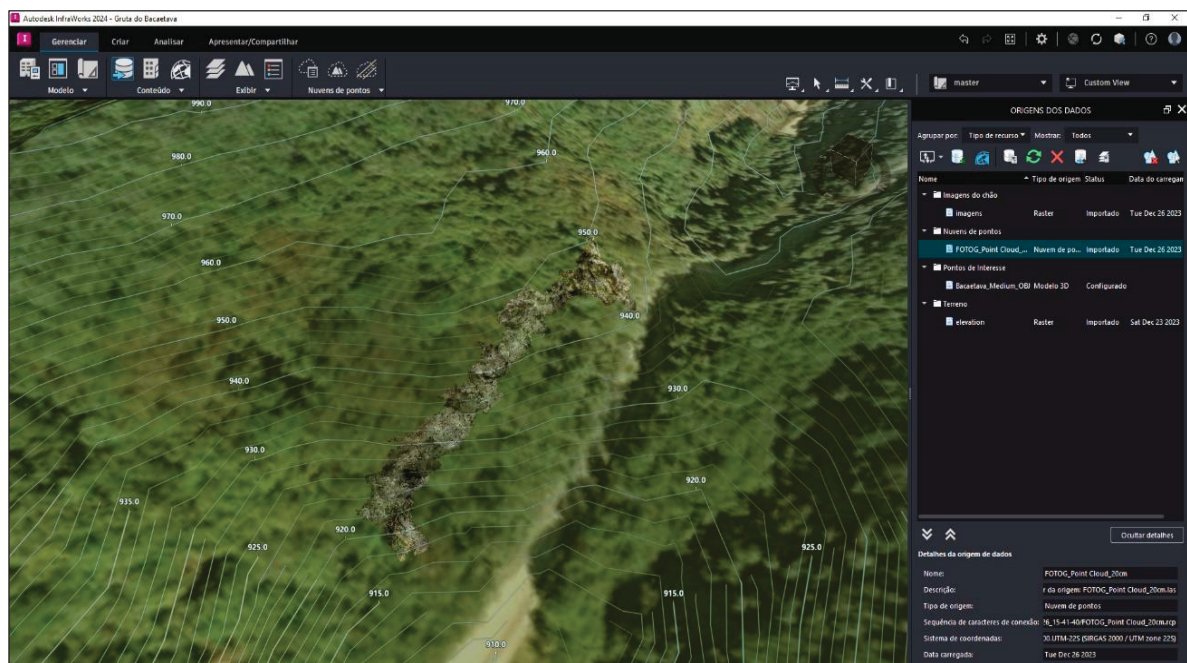
A associação de um modelo 3D de uma caverna com um modelo 3D da superfície topográfica oferece suporte para a realização de estudos interdisciplinares, explorando a interação entre o meio ambiente superficial e subterrâneo em diferentes áreas como geologia, geomorfologia, planejamento urbano, conservação ambiental e turismo.

De forma a implantar a Gruta do Bacaetava em seu relevo topográfico, criou-se um modelo topográfico com a nuvem de pontos fotogramétrica sob imagem de satélite de alta resolução no software Infravorks 2024. Inicialmente foi criado um projeto com o Gerador de modelo, onde é definido o recorte da área e o sistema de

coordenadas e datum. Este projeto foi gerado no servidor da Autodesk e ficou disponível na área de projetos quando finalizado. Com o comando Gerenciar > Conteúdo > Origem dos dados foi acessada uma caixa de diálogos onde se indicou o formato de dados e o arquivo a ser carregado. Este arquivo teve configurado seu sistema de coordenadas apenas e a nuvem de pontos fotogramétrica ficou disponível sob a imagem de satélite, a qual é possível atribuir uma transparência (FIGURA 134). Uma vez exportado em formato FBX, os modelos integrados podem ser carregados no site Sketchfab.com. No entanto, foram feitas várias tentativas sem sucesso, tendo apresentado erros no processo de upload.

De forma alternativa, os modelos 3D da superfície topográfica e da cavidade foram exportados em formato FBX e integrados na plataforma Unreal Engine 5.3. O modelo integrado resultante foi exportado em formato GLB e carregado no repositório de modelos 3D, não tendo apresentado problemas no processo.

FIGURA 134 – INTERFACE DO SOFTWARE INFRAWORKS 2024 APRESENTANDO A NUVEM DE PONTOS, AO CENTRO, SOB IMAGEM DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO.

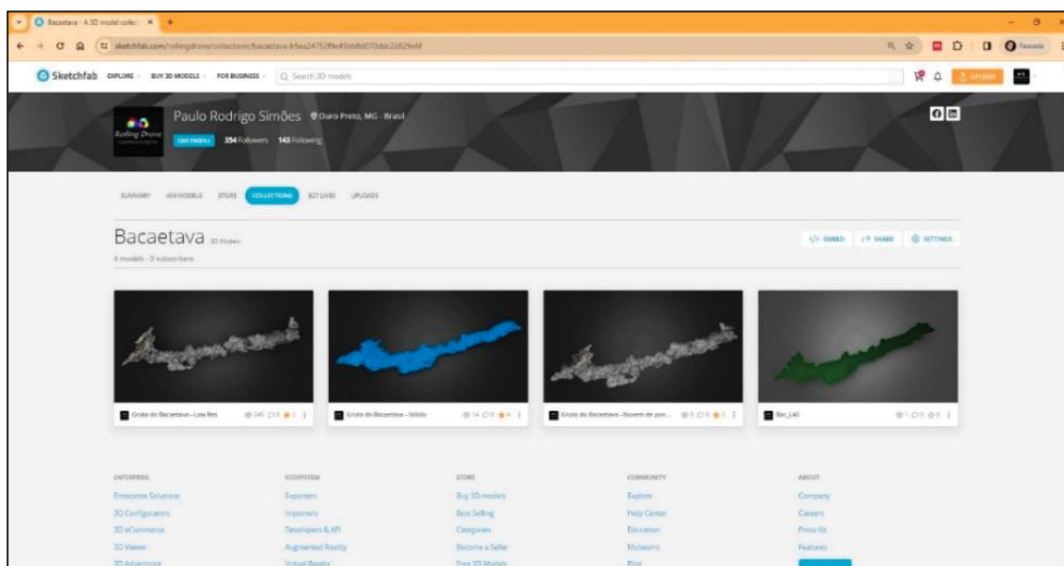


FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

3.3.12 – PUBLICAÇÃO DOS MODELOS 3D

Os modelos produzidos foram disponibilizados na página do repositório de modelos 3D Sketchfab que permite acesso online por PC, Lap Top ou dispositivo móvel, onde é possível estabelecer qualquer ponto de vista desejável através de navegação, interna ou externa (FIGURA 135). Este site inclui recursos de Realidade Virtual, podendo ser utilizados óculos como o Oculus Rift2 ou o Quest2. Dada as restrições de tamanho do upload de no máximo 100 Mb, foi feita uma cópia em menor resolução do modelo fotogramétrico da cavidade, sendo inevitável sua simplificação.

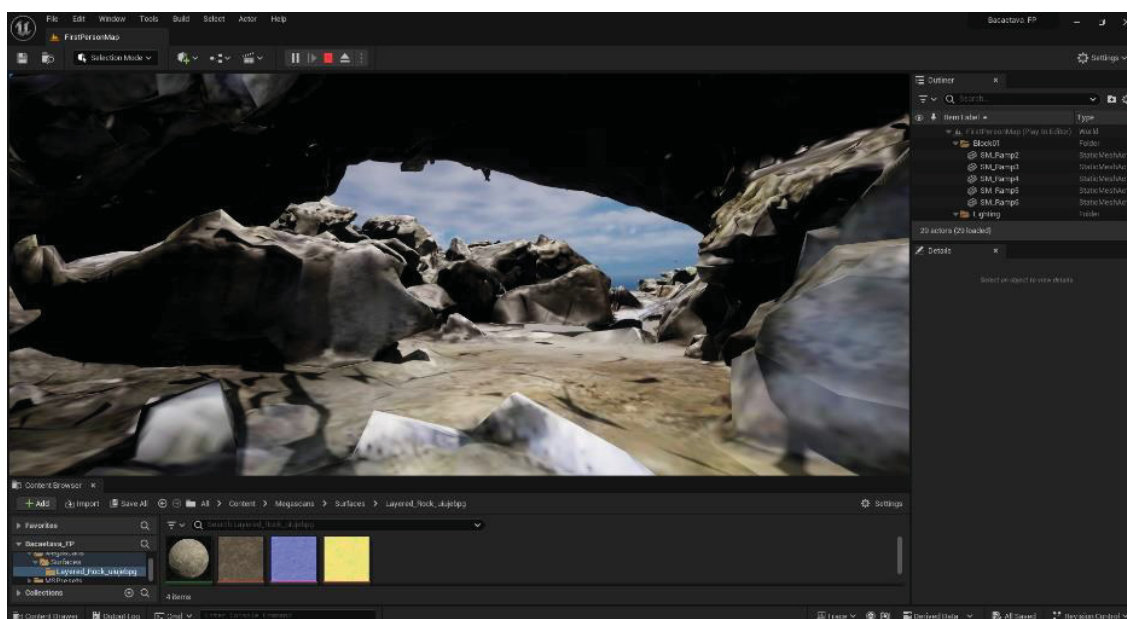
FIGURA 135 – INTERFACE DO SITE SKETCHFAB.COM COM A COLEÇÃO DE MODELOS DA GRUTA DO BACAETAVA.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

Uma experimentação de uma visita virtual foi realizada na plataforma gratuita de jogos Unreal Engine 5.3. Esta plataforma permite a navegação em primeira ou terceira pessoa através de um avatar, onde os movimentos podem ser controlados via teclado ou por controle do XBOX (FIGURA 136). O projeto da visita virtual foi empacotado e exportado para a plataforma Windows, sendo acessado diretamente por um arquivo executável, sem a necessidade de instalações e está disponível em um servidor.

FIGURA 136 - INTERFACE DA PLATAFORMA UNREAL ENGINE 5.3 COM A VISITA VIRTUAL EM PRIMEIRA PESSOA DA GRUTA DO BACAETAVA.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2023.

3.3.13 – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A VARREDURA A LASER E A FOTOGRAMETRIA

Uma análise comparativa entre características da varredura a laser e da fotogrametria terrestre foi realizada e considerou aspectos operacionais, do processamento e armazenamento de dados, curva de aprendizado, precisão, custos, condições de operação em relação ao ambiente subterrâneo. Esta análise visa apresentar vantagens e desvantagens de cada método, sem a pretensão de ser uma avaliação exaustiva, servindo os resultados de referência para que o leitor possa optar por um dos métodos de acordo com as necessidades, recursos e expertise, se for o caso.

Um quadro apresentado no Item 4.9 resume as principais características dos métodos, destacando as vantagens (em verde) e desvantagens (em vermelho) de cada um.

3.3.14 – FLUXOGRAMA DE TRABALHO

Com os objetivos de contribuir para a visualização, compreensão e padronização dos processos cartográficos adotados para a construção de um mapa espeleológico a partir de modelos 3D, foi proposto um fluxograma de trabalho. Este contém indicações dos recursos, em termos de software, das etapas, procedimentos e produtos gerados e está disponível no ANEXO 4.

3.3.15 – LISTAGEM DOS PROCEDIMENTOS

De forma a contribuir para a repetibilidade deste experimento em outras cavidades, foi feita uma planilha com o detalhamento operacional do fluxo de trabalho e os procedimentos realizados para a captura, pós-processamento, análises, publicação e compartilhamento dos modelos 3D, considerando os softwares e os comandos utilizados (ANEXO 5).

4 - RESULTADOS

4.1 – MODELO FOTOGRAMÉTRICO 3D

O levantamento fotogramétrico resultou num modelo 3D do conduto principal da Gruta do Bacaetava com cerca de 205 m de desenvolvimento em projeção horizontal. O modelo apresenta uma textura realística em sistema RGB, onde é possível observar as diferentes feições espeleológicas apesar da relativa homogeneidade textural da rocha. No entanto, foram observadas várias áreas oclusas de pequenas dimensões nas paredes, teto e piso, resultado de oclusões devidas à dificuldade de cobertura de concavidades e por conta do corpo hídrico, no caso do piso.

O processamento dos dados foi realizado sobre 11.292 imagens calibradas e alinhadas em alta resolução de um total de 11.335, ou seja, 99,6%, resultando em 8.123.018 *tie points*, 11.266 mapas de profundidade, nuvem com 106.169.921 pontos e espaçamento de 10 mm e modelo 3D com 45.106.323 de faces e 22.586.276 de vértices. O modelo resultante foi exportado em formato OBJ e tem um tamanho de 6.2 Gb. O projeto do software Agisoft Metashape em formato PSX com o modelo 3D completo, modelo do piso, modelo do teto e modelo fechado para o cálculo do volume ocupa 239 Gb.

A avaliação da precisão posicional foi feita a partir das métricas apresentadas pelo software, tendo sido baseadas em 19 de 27 pontos de controle (FIGURA 137) com coordenadas UTM obtidas por levantamento topográfico por estação total e por cinco de 13 pontos de *check* definidos a partir de escalas com distancias entre dois alvos medidas com trena laser. A precisão posicional do modelo foi 0,0174 m relativa aos pontos de controle (alvos) (QUADRO 8) e 0,062 m aos pontos de checagem (QUADRO 9). Tais valores mostram-se bastante baixos para levantamentos em espaços subterrâneos, principalmente se considerados em relação ao ambiente e às condições de trabalho.

QUADRO 8 – ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS PONTOS DE CONTROLE.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
19	1.06904	0.969569	0.973607	1.44323	1.74093

FONTE: Relatório de processamento do Agisoft Metashape, 2023.

QUADRO 9 - ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS PONTOS DE CHECAGEM.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	4.51616	3.98992	1.71721	6.0262	6.26609

FONTE: Relatório de processamento do Agisoft Metashape, 2023.

Os pontos de checagem (escalas) apresentaram o valor de 0,011 m para os pontos de controle (QUADRO 10) e 0,414 m para os pontos de *check* (QUADRO 11).

QUADRO 10 - ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS PONTOS DE CONTROLE DAS ESCALAS.

Label	Distance (m)	Error (m)
A27_AA26	6.76306	-0.00404162
AA25_AA26	16.5652	0.0111883
A27_AA25	18.222	-0.00756602
AA10_AA17	45.4891	0.0214801
AA20_AA22	25.9716	0.00374061
Total		0.0116116

FONTE: Relatório de processamento do Agisoft Metashape, 2023.

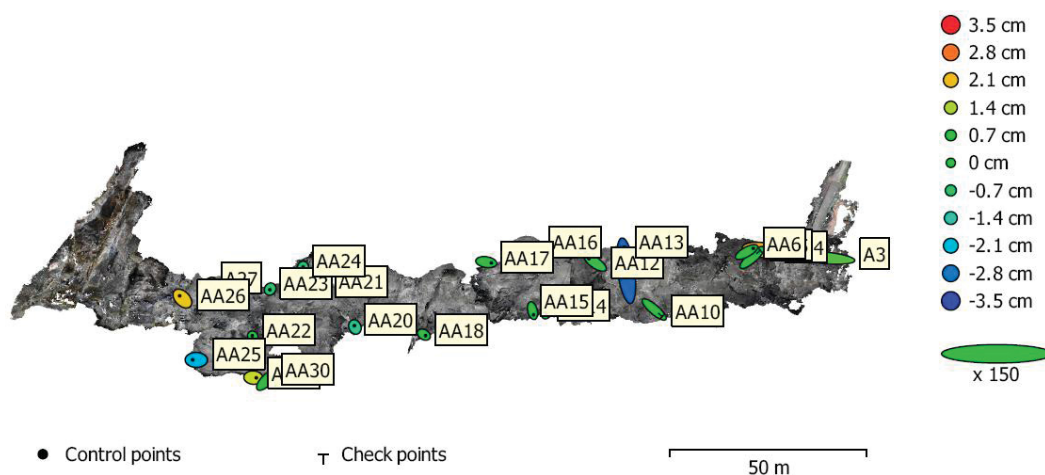
QUADRO 11 - ERRO MÉDIO QUADRÁTICO DOS PONTOS DE CHECAGEM DAS ESCALAS.

Label	Distance (m)	Error (m)
AA15_AA16	17.075	-0.0326695
AA10_AA13	20.5523	-0.0399274
AA23_AA30	21.7194	0.0500242
Total		0.0414886

FONTE: Relatório de processamento do Agisoft Metashape, 2023.

A validação da geometria do modelo 3D foi feita a partir da comparação entre nuvens de pontos do tipo nuvem a nuvem e através da sobreposição dos vetores extraídos dos contornos da planta baixa e dos cortes transversais e será discutida mais adiante (Ver itens 3.3.8 e 4.3).

FIGURA 137 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE E ESTIMATIVAS DE ERROS. ERROS EM Z SÃO REPRESENTADOS POR CORES E ERROS EM X E Y SÃO REPRESENTADOS PELA FORMA DA ELIPSE.



FONTE: Relatório de processamento do Agisoft Metashape, 2023.

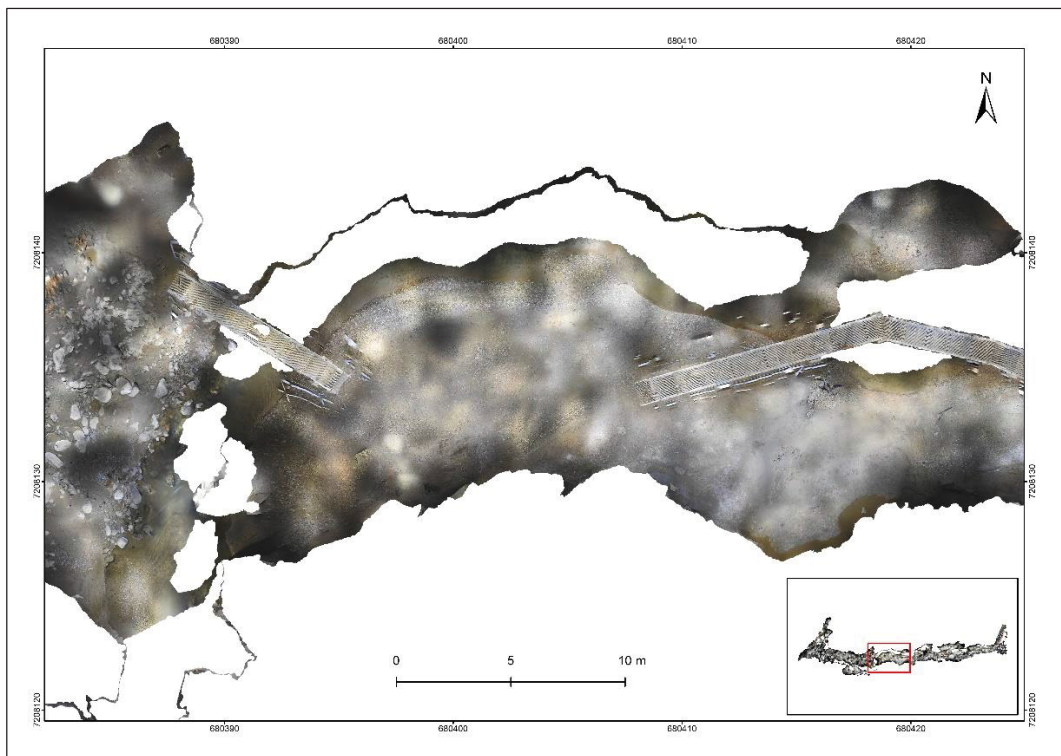
Uma vez validado o modelo 3D, este foi replicado e editado manualmente para a geração dos modelos do piso e do teto. A edição do modelo do piso foi o procedimento manual mais demorado, dada a natureza da função e a complexidade morfológica, o que dificultou a diferenciação entre parede e piso em muitos locais. Um

quarto modelo foi utilizado para o cálculo do volume, variável espeleométrica obtida facilmente, ao contrário do método tradicional de mapeamento.

Do modelo do piso foi obtido um mosaico de ortofotos com GSD de 1 mm por pixel de 213.233 linhas por 59.964 colunas, utilizado para a vetorização de elementos espeleológicos em escala de detalhe. A visualização desta imagem na sua máxima resolução é o equivalente à sua apresentação em escala de 1:3, o que demonstra sua alta resolução espacial, aspecto altamente positivo no processo de vetorização de feições espeleológicas. No recorte do mosaico de ortofotos do piso da FIGURA 138 percebe-se a variação das condições de iluminação, as oclusões associadas ao corpo hídrico, as projeções dos corrimãos no piso e o conjunto de blocos decimétricos na porção Oeste.

O mosaico de ortofotos gerados a partir do modelo do teto foi fundamental no processo de vetorização dos locais de ocorrência das estalactites, uma vez que se optou pela sua representação na forma de polígono e não como ícones pontuais.

FIGURA 138 – ASPECTO DO MOSAICO DE ORTOFOTOS DO PISO.

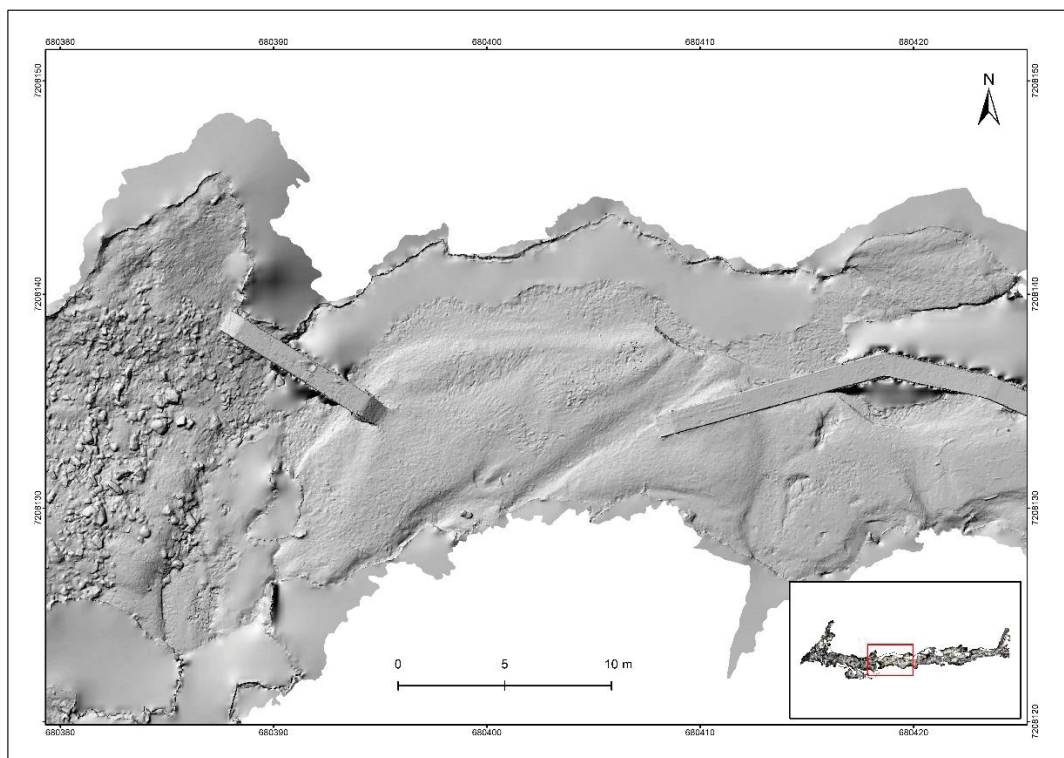


FONTE: Elaborada pelo autor, 2024.

Dois modelos digitais de superfície do piso foram gerados com GSD de 1 mm por pixel, sendo um em tons de cinza utilizado como plano de fundo do mapa espeleológico (FIGURA 139) para dar volume e um com paleta de cores representando as diferenças altimétricas.

Os modelos digitais de superfície foram utilizados na extração das curvas de nível do piso e do teto com equidistância de 5 cm, sendo estas utilizadas como referência para a vetorização de feições espeleológicas e para o cálculo de variáveis espeleométricas, não sendo utilizadas no mapa, no entanto.

FIGURA 139 – ASPECTO DO MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DO PISO EM TONS DE CINZA.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2024.

O conjunto de produtos cartográficos produzidos a partir do modelo 3D da cavidade, incluindo este próprio modelo, foi essencial para os procedimentos de extração e edição vetorial de dados espaciais necessários para a composição de um mapa espeleológico de alta precisão e nível de detalhe. E apesar dos bons resultados visuais, a iluminação foi o fator mais crítico no processo, apresentando-se deficiente especialmente nas bordas das imagens.

O compartilhamento de modelos 3D na página do Sketchfab.com permite que os usuários possam ter uma experiência imersiva e realista explorando virtualmente cavernas sem precisar estar fisicamente presente, especialmente adequado para aquelas localizadas em áreas remotas ou de difícil acesso. O registro 3D de cavidades pode ser particularmente útil para monitorar e documentar possíveis impactos ambientais ou mudanças naturais ao longo do tempo, permitindo que diferentes especialistas analisem os modelos e contribuam com seus conhecimentos, promovendo uma compreensão coletiva.

4.2 – NUVEM DE PONTOS DA VARREDURA A LASER TERRESTRE

O objetivo deste levantamento foi de servir de referência na comparação da configuração geométrica para com a nuvem de pontos fotogramétrica, visando a validação desta. O resultado foi uma nuvem de 164.134.822 pontos de todo o conduto principal da Gruta do Bacaetava com densidade de pontos média previamente definida em laboratório após a remoção dos *outliers* e de pontos associados à vegetação.

O processamento seguiu com os procedimentos de importação e registro semiautomático no software Leica Cyclone Register 360, atingindo uma precisão absoluta de 0,00593 m, obtida através das métricas de sobreposição de nuvem a nuvem e *overlap* de 52% do conjunto das 54 nuvens. A precisão absoluta apresentada encontra-se no intervalo de erro máximo até 0,015 m, menor valor de intervalo classificado pelo software. Com a utilização de quatro dos oito dos pontos de controle identificados no modo de visualização IR o erro médio posicional foi de 0,0564 m para todo o conjunto, obtido através das métricas do ajustamento dos pontos de controle às coordenadas (TABELA 5). A área média de captura de cada estação foi de 76,64 m², considerando uma área de 4139,05 m² do contorno externo e 54 estações.

Estes dados, disponíveis no relatório de processamento do software, parecem indicar a dificuldade no posicionamento manual de um ponto com coordenadas no centro geométrico do alvo dada a baixa visibilidade destes no modo IR do software, uma vez que não foram iluminados (FIGURA 140). O posicionamento do instrumento mais próximo do alvo e sua iluminação podem ser fatores de aumento da precisão e, conseqüentemente, do número de alvos passíveis de utilização para o ajustamento da nuvem de pontos.

Ressalta-se a importância de modelos acurados, uma vez que irão gerar uma representação mais fiel à realidade e dados espeleométricos mais precisos, principalmente neste caso em que esta nuvem se presta de referência à comparação com um outro método de levantamento.

TABELA 5 - ERRO MÉDIO ABSOLUTO DOS PONTOS DE CONTROLE DA NUVEM DE PONTOS DA GRUTA DO BACAETAVA.

Abs. Mean Error of Control to 'Bundle 1': **0.05640 m**

Bundle Name	Setup	Label	Error
Bundle 1	BLK360_3504089_Setup16	A11	0.05518 m
	BLK360_3504089_Setup22	A6	0.05776 m
	BLK360_3504089_Setup27	A17	0.03075 m
	BLK360_3504089_Setup36	A24	0.04781 m
	BLK360_3504089_Setup43	A25	0.09048 m

FONTE: Relatório de processamento do Cyclone Register 360, 2024.

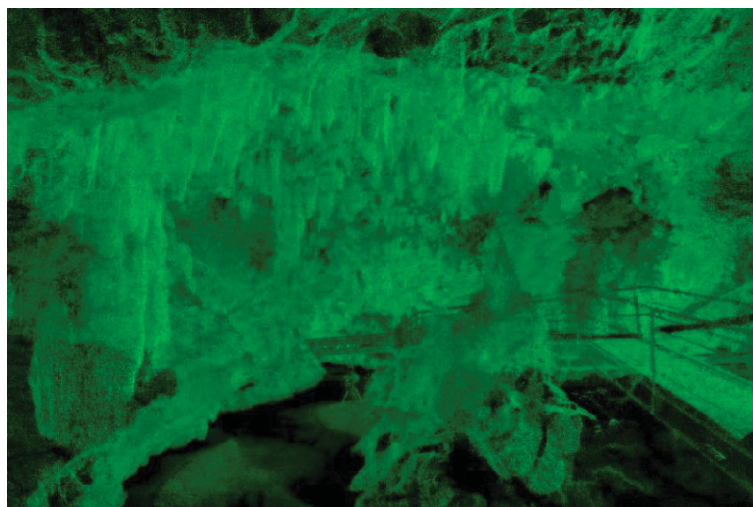
A falta de iluminação, ainda que não tenha impedido o funcionamento do método, resultou na atribuição do valor de intensidade de retorno do sinal e não a um valor do sistema RGB, à exceção das entradas, o que dificultou a visualização de alterações texturais, importantes para a identificação de feições espeleológicas de interesse (FIGURA 141).

FIGURA 140 – ALVO CODIFICADO PARA REGISTRO DAS NUVENS DE PONTOS DA VARREDURA A LASER TERRESTRE VISTO EM IMAGEM NO ESPECTRO DO IR.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2024.

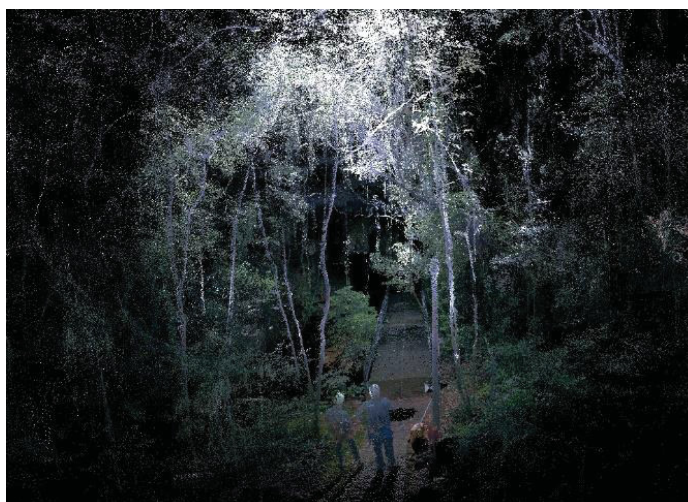
FIGURA 141 - VISTA DA NUVEM DE PONTOS DE OESTE PARA LESTE MOSTRANDO A PARTE INICIAL DA GRUTA DO BACAETAVA.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2024.

Durante o levantamento a caverna encontrava-se relativamente seca, o que impediu de avaliar a influência das superfícies úmidas no retorno do laser. No caso do corpo hídrico, algumas oclusões se apresentaram, como era esperado, tal qual no levantamento fotogramétrico. Os corrimãos das passarelas ficaram bem representados, com resultados muito superiores à fotogrametria. A vegetação teve de ser removida por edição manual das entradas da cavidade, tendo ocasionado forte interferência visual (FIGURA 142).

FIGURA 142 - VISTA DA ENTRADA DA GRUTA DO BACAETAVA NA NUVEM DE PONTOS DA VARREDURA A LASER TERRESTRE.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2024.

4.3 – COMPARAÇÃO ENTRE NUVENS DE PONTOS

A comparação entre nuvens de pontos teve a finalidade de avaliar a precisão geométrica entre uma nuvem de referência e uma nuvem comparada a partir das distâncias euclidianas entre seus pontos correspondentes. Neste estudo, a comparação entre nuvens de pontos foi realizada na expectativa de se avaliar a precisão e validar a geometria do modelo fotogramétrico tendo um conjunto de pontos de controle associados a um sistema de referência para ambos os métodos de levantamento.

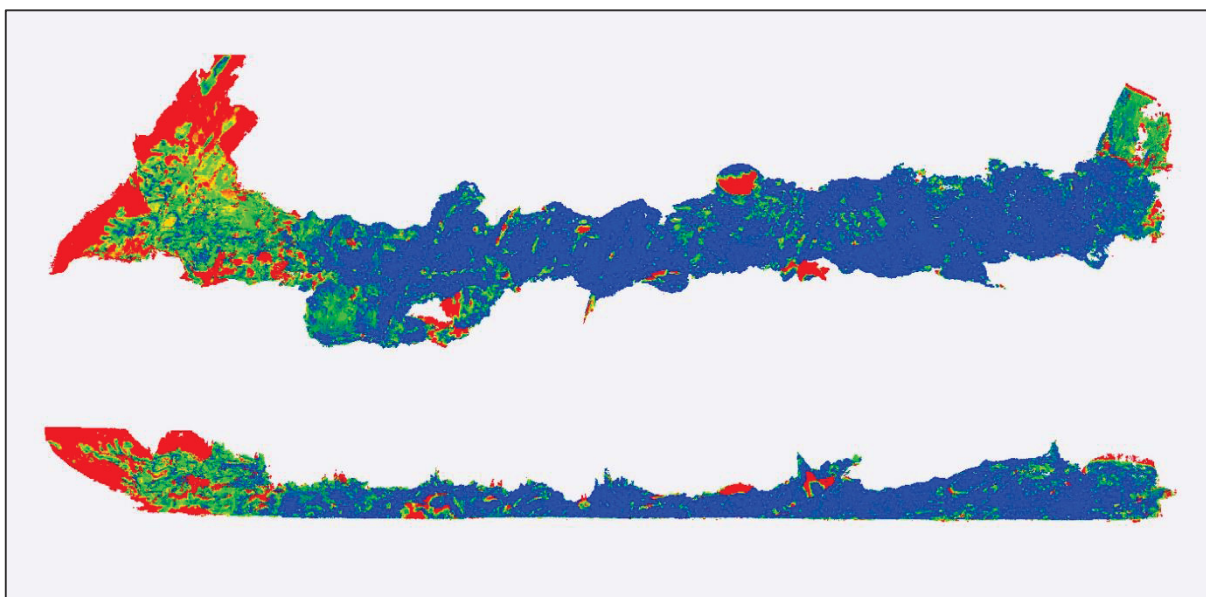
A métrica de distância euclidiana entre pontos correspondentes de duas nuvens de pontos, uma obtida por laser e outra fotogramétrica é uma medida comum para avaliar a similaridade ou diferença entre essas nuvens de pontos. A distância euclidiana entre dois pontos corresponde à linha reta que conecta os pontos correspondentes nas duas nuvens.

Para calcular a métrica de distância euclidiana entre nuvens de pontos inteiras, calcula-se a distância euclidiana entre cada par de pontos correspondentes e, em seguida, toma-se a média dessas distâncias para obter uma medida geral da discrepância entre as duas nuvens, buscando-se compreender o quão bem as nuvens de pontos se alinham ou se correspondem.

Os scanners a laser são projetados para fornecer medidas precisas e confiáveis, num processo que pode fornecer coordenadas 3D com precisão milimétrica. Dada a sua consistência geométrica, normalmente a nuvem da varredura a laser é utilizada como referência nos processos de comparação entre nuvens de pontos.

Seguindo essa lógica na comparação entre as nuvens de pontos da Gruta do Bacaetava realizadas no software Cloud Compare, dos 106.169.924 de pontos da nuvem comparada (fotogramétrica), 64% dos pontos (azuis) (QUADRO 12) foram classificados no intervalo de 0 a 6.25 cm, o que demonstra uma alta correspondência geométrica e, conseqüentemente, a precisão do levantamento. Como pode ser visto na FIGURA 144, as maiores diferenças se concentram nas entradas, em locais de maior complexidade geométrica, o que ocasionou oclusões na varredura a laser.

FIGURA 143 – NUVEM COMPARADA (FOTOGRAMÉTRICA) E DISTÂNCIAS REAIS VISTAS EM PERFIL LONGITUDINAL (SUPERIOR) E EM PLANTA (INFERIOR).



FONTE: Elaborada pelo autor, 2024.

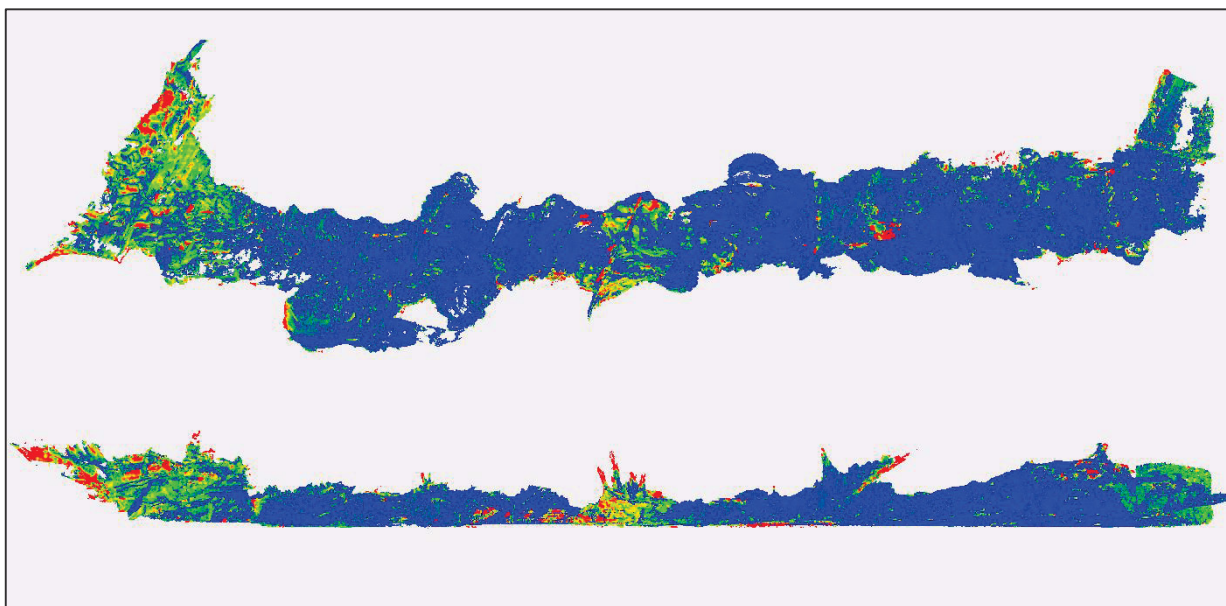
QUADRO 12 – CLASSIFICAÇÃO, EM PORCENTAGEM, DOS PONTOS DA NUVEM COMPARADA (FOTOGRAMÉTRICA) EM INTERVALOS DE DISTÂNCIAS REAIS EM RELAÇÃO À NUVEM DA VARREDURA A LASER.

Class	Points	Class start	Class end	%
1	68309035	0.0000	0.0625	64%
2	13381401	0.0625	0.1250	13%
3	4823668	0.1250	0.1875	5%
4	3182240	0.1875	0.2500	3%
5	2498137	0.2500	0.3125	2%
6	1895933	0.3125	0.3750	2%
7	1411775	0.3750	0.4375	1%
8	10667735	0.4375	0.5000	10%

FONTE: Elaborado pelo autor, 2024.

No entanto, considerando que a precisão posicional da nuvem fotogramétrica se mostrou melhor do que a nuvem da varredura a laser por motivos já explicitados, optou-se por realizar a comparação tomando-se a nuvem fotogramétrica como referência. Na FIGURA 144, dos 164.134.822 de pontos da nuvem comparada, 86% (azuis) (QUADRO 13) foram classificados no menor intervalo de distâncias reais, o que confirma a qualidade dos dados em seu aspecto geométrico. Esta comparação mostrou-se ainda com maior coerência, uma vez que os locais de difícil cobertura pela fotogrametria, como no caso das fraturas do teto, mostraram-se com valores maiores para as distancias reais. Nas entradas, os dados também se mostram aparentemente mais coerentes, com as distancias reais menores do que no caso anterior.

FIGURA 144 - NUVEM COMPARADA (LASER) E DISTÂNCIAS REAIS VISTA EM PERFIL LONGITUDINAL (SUPERIOR) E EM PLANTA (INFERIOR).



FONTE: Elaborada pelo autor, 2024.

QUADRO 13 – CLASSIFICAÇÃO, EM PORCENTAGEM, DOS PONTOS DA NUVEM COMPARADA (VARREDURA A LASER) EM INTERVALOS DE DISTANCIAS REAIS EM RELAÇÃO À NUVEM FOTOGRAMÉTRICA.

Class	Points	Class start	Class end	%
1	141797914	0.00	0.0625	86%
2	10232710	0.0625	0.1250	6%
3	3837410	0.1250	0.1875	2%
4	2639264	0.1875	0.2500	2%
5	1920241	0.2500	0.3125	1%
6	1233492	0.3125	0.3750	1%
7	673387	0.3750	0.4375	0%
8	1800404	0.4375	0.5000	1%

FONTE: Elaborado pelo autor, 2024.

O software utilizado tem a vantagem de apresentar os dados em qualquer posição, possibilitando uma interpretação mais precisa dos locais onde as diferenças sejam mais significativas, procurando-se determinar os fatores que ocasionaram uma maior discrepância entre as nuvens. E para que não houvesse possíveis interferências nos resultados, não foi feita a simplificação das nuvens, mantendo o número original de pontos, apesar de exigir maior tempo de processamento.

Em termos de completude, a nuvem fotogramétrica mostrou-se mais completa, havendo maior número de oclusões na nuvem da varredura a laser.

O aspecto visual da nuvem fotogramétrica, por ser realístico, permitiu uma percepção mais aprimorada das superfícies, como em discriminações litofaciológicas, identificação de estruturas geológicas como dobras e fraturas, extensão de depósitos clásticos. Este aspecto reflete no fato da nuvem fotogramétrica propiciar a geração de outros produtos cartográficos, conferindo outra vantagem para o método fotogramétrico.

4.4 – ESPELEOMETRIA

A espeleometria trata das quantificações de aspectos geométricos de um espaço subterrâneo visando estabelecer critérios objetivos para a comparação dos tamanhos entre duas ou mais cavidades. Além das variáveis tradicionalmente utilizadas (PH, DH, Desnível, Área e Volume), foram feitos os cálculos para outras menos usuais, mas que podem contribuir para uma melhor caracterização geométrica de uma caverna.

No QUADRO 14 são apresentadas as variáveis calculadas e seus respectivos valores.

QUADRO 14 - VALORES DAS VARIÁVEIS ESPELEOMÉTRICAS CALCULADAS A PARTIR DO MODELO FOTOGRAFÉTICO.

VARIÁVEL ESPELEOMÉTRICA	VALOR
Volume	15.351,82 m ³
Área do contorno externo	4.139,05m ²
Perímetro contorno externo	871,24 m
Área do piso	3.481,28 m ²
Perímetro do contorno do piso	859,9 m
Área da projeção vertical longitudinal	1.671,19 m
Perímetro da projeção vertical longitudinal	611,74 m
Área da projeção vertical transversal	699,93 m
Perímetro da projeção vertical transversal	277,10 m
Ponto mais alto	908,9 m
Ponto zero	896,9 m
Ponto mais baixo	894,3 m
Desnível Negativo	2,6 m
Desnível Positivo	12 m
Desnível Total	14,6 m
Gradiente hidráulico	2,6 m
Desenvolvimento em projeção horizontal - PH	272,27 m
Desenvolvimento inclinado - DL	296,52 m

Lamina d'água	1.047,4 m ²
Largura mínima	10,27 m
Largura média	19,43 m
Largura máxima	55,31 m
Altura mínima	1,58 m
Altura média	5,35 m
Altura máxima	13,00 m
Passarelas	127 m
Circuito turístico	216,5 m

FONTE: Elaborado pelo autor, 2023.

4.5 – MAPA ESPELEOLÓGICO

O mapa espeleológico da Gruta do Bacaetava foi gerado em ambiente SIG a partir de procedimentos automatizados na composição do layout, seguindo as orientações do projeto cartográfico. Inicialmente gerado em formato A4, foi também exportado em formatos A3 e A1 e plotados para inspeção visual.

Foi desconsiderado o levantamento do conduto superior por razões técnicas, não tendo sido feitas as indicações dos dois condutos que comunicam os dois níveis de desenvolvimento da cavidade.

A classificação do grau de precisão do mapa espeleológico da Gruta do Bacaetava atingiu os níveis UISv2 X - 4 – EF²⁴ e BCRA XD²⁵, o mais alto nível de classificação de precisão e do nível de detalhamento. A validação dos dados do mapa foi feita a partir da comparação de nuvens de pontos e pela métrica de ajustamento do modelo.

O mapa pode ser visualizado em formato A5 na FIGURA 145 e em formato A1 no Anexo 3.

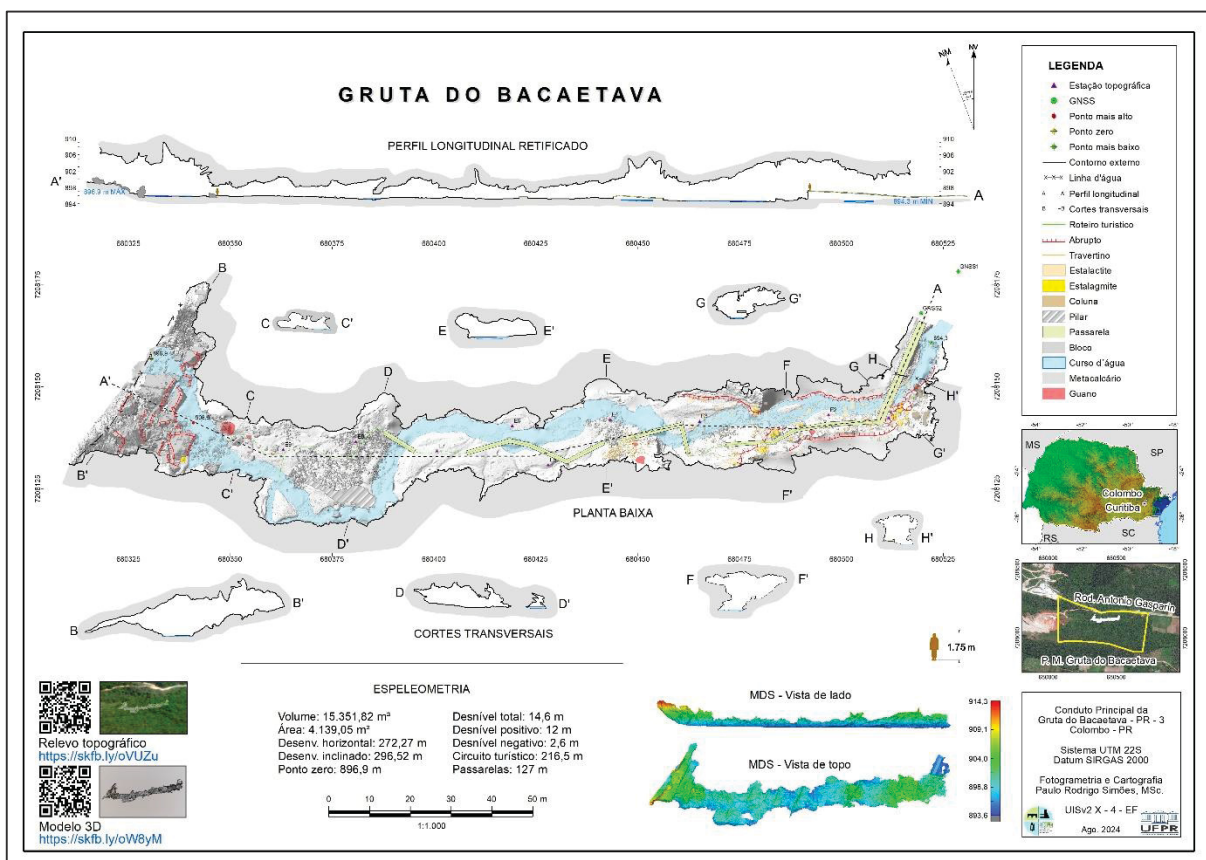
Os processos operacionais para a construção do mapa espeleológico a partir de modelos 3D são apresentados na forma de um fluxograma de trabalho (ANEXO 4)

²⁴ A classificação UIS foi feita a partir do exemplo do site: <https://www.surveymapping.com/uis-mapping-grades>. Acessado em 03 de janeiro de 2024.

²⁵ A classificação BCRA foi feita a partir do exemplo do site: <https://www.surveymapping.com/bcra-survey-grades>. Acessado em 03 de janeiro de 2024.

detalhado em uma planilha com os procedimentos adotados sequencialmente (ANEXO 5).

FIGURA 145 - FIGURA DO MAPA DO CONDUTO PRINCIPAL DA GRUTA DO BACAETAVA, COLOMBO, PR.



FONTE: Elaborado pelo autor, 2024.

4.6 – PUBLICAÇÃO DE MODELOS E VISITA VIRTUAL

O Sketchfab.com é uma plataforma online que permite aos usuários compartilharem, visualizarem e interagirem com modelos 3D. Utilizar modelos 3D a partir do Sketchfab oferece diversas vantagens, incluindo: 1 - a visualização interativa, que permite girar, ampliar e explorar o objeto de diferentes ângulos, proporcionando uma experiência mais imersiva e detalhada em comparação com imagens estáticas; 2- compatibilidade, uma vez que os modelos no Sketchfab podem ser visualizados em praticamente qualquer dispositivo com acesso à Internet, sem a necessidade de instalar plugins ou software especializado. Isso facilita a visualização em diferentes plataformas, como *desktops*, *tablets* e *smartphones*; 3 – *embedding*: a plataforma

oferece códigos de incorporação que permitem aos usuários incorporar modelos 3D diretamente em sites, blogs ou apresentações, simplificando o compartilhamento e a divulgação do trabalho; 4 – variedade de formatos suportados: o Sketchfab suporta uma ampla variedade de formatos de arquivo 3D, tornando-o compatível com muitos softwares de modelagem 3D, o que facilita o upload e a visualização de modelos criados em diferentes programas; 5 – comunidade ativa: o Sketchfab possui uma comunidade ativa de criadores e usuários interessados em modelos 3D, podendo ser vantajoso para networking, feedback e descoberta de novos trabalhos; 6 - ferramentas de edição e anotação, que adicionar anotações aos modelos, facilitando a comunicação de informações específicas; 7 - configurações de privacidade e compartilhamento: usuários assinantes têm controle sobre as configurações de privacidade dos seus modelos, podendo compartilhá-los publicamente ou apenas com pessoas específicas ou torná-los privados; 8 - configurações de iluminação e ambiente, que proporcionam uma compreensão mais completa do design (FIGURA 146); 9 – recursos para visualização em Realidade Virtual usando dispositivos de realidade virtual, como Oculus Rift, HTC Vive, Oculus Quest e outros, proporcionando aos usuários uma experiência imersiva. As configurações de visualização ajustáveis podem oferecer diferentes experiências de visualização em realidade virtual, incluindo a capacidade de ajuste da escala, altura do ponto de vista e outras configurações para otimizar a experiência VR.

Em resumo, o Sketchfab proporciona uma plataforma versátil e amigável para a apresentação e compartilhamento de modelos 3D, com uma série de recursos que facilitam a interação e a colaboração.

Na página Sketchfab.com foram disponibilizadas três versões do modelo fotogramétrico sendo, um modelo texturizado²⁶, um modelo sólido²⁷, uma nuvem de pontos²⁸ e a nuvem de pontos da varredura a laser²⁹. O mapa 2D com arquivo em formato JPG não pôde ser disponibilizado na página por ser um formato não compatível com a plataforma. No modelo de integração superfície-superfície o software Infracore aceitou apenas a inserção da nuvem de pontos fotogramétrica sob a imagem da superfície topográfica, não aceitando o arquivo em formato OBJ,

²⁶ Disponível em <https://skfb.ly/olHuz>. Acessado em 25 de dezembro de 2023.

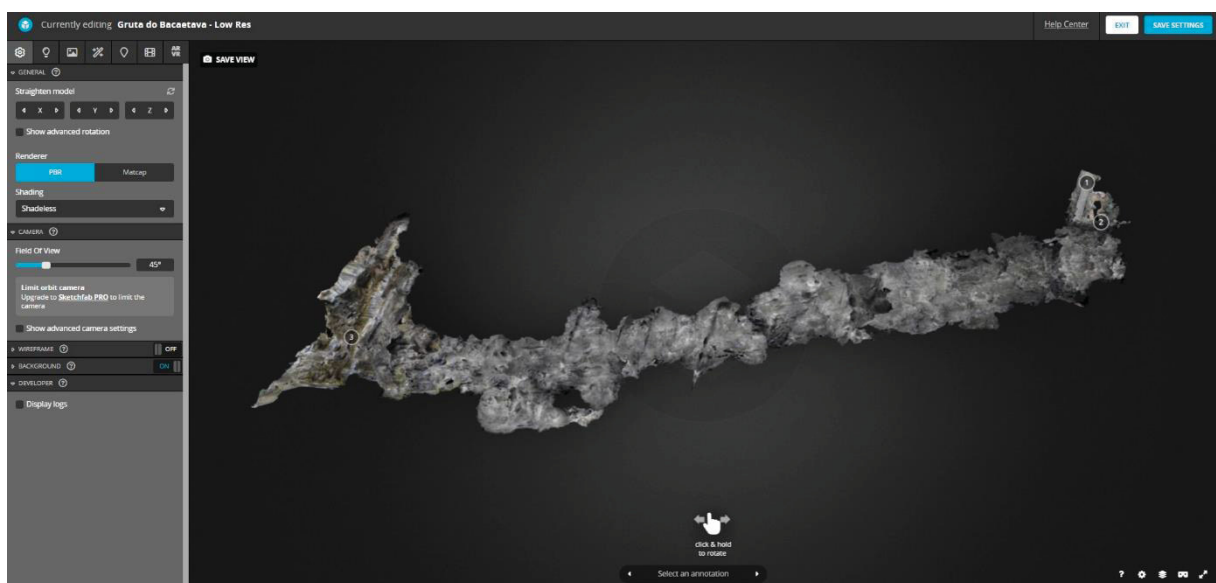
²⁷ Disponível em <https://skfb.ly/oP6Yy>. Acessado em 25 de dezembro de 2023.

²⁸ Disponível em <https://skfb.ly/oP6Yy>. Acessado em 25 de dezembro de 2023.

²⁹ Disponível em <https://skfb.ly/oPpEZ>. Acessado em 26 de dezembro de 2023.

como já anteriormente feito com outros modelos. E ainda que tenha aceitado a nuvem de pontos de forma isolada, o site Sketchfab.com não permitiu sua exibição sob a superfície topográfica quando de sua publicação. Acredita-se que seja algum problema na plataforma, alteração de política de utilização ou alguma restrição imposta aos usuários, uma vez que modelos integrados já foram carregados anteriormente na página em outros projetos.

FIGURA 146 - INTERFACE DE CONFIGURAÇÕES DO MODELO 3D NA PÁGINA SKETCHFAB.COM.



FONTE: Elaborada pelo autor, 2024.

O pacote com a visita virtual preliminar da Gruta do Bacaetava encontra-se disponível em provedor on line³⁰. A utilização de modelos 3D na configuração de visitas virtuais na plataforma Unreal Engine 5.3 oferece várias vantagens. Destacam-se o realismo gráfico avançado que permite a renderização de detalhes extremamente finos em modelos 3D. Isso contribui para uma experiência de visita virtual altamente imersiva e visualmente impressionante. A iluminação dinâmica, onde a luz interage de maneira realista com os objetos 3D, resultando em ambientes mais naturais e vívidos, contribuindo para a sensação de presença em uma visita virtual. Em termos de

³⁰ Disponível em https://mega.nz/folder/Q8U1BRLB#90CrnoQZfPqKFZdUP_tG2w. Acessado em 25 de dezembro de 2023.

interatividade, modelos 3D podem ser programados para interagir o usuário com informações contextuais sobre objetos específicos. A Unreal Engine oferece ferramentas para otimizar o desempenho, garantindo que a visita virtual funcione de maneira suave e eficiente, mesmo em hardware menos potente, com movimentação do avatar sendo feita através do teclado ou por controle do Xbox. Destaca-se a versatilidade deste software que suporta várias plataformas, incluindo PC, consoles e dispositivos móveis. Isso significa que as visitas virtuais podem ser acessadas por um amplo público, independentemente do dispositivo utilizado.

Em resumo, ao utilizar modelos 3D na configuração de visitas virtuais na Unreal Engine 5.3, você se beneficia de recursos avançados que contribuem para uma experiência virtual altamente realista, interativa e envolvente, sem custos para o licenciamento de software.

4.7 – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS DE LEVANTAMENTO

Ambas as abordagens apresentam vantagens e desvantagens distintas, variando em aspectos operacionais, necessidade de iluminação, produtos gerados, condições locais de uso, precisão, custos e tratamento dos dados e estão resumidas no QUADRO 15, com as vantagens em verde e as desvantagens em vermelho.

Em termos operacionais, ambos equipamentos possuem alta portabilidade, sendo que o scanner a laser possui baixa resistência enquanto instrumento, não sendo adequado para áreas com gotejamentos ou corpos hídricos, lama ou excesso de particulados em suspensão. No entanto, destaca-se pela baixa dificuldade de operação e baixo tempo de captura, sendo o processo de captura rápido mesmo em áreas complexas. Já a fotogrametria utiliza imagens capturadas por câmeras convencionais, permitindo uma operação mais flexível e acessível, sendo um instrumento relativamente mais robusto, com a desvantagem de que a necessidade de cobertura visual completa pode ser desafiadora nesses ambientes, especialmente em áreas de difícil acesso.

Em relação à iluminação, um dos requisitos mais críticos nesse ambiente, a varredura a laser não necessita de nenhuma fonte de iluminação auxiliar, com a desvantagem de não poder atribuir um valor de cor no sistema RGB ao ponto. A fotogrametria é totalmente dependente de fontes de iluminação, seja natural ou

artificial, sendo que a iluminação irregular pode resultar em sombras indesejadas nas imagens, impactando a qualidade dos modelos 3D. No entanto, tem a vantagem de atribuir um valor RGB ao ponto e resultar numa malha realística, fundamental para a discriminação das feições espeleológicas e das variações texturais da rocha.

No que se refere a produtos cartográficos como mosaicos de ortofotos e modelos digitais de superfície, a fotogrametria pode gerá-los facilmente, sendo estes texturizados e ricos em informações visuais. A varredura a laser, por não poder atribuir as texturas em função da não iluminação do ambiente, apresenta franca desvantagem nesse aspecto.

A varredura a laser oferece alta precisão geométrica, sendo ideal para a captura detalhada de superfícies complexas. Pode haver dificuldades em capturar detalhes minuciosos e áreas inacessíveis. A precisão do levantamento fotogramétrico mostrou-se muito próxima à da varredura a laser, ao menos para este estudo.

Embora os equipamentos sejam caros, a varredura a laser pode ser mais eficiente em termos de custos em áreas extensas ou quando a precisão é crucial, com a desvantagem de o investimento inicial poder ser proibitivo para orçamentos mais restritos.

Os dados provenientes da varredura a laser são geralmente mais fáceis de processar, resultando em nuvens de pontos densas e modelos 3D de alta qualidade. A quantidade de dados gerados pode exigir hardware e software especializados para processamento eficiente, sendo que a fotogrametria se mostra muito mais exigente nesse aspecto, resultando em muito maior tempo para a captura e para o pós-processamento.

A escolha entre fotogrametria e varredura a laser enquanto métodos de levantamento em ambientes subterrâneos depende das necessidades específicas do projeto, da disponibilidade de recursos e das condições locais. Compreender as vantagens e desvantagens de cada método é fundamental para tomar decisões nos processos de documentação e modelagem tridimensional de cavernas.

QUADRO 15 - COMPARATIVO ENTRE A VARREDURA A LASER TERRESTRE (TLS) E A FOTOGRAMETRIA DE CURTA DISTÂNCIA COM A VANTAGEM EM VERDE E DESVANTAGEM EM VERMELHO.

TLS	FOTOG
ASPECTOS OPERACIONAIS	
Alta portabilidade	Alta portabilidade
Baixa resistência do instrumento	Média resistência do instrumento
Baixa dificuldade de operação	Média dificuldade de operação
Baixo tempo de captura	Alto tempo de captura
Levantamento rápido em áreas complexas	Levantamento demorado em áreas complexas
ILUMINAÇÃO	
Sem necessidade de iluminação auxiliar	Depende totalmente da iluminação natural ou auxiliar
PRODUTOS	
Nuvem de pontos de intensidade	Nuvem de pontos em sistema RGB
Textura por pontos	Textura realística
Alta resolução de feições morfológicas de pequena escala	Alta resolução de feições morfológicas de pequena escala
CONDIÇÕES LOCAIS	
Susceptível a anomalias magnéticas	Não susceptível a anomalias magnéticas
Muito susceptível a particulados e vapor d'água	Menos susceptível a particulados e vapor d'água
Flexibilidade para capturar dados em espaços confinados	Pode haver dificuldades em ambientes estreitos
PRECISÃO	
Alta precisão garantida pelo fabricante	Precisão comparável com o TLS para distancias mais curtas
Alvos artificiais para registro individual de nuvens	Alvos artificiais para registro individual de imagens
CUSTOS	
Altos custos financeiros	Custos mais adequados
TRATAMENTO DOS DADOS	
Alta demanda computacional para os dados finais	Alta demanda computacional para os dados finais (nuvem de pontos e produtos cartográficos)
Mais tempo e dados demandados em grandes áreas	Mais tempo e dados demandados em grandes áreas
Tempo de processamento baixo	Tempo de processamento alto
Grande volume de dados gerados pelo projeto	Grande volume de dados gerados pelo projeto

FONTE: Modificado de Pukanská *et al.* (2020).

5 – CONCLUSÕES

A migração parcial ou total do ambiente analógico para o ambiente digital no processo de produção de mapas espeleológicos topográficos tem apresentado várias vantagens em termos de tratamento dos dados, instrumentação e novas formas de representação das feições espeleológicas. Ademais, a contínua melhora no desempenho computacional, capacidade de armazenamento e acessos a PC's conectados à Internet vêm contribuindo para o desenvolvimento de métodos de levantamento como a varredura a laser e a Fotogrametria de Curta Distância e consequente aplicação em ambientes subterrâneos.

Seguindo essa tendência, essa pesquisa parte da tese inicial acerca do potencial de utilização de modelos fotogramétricos 3D no processo de composição de mapas espeleológicos em ambiente digital. Este método, alternativo ao mapeamento topográfico convencional de cavidades subterrâneas foi denominado de Mapeamento por Modelagem 3D, tendo sido aplicado, com sucesso, o conduto principal da Gruta do Bacaetava utilizando-se de procedimentos majoritariamente automatizados para a extração e tratamento de informações espaciais utilizando softwares diversos.

A estratégia de automatização foi adotada em toda a cadeia operatória, como na obtenção das nuvens de pontos, na geração do mapa espeleológico, na obtenção das variáveis espeleométricas, nas formas de divulgação e compartilhamento, tendo por finalidades a agilização de processos, a diminuição da subjetividade, a reprodutibilidade, a execução de rotinas e produtividade.

Sendo que traçar um roteiro metodológico que contemplasse a composição de um mapa espeleológico e respectivo projeto cartográfico, os cálculos das variáveis espeleométricas e formas de compartilhamento e interação de modelos, passível de apropriação pelas comunidades espeleológica e geodésica foi definido enquanto objetivo geral desta pesquisa, uma série de procedimentos sequenciais foram estabelecidos para o seu desenvolvimento.

A precisão posicional da nuvem de pontos fotogramétrica gerada previamente foi dada por métricas como o erro médio quadrático (EMQ) dado pela diferença entre o valor do centro geométrico de um alvo obtido por levantamento topográfico com estação total a partir de um referencial geodésico e o valor obtido.

Adicionalmente, na varredura a laser a precisão do registro de nuvem a nuvem foi informada, estando sempre próxima ao erro nominal do instrumento. Todos os

resultados, na casa de milímetros, atestaram a qualidade posicional das nuvens de ambos métodos empregados, o que garante a precisão do mapeamento gerado a partir do modelo fotogramétrico. Este resultado é o suficiente para poder classificar a graduação da “topografia” da Gruta do Bacaetava enquanto Grau X (Topografia feita com teodolito ou meios comparáveis). No entanto, há de se considerar que a classificação da UIS precisa ser revista, uma vez que esta usa outras formas de mensuração que utilizam as variações angulares (horizontais e verticais) e a acurácia esperada (em %), além da precisão das distancias.

A validação da geometria da nuvem fotogramétrica foi dada pela comparação com a nuvem da varredura a laser, considerando suas distancias euclidianas, onde a maioria absoluta destas esteve associada ao menor intervalo de distância definido entre 0 e 6 cm, indicando alta correlação espacial entre ambas. O valor deste intervalo pode ser considerado baixo, tendo em vista as condições adversas em que o levantamento foi executado, havendo regiões específicas em que a fidelidade geométrica apresentou maior discrepância, como nas fraturas no teto, em reentrâncias e nas entradas da cavidade.

A nuvem de pontos da varredura a laser apresentou aspecto visual ruim quando comparada ao modelo fotogramétrico dada a ausência de uma textura em sistema RGB ocasionada pelo levantamento em ambiente afótico. Esta condição ocasionou perda de informação textural, o que impossibilitou a observação de feições em escala milimétrica e mesmo centimétrica. Deve-se atentar à distribuição das estações de varredura para se evitar excesso ou deficiência da densidade da nuvem de pontos. A baixa sobreposição em um par de varreduras, comum em situações em que o espaçamento entre estações esteja grande ou que haja grande variação morfológica dificulta o registro semi-automático e pode diminuir a precisão da nuvem. Sugere-se também, que seja informada a cobertura média, em metros quadrados, de uma estação de varredura a laser, informação que poderá ser utilizada na qualificação da precisão de um mapa obtido a partir deste método.

Em situações em que não esteja disponível o levantamento topográfico para atribuição de coordenadas aos alvos pode-se utilizar pares de alvos para a obtenção de escalas enquanto pontos de controle e pontos de checagem. Pode-se alinhar os dois alvos de uma escala a um determinado azimuth e atribuir coordenadas UTM obtidas por GPS de navegação aos pontos de controle, configurando alternativas para

a declinação e para o posicionamento em situações em que o modelo 3D não exija alta precisão.

O nível de detalhamento do mapa gerado depende do GSD do mosaico de ortofotos, do GSD do modelo digital de superfície, de variações texturais, das dimensões dos elementos espeleológicos e mesmo da escala do mapa. O mapa da Gruta do Bacaetava alcançou alto nível de detalhe, facilitado pela vetorização sobre mosaicos de ortofotos do teto e do piso, o que permite a representação das feições espeleológicas em escala e na posição correta. À exceção de feições de pequenas dimensões como canudos de fresco, coraloides e estalactites que são pouco visíveis nos mosaicos de ortofotos e que necessitam de levantamentos de campo para a complementação das feições espeleológicas, os demais elementos foram bem representados.

A nuvem fotogramétrica se mostrou mais completa no que se refere ao recobrimento das superfícies, resultando em menor número de oclusões e de menores dimensões do que a nuvem da varredura a laser. Esta apresentou um número elevado de oclusões, sendo vários de dimensões métricas. A explicação reside no fato de que na fotogrametria há uma ocupação de um número muito maior de estações, o que permite recobrir as superfícies de forma mais eficiente. Na varredura a laser, em função do menor número de estações, muitas oclusões ocasionadas pelas morfologias das superfícies por espeleotemas ou estruturas de visitação não tiveram como ser minimizadas. As dificuldades no fechamento das oclusões da nuvem da varredura a laser impossibilitaram o fechamento da malha e o consequente cálculo do volume da cavidade.

Os materiais constituintes das superfícies da cavidade tiveram reflexo direto nos resultados dos dois métodos de levantamento, aparentemente mais em termos de percepção visual do que em relação às possíveis deformações da geometria. As superfícies rochosas, apesar da relativa homogeneidade da textura do metacálcio e mesmo sofrendo os efeitos das variações na iluminação, ficaram bem representadas e aspecto visual próximo do natural no modelo fotogramétrico. A varredura a laser, não foi capaz de registrar este aspecto textural, uma vez que foi realizada em condições afóticas. Ambos os métodos apresentaram dificuldades na representação integral da drenagem, tendo registrado várias oclusões ao longo da cavidade e deformações locais da geometria do piso. Os escorrimentos, gotejamentos e o vapor

d'água ocasionaram pouca interferência, podendo ser consideradas desprezíveis. A representação das passarelas nos modelos fotogramétricos ficou comprometida devido à suas características construtivas, textura, dimensões, em especial, os corrimãos que apresentaram muitas descontinuidades. Em compensação, a representação bidimensional dos pisos das passarelas nos mosaicos de ortofotos mostrou-se muito precisa, ainda que tenha apresentado algumas oclusões. Na nuvem da varredura a laser, passarelas e corrimãos ficaram bem representados, ainda que com baixa densidade de pontos, tendo ocorrido oclusões no piso e em paredes. A vegetação ficou melhor representada na varredura do que no modelo fotogramétrico, mas foi removida das nuvens de ambos métodos, por comprometerem a visualização das entradas. A integração das nuvens de ambos os métodos visando o refinamento do modelo fotogramétrico agora poderá ser realizada em função da disponibilização deste procedimento em atualização recente do software utilizado.

A espeleometria do conduto principal da Gruta do Bacaetava teve suas variáveis calculadas a partir do modelo fotogramétrico e sua precisão posicional e geométrica está diretamente associada a este modelo 3D. Algumas variáveis espeleométricas pouco usuais foram apresentadas, podendo vir a enriquecer as comparações entre as características geométricas de modelos 3D. O volume, variável espeleométrica de difícil obtenção com o método convencional, é calculado de forma que pode ser considerada até banal com o uso de modelos 3D e procedimentos automatizados. Com o alto nível de precisão do modelo, variáveis como o gradiente hidráulico, ponto zero, ponto mais alto e ponto mais baixo podem ser facilmente determinados. Calculou-se, também, alturas e larguras médias de condutos, áreas e perímetros do contorno externo e do contorno do piso, a área e perímetro da projeção vertical longitudinal, área e perímetro da projeção vertical transversal, desníveis negativo, positivo e total, área da lamina d'água, além dos comprimentos das passarelas e do circuito turístico.

Tal qual ao caso da espeleometria, a precisão posicional e geométrica, além do nível de detalhamento atribuídos ao mapa espeleológico está relacionado diretamente à precisão do modelo fotogramétrico e resolução dos produtos cartográficos gerados. Os elementos cartográficos empregados para a representação das feições espeleológicas em formatos vetorial e raster foram resultantes da extração de informações espaciais diretamente do modelo 3D para a composição do *layout* do

mapa espeleológico em ambiente SIG. A extração e edição de dados vetoriais permitiu a reprodução das características geométricas do ambiente subterrâneo, proporcionando uma representação precisa e detalhada dos contornos e demais elementos das cavidades. A produção de modelos distintos para o piso e teto possibilitou uma representação completa da cavidade, oferecendo uma visão das características topográficas.

O produto principal desta pesquisa foi um mapa bidimensional, com todos os elementos tradicionais da cartográfica espeleológica (legenda, norte, mapas de inserção, gride de coordenadas, título, escala gráfica, dados técnicos e espeleométricos, etc.) em que se somou um conjunto novos elementos como hiperlinks e QRCodes dos modelos publicados na Internet e o modelo 3D visto em planta e de lado. O modelo digital de superfície em tons de cinza utilizado enquanto fundo do mapa representa, com detalhe, as variações topográficas e variações granulométricas dos depósitos clásticos da superfície do piso da cavidade, transmitindo uma percepção de tridimensionalidade, particularmente nos blocos. Os mosaicos de ortofotos do teto e do piso foram de fundamental importância enquanto referência para a vetorização de feições espeleológicas de interesse e na representação de dados no mapa espeleológico, conferindo alto nível de detalhamento dos temas. A representação tridimensional permitiu uma visualização mais clara e detalhada da cavidade, destacando padrões distintos, como a presença significativa de estalactites na terça parte inicial do conduto e a concentração de blocos na terça parte final, além de oferecer suporte a avaliações sobre as estruturas geológicas condicionantes.

Reconhece-se que existem lacunas na representação das feições espeleológicas de menores dimensões, que não são de fácil identificação nos mosaicos de ortofotos e modelos de superfície e menos ainda nas nuvens de varredura a laser, sendo que a complementação do mapa espeleológico deve ser realizada em campo.

Ainda que o mapa espeleológico possa ser composto totalmente em ambiente CAD, o uso do SIG traz vantagens como a facilidade na manipulação das camadas de dados especiais, a articulação e disposição dos elementos cartográficos, inclusão de mapas de inserção, variedade de símbolos e cores, inserção de elementos textuais e gráficos, entre outras possibilidades.

A extensa variedade de símbolos, espessuras de linhas e de cores disponibilizadas nos softwares possibilita uma diversidade de configurações. Esta diversidade de configurações pode acarretar dificuldades, como na diversidade e dimensionamento de ícones, campos e objetos, escolha de cores, tipos e espessuras de linhas, além de formas de visualização e composição do layout em razão das possíveis configurações de uma caverna. Para minimizar esse efeito, o conhecimento e a criação de projetos cartográficos devem ser estimulados, tendo em vista a inexistência de padronização dos mapas espeleológicos. Neste sentido, foi apresentado um projeto cartográfico estabelecendo as características da simbolização utilizada para os diversos elementos cartográficos e espeleológicos que, associado a um projeto SIG, podem ajudar na utilização do *layout* proposto.

Mapas espeleológicos geralmente representam uma cavidade desconectada do seu contexto geográfico exterior. Para minimizar esta recorrência, o modelo da cavidade integrado ao modelo do relevo topográfico foi gerado enquanto um produto complementar, ainda que as escalas de ambos modelos não estejam muito compatíveis, com potencial adequação com uso de aerolevanteamento com drone.

Modelos 3D e nuvens de pontos compartilhadas para o público em um repositório de modelos 3D têm permitido novas formas de visualização e interação e estão contribuindo na divulgação e fruição virtual do Patrimônio Natural. Novas formas de interação virtual com os modelos 3D *on-line*, recursos o uso de dispositivos de RV e gameficação foram apresentadas e merecem maior atenção no desenvolvimento de novos trabalhos. A combinação de modelos fotogramétricos de cavernas com modelos de relevo não apenas melhora a visualização e compreensão do espaço tridimensional, mas também amplia as possibilidades de aplicação em áreas como educação, planejamento e pesquisa, sendo de fácil compartilhamento através de links e QR Codes.

Os testes com a utilização do modelo fotogramétrico da cavidade numa plataforma de games foram feitos em um nível muito preliminar, apenas com a intenção de se avaliar o potencial de utilização. Se resumiram a testar o caminhar de um avatar pelo interior da cavidade em primeira pessoa, explorando formas de visualização. Em termos potenciais, o experimento pode ser melhor configurado com texturização e iluminação avançadas, tornando a visualização da caverna muito mais realista. É possível simular fenômenos naturais, como chuva ou

deslizamentos de terra, as diferentes condições climáticas ou realizar avaliações de risco. Considera-se que a visualização de dados espaciais em um ambiente interativo ajuda a identificar padrões e relações que podem não ser evidentes em modelos estáticos.

A avaliação comparativa entre os dois métodos empregados resumiu as vantagens e desvantagens no processo de levantamento da Gruta do Bacaetava, podendo diferir quando aplicados em outras cavidades, sendo que os fatores ambientais são variáveis de primeira grandeza na determinação do método de a ser utilizado. Tanto a varredura a laser terrestre quanto a fotogrametria não se mostram adequados a cavernas muito extensas, com grandes acidentes topográficos e volume d'água, excesso de lama ou particulados em suspensão.

Os resultados obtidos nesta pesquisa indicaram que as condições ambientais como a iluminação, a homogeneidade relativa da textura rochosa, a existência de estruturas como as passarelas, as variações granulométricas da lama a blocos, a circulação hídrica em suas diversas formas foram identificadas como o principal desafio durante os levantamentos por ambos os métodos e, conseqüentemente, afetaram a qualidade visual do modelo gerado de alguma forma. Em contrapartida, há de se destacar a facilidade no acesso e nos deslocamentos internos dadas as características morfológicas somadas à infraestrutura de visitação, a existência de amplas áreas secas além das dimensões relativamente pequenas da cavidade. Tais variáveis foram consideradas favoráveis na execução de ambos os levantamentos, contribuindo na obtenção de maior índice de cobertura de uma superfície fractal e nível de precisão.

No entanto, ambos métodos se apresentam inadequados para levantamentos de cavidades com grandes desenvolvimentos ou volumes, cavernas verticais, ou de excessiva complexidade morfológica, sendo a varredura menos restritiva nesse aspecto. Ao contrário, em cavidades relativamente pequenas ou em locais que necessitem alto nível de detalhamento, poderão ser empregados com sucesso.

Em termos técnicos, a iluminação irregular das superfícies no processo de registro fotográfico apresentou-se como o desafio mais significativo, influenciando diretamente a captura de detalhes necessários para a construção do modelo fotogramétrico uma vez que as condições de luz variáveis geraram áreas de sombras ou com subexposição em determinadas regiões do modelo. Para minimizar possíveis

efeitos na geometria dos modelos fotogramétricos, um maior número de capturas foi realizado, sendo que o alto número de fotos alinhadas reforça essa perspectiva. No entanto, as variações de iluminação parecem ter influenciado com maior intensidade a textura desses modelos, sendo o resultado agravado pela relativa homogeneidade textural da rocha.

Na varredura a laser, optou-se por não utilizar fontes de iluminação, uma vez que a nuvem a ser gerada teria a função apenas de servir de referência geométrica para a comparação com o modelo fotogramétrico. A não utilização de iluminação dificultou a representação em alta resolução dos alvos, tendo repercutido na precisão relativa da nuvem de pontos. É recomendado que as estações de varredura sejam posicionadas mais próximas aos alvos e entre si, de forma a melhorar sua representação e inserção dos marcadores dos pontos de controle a aumentar a sobreposição dos pontos das nuvens. Ainda que haja a possibilidade de utilização em ambientes afóticos, há de se considerar que a varredura a laser realizada nestas circunstâncias não registra as cores dos pixels no sistema RGB, ocasionando perda de informação textural das superfícies levantadas.

Operacionalmente, a varredura a laser apresenta um processo de captura simplificado, sendo que o instrumento utilizado pode ser pré-configurado e possui apenas um botão de operação, o que minimiza os erros. Já o levantamento fotogramétrico depende da cobertura total das superfícies com sobreposições horizontais e verticais de 50% e capturas redundantes. Tanto o scanner a laser quanto a câmera fotográfica apresentam alta portabilidade e a autonomia é definida pelo número de baterias disponíveis ou possibilidade de recarregamento próximo.

Ambos métodos exigem alta capacidade computacional e de armazenamento, não podendo ser realizado em máquinas com configuração básica. O tempo de processamento dos modelos fotogramétricos é superior ao tempo de processamento da varredura a laser, onde o registro semi-automático agiliza o processo. Em situações de baixa sobreposição das nuvens, o registro torna-se mais lento e pode haver diminuição da precisão do registro nuvem a nuvem. Em ambos os casos, os projetos podem ocupar grande espaço no armazenamento. A modelagem fotogramétrica e o registro das nuvens da varredura a laser foram realizados em softwares comerciais, ainda que haja softwares livres para esses procedimentos. Para

as análises das nuvens de pontos existe software livre, tanto quanto para a composição do mapa espeleológico em ambiente SIG.

Ambos métodos podem ser utilizados para a geração de produtos cartográficos além dos modelos tridimensionais como modelos digitais de superfície e dos mosaicos de ortofotos, desde que sejam realizados em ambientes iluminados. Nesta pesquisa, os mosaicos de ortofotos do piso e do teto, além do MDS do piso foram gerados apenas a partir da modelagem fotogramétrica dada a necessidade da representação textural realista das superfícies.

Além dos recursos computacionais, equipamentos e softwares, há de se considerar a necessidade de capacitação de pessoal, com larga vantagem para o escaneamento terrestre dadas às facilidades operacional e processual deste método de levantamento.

Em suma, a escolha de um método de levantamento deve avaliar uma série de características para que se obtenham resultados adequados entre o que foi proposto e o que foi obtido. Tais características partem da natureza do que está sendo documentado, passando pela disponibilidade de recursos financeiros, computacionais e humanos, eficiência, qualidade dos dados, produtos, entre outras possibilidades.

Analisado enquanto sua contribuição para o conhecimento existente acerca da cartografia espeleológica, o método ora proposto mostra-se como alternativa ao mapeamento tradicional e ao levantamento por varredura a laser, podendo ser assimilado pela comunidade espeleológica em projetos que exijam precisão geométrica e textura realista e/ou que disponham de poucos recursos para aquisição de instrumentos. Em termos mais específicos, o mapa e os modelos gerados podem vir a enriquecer a cartografia existente para a Gruta do Bacaetava e a dar suporte ao manejo, à pesquisa e a divulgação da cavidade, sendo um exemplo da evolução do mapeamento espeleológico brasileiro. O método de mapeamento proposto tem implicações teóricas e práticas, uma vez que seu domínio exigirá uma maior diversidade de conhecimentos, acesso aos instrumentos e familiaridade com um maior número de softwares.

No que se refere à relevância deste estudo para a comunidade espeleológica, destaca-se o ineditismo da proposta que apresenta uma abordagem inovadora na geração de mapas espeleológicos, empregando produtos fotogramétricos como base através de uma sequência de procedimentos descritos e que orientam sua

reprodutibilidade. O método de mapeamento por modelos 3D pode ser aplicado em grutas³¹ e potencialmente simas³², minas históricas, estruturas arquitetônicas, abrigos-sob-rocha, sítios arqueológicos de superfície e mesmo artefatos ou espeleotemas, incluindo os ambientes sub-aquáticos. Em comparação ao método de mapeamento convencional, se mostra muito mais detalhado e preciso, além de ser produzir as métricas que suportam essa avaliação. Os resultados obtidos indicam a necessidade de revisão das tabelas de classificação da precisão e grau de detalhamento UIS e BCRA para o pleno enquadramento de mapas gerados pelo método proposto.

De forma a divulgar o método de mapeamento através de modelos 3D e contribuir para a sua reprodutibilidade em outras cavidades, apresentou-se um protocolo de procedimentos sequenciais para a geração do mapa espeleológico e para o cálculo das variáveis espeleométricas. E no momento de finalização da redação da presente tese, El Hajjar (2024) utilizou-se do método de mapeamento ora proposto para produzir a cartografia base para o mapeamento espeleológico do conduto superior da Gruta do Bacaetava a partir da varredura a laser. A base cartográfica produzida apresentou alta precisão, com erros de registro das nuvens de pontos de 7 mm, próximo à precisão nominal do equipamento, vindo a demonstrar a aplicabilidade e reprodutibilidade do método de mapeamento por modelos 3D.

E em resposta às perguntas apresentadas na introdução pode-se afirmar que a construção de mapas espeleológicos poderá ser realizada através da extração e edição vetoriais sobre modelos 3D utilizando-se de procedimentos automatizados e manuais, softwares adequados e de modelos com nível de precisão conhecido. Pode-se afirmar também, que a qualidade dos modelos fotogramétricos no aspecto da geometria se equipara aos modelos gerados por varredura a laser, sendo superior em termos de textura e cobertura.

E ainda que a utilização de modelos possa resultar em representações 3D, um mapa espeleológico deverá continuar a ser apresentado em formato 2D, seja impresso ou inserido em relatórios digitais em formato PDF. Mapas vetoriais em formato 3D são de difícil leitura dada a sobreposição de linhas de contornos e demais elementos espeleológicos cartografados. De fato, a representação tridimensional

³¹ Refere-se às cavernas com desenvolvimento predominantemente horizontal.

³² Refere-se às cavernas com acesso ou desenvolvimento vertical.

deve ser vista enquanto uma forma adicional ou complementar para a visualização de uma caverna, não sendo, necessariamente, superior à representação em 2D (Jaillet 2022).

Independentemente da forma, nenhuma representação parece ser plenamente satisfatória. A representação plana, seja de plantas ou cortes, é insuficiente para apresentar a diversidade morfológica e o alto nível de detalhes simultaneamente, requerendo um esforço cognitivo para a reconstrução da geometria e percepção da tridimensionalidade (Jaillet 2014). Ademais, se as representações em 3D geram novas possibilidades, também geram novos desafios em termos de recursos gráficos, de necessidade de maior expertise, formas de apresentação dos produtos gerados, entre outras possibilidades.

5.1 - RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a abrangência da pesquisa realizada, é fundamental reconhecer que, embora tenham sido abordados aspectos substanciais e significativos, alguns pontos importantes não puderam ser totalmente explorados devido ao escopo do estudo, viabilidade temporal e recursos disponíveis. Recomenda-se, portanto, que futuros trabalhos incluam tópicos específicos que possam ter sido negligenciados durante esta pesquisa, mas que possam promover uma visão mais completa do tema, sugeridos a seguir.

A precisão e o nível de detalhamento dos mapas espeleotopográficos brasileiros são definidos pelas classificações da UIS e, mais comumente, da BCRA dada a sua simplicidade. No entanto, os levantamentos topográficos de cavernas no Brasil não se utilizam dos procedimentos de ajustamento para definir o nível de precisão, além de que tais levantamentos não são considerados topográficos pela NBR 13333 (ABNT, 2021). Mas dadas as características do método de mapeamento através de modelos 3D, abre-se a possibilidade de avaliação da qualidade do produto cartográfico segundo as diretrizes da ET-CQDG (DSG, 2016). Este documento apresenta o conceito de qualidade, o processo de avaliação e seus componentes, como a completude, consistência lógica, consistência topológica, acurácia posicional (planimétrica e altimétrica), acurácia temporal e temática e o formato de um relatório de qualidade. Tal avaliação não foi realizada neste estudo e sugere-se que seja aplicada aos possíveis mapas a serem gerados utilizando-se do método proposto.

Pode-se, também, estudar formas de compatibilizar o PEC PCD³³ ou a ET-CQDG para com a classificação da UIS, uma vez que essa referência não estabelece valores para as dimensões lineares e angulares, pressupondo-se que sejam menores que a classe 6.

Esforços também devem ser feitos para a revisão das Normas e Convenções Espeleométricas da SBE (1991), adequando o documento às novas formas de levantamento experimentadas nas últimas décadas, às novas possibilidades de representação cartográfica e formas de compartilhamento e divulgação.

Esta pesquisa encontrava-se em estágio avançado quando a atualização da versão do software Agisoft Metashape de 1.8.3 para 2.0.1 revelou uma nova função que permitiu a junção da nuvem de pontos da varredura a laser para com a nuvem de pontos fotogramétrica e a constituição de uma malha mais refinada. Testes preliminares demonstraram haver uma melhoria significativa na modelagem de estruturas como os corrimãos das passarelas e mesmo da drenagem. Tal melhoria na geometria do modelo 3D da cavidade repercutiu na precisão do posicionamento dos pontos de controle e dos pontos de checagem da ordem de 1 a 3 mm. Dada a restrição de tempo para refazer todos os procedimentos de geração de modelos, extração vetorial, geração dos produtos cartográficos, revisão dos cálculos espeleométricos e composição de nova versão do mapa espeleológico, optou-se pela manutenção dos modelos fotogramétricos originais, já suficientemente adequados.

Deve ser feita a integração dos dados do conduto principal e do conduto superior da Gruta do Bacaetava de forma a produzir um modelo 3D e um mapa integral da cavidade. Para tanto, se faz necessário o georreferenciamento por GNSS da nuvem de pontos do conduto superior visando a integração com a nuvem fotogramétrica do conduto base, a finalização da cartografia espeleológica, a atualização do mapa final e do projeto cartográfico e respectivas variáveis espeleométricas. O modelo com os dois condutos conectados de forma expedita e o

³³ O Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais – PEC PCD refere-se a um conjunto de critérios ou especificações que definem a precisão e a qualidade dos produtos cartográficos, como mapas, cartas e outras representações gráficas da superfície terrestre. Esse padrão estabelece os requisitos mínimos que um produto cartográfico deve atender para ser considerado preciso e confiável. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm e acessado em 07 de fevereiro de 2024.

relevo topográfico³⁴ também precisa ser atualizado, sendo que erros na conexão irão refletir em erros nas variáveis espeleométricas, notadamente no desnível.

O cálculo da dimensão fractal de uma caverna com base em um modelo fotogramétrico 3D pode fornecer elementos de análise sobre a complexidade e a estrutura da caverna. A dimensão fractal é uma medida que descreve a irregularidade ou complexidade de um objeto geométrico, e é especialmente útil para descrever estruturas complexas e irregulares, como cavernas, podendo se tornar uma variável espeleométrica. Uma pesquisa que envolva o desenvolvimento de procedimentos para o cálculo da dimensão fractal deve ser incentivada e viabilizada.

Foi abordada de forma muito superficial a utilização da plataforma Unreal Engine na geração de uma visita virtual na Gruta do Bacaetava, que se restringiu à movimentação do avatar no modelo fotogramétrico da caverna. A visita virtual preliminar necessita de melhoramentos para se tornar uma experiência mais realista. Necessita-se, primariamente, buscar formas de importação do modelo 3D para o projeto sem que haja a simplificação exagerada da malha. Segue-se com a configuração do ambiente, com elementos do tipo vegetação, água, relevo, rochas e a iluminação externa e interna. Junto às diversas feições espeleológicas podem ser inseridos elementos informativos na forma de janelas, acessíveis quando da proximidade com o avatar. O avatar, por sua vez, precisa ter maior diversidade de movimentos como o agachamento e rastejamento, configurações ainda não implementadas, melhorando a experiência do usuário. Necessária, também, a aplicação das características do espeleólogo ao avatar, como o capacete, macacão, botas, mochila e lanterna de cabeça.

Caso a visita virtual seja destinada à VR, funcionalidades específicas para *headsets* como Oculus Rift 2, Quest 3 ou HTC Vive deverão ser implementadas. Feitos os melhoramentos, testes podem ser propostos para se avaliar a navegabilidade, "imersibilidade", os recursos adicionais, realismo dos aspectos texturais, entre outros. Deve-se buscar, também, o compartilhamento da visita virtual enquanto um aplicativo independente para diversas plataformas, como PC, consoles, celulares ou até mesmo com estações de realidade virtual.

A visita virtual à Gruta do Bacaetava pode se tornar uma ferramenta educativa e de conscientização sobre a importância da preservação dos ambientes subterrâneos

³⁴ Disponível em <https://skfb.ly/oWrKB> e acessado em 31 de julho de 2024.

e a democratização do seu acesso, mesmo para aqueles que não possam visitar fisicamente o local. Escolas podem utilizar a visita virtual como uma ferramenta, permitindo que alunos aprendam sobre a geologia, ecologia e história da gruta de forma interativa. Recursos interativos na Unreal Engine, como o acesso a informações em pontos específicos podem aumentar o engajamento dos visitantes, oferecendo uma experiência mais rica a potenciais turistas, destacando a beleza e importância do Parque Municipal da Gruta do Bacaetava.

Devem ser buscados novos repositórios de modelos 3D com inscrição gratuita, testar suas funcionalidades e avaliar possíveis ganhos em relação ao Sketchfab.com. Esta iniciativa deve se estender a repositórios de mosaicos de ortofotos, de modelos digitais de superfície e do mapa espeleológico.

A geração de modelos que integram o ambiente subterrâneo à superfície topográfica deve ser explorada, uma vez que existem diversas vantagens na representação do ambiente em que a caverna está inserida como para a contextualização geoespacial, análise de padrões de drenagem, visualização integrada, avaliações de riscos, monitoramentos ambientais e na modelagem de ecossistemas subterrâneos. Utilizados enquanto ferramentas educacionais ou de divulgação, estes modelos podem ser úteis a estudantes, pesquisadores e o público em geral compreendam melhor a complexidade da relação entre ambientes epígeos e hipógeos.

Por fim, mas não menos importante, a estratégia de automatização de processos neste trabalho buscou softwares comerciais e livres que realizassem tarefas necessárias às diversas etapas de geração do mapa espeleológico. Como o objetivo é minimizar os trabalhos manuais, recomenda-se que se busquem novos softwares e a implementação novos procedimentos através de *scripts* ou *lisps* voltados à eliminação de *outliers* das nuvens de pontos, à classificação temática, rotação e translação de contornos, cálculos espeleométricos, entre outras possibilidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU ZEID, N.; BIGNARDI, S.; RUSSO, P.; PERESANI, M. Deep in a Paleolithic archive: Integrated geophysical investigations and laser-scanner reconstruction at Fumane Cave, Italy. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 27, n. July, p. 1–10, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.101976>>. .
- ALBERT, G. Aspects of Cave Data Use in a GIS. **Cave Investigation**. p.47, 2017. InTech. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/cave-investigation/aspects-of-cave-data-use-in-a-gis>>. .
- ALESSANDRI, L.; BAIOCCHI, V.; DEL PIZZO, S.; et al. THREE-DIMENSIONAL SURVEY OF GUATTARI CAVE WITH TRADITIONAL AND MOBILE PHONE CAMERAS. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, n. 2/W11, p. 37–41, 2019.
- ALESSANDRI, L.; BAIOCCHI, V.; DEL PIZZO, S.; et al. A flexible and swift approach for 3D image-based survey in a cave. **Applied Geomatics**, p. 15, 2020. Applied Geomatics. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s12518-020-00309-4>>. .
- AM ENDE, B. A. 3D mapping of underwater caves. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 21, n. 2, p. 14–20, 2001.
- AMARO, V. E.; DE ALMEIDA, J. E.; SCUDELARI, A. C.; DE MATOS, M. DE F. A.; GOMES, W. V. Estimativa do volume erodido e da taxa de retração em curto prazo na falésia marinha ativa da Barreira do Inferno com o uso de Laser Scanner Terrestre. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 22, n. 3, p. 578–603, 2021.
- ARAÚJO, A. H. ESPELEOMETRIA: UMA ABORDAGEM TÉCNICO-CIENTÍFICA. In: Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE (Org.); Anais do 20º Congresso Nacional de Espeleologia. **Anais...** . p.25–39, 1989. Brasília.
- ARAÚJO, R. N. **LEVANTAMENTO DE PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DE UMA CAVIDADE NATURAL SUBTERRÂNEA UTILIZANDO TECNOLOGIAS DE**

LASER SCANNER 3D E REALIDADE VIRTUAL, 2016. Universidade Federal de Ouro Preto.

ARAÚJO, R. N.; MUNIZ, F.; SILVA, B. R.; BRANDI, I. CONTROLE MORFOLÓGICO DE CAVIDADES COM A UTILIZAÇÃO DE LASER SCANNER MORPHOLOGICAL CAVES CONTROL WITH THE USE OF LASER SCANNER ANAIS do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia. In: Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE (Org.); ANAIS do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia. **Anais...** . v. 1, p.129–136, 2015. Eldorado.

ARTUGYAN, L. USING GIS FOR CAVES MODELLING AND ANALYSIS. THE STUDY CASE OF ANINA MINING AREA (BANAT MOUNTAINS, ROMANIA). **Analele Universității din Oradea**, v. 5, n. 2, p. 261–268, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13133 - 2021**. Rio de Janeiro, 2021.

AUDI, C.; BUCHMANN, F. S. MODELO DIGITAL TRIDIMENSIONAL DE UMA PALEOTOCA ATRIBUÍDA A PREGUIÇAS GIGANTES (Megaichnus major). In: UNESP (Org.); Anais do Simpósio de Biodiversidade de Ambientes Costeiros. Década da Restauração de Ecossistemas. **Anais...** . p.12, 2021. São Vicente.

AUDI, C.; MEYER, D.; YEOW, T. T.; et al. Photogrammetry of an excavated ichnofossil by giant sloths (Megaichnus major). **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 25, n. 3, p. 208–218, 2022.

AULER, A. Espeleologia No Brasil: Uma Abordagem Histórica. **Revista Espeleo-Tema**, v. 18, n. January, p. 23–30, 1997.

AULER, A. S. Qual a maior caverna do Brasil? **Boletim Informativo SBE**, , n. 8, p. 19–20, 1986.

AULER, A. S.; RUBBIOLI, E. L.; MASSOTI, F. S. Evolução metodológica no mapeamento da Toca da Boa Vista, Campo Formoso, BA. **Revista Espeleo-Tema**, v. 16, p. 25–40, 1992.

BARTOŠ, K.; PUKANSKÁ, K.; RAKAY, Š.; SABOVÁ, J.; BELLA, P. 3D digital mapping of cave spaces in Slovakia by terrestrial laser scanning. **Advances and Trends in Geodesy, Cartography and Geoinformatics**. p.9–14, 2018. CRC Press.

Disponível

em:

<<https://www.taylorfrancis.com/books/9780429012891/chapters/10.1201/9780429505645-2>>. .

- BENANI, H.; BOUDAD, L.; RHINANE, H.; NEHILI, A. Modélisation 3D et apport du SIG dans l'exploitation de l'endokarst: cas de la grotte Aziza, province d' Errachidia , Maroc. In: International Speleological Society (Org.); Proceedings of the 18th International Conference on 3D Web Technology - Web3D '13. **Anais...** . v. VI, p.75–78, 2022. Savoie Mont Blanc.
- BERCEA, S.; NĂSTASE-BUCUR, R.; MIREA, I. C.; et al. Novel approach to microbiological air monitoring in show caves. **Aerobiologia**, v. 34, n. 4, p. 445–468, 2018.
- BESANÇON, L.; YNNERMAN, A.; KEEFE, D. F.; YU, L.; ISENBERG, T. The State of the Art of Spatial Interfaces for 3D Visualization. **Computer Graphics Forum**, v. 40, n. 1, p. 293–326, 2021.
- BISHOP, R.; MONSALVE, J.; BAGGETT, J.; SONI, A.; RIPEPI, N. A comparison of laser scanning and photogrammetry in an underground limestone mine. **2019 SME Annual Conference and Expo and CMA 121st National Western Mining Conference**, , n. February, p. 1–4, 2019.
- BITTENCOURT, A. DE U. Gruta dos Estudantes. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 486–489, p. 1275–1291, 1945.
- BLAIS, F. Review of 20 years of range sensor development. **Journal of Electronic Imaging**, v. 1, n. 13, p. 231–240, 2004.
- BLEISCH, S. 3D GEOVISUALIZATION – DEFINITION and STRUCTURES for the ASSESSMENT of USEFULNESS. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 1, n. February, p. 129–134, 2012.
- BOGGUS, M.; CRAWFIS, R. Explicit Generation of 3D Models of Solution Caves for Virtual Environments.pdf. **Computer Graphics and Virtual Reality**, , n. January 2009, p. 85–90, 2009. Disponível em: <<http://sci2ools.com/read/explicit-generation-of-3d-models-of-solution-caves-for-virtual-environments-238645>>. .

- LE BRET, M. Estudos Espeleológicos no Vale do Alto Ribeira. **Boletim Geográfico**, , n. 214, p. 10–52, 1970.
- BROWN, K. A. R.; CHALMERS, A.; SAIGOL, T.; GREEN, C.; D'ERRICO, F. An automated laser scan survey of the upper palaeolithic rock shelter of Cap Blanc. **Journal of Archaeological Science**, v. 28, n. 3, p. 283–289, 2001.
- BÜYÜKSALIH, G.; KAN, T.; ÖZKAN, G. E.; et al. Preserving the Knowledge of the Past Through Virtual Visits: From 3D Laser Scanning to Virtual Reality Visualisation at the Istanbul Çatalca İnceğiz Caves. **PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science**, v. 88, n. 2, p. 133–146, 2020. Springer International Publishing. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s41064-020-00091-3>>. .
- CALUX, A. Espeleometria no contexto do licenciamento ambiental. In: SEE (Org.); Simpósio de Espeleologia e Legislação Ambiental. **Anais...** . p.45, 2018. Ouro Preto.
- CANDIOTTO, L. Z. P. **Turismo Rural na Agricultura Familiar: Uma Abordagem Geográfica do Circuito Italiano de Turismo Rural (CITUR), Município de Colombo - PR**, 2007. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.
- CARVALHO, B. P.; CARNIELI, A. L.; SANTOS, J. L.; VERISSIMO, C. U. V. ESPELEOMETRIA E MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA GRUTA CASA DE PEDRA, MADALENA – CE. XXXV Encontro de Iniciação Científica. **Anais...** . v. 15, p.20–31, 2016. Fortaleza. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1191/026921501677557755>>. .
- CECAV. **IV Curso De Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília, 2016.
- CHABERT, C. Sobre Alguns Problemas de Espeleometria com a Ajuda de Exemplos Brasileiros. **Revista Espeleotema**, v. 16, p. 15–21, 1992.
- CHABERT, C. ET ALII. **Atlas du Janelão**. Paris, 2003.
- CHABERT, C.; WATSON, R. A. Mapping and measuring caves: a conceptual analysis. **NSS Bulletin**, v. 43, n. 1, p. 3–11, 1981.
- CHALIKAKIS, K.; PLAGNES, V.; GUERIN, R.; VALOIS, R.; BOSCH, F. P. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: An overview.

- Hydrogeology Journal**, v. 19, n. 6, p. 1169–1180, 2011.
- COLLET, G. Mapeamento Topográfico da Caverna de Bacaetava. **Boletim da Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE / PARANATUR**, 1976.
- CORVI, M. Cave Surveying in 2017. , 2017. Disponível em: <<http://marcocorvi.altervista.org/caving/notes/Varenna-20170429.pdf>>. .
- CROWL, D. SOURCES OF ERROR IN CAVE SURVEYS. **Compass & Tape**, v. 2, n. 1, p. 14–18, 1984.
- CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. (ORG. . **Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília, 2019.
- CRUZ, L. C.; SILVÉRIO, M. S.; FARIAS, V.; SILVÉRIO, V. S.; LORIA, A. MAPEAMENTO E MODELAGEM 3D DA GRUTA DENTE VERMELHO : FRUTO DA EXPEDIÇÃO TOCANTINS. In: Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE (Org.); ANAIS do 34º Congresso Brasileiro de Espeleologia. **Anais...** . p.173–179, 2017. Ouro Preto.
- CURL, R. L. On the Definition of a Cave. **Bulletin of the National Speleological Society**, v. 26, n. 1, p. 1–6, 1964. Disponível em: <<http://yxw.caves.org/pub/journal/PDF/V26/v26n1-Curl.htm>>. .
- CUSTÓDIO, R. P.; DANTAS, M. A. T.; PRATA, A. P. DO N.; DONATO, C. R.; DUARTE, L. M. O turismo virtual de cavernas como instrumento didático-inclusivo. **Nature and Conservation**, v. 6, n. 2, p. 70–84, 2014.
- DALMOLIN, Q. Ajustamento por Mínimos Quadrados. , 2002. Curitiba: Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - UFPR.
- DAVIS JÚNIOR, C. A. Cartografia Automatizada e SIG. , p. 16, 1997. Disponível em: <https://homepages.dcc.ufmg.br/~clodoveu/files/100.40/AC016.1997Cartografia_automatizada_e_SIG.pdf>. .
- DESPAIN, J.; FRYER, S. Hurricane Crawl Cave: A GIS-based cave management plan analysis and review. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 71–76, 2002. The National Speleological Society - NSS.
- DRUMOND, A. S.; BITTENCOURT, C.; ARAÚJO, É. C. DE. Uso do Scanner à Laser

na Cartografia Espeleológica 3D. In: Resdespeleo (Org.); Anais do I Encontro Brasileiro de Estudos do Carste. **Anais...** . p.24, 2004. Belo Horizonte.

DSG. NORMA DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS GEOESPACIAIS (ET-CQDG). 2016. Disponível em: <<http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/index.php/inde2?id=142>>. .

ECOSSISTEMA CONSULTORIA AMBIENTAL. PLANO DE MANEJO PARQUE NATURAL MUNICIPAL GRUTA DO BACAETAVA: ENCARTE II. , 2016. Curitiba.

EL HAJJAR, B. C.. **LEVANTAMENTO CARTOGRÁFICO POR MEIO DE ESCANEAMENTO A LASER PARA MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO DO CONDUTO SUPERIOR DA GRUTA DO BACAETAVA - COLOMBO/PR**, Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2024.

EL-HAKIM, S. F.; FRYER, J.; PICARD, M. Modeling and visualization of Aboriginal rock art in the Baiame Cave. **Proceedings of the XXth congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing: 12-23 July 2004: Istanbul, Turkey. Commission V, Working Group V/2**, p. 990–995, 2004.

FABBRI, S.; SAURO, F.; ROSSI, G.; WAELE, J. DE. 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. **Geomorphology**, v. 280, p. 16–29, 2017.

FAHLE, L.; HOLLEY, E. A.; WALTON, G.; PETRUSKA, A. J.; BRUNE, J. F. Analysis of SLAM-Based Lidar Data Quality Metrics for Geotechnical Underground Monitoring. **Mining, Metallurgy and Exploration**, v. 39, n. 5, p. 1939–1960, 2022. Springer International Publishing. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s42461-022-00664-3>>. .

FARELLA, E. M. 3D mapping of underground environments with a hand-held laser scanner. , p. 1–10, 2016.

FARIA, L. E.; BARBOSA, K.; FERNANDES, A. S.; et al. Tecnologias 3D : digitalização de uma caverna na Serra do Baldim , MG. In: I.- UFMG (Org.); Anais do IV

Simpósio Mineiro do Carste. **Anais...** . p.85–86, 2019. Belo Horizonte: Instituto de Geociências da UFMG.

FERRARI, J. A.; MANGIN, A. MODELAGEM GEOMÉTRICA 3D E ANÁLISE ESPACIAL DE SISTEMAS CÁRSTICOS COM O USO DE OPENGL E SQL. , p. 1–8, 2001.

FERREIRA, J. S.; SANTOS, C. P. S.; GOMES, R. G.; ZANETTE, F. C.; GOMIDE, E. D. C. Análise dos levantamentos topográficos 3D realizados por laser scanner e por rpa para projetos geométricos de estradas. **Revista Paramétrica**, v. 12, p. 732–746, 2020.

FIGUEIREDO, L. A. V. DE. História Da Espeleologia Brasileira: Protagonismo E Atualização Cronológica. **ANAIS do 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia**, p. 21–24, 2011.

FISH, L. Blunder Location. **Compass & Tape**, v. 12, n. 40, p. 26, 1996.

FISH, L. The Problem with Least Square Loop Closures. **Compass & Tape**, v. 13, n. 41, p. 15–18, 1997.

FISH, L. Rebuttal: Simultaneous vs Sequential Loop Closures. **Compass & Tape**, v. 13, n. 44, p. 15–19, 1998.

FISH, L. HOW COMMON ARE BLUNDERS IN CAVE SURVEY DATA? , p. 5, 1999a. Disponível em: <<https://sacs.caves.org/resources/comblund.pdf>>. .

FISH, L. Compass and Surveyor variability analysis How many blunders does your cave have ? Survey Archive Update. , , n. 25, p. 1–16, 1999b.

FRANK, H. T.; CARON, F.; GONÇALVES DE LIMA, L.; et al. Paleotocas e o Cadastro Nacional de Cavernas Brasileiras - Uma Discussão. , p. 11, 2010.

FRANKE, K.; MÜLLER, H. Procedural generation of 3D karst caves with speleothems. **Computers and Graphics (Pergamon)**, v. 102, p. 533–545, 2022. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.10.002>>. .

GALLAY, M.; HOCHMUTH, Z.; KAŇUK, J.; HOFIERKA, J. Geomorphometric analysis of cave ceiling channels mapped with 3-D terrestrial laser scanning. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 5, p. 1827–1849, 2016. Disponível em:

<<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/1827/2016/>>. .

GALLAY, M.; KAŇUK, J.; HOCHMUTH, Z.; et al. Large-scale and high-resolution 3-D cave mapping by terrestrial laser scanning: a case study of the Domica Cave, Slovakia. **International Journal of Speleology**, v. 44(3), p. 277–291, 2015.

GAMA, M. DA; BRAGA, M. A.; BARBOSA, M. R.; DE PAULA, R.; BRANDI, I. Geophysics applied to litho-structural mapping of iron caves, Carajás, Brazil. Proceedings of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society&Expogef. **Anais...** . p.1–5, 2019. Brazilian Geophysical Society. Disponível em: <[https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/16th_CISBGf/session/NEAR SURFACE/Geophysics applied to litho-structural mapping of iron caves, Carajás, Brazil.pdf](https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/16th_CISBGf/session/NEAR_SURFACE/Geophysics%20applied%20to%20litho-structural%20mapping%20of%20iron%20caves,%20Caraj%C3%AAs,%20Brazil.pdf)>. .

GAO, Y.; ZHOU, W. Advances and challenges of GIS and DBMS applications in karst. **Environmental Geology**, v. 54, n. 5, p. 901–904, 2008.

GEDE, M.; UNGVÁRI, Z.; KISS, K.; NAGY, G. Open-source web-based viewer application for TLS surveys in caves. In: International Cartographic Association ICA (Org.); Proceedings of the 1st ICA European Symposium on Cartography. **Anais...** . p.334–341, 2015. Vienna.

GEROVASILEIOU, V.; TRYGONIS, V.; SINI, M.; KOUTSOUBAS, D.; VOULTSIADOU, E. Three-dimensional mapping of marine caves using a handheld echosounder. **Marine Ecology Progress Series**, v. 486, p. 13–22, 2013. Disponível em: <<http://www.int-res.com/abstracts/meps/v486/p13-22/>>. .

GHILANI, C. D. **ADJUSTMENT COMPUTATIONS Spatial Data Analysis**. 6th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2018.

GHILANI, C. D.; WOLF, P. R. **Elementary Surveying-An Introduction to Geomatics**. 13th ed. New Jersey, 2012.

GLENNON, A.; GROVES, C. An examination of perennial stream drainage patterns within the Mammoth Cave Watershed, Kentucky. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 82–91, 2002. The National Speleological Society - NSS.

GROHMANN, C. H.; ZACHARIAS, G.; GARCIA, G. P. B.; et al. Mapeamento e

Modelagem 3D Do Setor Turístico da Caverna do Diabo (SP) Com Laser Scanner: Resultados Preliminares. In: Sociedade Brasileira Espeleologia (Org.); ANAIS do 35º Congresso Brasileiro de Espeleologia. **Anais...** . p.201–206, 2019. Bonito.

GRUSSENMEYER, P.; LANDES, T.; ALBY, E.; CAROZZA, L. High resolution 3D recording and modelling of the bronze age cave “les fraux” in perigord (France). **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 38, n. PART 5, p. 262–267, 2010.

GUIMARÃES, F. S.; CORDEIRO, C. M.; BUENO, G. T.; MACAGNAN CARVALHO, V. L.; NERO, M. A. Uma proposta para automatização do índice de dissecação do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, p. 155–167, 2017.

HADDAD, N. A. From ground surveying to 3D laser scanner: A review of techniques used for spatial documentation of historic sites. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, v. 23, n. 2, p. 109–118, 2011. King Saud University. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2011.03.001>>. .

HAKLAY, M. Virtual reality and GIS. **Virtual Reality in Geography**. p.47–57, 2002. CRC Press. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/9780203305850.ch5>>. .

HALE, E. MAPPING VISITOR IMPACTS WITH GIS AT OREGON CAVES. Proceedings of the 2007 National Cave and Karst Management Symposium. **Anais...** . p.233–244, 2007.

HALLECK, J. Overview on Least Squares Cave Survey Issues. **Compass & Tape**, v. 14, n. 45, p. 11–13, 1999.

HALLECK, J. Loop Adjustment Decisions. **Compass Points**, , n. 34, p. 7, 2005.

HÄMMERLE, M.; HÖFLE, B.; FUCHS, J.; et al. Comparison of Kinect and terrestrial LiDAR capturing natural karst cave 3-D objects. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 11, n. 11, p. 1896–1900, 2014.

HEBERLE, A. DE G. A Gruta de Maquiné e Seus Arredores. **Revista Brasileira de Geografia**, p. 270–317, 1941.

HEEB, B. Paperless Caving - An Electronic Cave Surveying System. **4th European**

Speleological Congress, p. 1–4, 2008.

HELLER, M.; NEUMAN, A. Inner-mountain cartography - from surveying towards information systems. In: International Cartographical Association - ICA (Org.); PAPERS — ICA-CMC-Session. **Anais...** . p.1–9, 2001. Beijing. Disponível em: <www.semanticscholar.org/paper/INNER-MOUNTAIN-CARTOGRAPHY-FROM-SURVEYING-TOWARDS-Heller7db0ccb796f89e814bef818a094eb1adf6ece5e8>. .

HOFFMEISTER, D.; ZELLMAN, S.; PASTOORS, A.; et al. The Investigation of the Ardales Cave, Spain – 3D Documentation, Topographic Analyses, and Lighting Simulations based on Terrestrial. **Archaeological Prospection**, p. 12, 2015.

HORROCKS, R. D.; SZUKALSKI, B. W. Using geographic information systems to develop a cave potential map for Wind Cave, South Dakota. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 63–70, 2002. The National Speleological Society - NSS.

HUNG, L. Q.; DINH, N. Q.; BATELAAN, O.; TAM, V. T.; LAGROU, D. Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment (Son La - NW Vietnam). **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 23–33, 2002.

HUSAIN, A.; JONES, H.; KANNAN, B.; et al. Mapping planetary caves with an autonomous, heterogeneous robot team. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, p. 13, 2013. IEEE.

IBAMA. Plano de Manejo do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. Encarte 4 - Planejamento da Unidade de Conservação. , 2005. Brasília: CSD-Geoklock.

IBGE. **As Grutas em Minas Gerais**. Belo Horizonte, 1939.

IDREES, M. O.; PRADHAN, B. A decade of modern cave surveying with terrestrial laser scanning: A review of sensors, method and application development. **International Journal of Speleology**, v. 45, n. 1, p. 71–88, 2016. Disponível em: <<http://scholarcommons.usf.edu/ijsvol45/iss1/8/>>. .

IDREES, M. O.; PRADHAN, B. Frontier in Three-Dimensional Cave Reconstruction— 3D Meshing Versus Textured Rendering. . p.1029–1038, 2019. Springer

Singapore. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-8016-6_90>. .

INSTITUTO DO CARSTE. WORKSHOP TÉCNICO CIENTÍFICO - Espeleometria. Síntese do Evento: Workshop de Espeleometria. **Anais...** . p.21, 2012. Belo Horizonte.

JAILLET, S. From 2D to 3D. From 3D to 2D. Towards a high - resolution representation of underground worlds. In: I. S. Society (Org.); Proceedings of the 18th International Congress of Speleology. **Anais...** . v. VI, p.103–106, 2022a. Savoie Mont Blanc.

JAILLET, S. Topography & 3D: fascinating images. In: I. S. Society (Org.); Proceedings of the 18th International Congress of Speleology. **Anais...** . v. VI, p.45–46, 2022b. Savoie Mont Blanc.

JAILLET, S.; DELANNOY, J. J.; GÉNUITE, K.; HOBLÉA, F.; MONNEY, J. L'image topographique du karst et des grottes : représentations 2D et technologies 3D, entre réalité et imaginaire. **Geomorphologie: Relief, Processus, Environnement**, v. 25, n. 3, p. 191–205, 2019.

JAILLET, S.; HÄUSELMANN, P. Topography, Mapping, 3D, Documentation. In: I. S. Society (Org.); Proceedings of the 18th International Congress of Speleology. **Anais...** . v. VI, p.11–12, 2022. Savoie Mont Blanc.

JAILLET, S.; SADIÉ, B.; PERAZIO, G.; DELANNOY, J.-J. Une brève histoire de la 3D en grotte. **Karstologia**, v. 63, n. February 2016, p. 3–20, 2014. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/293440006>>. .

JHA, A.; TUKKARAJA, P. Monitoring and assessment of underground climatic conditions using sensors and GIS tools. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 30, n. 4, p. 495–499, 2020. China University of Mining & Technology. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.05.010>>. .

JIMÉNEZ. Utilización de la tecnología LiDAR del móvil Iphone 12 para representación de cavidades en 3D. **Revista Espeleologia Digital**, , n. 3, p. 4, 2022.

KALITA, H.; MORAD, S.; RAVINDRAN, A.; THANGAVELAUTHAM, J. Path planning and navigation inside off-world lava tubes and caves. **2018 IEEE/ION Position**,

Location and Navigation Symposium, PLANS 2018 - Proceedings, p. 1311–1318, 2018. IEEE.

KAMBESIS, P. The Importance of Cave Exploration to Scientific Research. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 69, n. 1, p. 46–58, 2007.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. H. Distribuição das Rochas Carbonáticas e Províncias Espeleológicas do Brasil. **Revista Espeleo-Tema**, , n. 13, p. 105–168, 1979.

KASPRZAK, M.; SOBCZYK, A.; KOSTKA, S.; HACZEK, A. Surface geophysical surveys and LiDAR DTM analysis combined with underground cave mapping – an efficient tool for karst system exploration: Jaskinia Niedźwiedzia case study (Sudetes, SW Poland). **Geomorphometry**, , n. October, p. 75–78, 2015.

KLEIN, I. **Controle de qualidade no ajustamento de observações geodésicas**, 2011. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/38615>>. .

KLEIN, I.; GUZATTO, M. P. Ajustamento de observações e redes: Topografia e agrimensura para cursos técnicos. , 2018. Florianópolis: Instituto Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://sites.florianopolis.ifsc.edu.br/agrimensura/files/2018/09/Ajustamento-de-Observações-e-Redes.pdf>>. .

KRAAK, M. J. **Cartographic Visualization**. Second Edi ed. Elsevier, 2015.

KRUGER, P. VON. Topografia Subterrânea Aplicada às Cavernas. **Revista Espeleologia**, p. 33–36, 1969.

LAUTERBACH, H. A.; BORRMANN, D.; NÜCHTER, A.; et al. MOBILE MAPPING of the la CORONA LAVATUBE on LANZAROTE. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 4, n. 2/W5, p. 381–387, 2019.

LEONOV, A. V.; ANIKUSHKIN, M. N.; BOBKOV, A. E.; et al. Development of a Virtual 3d Model of Denisova Cave in the Altai Mountains. **Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia**, v. 42, n. 3, p. 14–20, 2014. Elsevier Srl. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.aeae.2015.04.003>>. .

LIMA, J. G. A.; FRANÇA, E. T.; CRUZ, J. B.; et al. Gruta das Onças – A Redescoberta

da Primeira Caverna Mapeada no Brasil. **Anais do 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia**, v. 2113, p. 207–217, 2015.

LIMA, M. T. DE. Computação Aplicada à Topografia de Cavernas. **Revista Escola de Minas**, v. 40, n. 4, p. 28–30, 1987.

LINHARES, J. C. F. Espeleometria Tridimensional (Blocos Diagramas) de Cavernas da Região de Mambáí , Goiás , Brasil. In: Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE (Org.); Anais do 26 Congresso Brasileiro de Espeleologia. **Anais...** . p.1, 2001. Brasília. Disponível em: <www.sbe.com.br>. .

LINO, C. **Cavernas. O Fascinante Brasil Subterrâneo**. São Paulo: Editora Rios, 1989.

LIPINSKI, R. J.; LINDSLEY, P. Caver Quest 3D Virtual Cave Simulation of SnoWy River in Fort Stanton Cave. In: L. Land; M. Joop (Orgs.); Proceedings of the 20th National Cave and Karst Management Symposium. **Anais...** . p.91–100, 2013. Carlsbad;

LOTT, C. F. S. Cartografia espeleológica: dos mapas primitivos às experiências atuais em mapeamento de caverna. **Pedagogia em Ação**, v. 5, n. 1, p. 82–101, 2014. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/pedagogiacao/article/view/8479>>. .

LUETZENBURG, G.; KROON, A.; BJØRK, A. A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1–9, 2021. Nature Publishing Group UK. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>>. .

MAACK, R. **Geografia Física do Paraná**. 2 ed. ed. Rio de Janeiro, 1981.

MAGALHÃES, E. D.; SEVERO, R.; BIANCHETTI, B. M. O USO DO CAVEATRON NA TOPOGRAFIA 3D DE CAVERNAS NA ESPELEOLOGIA BRASILEIRA. In: Sociedade Brasileira Espeleologia - SBE (Org.); Anais do 37 Congresso Brasileiro de Espeleologia. **Anais...** . p.285–290, 2022. Brasília.

MALLIOS, A.; VIDAL, E.; CAMPOS, R.; CARRERAS, M. Underwater caves sonar data set. **International Journal of Robotics Research**, v. 36, n. 12, p. 1247–1251, 2017.

- MANTILLA-DULCEY, A. G.; CARRILLO-HERNÁNDEZ, Y. M. Metodología para cartografiar cavidades subterráneas en 3D: caso La Escondida y Las Alsacias (Zapatoca, Santander). **Memorias II Congreso Colombiano de Espeleología**, v. 2, n. September, p. 52–58, 2021.
- MARTIN, P. A ESPELEOLOGIA NO BRASIL. **Revista Espeleo-Tema**, v. 13, p. 21–28, 1979.
- MARTINHAGO, A. **CONFLITOS ENTRE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO E ATIVIDADES MINERÁRIAS: O CASO DO PARQUE MUNICIPAL GRUTA DO BACAETAVA – COLOMBO - PR**, 2015. Universidade Federal do Paraná - UFPR.
- MCFARLANE, D. A.; BUCHROITHNER, M.; J. LUNDBERG, C. P.; ROBERTS, W.; RENTERGEN, G. VAN. INTEGRATED THREE-DIMENSIONAL LASER SCANNING AND AUTONOMOUS DRONE SURFACE-PHOTOGRAMMETRY AT GOMANTONG CAVES, SABAH, MALAYSIA. Proceedings of the 16th International Congress of Speleology. **Anais...** . p.317–319, 2013. Brno.
- MCNEIL, B. E.; JASPER, J. D.; LUCHSINGER, D. A.; RAINSMIER, M. V. Implementation and application of GIS at Timpanogos Cave National Monument, Utah. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 34–37, 2002. The National Speleological Society - NSS.
- MITCHELL, J.; GUTTING, S. The Caveatron: an Integrated Cave Survey and LIDAR Scanning Instrument. In: UIS (Org.); Proceedings of the 17th International Congress of Speleology. **Anais...** . v. 1, p.126–130, 2017. Sydney.
- MLENEK, D. C.; ARENAS, F. C.; FERREIRA, F. J. F.; et al. MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DA CAVERNA BURACO DO INFERNO NA RODOVIA BR-135 NO MUNICÍPIO DE SÃO DESIDÉRIO – BA. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva. **Anais...** . p.193–197, 2017. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia.
- MOON, D.; CHUNG, S.; KWON, S.; SEO, J.; SHIN, J. Comparison and utilization of point cloud generated from photogrammetry and laser scanning: 3D world model for smart heavy equipment planning. **Automation in Construction**, v. 98, p. 322–331, 2019.

- MORENO-GÓMEZ, M.; LIEDL, R.; STEFAN, C. A new GIS-based model for karst dolines mapping using LiDAR; Application of a multidepth threshold approach in the Yucatan karst, Mexico. **Remote Sensing**, v. 11, n. 10, p. 14, 2019.
- MOURA, V. Topografia e espeleometria de cavidades naturais. **IV CURSO DE ESPELEOLOGIA E LICENCIAMENTO AMBIENTAL**. p.53–71, 2016. Brasilia: CECAV.
- MOYES, H. The use of GIS in the spatial analysis of an archaeological cave site. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 9–16, 2002. The National Speleological Society - NSS.
- MÜLLER, R.; ZECKZER, D. Past, present, and future of 3D software visualization: A systematic literature analysis. **IVAPP 2015 - 6th International Conference on Information Visualization Theory and Applications; VISIGRAPP, Proceedings**, , n. March, p. 63–74, 2015.
- NOCERINO, E.; POIESI, F.; LOCHER, A.; et al. 3D reconstruction with a collaborative approach based on smartphones and a cloud-based server. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**, v. 42, n. 2W8, p. 187–194, 2017.
- ORTIZ, A. A. **Teoría de los errores en Topografía Espeleológica . Cálculo de la calidad de Bucle en Auriga Índice Introducción : Teoría de los errores en topografía espeleológica**. 2010.
- ORTIZ, A. A. DistoX: presente y futuro. Disponible em: <<http://comisiontopo.blogspot.com/2012/05/distox-presente-y-futuro.html>>. .
- ORTIZ, A. A.; SÁNCHEZ, J. G. Realización de una poligonal cerrada en el Sistema Cueva del Agua. Karst en Yeso de Sorbas. Almería. Precisión del DistoX. **Comisión de Topografía Espeleológica de la F.A.E.**, p. 11, 2010.
- PALMER, A. Precision surveys with the Brunton compass Displaying. **Compass Points - BCRA**, v. 28, p. 17, 2002.
- PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. **Geological Society of America Bulletin**, v. 103, n. 1, p. 1–21, 1991.
- PALMER, A. N. **Cave Geology**. Cave Books, 2007.

- PARADA, J. M. Gruta dos Poçoões, da Lavoura e das Cacimbas. **Revista Escola de Minas**, v. 14, n. 3, p. 17–29, 1949.
- PATTERSON, T. Developing a data structure framework for three- dimensional cave geo-representation. **Compass Points - BCRA**, , n. 35, p. 11–16, 2006.
- PHELAN, T. L. Public datasets integrated with GIS and 3-D visualization help expand subsurface conceptual model. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 77–81, 2002. The National Speleological Society - NSS.
- POLOGEA, A. A web GIS application for visualization and management of cave topographic and geographic information. In: International Speleological Society (Org.); Proceedings of the 18th International Congress of Speleology. **Anais... .** v. VI, p.169–173, 2022. Savoie Mont Blanc.
- PUKANSKÁ, K.; BARTOŠ, K.; BELLA, P.; et al. Surveying and high-resolution topography of the Ochtiná Aragonite cave based on TLS and digital photogrammetry. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 13, 2020.
- PUKANSKÁ, K.; BARTOŠ, K.; BELLA, P.; RÁKAY ML, Š.; SABOVÁ, J. Comparison of non-contact surveying technologies for modelling underground morphological structures. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 22, n. 3, p. 246–256, 2017.
- REDOVNIKOVIĆ, L.; STANČIĆ, B.; CETL, V. Comparison of Different Methods of Underground Survey. **SIG 2016 – International Symposium on Engineering Geodesy**, 2016. Disponível em: <<http://www.google.com/patents?hl=en&lr=&vid=USPAT1900190&id=evBQAAA AEBAJ&oi=fnd&printsec=abstract>>. .
- REINHART, H. Contextualizing Cave Maps as Geospatial Information: Case Study of Indonesia. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 98, n. 1, p. 0–8, 2017.
- REIS, J. A. DE V. Gruta da Lapa Nova e Gruta da Deuza. **Revista da Escola de Minas - REM**, p. 9, 1968. Ouro Preto.
- RICHMOND, K.; FLESHER, C.; TANNER, N.; SIEGEL, V.; STONE, W. C. Autonomous exploration and 3-D mapping of underwater caves with the human-portable SUNFISH® AUV. **2020 Global Oceans 2020: Singapore - U.S. Gulf**

Coast, p. 10, 2020.

RIQUELME, A.; CANO, M.; TOMÁS, R.; ABELLÁN, A. Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: A Comparative Analysis. **Procedia Engineering**, v. 191, p. 838–845, 2017. The Author(s). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.251>>. .

RIUS, A. M. Topografia Espeleologica. , 1992. Madrid: Federacion Espanola de Espeleologia.

ROCHA, L. F. S. DA; GENTHNER, C.; RABELO, L. Mapeamento Topográfico e Geoespeleológico da Gruta do Bacaetava , Colombo - PR / Brasil. In: Union Internationale de Spéleologie - UIS/Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE (Org.); Anais do 26th Brazilian Congress of Speleology. **Anais...** . p.269–273, 2001. Brasília: Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE.

ROCHA, L. F. S. DA; GENTHNER, C.; RABELO, L. Mapeamento Topográfico e Geoespeleológico da Gruta do Bacaetava , Colombo -PR / Brasil. In: S. B. de E.-SBE (Org.); Anais do 13 Congresso Internacional de Espeleologia. **Anais...** . p.2001, 2001. Brasília: SBE.

ROCHA, M. C.; ALVES, L.; COSTA, F. A GIS-BASED SPATIAL ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF CAVES IN BRAZIL Universidade Federal do Sul e Sudeste doPará | Brasil Universidade Federal do Sul e Sudeste doPará | Brasil Universidade Federal do Sul e Sudeste doPará | Brasil The Brazilian Center for. **Brazilian Geographical Journal - Geosciences and Humanities Research Medium**, p. 149–162, 2018. Universidade Federal de Uberlandia - UFU.

RODRIGUES, S. C. Cartografia e Simbologia Geomorfológica: Evoluindo da Cartografia Tradicional para o Uso de Simbologia Digital. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 1, p. 3–10, 2010.

ROMANHOLI, M. P.; CIUFFA, A. I.; TALAMONI, C. D.; TAFARELLO, M. E.; DUARTE, R. Automatização na produção de mapas topográficos baseada em páginas de dados dinâmicos e bancos de dados espaciais. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** . p.3439–3446, 2015. João Pessoa: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

- RUBBIOLI, É.; AULER, A.; MENIN, D.; BRANDI, R. **Cavernas. Atlas do Brasil Subterrâneo**. Belo Horizonte: ICMBio, 2019.
- RUBBIOLI, E. L.; AULER, A. S. Peter Andreas Brandt e os levantamentos topográficos das grutas pesquisadas por Lund. **Revista O Carste**, v. 14, p. 18–23, 2002.
- SALEM, B. B. Application of GIS to biodiversity monitoring. **Journal of Arid Environments**, v. 54, n. 1, p. 91–114, 2003.
- SAMMARTANO, G.; SPANÒ, A. Point clouds by SLAM-based mobile mapping systems: accuracy and geometric content validation in multisensor survey and stand-alone acquisition. **Applied Geomatics**, v. 10, n. 4, p. 317–339, 2018. Applied Geomatics.
- SÁNCHEZ, L. E. GRAUS DE PRECISÃO EM TOPOGRAFIA DE CAVERNA. ANAIS do 14º Congresso Nacional de Espeleologia. **Anais...** . p.49–50, 1980. Belo Horizonte.
- SANTOS, A. R. DOS; SOUZA, K. B. DE; SILVA, R. G. DA. Fundamentos Teóricos de Geotecnologias. , 2016. Alegre: Universidade Federal do Espírito Santo - UFES.
- SCHMIDT, V. A.; SCHELLENG, J. H. THE APPLICATION OF THE METHOD OF LEAST SQUARES TO THE CLOSING OF MULTIPLY-CONNECTED LOOPS IN CAVE OR GEOLOGICAL SURVEYS. **Bulletin of the National Speleological Society**, v. 32, n. 3, p. 636, 1970.
- SCHUCHARDT, P.; BOWMAN, D. A. The benefits of immersion for spatial understanding of complex underground cave systems. **Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST**, v. 1, n. 212, p. 121–124, 2007.
- SEE. Mesa Redonda de Espeleologia. In: Sociedade Brasileira Espeleologia - SBE (Org.); Anais do 10 Congresso Nacional de Espeleologia. **Anais...** . p.95–98, 1975. Ouro Preto: Sociedade Excursionista e Espeleológica - SEE.
- SELLERS, W. I.; CHAMBERLAIN, A. T. Ultrasonic Cave Mapping. **Journal of Archaeological Science**, v. 25, n. 9, p. 867–873, 1998. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0305440397902326>>. .
- SEPULVEDA, J.; CAPPS, J.; JOHNSON, K.; et al. Photogrammetric Modeling of

Subterranean Features Through Three-Dimensional Software Analysis. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLIV-M-2-2, n. June, p. 95–98, 2020.

SESSEGOLO, G. C.; THEULEN, V. Manejo do Parque Municipal da Gruta do Bacaetava , Colombo – PR/Brasil. In: Sociedade Brasileira Espeleologia - SBE (Org.); Anais do 13 Congresso Internacional de Espeleologia. **Anais...** . p.699–703, 2001. Brasília.

SESSEGOLO, G.; ROCHA, L. F. S. DA; LIMA, F. F. DE. Gruta do Bacaetava. In: G. de E. E. do P.- GEEP-Açungui (Org.); **Conhecendo Cavernas Região Metropolitana de Curitiba**. p.21–23, 2006. Curitiba.

SHULTS, R.; LEVIN, E.; HABIBI, R.; et al. Capability of matterport 3d camera for industrial archaeology sites inventory. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, n. 2/W11, p. 1059–1064, 2019.

SIEGEL, V.; STONE, W.; RICHMOND, K. Exploration of Dragon’s Breath Cave and Harasib Cave using an autonomous underwater vehicle. , v. II, p. 181–184, 2022.

SILVA, D. C. DA. Evolução da Fotogrametria no Brasil. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 3, n. 2, p. 81–96, 2015.

SILVA, M. M.; ANTONIO, M.; DEROCO, G. Fotogrametria terrestre aplicada à espeleotopografia : Estudo de caso na Gruta do Urubu (Coromandel-MG). In: Universidade Federal de Uberlândia - UFU (Org.); Simpósio de Ciências Agrárias e Ambientais. **Anais...** . p.1, 2020. Uberlândia.

SILVERIO, M. O. **ATUAÇÃO DA ARQUITETURA NO USO PÚBLICO DE CAVERNAS. Conceitos, métodos e estratégias para ocupação. Caverna do Diabo, SP.**, 2014. Universidade de São Paulo.

SILVERIO, MARCELO S.; CRUZ, L. C.; SILVERIO, MARCOS S.; FARIAS, V. VISÕES GEOMÉTRICAS DA GRUTA DO BOCÃO NO PARQUE ESTADUAL DE IBITIPOCA MG: MAPEAMENTO E MODELAGEM. **Revista Hipótese**, p. 176–190, 2019.

SILVESTRE, I.; RODRIGUES, J.; FIGUEIREDO, M.; VEIGA-PIRES, C. High-

resolution digital 3D models of Algar do Penico Chamber: limitations, challenges, and potential. **International Journal of Speleology**, v. 44, n. 1, p. 25–35, 2015. Disponível em: <<http://scholarcommons.usf.edu/ijs/vol44/iss1/3/>>. .

SILVESTRE, I.; RODRIGUES, JOSE I.; FIGUEIREDO, M. J. G.; VEIGA-PIRES, C. Cave Chamber Data Modeling and 3D Web Visualization. Proceedings of the 17th International Conference on Information Visualisation. **Anais...** . p.468–473, 2013. IEEE. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6676603/>>. .

SILVESTRE, I.; RODRIGUES, JOSÉ I.; FIGUEIREDO, M.; VEIGA-PIRES, C. Framework for 3D data modeling and web visualization of underground caves using open source tools. Proceedings of the 18th International Conference on 3D Web Technology - Web3D '13. **Anais...** . p.121, 2013. New York, New York, USA: ACM Press. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2466533.2466549>>. .

SIMÕES, P. R. Levantamento fotogramétrico e modelagem 3D aplicados à cartografia espeleológica e à espeleometria da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual do Ibitipoca - MG. **Revista Espeleologia Digital**, , n. 2, p. 58–66, 2019a. Ouro Preto.

SIMÕES, P. R. Levantamento Fotogramétrico e Modelagem 3D Aplicados à Cartografia Espeleológica e à Espeleometria da Gruta Dos Fugitivos, Parque Estadual de Ibitipoca – MG. In: SBE (Org.); ANAIS do 35º Congresso Brasileiro de Espeleologia. **Anais...** . p.229–237, 2019b. Bonito. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anaiiscbe/35cbe_229-237.pdf>. .

SIMÕES, P. R. Automação de Processos no Mapeamento Espeleológico 3D de Cavidades a Partir de Modelos Fotogramétricos de Cavidades Subterrâneas em Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Espeleologia**, , n. 1, p. 90–119, 2022.

SIMÕES, P. R.; PEREIRA FILHO, M. Sistema de Informações Geográficas – SIG Aplicado a Dados Espeleológicos. In: Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE (Org.); Anais do 27 Congresso Brasileiro de Espeleologia. **Anais...** . p.190–192, 2003. Januária.

SLUTER, C. R. O Desenvolvimento De Projetos Cartográficos Com uma abordagem

sistêmica. In: UNESP (Org.); Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. **Anais...** . p.320–325, 2007. Presidente Prudente.

SOARES FILHO, B. S. CARTOGRAFIA ASSISTIDA POR COMPUTADOR - conceitos e métodos. , 2000. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

SOCIEDADE BRASILEIRA ESPELEOLOGIA. **Normas e Convenções Espeleométricas**. Campinas, 1991.

DI STEFANO, F.; TORRESANI, A.; FARELLA, E. M.; et al. 3D surveying of underground built heritage: Opportunities and challenges of mobile technologies. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 23, 2021.

STIPANOV, M.; BAKARIĆ, V.; EŠKINJA, Z. ROV use for cave mapping and modeling. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 41, n. 1, p. 208–211, 2008. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474667015355270>>. .

STONE, D.; SCHINDEL, G. M. The application of GIS in support of land acquisition for the protection of sensitive groundwater recharge properties in the Edwards Aquifer of south-central Texas. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 38–44, 2002. The National Speleological Society - NSS.

ŠUPINSKÝ, J.; KAŇUK, J.; NOVÁKOVÁ, M.; HOCHMUTH, Z. LiDAR point clouds processing for large-scale cave mapping: a case study of the Majko dome in the Domica cave. **Journal of Maps**, v. 18, n. 2, p. 268–275, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17445647.2022.2035270>>. .

ŠUŠTERŠIČ, F. What is the speleometry. **NAŠE JAME**, v. 20, p. 21, 1978.

SZUKALSKI, B. W. Introduction To Cave and Karst Gis. **Journal Of Cave And Karst Studies**, v. 64, n. April, p. 3, 2002. National Speleological Society.

TABIB, W.; GOEL, K.; YAO, J.; BOIRUM, C.; MICHAEL, N. Autonomous Cave Surveying with an Aerial Robot. , p. 1–13, 2020. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/2003.13883>>. .

TARSOLY, P. Cave Information System. Proceedings of the XXIII FIG Congress. **Anais...** . p.1–9, 2006. Munich.

- THRUN, R. A Comparison of Simultaneous and Sequential Closure Adjustment Methods. **Compass & Tape**, v. 13, n. 44, p. 9–13, 1998.
- THRUN, R. Simultaneous/Sequential Closure: Round 2. **Compass & Tape**, v. 14, n. 1, p. 6–7, 1999.
- TOMETZOVÁ, D.; HLAVŇOVÁ, B.; DREVKO, S.; et al. The Development of Geotourism with the Use of 3D Digital Cave Model. A Case Study of the Bear Cave, Slovakia. **Geomatics and Environmental Engineering**, v. 14, n. 2, p. 83–105, 2020.
- TSAKIRI, M.; SIGIZIS, K.; BILLIRIS, H.; DOGOURIS, S. 3D laser scanning for the documentation of cave environments. **11th ACUUS International Conference - Underground Space: Expanding the Frontiers**, , n. November, p. 403–408, 2007.
- TYREE, L.; MCCOY, F.; FREY, J.; STAMOS, A. 3D imaging of skoteino cave, Crete, Greece: Successes and difficulties. **Journal of Field Archaeology**, v. 39, n. 2, p. 180–192, 2014.
- VEIGA, L. A. K.; CINTRA, J. P. Automação Topográfica. **A Mira**, , n. 103, p. 6, 2001.
- VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2012.
- VERDET, C.; SIRIEIX, C.; MARACHE, A.; RISS, J.; PORTAIS, J. C. Detection of undercover karst features by geophysics (ERT) Lascaux cave hill. **Geomorphology**, v. 360, p. 107177, 2020. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107177>>. .
- VILLASANTE, J. S. G. Fotogrametría aérea aplicada a la situación de cavidades. **Boletín Nº 5. Grupo Espeleológico Edelweiss.**, , n. 5, p. 10, 2002. Disponível em: <<http://ftp.grupoedelweiss.com/pdf/cubia5-c.pdf>>. .
- VOZENILEK, V. O Projeto Cartográfico. **O Mundo dos Mapas**, p. 19–29, 2014. Disponível em: <<https://icaci.org/publications/the-world-of-maps/o-mundo-dos-mapas-portuguese/>>. .
- WAELE, J. DE; FABRI, S.; SANTAGATA, T.; et al. Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanner and 3D

photogrammetry in a gypsum cave (Emilia Romana, N. Italy). **Geomorphology**, v. 319, p. 47–61, 2018.

WALTERS, R.; HAJNA, N. Z. 3d laser scanning of the natural caves: Example of Škocjanske jame. **Geodetski Vestnik**, v. 64, n. 1, p. 89–103, 2020.

WHITE, W. B.; CULVER, D. C.; PIPAN, T. Surveing Caves. **Encyclopedia of Caves**, 2019. Elsevier.

WILKINSON, M. W.; JONES, R. R.; WOODS, C. E.; et al. A comparison of terrestrial laser scanning and structure-from motion photogrammetry as methods for digital outcrop acquisition. **Geosphere**, v. 12, n. 6, p. 1865–1880, 2016.

WU, Q.; XU, H.; ZHOU, W. Development of a 3D GIS and its application to karst areas. **Environmental Geology**, v. 54, n. 5, p. 1037–1045, 2008.

YAKAR, M.; ULVI, A.; TOPRAK, A. S. The Use of Laser Scanner in Cave , Encountered Problems and Solution Suggestion. **Universal Journal of Geoscience**, v. 4, n. 4, p. 81–88, 2016.

ZLOT, R.; BOSSE, M. Three-Dimensional Mobile Mapping of Caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 76, n. 3, p. 191–206, 2014. Disponível em: <<http://caves.org/pub/journal/PDF/v76/cave-76-03-191.pdf>>. .

ANEXO 1

Autorização para atividades com finalidade científica

Número: 80072-1	Data da Emissão: 04/10/2021 11:01:01	Data da Revalidação*: 04/10/2022
De acordo com o art. 28 da IN 03/2014, esta autorização tem prazo de validade equivalente ao previsto no cronograma de atividades do projeto, mas deverá ser revalidada anualmente mediante a apresentação do relatório de atividades a ser enviado por meio do Sisbio no prazo de até 30 dias a contar da data do aniversário de sua emissão.		

Dados do titular

Nome: Paulo Rodrigo Gaiotti Simoes	CPF: 938.262.067-20
Título do Projeto: LEVANTAMENTOS FOTOGRAFICOS E POR ESCANEAMENTO A LASER DA GRUTA DO BACAETAVA, COLOMBO - PR	
Nome da Instituição: Universidade Federal do Paraná	CNPJ: 75.095.679/0001-49

Cronograma de atividades

#	Descrição da atividade	Início (mês/ano)	Fim (mês/ano)
1	Pos processamento; modelagem 3D; geracao de mapa espeleologico;	01/2022	05/2022
2	Redacao de artigo científico;	06/2022	11/2022
3	Levantamentos em campo	12/2021	01/2022

Equipe

#	Nome	Função	CPF	Nacionalidade
1	Rafael Balestieri	Mapeamento topografico; registro fotografico;	032.058.879-30	Brasileira
2	LUIS AUGUSTO KOENIG VEIGA	Levantamentos em campo; pos-processamento; orientacao;	939.386.329-68	Brasileira

Observações e ressalvas

1	Deve-se observar as as recomendações de prevenção contra a COVID-19 das autoridades sanitárias locais e das Unidades de Conservação a serem acessadas.
2	Esta autorização NÃO libera o uso da substância com potencial agrotóxico e/ou inseticida e NÃO exime o pesquisador titular e os membros de sua equipe da necessidade de atender às exigências e obter as autorizações previstas em outros instrumentos legais relativos ao registro de agrotóxicos (Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002, entre outros).
3	Esta autorização NÃO libera o uso da substância com potencial agrotóxico e/ou inseticida e NÃO exime o pesquisador titular e os membros de sua equipe da necessidade de atender às exigências e obter as autorizações previstas em outros instrumentos legais relativos ao registro de agrotóxicos (Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, Decreto nº 4.074, de 4 de janeiro de 2002, entre outros)
4	O titular de autorização ou de licença permanente, assim como os membros de sua equipe, quando da violação da legislação vigente, ou quando da inadequação, omissão ou falsa descrição de informações relevantes que subsidiaram a expedição do ato, poderá, mediante decisão motivada, ter a autorização ou licença suspensa ou revogada pelo ICMBio, nos termos da legislação brasileira em vigor.
5	Este documento somente poderá ser utilizado para os fins previstos na Instrução Normativa ICMBio nº 03/2014 ou na Instrução Normativa ICMBio nº 10/2010, no que especifica esta Autorização, não podendo ser utilizado para fins comerciais, industriais ou esportivos. O material biológico coletado deverá ser utilizado para atividades científicas ou didáticas no âmbito do ensino superior.
6	As atividades de campo exercidas por pessoa natural ou jurídica estrangeira, em todo o território nacional, que impliquem o deslocamento de recursos humanos e materiais, tendo por objeto coletar dados, materiais, espécimes biológicos e minerais, peças integrantes da cultura nativa e cultura popular, presente e passada, obtidos por meio de recursos e técnicas que se destinem ao estudo, à difusão ou à pesquisa, estão sujeitas a autorização do Ministério de Ciência e Tecnologia.
7	Este documento não dispensa o cumprimento da legislação que dispõe sobre acesso a componente do patrimônio genético existente no território nacional, na plataforma continental e na zona econômica exclusiva, ou ao conhecimento tradicional associado ao patrimônio genético, para fins de pesquisa científica, bioprospecção e desenvolvimento tecnológico. Veja maiores informações em www.mma.gov.br/cgen .

Este documento foi expedido com base na Instrução Normativa nº 03/2014. Através do código de autenticação abaixo, qualquer cidadão poderá verificar a autenticidade ou regularidade deste documento, por meio da página do Sisbio/ICMBio na Internet (www.icmbio.gov.br/sisbio).

Código de autenticação: 0800720120211004

Página 1/3

Autorização para atividades com finalidade científica

Número: 80072-1	Data da Emissão: 04/10/2021 11:01:01	Data da Revalidação*: 04/10/2022
De acordo com o art. 28 da IN 03/2014, esta autorização tem prazo de validade equivalente ao previsto no cronograma de atividades do projeto, mas deverá ser revalidada anualmente mediante a apresentação do relatório de atividades a ser enviado por meio do Sisbio no prazo de até 30 dias a contar da data do aniversário de sua emissão.		

Dados do titular

Nome: Paulo Rodrigo Gaiotti Simoes	CPF: 938.262.067-20
Título do Projeto: LEVANTAMENTOS FOTOGRAFICOS E POR ESCANEAMENTO A LASER DA GRUTA DO BACAETAVA, COLOMBO - PR	
Nome da Instituição: Universidade Federal do Paraná	CNPJ: 75.095.679/0001-49

Observações e ressalvas

8	O titular de licença ou autorização e os membros da sua equipe deverão optar por métodos de coleta e instrumentos de captura direcionados, sempre que possível, ao grupo taxonômico de interesse, evitando a morte ou dano significativo a outros grupos; e empregar esforço de coleta ou captura que não comprometa a viabilidade de populações do grupo taxonômico de interesse em condição in situ.
9	Esta autorização NÃO exime o pesquisador titular e os membros de sua equipe da necessidade de obter as anuências previstas em outros instrumentos legais, bem como do consentimento do responsável pela área, pública ou privada, onde será realizada a atividade, inclusive do órgão gestor de terra indígena (FUNAI), da unidade de conservação estadual, distrital ou municipal, ou do proprietário, arrendatário, posseiro ou morador de área dentro dos limites de unidade de conservação federal cujo processo de regularização fundiária encontra-se em curso.
10	Em caso de pesquisa em UNIDADE DE CONSERVAÇÃO, o pesquisador titular desta autorização deverá contactar a administração da unidade a fim de CONFIRMAR AS DATAS das expedições, as condições para realização das coletas e de uso da infraestrutura da unidade.

Outras ressalvas

1	Não estão autorizadas coletas de espeleotemas, rochas, água, sedimentos, fósseis, material biológico ou quaisquer outros materiais da caverna, que não apenas imagens e dados indiretos. O pesquisador deve considerar remover os pontos de controle instalados na caverna após a pesquisa, visando reduzir impactos visuais.	CECAV Brasília-DF
---	---	-------------------

Locais onde as atividades de campo serão executadas

#	Descrição do local	Município-UF	Bioma	Caverna?	Tipo
1	Parque Municipal Gruta do Bacaetava	Colombo-PR	Mata Atlântica	Sim	Dentro de UC Municipal

Atividades

#	Atividade	Grupo de Atividade
1	Levantamento de dados abióticos em caverna	Dentro de Caverna

Destino do material biológico coletado

#	Nome local destino	Tipo destino
1	Universidade Federal do Paraná	Outro

Este documento foi expedido com base na Instrução Normativa nº 03/2014. Através do código de autenticação abaixo, qualquer cidadão poderá verificar a autenticidade ou regularidade deste documento, por meio da página do Sisbio/ICMBio na Internet (www.icmbio.gov.br/sisbio).

Autorização para atividades com finalidade científica

Número: 80072-1	Data da Emissão: 04/10/2021 11:01:01	Data da Revalidação*: 04/10/2022
De acordo com o art. 28 da IN 03/2014, esta autorização tem prazo de validade equivalente ao previsto no cronograma de atividades do projeto, mas deverá ser revalidada anualmente mediante a apresentação do relatório de atividades a ser enviado por meio do Sisbio no prazo de até 30 dias a contar da data do aniversário de sua emissão.		

Dados do titular

Nome: Paulo Rodrigo Gaiotti Simoes	CPF: 938.262.067-20
Título do Projeto: LEVANTAMENTOS FOTOGRAFICOS E POR ESCANEAMENTO A LASER DA GRUTA DO BACAETAVA, COLOMBO - PR	
Nome da Instituição: Universidade Federal do Paraná	CNPJ: 75.095.679/0001-49

Registro de coleta imprevista de material biológico

De acordo com a Instrução Normativa nº 03/2014, a coleta imprevista de material biológico ou de substrato não contemplado na autorização ou na licença permanente deverá ser anotada na mesma, em campo específico, por ocasião da coleta, devendo esta coleta imprevista ser comunicada por meio do relatório de atividades. O transporte do material biológico ou do substrato deverá ser acompanhado da autorização ou da licença permanente com a devida anotação. O material biológico coletado de forma imprevista, deverá ser destinado à instituição científica e, depositado, preferencialmente, em coleção biológica científica registrada no Cadastro Nacional de Coleções Biológicas (CCBIO).

Táxon*	Qtde.	Tipo de Amostra	Qtde.	Data

* Identificar o espécime do nível taxonômico possível.

Este documento foi expedido com base na Instrução Normativa nº 03/2014. Através do código de autenticação abaixo, qualquer cidadão poderá verificar a autenticidade ou regularidade deste documento, por meio da página do Sisbio/ICMBio na Internet (www.icmbio.gov.br/sisbio).

Código de autenticação: 0800720120211004

Página 3/3

ANEXO 2

PROJETO CARTOGRÁFICO

MAPA ESPELEOLÓGICO DE REFERÊNCIA GERAL

ETAPA	ESPECIFICAÇÕES	FONTE/RECURSO
<p>1 - O usuário e suas necessidades.</p> <p>1.1 – Circunstâncias de uso.</p>	<p>Usuário: Servidores públicos; Comunidade espeleológica; Comunidade acadêmica;</p> <p>Produtor: Consultorias; Comunidade espeleológica;</p> <p>- Processos de licenciamento ambiental: suporte à decisão; manejo em UC's; - Base cartográfica para pesquisas espeleológicas.</p>	<p>Censo Espeleológico 2020</p> <p>Perfil do Mapeamento no Brasil 2021 (GT TOPGRU 2022)</p> <p>Recursos: Expertise Hardware Software Instrumentação</p>
<p>2 - Definição do produto a ser gerado; meios de comunicação; sistema de referência; acurácia e detalhamento pretendidos; escalas; formatos.</p>	<p>Produtos cartográficos: - Mapa de referência geral; versões impressa e digital; - Modelos 3D: da cavidade, do piso, teto e de integração com modelo topográfico; - Nuvens de pontos;</p> <p>Meios de comunicação: Impressão Tela do computador</p> <p>Sistema de referência: UTM 22S SIRGAS 2000</p> <p>Acurácia e detalhamento pretendidos: UIS 6X</p> <p>Escalas de levantamento: 1:50 – Abrigos 1:100 – Cavernas pequenas 1:200 – Cavernas médias 1:500 – Cavernas grandes</p> <p>Escalas de impressão: 1:1000</p> <p>Formato de impressão: A4</p>	<p>Impressora colorida ou formato PDF</p> <p>www.sketchfab.com</p> <p>www.sketchfab.com</p> <p>Canon 3110 Monitor LG 27mp400</p> <p>UIS Mapping Grade</p>

<p>3 – Definição das feições espeleológicas a serem representadas; procedimentos manuais e automatizados e produtos cartográficos necessários para sua geração.</p>	<p>Elementos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contornos: planta baixa, cortes transversais, perfil longitudinal; - Espeleotemas: estalactites, estalagmites, travertinos, colunas, - Espeleogens: pilares; - Sedimentos clásticos: blocos; - Infra-estrutura de visitação: Passarelas, circuito turístico; - Hidrografia: drenagem; - Estruturas geológicas: fraturas ou falhas; rocha; - Estações topográficas; ponto zero; ponto mais alto; ponto mais baixo; alvos; <p>Procedimentos automatizados:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coleta e tratamento de dados topográficos; ajustamento; - Geração de modelos fotogramétricos; - Extração vetorial dos contornos; - Extração vetorial das curvas de nível; - Geração de mosaicos de ortofotos; - Geração de MDS; - Geração de modelos do relevo; - Integração de modelos epígeos e hipógeos; - Publicação em repositório 3D. 	<p>Primitivas geométricas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - polígonos e linhas - linhas e polígonos - polígonos - polígonos - polígonos e linhas - polígono - linhas e polígonos - pontos <p>Softwares:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Topografia por TS ; - TOPOEVN - Agisoft Metashape - 3D Reshaper 2018 - ArcMap 10.8 - Agisoft Metashape - Agisoft Metashape - Infracworks 2024 - Infracworks 2024 - www.sketchfab.com
--	---	--

	<p>Procedimentos manuais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Edição vetorial: vetorização de feições diversas; rotação e translação de vetores; - Composição do layout do mapa 2D; <p>Produtos cartográficos fonte:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modelos 3D; - Mosaicos de ortofotos de piso, teto; - Modelos digitais de superfície: sombreamento sintético, planicidade, curvas de nível; 	<ul style="list-style-type: none"> - AutoCAD 2019 - ArcMap 10.8 - Agisoft Metashape - Agisoft Metashape - Agisoft Metashape e ArcMap 10.8 - Agisoft Metashape e 3D Reshaper 2018
<p>4 – Geração de dados fonte. Cálculos espeleométricos.</p>	<p>Modelos 3D e nuvens de pontos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Levantamento topográfico e inserção de GCP's; - Modelos fotogramétricos 3D; - Nuvens de pontos; <p>Cálculos espeleométricos:</p> <p>Volume</p> <p>Área do contorno externo</p> <p>Perímetro contorno externo</p> <p>Área do piso</p> <p>Perímetro do piso</p> <p>Área da projeção vertical</p> <p>Perímetro da projeção vertical</p> <p>Área da projeção transversal</p> <p>Perímetro da projeção transversal</p> <p>Ponto mais alto</p> <p>Ponto zero</p> <p>Ponto mais baixo</p> <p>Desnível Negativo</p> <p>Desnível Positivo</p> <p>Desnível Total</p> <p>Gradiente hidráulico</p> <p>Desenvolvimento horizontal - PH</p> <p>Desenvolvimento inclinado - DL</p> <p>Lamina d'água</p> <p>Largura mínima</p> <p>Largura média</p> <p>Largura máxima</p> <p>Altura mínima</p> <p>Altura média</p> <p>Altura máxima</p> <p>Passarelas</p> <p>Circuito turístico</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Estação Total - Agisoft Metashape SBE (1991) - Agisoft Metashape - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - Autocad 2019 e ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8 - ArcMap 10.8

5 – Avaliação de resultados: qualidade dos dados; acurácia e detalhamento obtidos.	<p>Qualidade da textura</p> <p>Classificação da acurácia e detalhamento;</p> <p>Classificação do produto; RMSE;</p>	<p>- Análises visuais</p> <p>- Grade UIS</p> <p>- Agisoft Metashape</p>
6 – Linguagem cartográfica.	<p>Ponto: símbolo, cor, tamanho</p> <p>Linha: nome, cor, espessura</p> <p>Polígono: tipo, cor, espessura do polígono, espessura do contorno</p> <p>Raster: simbologia, display, stretch</p> <p>Textos: fonte, cor, tamanho</p>	

TEMAS E SIMBOLOGIAS

TEMA	ELEMENTO GRÁFICO	SÍMBOLO	COR - RGB	TAMANHO
Alvo	Ponto	Circle 13	255 255 0	4
Estação topog.	Ponto	Triangle 3	169 0 230	4
Estação GNSS	Ponto	Circle 3	0 255 0	4
Ponto zero	Ponto	Circle 17	255 255 0	4
Ponto mais alto	Ponto	Circle 17	230 0 0	4
Ponto mais baixo	Ponto	Circle 17	76 230 0	4

TEMA	ELEMENTO GRÁFICO	NOME	COR - RGB	ESPESSURA
Contorno externo	Linha	Major road	0 0 0	0,5
Linha d'água	Linha	Fence line	0 0 0	4,0
Indicadores cortes	Linha	Major road	0 0 0	0,4
Roteiro turístico	Linha	Road narrow	76 230 0	0,25
Abrupto	Linha	Drop in floor	255 0 0	2,0
Travertino	Linha	Road narrow	230 150 0	0,15

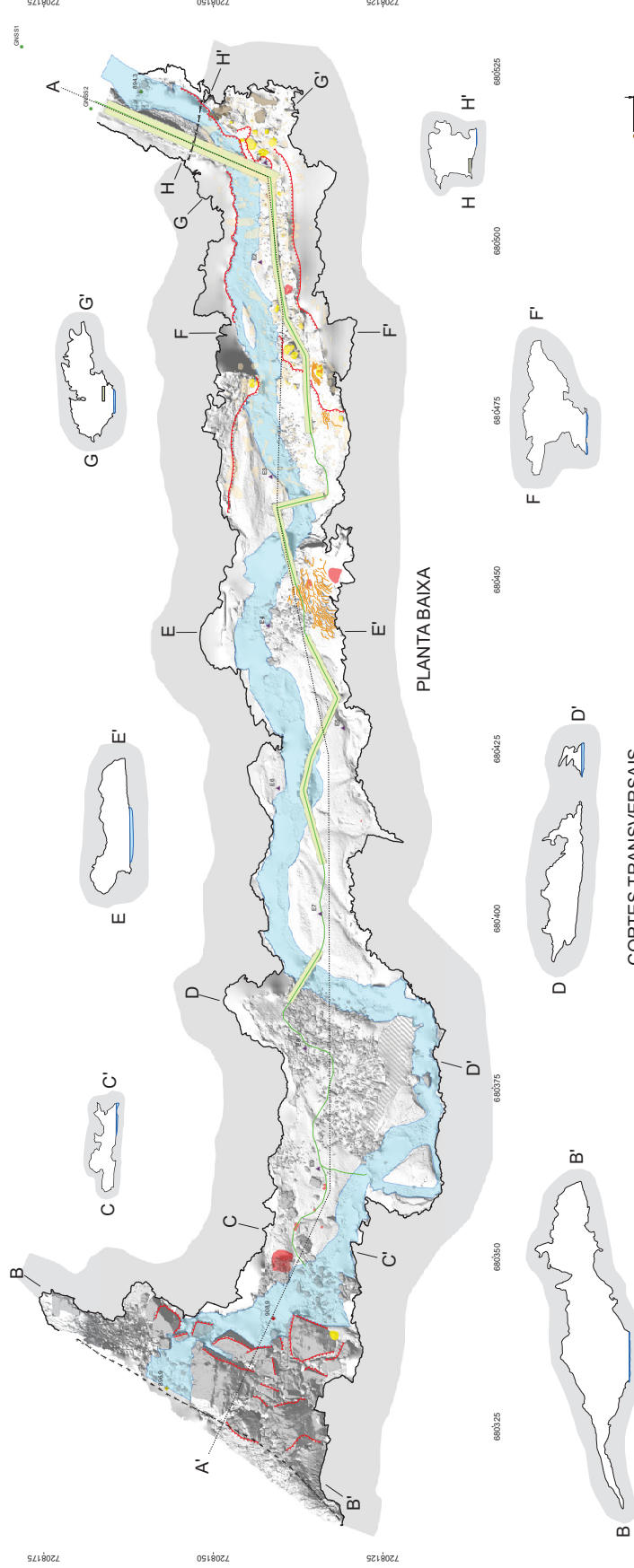
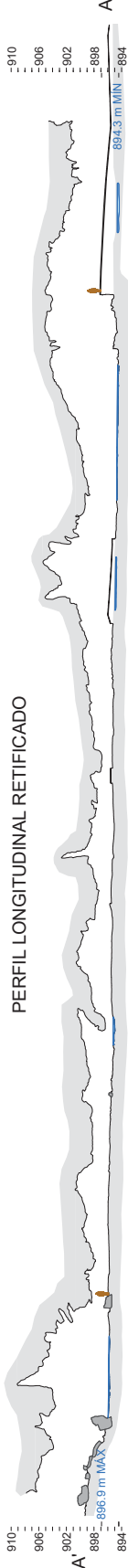
TEMA	ELEMENTO GRÁFICO	TIPO	COR - RGB	ESPESSURA
Estalactite	Polígono	Solid	Polígono: 255 234 190	0,15
		Road narrow	Contorno: 110 110 110	
Estalagmite	Polígono	Solid	Polígono: 255 255 0	0,15
		Road narrow	Contorno: 230 152 0	
Coluna	Polígono	Solid	Polígono: 137 112 68	0,2
		Road narrow	Contorno: 110 110 110	
Pilar	Polígono	100 Year Flood	Polígono: 107 126 174	0,2
		Road narrow	Contorno: 107 126 147	
Passarela	Polígono	Solid	Polígono: 232 240 190	0,2
		Road narrow	Contorno: 0 0 0	
Bloco	Polígono	Solid	Polígono: 156 156 156	0,15
		Road narrow	Contorno: 0 0 0	
Curso d'água	Polígono	Solid	Polígono: 190 232 255	0,25
		Road narrow	Contorno: 64 101 235	
Metacalcário	Polígono	Solid	Polígono: 225 225 225	-
		-	Contorno: -	
Guano	Polígono	Solid	Polígono: 230 0 0	0,15
		Road narrow	Contorno: 168 0 0	

TEMA	ELEMENTO GRÁFICO	SIMBOLOGIA	DISPLAY	STRETCH
Sombreamento sintético	Raster	Stretched	Contrast: 20%	None
			Brightness: 20%	
Modelo superfície piso	Raster	RGB Composite	Contrast: 0%	Percent clip
			Brightness: 0%	
Modelo superfície teto	Raster	Major road	Contrast: 0%	Percent clip
			Brightness: 0%	

TEMA	ELEMENTO GRÁFICO	FONTE	COR	TAMANHO
Título	Texto	Arial	0 0 0	14
Legenda	Texto	Arial	0 0 0	6,5
Indicadores de cortes	Texto	Arial	0 0 0	9
Representações	Texto	Arial	0 0 0	8
Espeleometria	Texto	Arial	0 0 0	7
MDS	Texto	Arial	0 0 0	8
Grid	Texto	Arial	0 0 0	6
Quadro informações	Texto	Arial	0 0 0	7
QR Code e hiperlinks	Texto	Arial	0 0 0	8
Mapas inserção	Texto	Arial	0 0 0	8
Escala gráfica	Texto	Arial	0 0 0	6
Escala numérica	Texto	Arial	0 0 0	6
Autoria	Texto	Arial	0 0 0	5

ANEXO 3

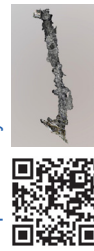
GRUTA DO BACAETAVA



CORTES TRANSVERSAIS



Relevo topográfico
<https://skfb.ly/oVUZu>



Modelo 3D
<https://skfb.ly/oW8yM>

ESPELEOMETRIA

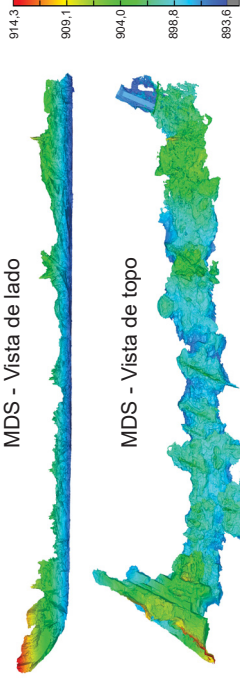
Volume: 15.351,82 m³
 Área: 4.139,05 m²
 Desenv. horizontal: 272,27 m
 Desenv. inclinado: 296,52 m
 Ponto zero: 896,9 m

Desnível total: 14,6 m
 Desnível positivo: 12 m
 Desnível negativo: 2,6 m
 Circuito turístico: 216,5 m
 Passarelas: 127 m

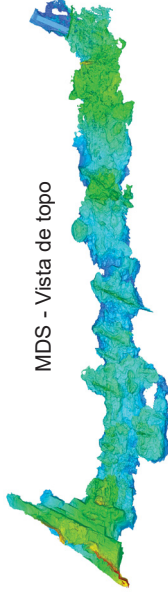


1:250

MDS - Vista de lado

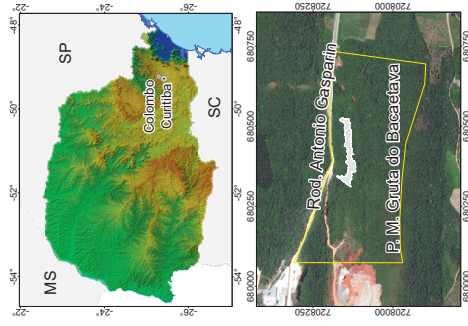


MDS - Vista de topo



LEGENDA

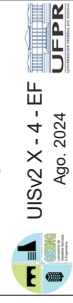
- Estação topográfica
- GNSS
- Ponto mais alto
- Ponto zero
- Ponto mais baixo
- Contorno externo
- Linha d'água
- Perfil longitudinal
- Cortes transversais
- Roteiro turístico
- Abrupto
- Travertino
- Estalactite
- Estalagmite
- Coluna
- Pilar
- Passarela
- Blocco
- Curso d'água
- Metacalcário
- Guano



Conduto Principal da
 Gruta do Bacaetava - PR - 3
 Colombo - PR

Sistema UTM 22S
 Datum SIRGAS 2000

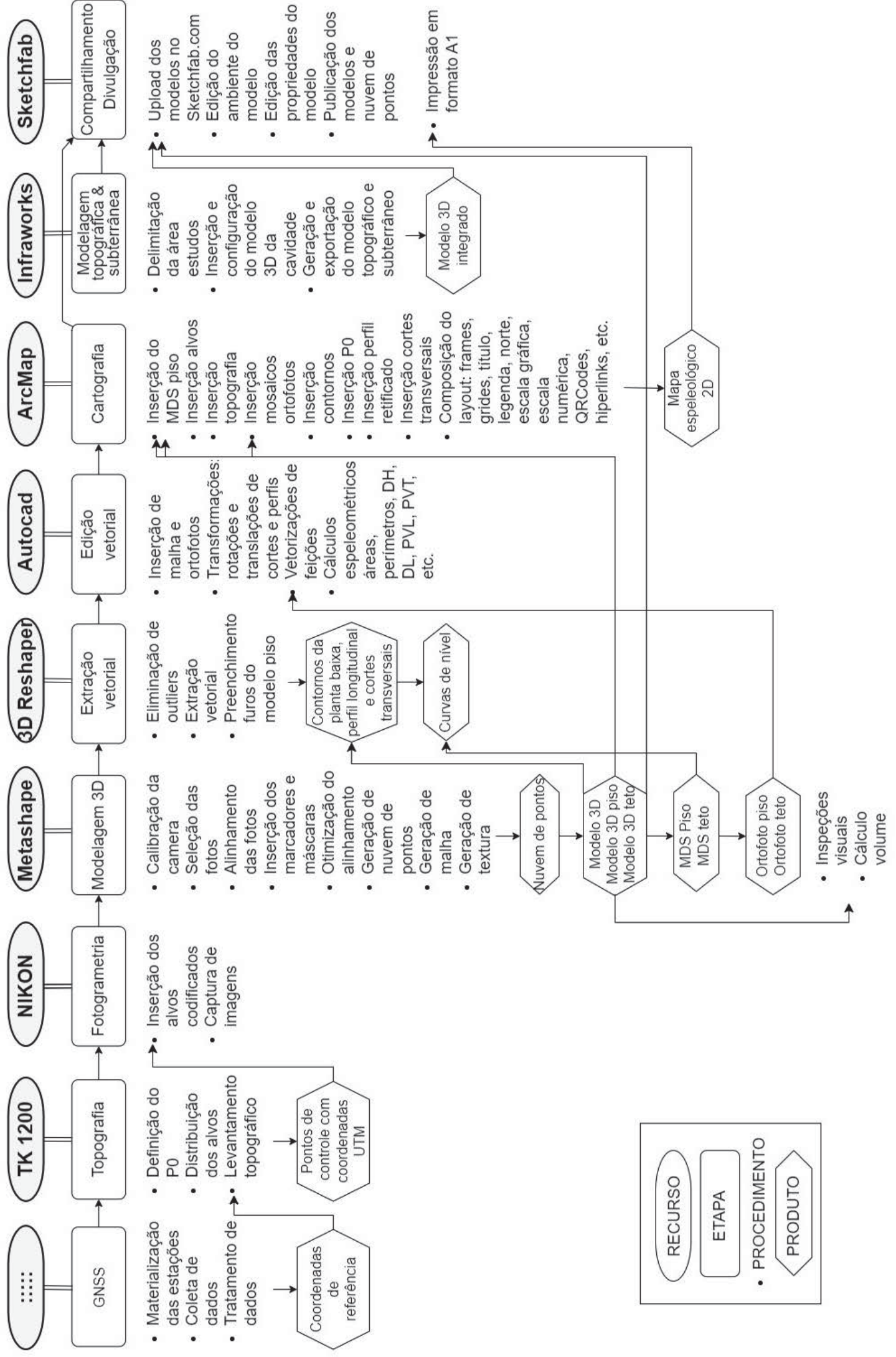
Fotogrametria e Cartografia
 Paulo Rodrigo Simões, MSc.



Ago. 2024

ANEXO 4

MAPEAMENTO DE CAVIDADES POR MODELOS 3D



RECURSO

ETAPA

PROCEDIMENTO

PRODUTO

ANEXO 5

COD	TIPO	ATIVIDADE	INSTRUMENTO	SOFTWARE	COMANDO	PROCEDIMENTO	OBS
G1	GNSS	POSICIONAMENTO GNSS	Hyper			automa tizado	Obrigaçõ de coordenadas UTM 2.25 SINGAS 2.000
G2	GNSS	Correçõ de coordenadas obtidas	RINEX	https://www.ign.fr/br/	Módulo de processamento, Antena, Altura, Arquivo	automa tizado	Correçõ de coordenadas obtidas
T1	T0106	Distribuir alvos	Alvos			manual	Distribuir alvos, assegurar visões, morfologias e feições interesse
T2	T0106	Levantamento dos targets	TS 1.200			automa tizado	Obrigaçõ de coordenadas UTM dos targets e tabela em formato TXT
T3	T0106	Ajustamento do levantamento	TS 1.200	Sistema Posidolo	Calcularmeta de campo	automa tizado	Coordenadas UTM SINGAS2000 2.25 dos targets em formato TXT para inserir no Metashape
T4	T0106	Exportaçõ de arquivo TXT		Sistema Posidolo	Calcularmeta de campo	automa tizado	
F1	F0106	Calibrarãõ da câmera	Nikon 2840	Metashape 2.0.1	Tools > Camera Calibration	automa tizado	Calibrarãõ segundo informações Agisoft
F2	F0106	Importaçõ de imagens	Agisoft 2800	Visualizador de imagens	Arquivos	automa tizado	Arquivos de imagens de baixa resolução
F3	F0106	Avaliaçõ de qualidade	PC	Metashape 2.0.1	Teclado	automa tizado	Analisar exclusãõ de imagens de baixa qualidade
F4	F0106	Estimativa de qualidãde	PC	Metashape 2.0.1	Select Camera > Estimate Image Quality	automa tizado	Definir um limiar e exibir imagens
F5	F0106	Inserçõ de mãscaras	PC	Metashape 2.0.1	Select Camera Tool > Add Subtract Selection	automa tizado	Definir um limiar e exibir imagens
F6	F0106	Alinhamento de fotos	PC	Metashape 2.0.1	Workflow > Align Photos	automa tizado	Alinhar em resoluçõõ HIGH
F7	F0106	Formataçõ de arquivo TXT com targets	PC	Wordpad	Teclado	automa tizado	Formatar colunas segundo Metashape
F8	F0106	Importaçõ de arquivos	PC	Metashape 2.0.1	File > Open > Detect Mark	automa tizado	Importar distãncias entre os targets
F9	F0106	Inserçõ de distãncias	PC	Metashape 2.0.1	Calcular meta de campo	automa tizado	Inserir distãncias entre os targets
F10	F0106	Otimizaçõ	PC	Metashape 2.0.1	Optimize Cameras	automa tizado	Analisar os resultados
F11	F0106	Geraçõ de nuvem de pontos	PC	Metashape 2.0.1	Workflow > Build Dense Cloud	automa tizado	Gerar nuvem em resoluçõõ MEDIUM
F12	F0106	Filtragem da nuvem de pontos	PC	Metashape 2.0.1	Tools > Dens Cloud > Filter Dense Cloud	automa tizado	Avallar a distãncia entre pontos para reduzir
F13	F0106	Remoçõ manual de outliers	PC	Metashape 2.0.1	Navigation / Selection	automa tizado	Inspeccionar a nuvem e remover os outliers a partir de uma visãõ visual
F14	F0106	Geraçõ de malha	PC	Metashape 2.0.1	Workflow > Build Mesh	automa tizado	Respostaõ MEDIUM superior: Agisoft 3D, Topin map ou Point Cloud, Interpolation: Disable, vertex: color,
F15	F0106	Exportaçõ de malha	PC	Metashape 2.0.1	File > Export > Export Model	automa tizado	Exportar malha para o software de modelagem 3D
F16	F0106	Exportaçõ de modelo	PC	Metashape 2.0.1	File > Export > Export Model	automa tizado	Exportar em formatos OBJ, GLB, PDR, DAE.
F17	F0106	Geraçõ e seçõõ de modelo do piso	PC	Metashape 2.0.1	Selection Tool / Delete	automa tizado	Fazer seçõõ e exclusãõ de paredes e piso;
F18	F0106	Gerãõ do modelo do teto	PC	Metashape 2.0.1	Selection Tool / Delete	automa tizado	Fazer seçõõ e exclusãõ de paredes e teto;
F19	F0106	Gerãõ de DEM do piso	PC	Metashape 2.0.1	Workflow > Build DEM	automa tizado	Insere em novo Chunk, arredondar o GSD, formato JPG
F20	F0106	Gerãõ de mosaico de ortofotos do piso	PC	Metashape 2.0.1	Workflow > Build Orthomosaic	automa tizado	Exportar em formato TIFF
F21	F0106	Exportaçõ de DEM do piso	PC	Metashape 2.0.1	File > Export > Export DEM	automa tizado	Exportar em formato TIFF
F22	F0106	Exportaçõ de mosaico ortofotos do teto	PC	Metashape 2.0.1	File > Export > Export Orthomosaic	automa tizado	Exportar em formatos JPG e em TIFF
F23	F0106	Exportaçõ do mosaico ortofotos do piso	PC	Metashape 2.0.1	File > Export > Export Orthomosaic	automa tizado	Exportar em formatos JPG e em TIFF
F24	F0106	Exportaçõ da nuvem de pontos	PC	Metashape 2.0.1	File > Export > Export Cloud Point	automa tizado	Exportar em formato E57 ou LAS
F25	F0106	Exportaçõ da nuvem de pontos	PC	Metashape 2.0.1	File > Export > Export Cloud Point	automa tizado	Exportar em formato E57 ou LAS
F26	F0106	Gerãõ e análise de relatório	PC	Metashape 2.0.1	File > Export > Export Report	automa tizado	Analisar resultados
T1	T15	VAZEDURA E REGISTRO	Leica BLX 360		Snit	automa tizado	Terminar pesquisa emite posições/
T2	T15	Download equações .bik	Leica BLX 360	BLX Data Manager v.2022.1.0	Conect > Download	automa tizado	Conectar e baixar dados via WIFI
T3	T15	Criaçõ de projeto	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Create project > Browse files	automa tizado	
T4	T15	Importaçõ de arquivos .bik	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Import > Browse files	automa tizado	Importar arquivos .bik
T5	T15	Registragõ dos nuvens	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Review and Optimize	semiautoma tizado	Realizar registragõ manualmente em planta e perfil e depois otimizar
T6	T15	Formataçõ de arquivo TXT com targets	PC	Wordpad	Review and Optimize	manual	Formatar colunas segundo Cyclone Register
T7	T15	Formataçõ de arquivos	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Review and Optimize > Optimize bundle	automa tizado	Atualizar colunas de acordo com o arquivo de targets
T8	T15	Otimizaçõ dos pontos	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Review and Optimize > Optimize bundle	automa tizado	Atualizar colunas de acordo com o arquivo de targets
T9	T15	Mostrar e esconder pontos móveis	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Show Moved Points / Delete All Moved	automa tizado	Remover pessoas
T10	T15	Finalizaçõ	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Accept	automa tizado	Avallar métricas de erro
T11	T15	Publicaçõ de relatório	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Report > Publish	automa tizado	Geraçõõ do relatório de pós-processamento
T12	T15	Exportaçõ	PC	Cyclone Register 360 2022.1.0	Report > Publish	automa tizado	Indicar os formatos a serem exportados: LAS
T13	T15	Avaliaçõ dos resultados	PC	PDF Reader	Manual	automa tizado	Avallar as variãveis do relatório de pós-processamento
A1	GNP	Eliminãõ de outliers	PC	Metashape 2.0.1	Selection > Free-Form Selection File > Export > Arquivo LAS	manual	Eliminãõ das partícula e limpeza das entradas: exportaçãõ em formato LAS;
A2	GNP	Inserçõ de outliers	PC	Metashape 2.0.1	Selection > Free-Form Selection	manual	Eliminãõ das partícula e limpeza das entradas: exportaçãõ em formato LAS;
A3	GNP	Inserçõ de nuvens no software	PC	CloudCompare 2.13 alpha	Arquivo > Abrir > Arquivo LAS	automa tizado	Arquivos LAS das duas nuvens
A4	GNP	Calcular a distãncia aproximãde entre nuvens	PC	CloudCompare 2.13 alpha	Calcular a distãncia	automa tizado	Definir arquivo de referência (LASER)
A5	GNP	Avallar as distãncias aproximãdas	PC	CloudCompare 2.13 alpha	Calcular a distãncia > Mãxima distãncia	automa tizado	Definir distãncia máxima (0,3 m)
A6	GNP	Calcular as distãncias reais	PC	CloudCompare 2.13 alpha	Calcular a distãncia > Calcular	automa tizado	Selecionar o histograma em formato LAS e formato imagem
A7	GNP	Calcular as distãncias reais	PC	Microsoft Excel 2016	Estãõ de porcentagem	automa tizado	Calcular as porcentagens e gerar gráficos

COD	TIPO	ATIVIDADE	INSTRUMENTO	SOFTWARE	COMANDO	PROCEDIMENTO	OBS
EV1	EVU	EXTRAÇÃO E EDIÇÃO VETORIAIS	PC	3D Reshaper 18.0.8	Polilinha > Contorno externo > Exportar polilinha	automa tizado	Utilizar o modelo 3D completo, exportar em formato DXF
EV2	EVU	Exatidão e exportação do contorno do piso	PC	3D Reshaper 18.0.8	Polilinha > Contorno externo > Exportar polilinha	automa tizado	Utilizar o modelo 3D do piso, exportar em formato DXF
EV3	EVU	Exatidão do contorno do piso	PC	3D Reshaper 18.0.8	Tools > Generate Contours	automa tizado	Utilizar o comando de geração de contornos
EV4	EVU	Exatidão do contorno do piso	PC	Metashape 2.0.1	Tools > Generate Contours	automa tizado	Definir equidistância, exportar em formato SHP
EV5	EVU	Exatidão de curvas de nível do piso	PC	Metashape 2.0.1	Tools > Generate Contours	automa tizado	Definir equidistância, exportar em formato SHP
EV6	EVU	Exatidão de seções transversais	PC	3D Reshaper 18.0.8	Polilinha > Seções planares	automa tizado	Exportar para AutoCAD 2019
EV7	EVU	Reordenar, trasladar e editar as seções	PC	AutoCAD 2019	3D Rotate / Flatten	sema tizado	Salvar em formato DWG
EV8	EVU	Exatidão perim (longitudinal)	PC	3D Reshaper 18.0.8	Polilinha > Seções ao longo da curva	automa tizado	Exportar para AutoCAD 2019
EV9	EVU	Exatidão perim (transversal)	PC	AutoCAD 2019	Break > 3D Rotate > Move	manual	Salvar em formato DXF
V1	VET	Vetorizar o contorno	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o comando de vetorização do piso como referência
V2	VET	Vetorizar passarelas	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos e DEM do piso como referência
V3	VET	Vetorizar pilares	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos do piso como referência
V4	VET	Vetorizar colunas	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos do piso como referência
V5	VET	Vetorizar abrigos	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos e DEM do piso como referência
V6	VET	Vetorizar pilares	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos do piso como referência
V7	VET	Vetorizar indicadores de cores	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos do piso como referência
V8	VET	Vetorizar indicadores de cores	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos do piso como referência
V9	VET	Vetorizar indicador do perfil	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos do piso como referência
V10	VET	Vetorizar roteiro turístico	PC	3D Reshaper 18.0.8	Construir polilinha	manual	Utilizar o modelo 3D do piso, desviar de blocos;
V11	VET	Vetorizar trevões	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos do piso como referência
V12	VET	Vetorizar travessias	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos e DEM do piso como referência
V13	VET	Vetorizar estalajames	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos e DEM do piso como referência
V14	VET	Vetorizar estalajames	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o mosaico de entalhos e DEM do piso como referência
V15	VET	Vetorizar polígono da floresta	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o contorno externo como referência
V16	VET	Vetorizar filhas geológicas	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o modelo 3D ou DEM do teto como referência
V17	VET	Vetorizar o ponto mais alto	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o modelo 3D ou DEM do teto como referência
V18	VET	Vetorizar o ponto mais alto	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o DEM do piso como referência
V19	VET	Vetorizar o ponto mais baixo	PC	ArCMap 10.8	ArCMap > Edit Features	manual	Utilizar o DEM do piso como referência
EM1	ESPM	Fechar o modelo completo	PC	Metashape 2.0.1	Tools > Mesh > Close holes; Tools > Mesh > Measure	automa tizado	Entidades devem estar ancoradas em plano vertical
EM2	ESPM	Calcular volume	PC	Metashape 2.0.1	Tools > Mesh > Measure Area and Volume	automa tizado	Todos os buracos precisam ser previamente fechados.
EM3	ESPM	Calcular área do contorno externo	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Area / Add Field > Calculate Geometry	automa tizado	O polígono precisa ser fechado no AutoCAD
EM4	ESPM	Calcular perímetro do contorno externo	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Area / Length	automa tizado	Valor dado pelo comando Area
EM5	ESPM	Calcular área do piso	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Area / Add Field > Calculate Geometry	automa tizado	O polígono precisa ser fechado no AutoCAD
EM6	ESPM	Calcular perímetro do piso	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Area / Add Field > Calculate Geometry	automa tizado	Valor dado pelo comando Area no AutoCAD
EM7	ESPM	Calcular perímetro da projeção vertical	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Area / Add Field > Calculate Geometry	automa tizado	Valor dado pelo comando Area no AutoCAD
EM8	ESPM	Calcular área da projeção transversal	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Area / Add Field > Calculate Geometry	automa tizado	Valor dado pelo comando Area no AutoCAD
EM9	ESPM	Calcular área da projeção transversal	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Area / Add Field > Calculate Geometry	automa tizado	Valor dado pelo comando Area no AutoCAD
EM10	ESPM	Calcular perímetro da projeção transversal	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Area / Add Field > Calculate Geometry	automa tizado	Valor dado pelo comando Area no AutoCAD
EM11	ESPM	Identificar o ponto mais alto	PC	ArCMap 10.8	Zoom / Identify	sema tizado	Analisar as curvas de nível
EM12	ESPM	Identificar o ponto mais baixo	PC	ArCMap 10.8	Zoom / Identify	sema tizado	Analisar as curvas de nível
EM13	ESPM	Calcular o Desnivel Absoluto	PC	ArCMap 10.8	Sum	sema tizado	Subtrair o ponto mais baixo do ponto zero
EM14	ESPM	Calcular o Desnivel Absoluto	PC	Calculadora	Soma	sema tizado	Subtrair o ponto mais alto do ponto zero
EM15	ESPM	Calcular o Desnivel Total	PC	Calculadora	Soma	sema tizado	Subtrair o ponto mais baixo do ponto mais alto
EM16	ESPM	Calcular o Desnivel Total	PC	Calculadora	Soma	sema tizado	Subtrair o ponto mais alto do ponto zero
EM17	ESPM	Calcular o desnível hidrelógico	PC	Calculadora	Soma	sema tizado	Subtrair o ponto mais baixo do ponto zero
EM18	ESPM	Calcular o desnível hidrelógico	PC	Calculadora	Soma	sema tizado	Subtrair o ponto mais alto do ponto zero
EM19	ESPM	Calcular o desenvolvimento horizontal (1)	PC	3D Reshaper	Polilinha / Construir polilinha	automa tizado	Vetorizar segmentos sobre o contorno externo e somar
EM20	ESPM	Calcular o desenvolvimento horizontal (2)	PC	3D Reshaper	Polilinha / Construir polilinha	automa tizado	Vetorizar segmentos sobre o modelo 3D do piso e somar
EM21	ESPM	Calcular largura mínima	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Adf Field > Calculate Geometry > Statistics	automa tizado	Tracar segmentos horizontais perpendicularmente ao desenvolvimento
EM22	ESPM	Calcular largura média	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Adf Field > Calculate Geometry > Statistics	automa tizado	Tracar segmentos horizontais perpendicularmente ao desenvolvimento
EM23	ESPM	Calcular largura máxima	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Adf Field > Calculate Geometry > Statistics	automa tizado	Tracar segmentos horizontais perpendicularmente ao desenvolvimento
EM24	ESPM	Calcular largura mínima	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Adf Field > Calculate Geometry > Statistics	automa tizado	Tracar segmentos verticais perpendicularmente ao desenvolvimento
EM25	ESPM	Calcular altura média	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Adf Field > Calculate Geometry > Statistics	automa tizado	Tracar segmentos verticais perpendicularmente ao desenvolvimento
EM26	ESPM	Calcular altura máxima	PC	AutoCAD 2019 / ArCMap 10.8	Adf Field > Calculate Geometry > Statistics	automa tizado	Tracar segmentos verticais perpendicularmente ao desenvolvimento
EM27	ESPM	Calcular comprimento de circunferência	PC	ArCMap 10.8	Adf Field > Calculate Geometry > Summarize	automa tizado	Tracar o circuito turístico sobre DEM
EM28	ESPM	Calcular comprimento de circunferência	PC	ArCMap 10.8	Adf Field > Calculate Geometry > Summarize	automa tizado	Tracar o circuito turístico sobre DEM

COD	TIPO	ATIVIDADE	INSTRUMENTO	SOFTWARE	COMANDO	PROCEDIMENTO	OBS
C1	CARTO	CARTOGRAFIA					
C2	CARTO	Inserir layer contornado base	PC	ArcMap 10.8	Add Data	automatizado	Converter DWG para SHP
C3	CARTO	Inserir layer contornado piso	PC	ArcMap 10.8	Add Data	automatizado	Converter DWG para SHP
C4	CARTO	Inserir layer contornado rede	PC	ArcMap 10.8	Add Data	automatizado	Utilizar o DTM do Lote Exportar em formato PNG
C5	CARTO	Gerar o mapa de cores de relevo sombreado	PC	ArcMap 10.8	3D Analyst Tools > Raster Surface > Hillshade	automatizado	Aumentar brilho em 20%
C6	CARTO	Inserir grade de coordenadas UTM	PC	ArcMap 10.8	Properties > Grid > New grid	automa listado	Configurar fonte, espaçamento, espessura linhas
C7	CARTO	Inserir layer Alvos	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C8	CARTO	Inserir layer Estações GNSS	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C9	CARTO	Inserir layer Pontos	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C10	CARTO	Inserir Pontos mais alto	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C11	CARTO	Inserir Pontos mais baixo	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C12	CARTO	Inserir layer Linhas d'água	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C13	CARTO	Inserir layer Linhas de energia	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C14	CARTO	Inserir layer Rodovias turísticas	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C15	CARTO	Inserir layer Rodovias transversais	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C16	CARTO	Inserir layer Estradas	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C17	CARTO	Inserir layer Ferrovias	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C18	CARTO	Inserir layer Estradas	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C19	CARTO	Inserir layer Estradas	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C20	CARTO	Inserir layer Colunas	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C21	CARTO	Inserir layer Pilar	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C22	CARTO	Inserir layer Passarela	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C23	CARTO	Inserir layer Cercas	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C24	CARTO	Inserir layer Cercas d'água	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C25	CARTO	Inserir layer Metacalção	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C26	CARTO	Inserir layer Guano	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C27	CARTO	Inserir layer Cortes	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C28	CARTO	Inserir layer Cortes B	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C29	CARTO	Inserir layer Cortes C	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C30	CARTO	Inserir layer Cortes D	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C31	CARTO	Inserir layer Cortes E	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C32	CARTO	Inserir layer Cortes F	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C33	CARTO	Inserir layer Cortes G	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C34	CARTO	Inserir layer Perfil longitudinal	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C35	CARTO	Inserir layer MDS-Piso	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C36	CARTO	Inserir layer MDS-Paralela	PC	ArcMap 10.8	Add Data / Properties > Symbolology	automa listado	Configurar a simbologia e salvar o arquivo.lyr
C37	CARTO	Gerar ORCodes dos modelos on line	PC	Internet	https://br.cadtools.com/arcgis/arcgis.html	automatizado	Gerar ORCode on line
C38	CARTO	Importar ORCodes	PC	ArcMap 10.8	Insert Picture	automatizado	Inserir nome, local, sistema, metadado, data
C39	CARTO	Inserir quadro de informações	PC	ArcMap 10.8	Insert Text / Edit Text	automa listado	Inserir nome de grifa
C40	CARTO	Inserir título	PC	ArcMap 10.8	Insert Title	automa listado	Inserir texto e editar posições
C41	CARTO	Inserir texto identificação fontes	PC	ArcMap 10.8	Insert Text / Edit Text	automa listado	Inserir texto e editar posições
C42	CARTO	Inserir texto identificação fontes	PC	ArcMap 10.8	Insert Text / Edit Text	automa listado	Inserir texto e editar posições
C43	CARTO	Inserir layer Placa PERM E Cortes	PC	ArcMap 10.8	Insert Text / Edit Text	automa listado	Inserir texto e editar posição e ângulo
C44	CARTO	Inserir a autora	PC	ArcMap 10.8	Insert Legend	automa listado	Configurar a sequência
C45	CARTO	Inserir legenda	PC	ArcMap 10.8	Insert Legend	automa listado	Divulgar administrativa estadual e localidades; configurar simbologia
C46	CARTO	Inserir mapa inserido estadual	PC	ArcMap 10.8	Insert Data Frame / Properties	automa listado	Configurar tamanho da fonte e centralizar texto
C47	CARTO	Inserir dados esferométricos	PC	ArcMap 10.8	Insert Text / Edit Text	automa listado	Configurar unidades, linha e texto
C48	CARTO	Inserir esquadra gráfica	PC	ArcMap 10.8	Insert Scale Bar	automa listado	Configurar tamanho da fonte
C49	CARTO	Inserir escala	PC	ArcMap 10.8	Insert Scale Text	automa listado	Configurar tamanho da fonte
C1	COM	COMPARTILHAMENTO					
C2	COM	Reduzir o tamanho do arquivo - 100 mb	PC	RCAP Photo / Metashape	RCAP Model > Export Model > Decimation Percentage	automa listado	Exportar em GLB
C3	COM	Fazer upload no repositório	PC	Sketchfab.com	Edit properties / Edit 3D Setting	manual	Fazer upload a nuvem GLB
C4	COM	Configurar o modelo 3D	PC	Sketchfab.com	Edit properties / Edit 3D Setting	manual	Configurar rotacao, iluminação, relevo, textura, animações, descrição, VR
C4	COM	Publicar o modelo	PC	Sketchfab.com	Edit 3D Setting / Publish	automatizado	

(1) Equivalente a ProjGeoHorizontal - PH

(2) Equivalente ao Desenvolvimento Linear - DL