



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

PEDRO EDSON FACE MOURA

**APLICAÇÃO DE DADOS LIDAR NA CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA
DE CAVERNAS NA PORÇÃO SUL DA BACIA DE IRECÊ-BA**

FORTALEZA

2022

PEDRO EDSON FACE MOURA

APLICAÇÃO DE DADOS LIDAR NA CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DE
CAVERNAS NA PORÇÃO SUL DA BACIA DE IRECÊ-BA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geografia. Área de concentração: Dinâmica territorial e ambiental.

Orientador: Rubson Pinheiro Maia
Coorientador: Francisco Hilário Rego Bezerra

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M889a Moura, Pedro Edson Face.

Aplicação de dados LIDAR na caracterização geomorfológica de cavernas na porção sul da Bacia de Irecê-BA / Pedro Edson Face Moura. – 2022.

186 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Rubson Pinheiro Maia.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco Hilário Rego Bezerra.

1. Sistema Cárstico. 2. LIDAR. 3. Cavernas. I. Título.

CDD 910

PEDRO EDSON FACE MOURA

APLICAÇÃO DE DADOS LIDAR NA CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DE
CAVERNAS NA PORÇÃO SUL DA BACIA DE IRECÊ-BA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geografia. Área de concentração: Dinâmica territorial e ambiental.

Aprovada em: 31/10/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rubson Pinheiro Maia (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Hilário Rego Bezerra (Coorientador)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Prof. Dr. César Ulisses Vieira Veríssimo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Celso Lira Ximenes
PETROBRAS

Prof. Dr. Vincenzo La Bruna
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela conquista de alcançar com êxito a conclusão da pesquisa. Aos meus pais, Maria da Sagrada Face Moura e José Edson Moura, a quem dedico esse trabalho, e a minha tia Antônia Elba Saraiva Nogueira, pelo apoio incondicional. A minha companheira Nágila Fernanda Furtado Teixeira.

Ao meu orientador, Rubson Pinheiro Maia pela oportunidade da pesquisa e ao meu coorientador Francisco Hilário Rego Bezerra pelo grande apoio e a oportunidade de trabalhar com pesquisadores de grande renome.

Aos meus colegas espeleólogos e grandes mentores, Jefferson Lima, César Veríssimo, Celso Ximenes, Wilson, que sempre estiveram a ajudar. Agradeço também aos grandes amigos e colegas de laboratório da (UFRN), Cayo, Vincenzo Rebeca, Patrícia, Jane, Catarina e aos amigos motoristas da UFRN em especial Pedro e Tonhão.

Aos Amigos e colegas de laboratório da UFC, Henrique, Letícia, Micaele, Sabrina, Beatriz, Wesley, Hudson, e todos os que vieram antes de mim e que viram após.

A todos os amigos integrantes e coordenadores do Laboratório de Cartografia (LABOCART), Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência (PIBID), Laboratório de Geoecologia das Paisagens e Planejamento Ambiental (LAGEPLAN), Laboratório de Geomorfologia Costeira e Continental (LAGECO) do Departamento de Geografia e do Laboratório de Geotécnica e Prospecção (LAGETEC) do Departamento de Geologia, que fizeram e fazem parte da minha formação acadêmica.

A Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP).

Ao Projeto Processos e propriedades em reservatórios carbonáticos fraturados e carstificados financiado pela Shell. A todos os colegas estudantes e professores do Departamento de Geografia que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento dessa pesquisa.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar três cavernas, sendo elas Ioiô, Diva de Maura e Paixão, todas na Chapada Diamantina na Bahia, sob a ótica dos processos geomorfológicos associados a formações de espeleotemas. Tal investigação foi subsidiada por dados extraídos a partir de nuvens de pontos obtidas por escaneamento laser, a fim de estabelecer uma classificação para os tipos, formas, padrões e densidade de distribuição de espeleotemas. Para tanto, serão analisados fatores de controle estrutural associados a dados morfométricos e suas variações, mediante a geometria dos tetos e a resposta geomorfológica. Na primeira parte, é realizada uma revisão bibliográfica dos conceitos e definições que abrangem a perspectiva sistêmica do carste. Na segunda parte, é realizada uma discussão a respeito dos dados LIDAR e sua aplicação na geomorfologia de cavernas, demonstrando a utilização de índices morfométricos na extração automática de feições de cavernas. Na terceira parte é sugerida e aplicada a classificação da ornamentação da caverna baseada na morfologia dos grupos de espeleotemas, no local onde se desenvolvem e no processo de desenvolvimento predominante. Os dados obtidos com essa pesquisa, permitiu mostrar as diversas aplicabilidades obtidas através do processamento e manipulação das nuvens de pontos obtidas, seja por LIDAR, seja por fotogrametria. Esses resultados apontam para novas perspectivas de análises das feições internas de caverna, que podem ser expandidas para além da ornamentação de teto, fomentando as discussões a respeito destes ambientes.

Palavras-chave: sistema cárstico; dados LIDAR; ornamentação de cavernas.

ABSTRACT

The present work, structured in three parts, has as its main objective to analyze three caves, namely Ioiô, Diva de Maura and Paixão, from the perspective of geomorphological phenomena, subsidized by data extracted from point clouds, in order to establish a classification for the types of ornamentation present in the cave, taking into account structural control factors, associated with morphometric data and their variations through the geometry of the ceilings and the response of the speleothems in the formation of this cave ornamentation. In part I, a bibliographic review of the concepts and definitions that encompass the systemic perspective of karst is carried out. Part II discusses Lidar data and its application in cave geomorphology, demonstrating the use of morphometric indices in the automatic extraction of cave features. In the third part of this work, the classification of cave ornamentation is suggested and applied, based on the morphology of the speleothem groups, on the place where they develop and on the predominant development process. The data obtained from this research allowed to show the different applicability obtained through the processing and manipulation of the point clouds obtained, either by LIDAR or by Photogrammetry. These results point to new perspectives for the analysis of the internal features of the cave, which can be expanded beyond the ceiling ornamentation, encouraging discussions about these environments.

Keywords: ceiling ornamentation; cave geomorphology; LIDAR data.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo.....	15
Figura 2 - Sistemas de recarga.....	19
Figura 3 - Padrões internos a partir de cortes horizontais	21
Figura 4 - Padrões internos a partir de cortes transversais	22
Figura 5 - Desenvolvimento do relevo cárstico em relação a variações climáticas e mudanças no nível de base.....	28
Figura 6 - Modelo evolutivo para carste geossinclinais	29
Figura 7 - Modelo simplificado de desenvolvimento de caverna.....	31
Figura 8 - Modelo de gotejamento em caverna	33
Figura 9 - Modelo de variações de espeleotemas de teto a partir da dinâmica evolutiva da caverna.....	36
Figura 10- Processo de Gotejamento formando espeleotemas	38
Figura 11- Altimetria, drenagem e geologia básica da área de estudo.....	42
Figura 12- Abrangente sistema cárstico de Irecê e Una-Utinga.....	44
Figura 13- Tipos de LIDAR segundo a plataforma do sensor.....	51
Figura 14- Nuvens de pontos provenientes de LIDAR fixo e mobile	52
Figura 15- Artefatos nas nuvens de pontos obtidas por LIDAR fixo e Mobile	53
Figura 16- Interface do software CloudCompare.....	55
Figura 17- Perspectiva e visualização da nuvem de pontos no CloudCompare ..	56
Figura 18- Falha na nuvem de pontos no CloudCompare	57
Figura 19- Falha na nuvem de pontos exemplo esquemático	58
Figura 20- Ferramenta de corte manual de nuvens de pontos do Cloud Compare exemplo esquemático	59
Figura 21- Resultado da utilização da ferramenta de corte no CloudCompare	60
Figura 22- Delimitação da área útil do dado LIDAR	61
Figura 23- Sobreposição do levantamento de LIDAR aos levantamentos espeleométrico de cavernas Ioiô, Diva de Maura e Paixão.....	62
Figura 24- Quadro esquemático das etapas procedimentais da utilização de	

dados LIDAR em softwares livres.....	63
Figura 25- Extração manual de lineamentos	64
Figura 26- Analogia geométrica entre os espeleotemas e os volumes dos cones e cilindros.....	65
Figura 27- Tipos de grupos de espeleotemas	66
Figura 28- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e sedimentos detríticos no piso da caverna loiô	71
Figura 29- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e lineamentos no teto da caverna loiô.....	72
Figura 30- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e sedimentos detríticos no piso da caverna Diva de Maura	73
Figura 31- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e lineamentos no teto da caverna loiô.....	74
Figura 32- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e sedimentos detríticos no piso da caverna Paixão..	75
Figura 33- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e lineamentos no teto da caverna Paixão	76
Figura 34- Aspectos morfológicos gerais da caverna loiô.....	80
Figura 35- aspecto do teto da caverna loiô	82
Figura 36- Aspectos morfológicos gerais da caverna Diva de Maura	84
Figura 37- Aspecto do teto da caverna Diva de Maura	86
Figura 38- Aspectos morfológicos gerais da caverna Paixão.....	88
Figura 39- Aspecto do teto da caverna Paixão.....	90
Figura 40- Mapa de lineamentos (linhas vermelhas) e mapa de alinhamento de espeleotemas (linhas azuis) da caverna loiô.....	92
Figura 41- Mapa de lineamentos (linhas vermelhas) e mapa de alinhamento de espeleotemas (linhas azuis) da caverna Diva de Maura	93
Figura 42- Mapa de lineamentos (linhas vermelhas) e mapa de alinhamento	

de espeleotemas (linhas azuis) da caverna Paixão.....	94
Figura 43- Posição dos espeleotemas na caverna loiô.....	96
Figura 44- Posição dos espeleotemas na caverna Diva de Maura	97
Figura 45- Posição dos espeleotemas na caverna Paixão.....	98
Figura 46- Modelo conceitual de ornamentação em teto de caverna formado a partir de dobra	99
Figura 47- Modelo conceitual de ornamentação em teto de caverna formado a partir de zonas de colapso gravitacional	101
Figura 48- Modelo conceitual de ornamentação em teto de caverna formado a partir de encontro de direções.....	102
Figura 49- Mapeamento da ornamentação de teto da caverna loiô.....	104
Figura 50- Mapeamento da ornamentação de teto da caverna Diva de Maura ...	106
Figura 51- Mapeamento da ornamentação de teto da caverna Paixão.....	108
Figura 52- Área de ocorrência dos espeleotemas nas três cavernas.....	109
Figura 53- Volume dos espeleotemas nas três cavernas.....	111
Figura 54- Volume totais dos espeleotemas somados nas três cavernas.....	112
Figura 55- Modelo de desenvolvimento de ornamentação da caverna IOI	115
Figura 56- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em teto plano da caverna DDM	117
Figura 57- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em zona de colapso da caverna DDM.....	119
Figura 58- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em eixo de dobra da caverna PAX	121
Figura 59- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em zona de colapso da caverna PAX	122
Figura 60- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em encontro de direções da caverna PAX	124

LISTA DE SIGLAS

LIDAR	LIGHT DETECTION AND RANGING
QGIS	QUANTUM GIS
MDE	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO
VANT	VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO
TLS	TERRESTRIAL LASER SCANNER
SIG	SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA
IOI	CAVERNA IOIÔ
DDM	CAVERNA DIVA DE MAURA
PAX	CAVERNA PAIXÃO

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	14
3	QUESTÃO CLIMÁTICA	16
4	SISTEMA CÁRSTICO: CONCEPÇÕES TEÓRICAS	17
4.1	Padrões internos da caverna.....	20
4.2	Espeleotemas.....	23
4.3	Modelos evolutivos	27
5	SISTEMA CÁRSTICO NA FORMAÇÃO SALITRE.....	40
6	PROPOSTAS METODOLÓGICAS PARA A INTERPRETAÇÃO DE DADOS LIDAR EM GEOMORFOLOGIA DE CAVERNA	46
6.1	Geomorfologia de caverna, Nuvem de pontos e LIDAR.....	47
6.2	A utilização de dados LIDAR em cavernas	48
7	PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE DADOS LIDAR EM TRÊS CAVERNAS DO CARSTE IRECÊ E UNA-UTINGA.....	62
8	IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES COM USO DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS	69
9	CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS/GEOMORFOLÓGICAS DAS CAVERNAS IOIÔ, DIVA DE MAURA E PAIXÃO	77
9.1	Geologia das cavernas.....	77
9.2	Características morfométricas das cavernas	79
10	CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS TETOS E DOS ESPELEOTEMAS DE TETO.....	91
11	MAPEAMENTO DOS ESPELEOTEMAS E MODELOS DE ORNAMENTAÇÃO DAS CAVERNAS	95
11.1	Mapeamento da ornamentação da caverna	102
11.2	Quantificação das ornamentações das cavernas IOI, DDM e PAX....	109
12	MODELO DE DESENVOLVIMENTO DA ORNAMENTAÇÃO DAS CAVERNAS IOIÔ, DIVA DE MAURA E PAIXÃO.....	113
13	CONCLUSÕES	125
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICE A - QUADRO COMPILATÓRIO DOS MODELOS TEÓRICOS UTILIZADOS NO TRABALHO	135

APÊNDICE B - GRÁFICOS DE MORFOMETRIA DOS GRUPOS DE ESPELEOTEMAS DA IOI	138
APÊNDICE C - GRÁFICOS DE MORFOMETRIA DOS GRUPOS DE ESPELEOTEMAS DA DDM	139
APÊNDICE D - GRÁFICOS DE MORFOMETRIA DOS GRUPOS DE ESPELEOTEMAS DA PAX.....	140
APÊNDICE E - MAPA DE ALTIMETRIA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA IOI.....	141
APÊNDICE F - MAPA DE ALTIMETRIA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA DDM.....	142
APÊNDICE G - MAPA DE ALTIMETRIA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA PAX.....	143
APÊNDICE H - MAPA DE FLUXOS E MORFOLOGIA BÁSICA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA IOI	144
APÊNDICE I - MAPA DE FLUXOS E MORFOLOGIA BÁSICA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA DDM.....	145
APÊNDICE J - MAPA DE FLUXOS E MORFOLOGIA BÁSICA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA PAX	146
APÊNDICE K - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS E RECORTES 3D UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DE MEDIDAS E DESCRIÇÕES DA CAVERNA IOI.....	147
APÊNDICE L - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS E RECORTES 3D UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DE DESCRIÇÕES DA CAVERNA DDM.....	160
APÊNDICE M - FOTOGRAFIA DA CRATERA QUE POSSUI NÍVEL FREÁTICO NA CAVERNA DDM.....	176
APÊNDICE N - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS E RECORTES 3D UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DE MEDIDAS E DESCRIÇÕES DA CAVERNA PAX	177

1 INTRODUÇÃO

Cavernas são espaços subterrâneos formados pelo processo de intemperismo natural em rochas, em sua maioria do tipo carbonáticas (PALMER, 2007; VERESS, 2016). Nesses espaços subterrâneos são encontradas diversas feições geomorfológicas chamadas espeleotemas, que são definidos como depósitos minerais gerados por dissolução em meio aquoso, principalmente do carbonato de cálcio, pelo processo de carbonatação e posterior precipitação deste carbonato na forma de depósitos minerais, (RODRIGUES et al, 2007) esse processo amplia e coalesce a porosidade presente nas rochas (porosidade primária) formando os espaços que compreendem as cavernas (porosidade secundária). Os espeleotemas são gerados, em grande parte, nos tetos das cavernas, formando a chamada ornamentação.

Existem vários tipos de espeleotemas e várias classificações seguindo diferentes critérios, que incluem formas derivadas dos processos de gotejamento ou de fluxos de exsudação, águas paradas dentre outros (LINO, 2009; PILÓ, 2010; PALMER, 2007; TRAVASSOS, 2019). Porém durante muitos anos, as técnicas de espeleometria tradicionais, embora excelentes para mapear com grande precisão as plantas baixas, ou pisos de cavernas, não representaram com a mesma precisão os tetos das cavidades subterrâneas. Portanto, essas técnicas tradicionais, no caso a espeleometria com bússolas, não são capazes de apresentar um vislumbre detalhado das estruturas, formas e ornamentação dos tetos de cavernas. Neste sentido, foram realizados levantamentos a partir da utilização de dados LIDAR para que assim possa ser feita uma análise qualitativa e quantitativa dos tetos de três cavernas formadas em carbonatos das bacias sedimentares de Irecê e Una-Utinga.

A utilização dessas novas tecnologias, como o LIDAR, a partir do século XX vem lançando luz sobre a escuridão perpétua em muitos desses ambientes, tornando a tarefa de mapear e compreender as cavernas menos árdua, mais rápida e simplificada, aumentando inclusive a possibilidade de se monitorar processos geomorfológicos internos (IDREES; PRADHAN, 2016).

Assim, os sensores como o LIDAR (*Light Detection and Ranging*) estão revolucionando o entendimento das ciências a respeito das formas, das condições de gênese e evolução desses relevos (IDREES; PRADHAN, 2016). É importante

salientar que a tecnologia não substitui as interações humanas com os ambientes subterrâneos. A figura do espeleólogo, as técnicas associadas as descrições, tomadas com bussolas e a fotografias, assim como os princípios e normas éticas da espeleologia são indispensáveis para o desenvolvimento do estudo de geomorfologia das cavernas.

A presente pesquisa está dividida em três partes, na primeira tem-se como objetivo estabelecer o contexto geológico e geomorfológico da área de estudo assim como apresentar alguns elementos teóricos a respeito dos temas relevantes para o entendimento do sistema cárstico. Na segunda parte é sugerido rotinas de utilização de dados LIDAR através de softwares em três cavernas localizadas na porção sul da Bacia de Irecê e na porção norte da bacia de Una-Utinga. A terceira parte do trabalho refere-se a interpretação das feições que ornamentam os tetos das mesmas três cavernas. Essa interpretação será realizada a partir da análise estrutural do teto das cavernas e do tipo de processo que controla a formação desse teto. Para esse fim, foram realizados levantamentos de nuvens de pontos a partir de sensor LIDAR em plataforma móvel nas cavernas Ioiô, Diva de Maura e Paixão. Deste modo, as informações adquiridas por essas rotinas visam subsidiar a interpretação geológica e geomorfológica desses ambientes.

2 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

A área de estudo, representada pelo polígono “b” da figura 01, corresponde a três cavidades naturais, sendo que duas estão situadas na porção sul da Bacia de Irecê (Cavernas Diva de Maura e Ioiô) e uma na porção central da Bacia de Una-Utinga (Caverna Paixão), definida como uma plataforma carbonática pré-cambriana situada na porção oriental da Chapada Diamantina, sendo ambas bacias neoproterozóicas correlatas (LEÃO; DOMINGUEZ, 1992).

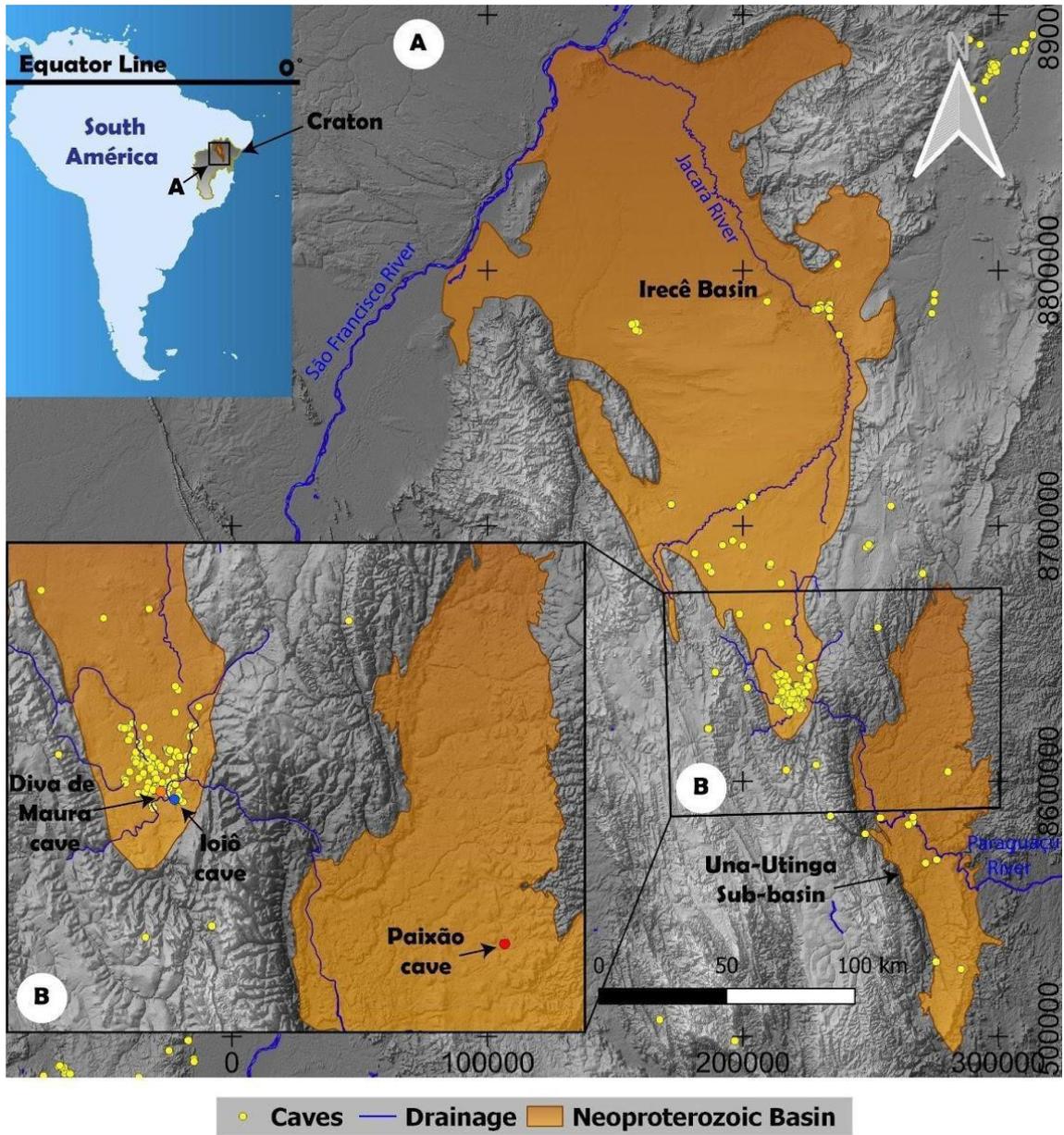
A Bacia de Irecê faz parte de uma das principais regiões cratônicas do Brasil, denominada de Cráton do São Francisco. Segundo Barbosa e Sabaté (2004) e Reis et al (2013), a origem desse Cráton está associada a processos de colisão continental do tipo himalayana. Essa bacia integra o aulacógeno do Paramirim, onde as unidades de preenchimento são os Supergrupos Espinhaço e São Francisco associados a fases *rift* de subsidência, ocorridas entre 1,75 e 1,0 Ga (SCHOBENHAUS, 1996; CRUZ; ALKIMIM, 2004).

A Bacia de Irecê está situada, em termos altimétricos, no centro de uma plataforma elevada, com cotas mínimas de 800 m cercada por cinturão de deformação correspondente a unidades do Supergrupo São Francisco com altitude de mais de 1000 m. Estando a área de estudo associada ao depocentro no sul da bacia, que também, corresponde a área menos deformada ao ser comparada com os setores ao norte (GONÇALVES; LEAL, 2018; REIS et al, 2013).

A Bacia Una-Utinga apresenta apresenta composição litológica semelhante a Bacia de Irecê, a principal diferença entre as duas está na altimetria, já que a Una-Utinga apresenta-se mais rebaixada, que a Bacia de Irecê. com cotas máximas de aproximadamente 750m e mínimas de cerca de 300m.

Em termos hidrológicos, Cordeiro (2019) estabelece que a bacia hidrográfica do rio São Francisco sofreu perda de área para a bacia do Rio Paraguai a partir de processos de captura de drenagem, denominada de pirataria cárstica, onde as cavidades subterrâneas constituem os caminhos pelos quais as águas de uma bacia hidrográfica são carregados para a outra bacia. A área capturada pelo Rio Paraguai corresponde à porção sul da Bacia de Irecê, área de estudo da presente pesquisa. Enquanto o setor da bacia Una-Utinga, onde se localiza-se a caverna Paixão, apresenta relevo mais arrasado, onde se encontram morros testemunhos entrecortados pela drenagem local.

Figura 01: Localização da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor.

3 CONTEXTO CLIMÁTICO

A área de estudo faz parte de um contexto que engloba duas das maiores bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro, sendo essas, as bacias dos rios São Francisco e Paraguaçu (cujo limite entre as duas bacias é apresentado como uma linha preta na figura 01). Inseridas na região semiárida do nordeste brasileiro, apresentam precipitações anuais que variam entre 750 e 1000 mm e um período de estiagem que abrange cerca de 5 meses no ano (BONFIM; CAVEDON, 1994). Quanto aos solos, predominam nesta região associações de Argissolos, Cambissolos, Latossolos, Luvissolos, Neossolos e Planossolos (RADAMBRASIL, 1981).

Em termos hidrológicos, Cordeiro (2019) estabelece que a bacia hidrográfica do rio São Francisco sofreu perda de área para a bacia do Rio Paraguaçu a partir de processos de captura de drenagem, denominada de pirataria cárstica. A área capturada pelo Rio Paraguaçu corresponde à porção sul da Bacia de Irecê, área de estudo da presente pesquisa.

Os indicadores paleoclimáticos da área, demonstram uma variabilidade climática acentuada, devido a presença de formas de relevo residuais, como os morros testemunhos na área da bacia de Una-Utinga. Um exemplo disso é a própria caverna Paixão, que atualmente apresenta-se em um patamar cerca de 15 a 20 metros mais elevado que o nível de base local.

Outros indícios de variações climáticas podem ser encontrados na região das cavernas de Ioiô e Diva de Maura, nessas há formação de crostas de carbonato de cálcio no piso das cavernas demonstrando que houve variações do nível de base interno da cavidade. Também há indicadores de variações sazonais do nível freático dessas duas cavernas, apresentando marcas de água em áreas elevadas (Apêndice IV, foto 11, F10, círculo tracejado vermelho “a”).

Embora sejam necessários estudos mais rigorosos a esse respeito, as três cavernas apresentam um entulhamento de material detrítico muito acentuado, com uma variação mais baixa na caverna Ioiô, cerca de dois metros em alguns setores e 6 nas áreas mais próximas à entrada. Na Diva de Maura, essa variação chega a mais de 10 metros e pode ser ainda maior na Paixão devido ao fato desta estar alinhada em relação ao nível de base local.

Alguns trabalhos apontam variações de tipo climáticos nesta região, obtidas a partir de técnicas de datação absolutas, com aumentos da precipitação na região relacionadas ao 145 mil anos e em torno de 400 mil anos (AULER; SMART, 2001), assim como variações eventos de degradação de cavernas que resultam no preenchimento de Cavernas como Lapa Doce e Torrinha nos últimos processos de agradação desde 1,9 + 0,12 estendendo-se até 0,36 +/- 0,08 My (LAUREANO et al, 2004).

Esses indicadores corroboram o que afirma Cordeiro (2019) a respeito das variações do final do último período glacial, que submeteu toda essa região a processos mais intensos de umidade e posterior de período mais seco, fortalecido com um grande pico de carstificação que auxiliado pelos processos tectônicos de deformação da Bacia de Irecê descritos por Brito Neves et al (2014; 2012), tornou os rios que chegam aos sul da bacia mais erosivos, criando assim uma densidade de cavidades muito grande nesse setor, sendo a área de ocorrência da pirataria cárstica que resultou na grande captura de drenagem formada pelos canais do rio Santo Antônio. Esse processo teve efeito também na bacia de Una-Utinga, onde esta foi mais arrasada e erodida, mantendo apenas os testemunhos, como o da Caverna Paixão.

4 SISTEMA CÁRSTICO: CONCEPÇÕES TEÓRICAS

O sistema cárstico é definido por Ford e Williams (1989) como um sistema aberto que compõe a inter-relação entre dois subsistemas, o hidrogeológico e o químico. essa interação entre hidrogeologia e elementos químicos culmina na formação de feições geomorfológicas próprias do Carste, deste modo tem-se o abrangente sistema cárstico, representado pelo modelo proposto por Ford e Williams (1989).

Este modelo espacializa os processos de classificação segundo a topografia e a consequente fase de erosão e deposição dos rios. Desta forma tem-se duas grandes zonas **1)- zona de erosão** correspondendo às áreas mais altas do relevo, onde ocorrem os maiores contatos da litologia solúvel com a atmosfera. Nesses setores são encontradas as **formas de entrada** caracterizadas principalmente pelos

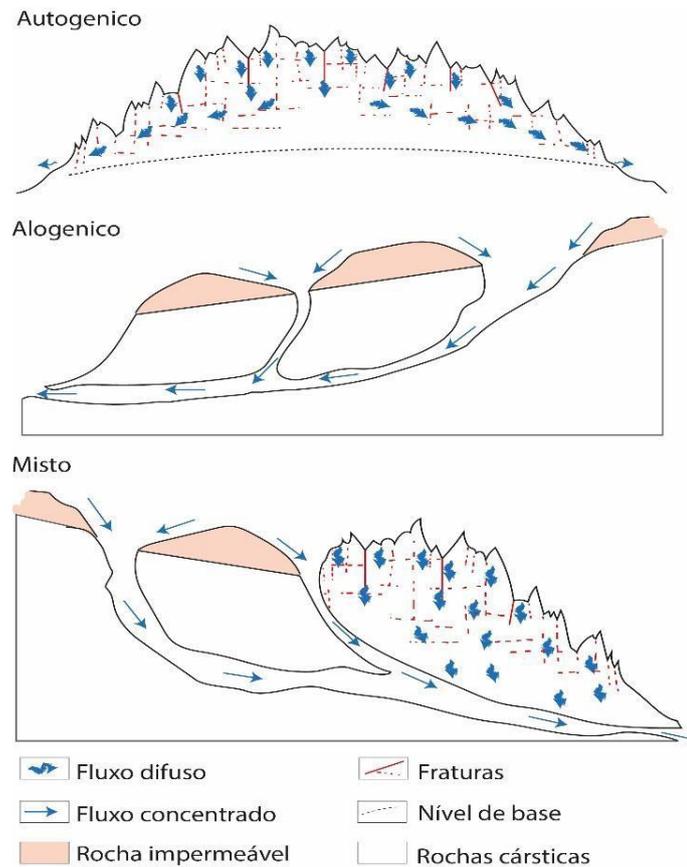
poljes, uvalas, dolinas, vales cegos ou sumidouros e lapiás em ordem decrescente de grandeza. E conseqüentemente, ainda em fase erosiva, tem-se as formas de saída, que correspondem em geral às zonas de ressurgência (FORD; WILLIAMS, 1989).

A **2)- zona de deposição**, onde normalmente o sistema cárstico tem seu “fim” e seu possível “reinício”. É nessa zona que ocorre a deposição de materiais provenientes dos processos erosivos que perpassam o abrangente sistema cárstico. Nesta zona, são gerados os depósitos sedimentares fontes de novas rochas que reiniciaram a modelagem de um novos sistemas cársticos. Nestas zonas encontram-se os pântanos, os bancos de dunas e as plataformas rasas (FORD; WILLIAMS, 1989).

O modelo do abrangente sistema cárstico engloba uma escala regional, porém para que se compreenda melhor o sistema cárstico faz-se necessário o entendimento em escalas cada vez mais específicas sendo realizadas várias classificações seguindo diferentes critérios como: o sistema hidrogeológico cárstico, as condições geológicas regionais, a elevação em relação ao nível do mar, a presença de cobertura/solo, o clima que atua sob seus processos de carstificação atuais, os processos hidrotermais ou pluviais que atuam sob sua gênese e evolução (GVOZDETSKIY, 1965 *apud* VERESS, 2016; VERESS, 2016; AULER; SMART, 2003; JAKUCS, 1977).

Porém a classificação que mais interessa no presente trabalho é a apresentada por Ford e Williams (2007) onde tem-se a presença dos carstes **alogênicos**, **autogênicos** e **misto** (Figura 02) (FORD; WILLIAMS, 2007). No primeiro ocorre uma incidência concentrada da drenagem através de feições de circulação livres como dolinas e sumidouros. Neste caso, geralmente existe uma cobertura impermeável que direciona o fluxo de água superficial para esses locais. No segundo caso, a entrada de água no sistema se dá através de fluxo difuso da água que se infiltra em fendas e fraturas da rocha. Na terceira situação, existe a ocorrência conjugada de ambas as formas de coberturas assim como de ambas as formas de fluxo de infiltração (MOURA, 2017).

Figura 02- Sistemas de recarga.



Fonte: Adaptado de FORD; WILLIAMS, 2007.

Especificando ainda mais a interpretação do carste enquanto sistema, a divisão mais utilizada é a sugerida e reiterada por diversos autores como, Ford e Williams (1989), Piló (2000), Klimchouck (2011), Veress (2016) Palmer (2007), Travassos (2019) e Sousa e Auler (2018), que dividem as feições cársticas em:

1)-Exocársticas, entendidos como um conjunto de feições superficiais relacionados a padrões negativos de relevo, cuja função de entrada, determinada pelo *input* de matéria no sistema cárstico, se dá a partir dos materiais carreados de zonas mais elevadas cuja comunicação entre as feições negativas e as feições positivas dar-se-ão através dos fluxos de água (BIGARELLA et al, 1994; AULER; ZOGBI, 2005; FORD; WILLIAMS, 2007; SUGUIO, 2010; PILÓ, 2000).

2)- Epicárstica pode ser entendido como a área de contato entre a rocha cárstica e o solo. É comumente descrita como “pele” ou região “subcutânea” do relevo cárstico. (GAMBARINI, 2012). Veress (2016) amplia esta visão ao relacionar essa região não apenas com o contato com o solo, mas com a cobertura. Assim, o autor

define a cobertura cárstica como um fenômeno, forma e processo que exerce grande influência sobre as feições esculturais da rocha subjacente.

3)- Endocárstica é a expressão subterrânea do sistema cárstico, nestes há a ocorrência das cavernas, condutos e salões, englobando as cavidades subterrâneas (GAMBARINI, 2012). Para Lino (2009) as cavernas, são cavidades naturais onde um homem é capaz de entrar. Também no endocarste são encontrados os depósitos minerais, chamados espeleotemas (PALMER, 2007), estas feições geomorfológicas serão abordadas com detalhes mais à frente neste trabalho.

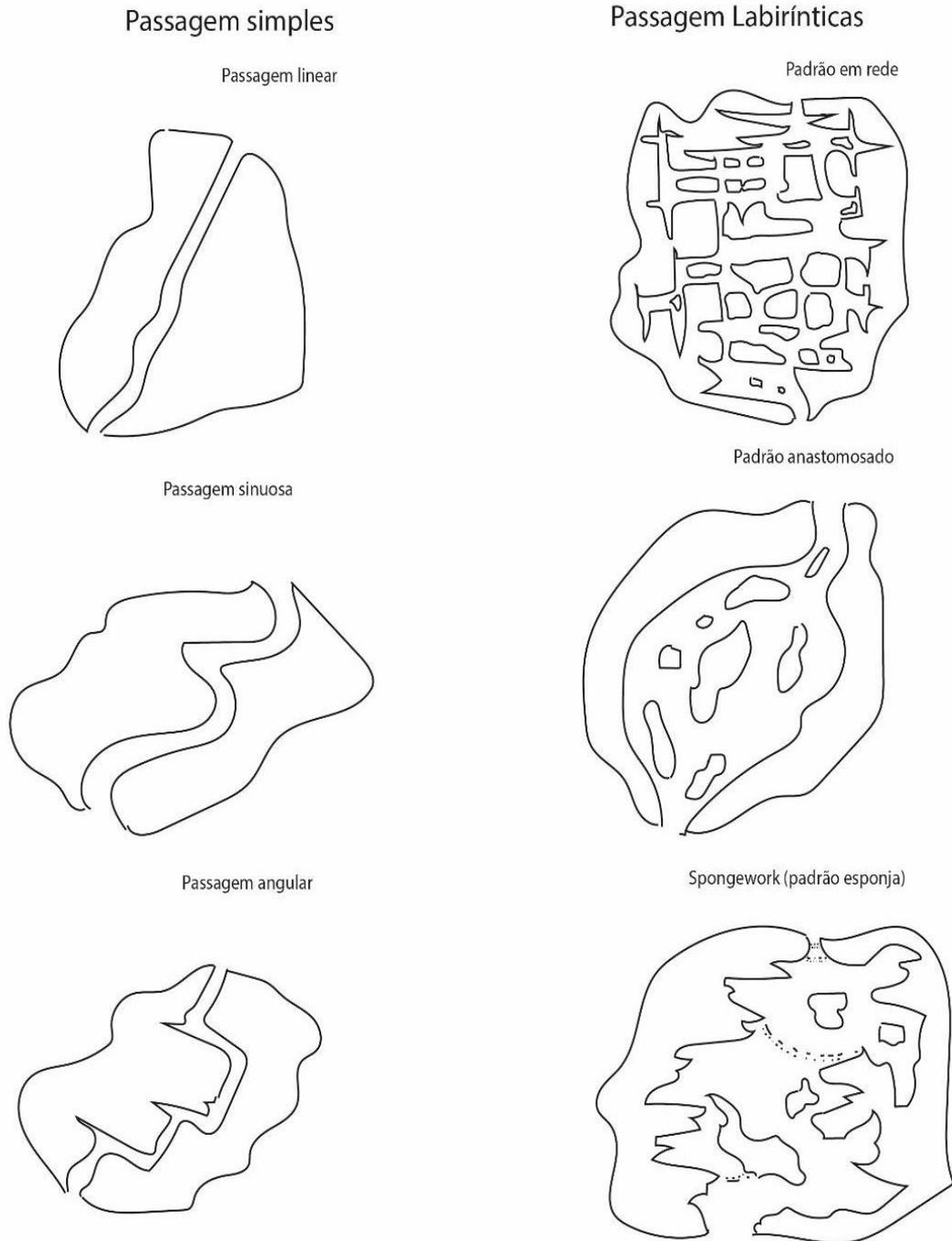
4.1- Padrões internos da caverna

Segundo Lino (2009), White (1988) Palmer (2007) a caverna, como a feição de relevo mais abrangente do endocarste, apresenta variações em sua morfometria, essas variações se dão por mudanças da geometria dos condutos. A geometria dos condutos é alvo de estudos da espeleologia destacando-se White, (1988), Lauritzen e Lundberg (2000), Ford e Williams (2007), Jeannin (1990) Gilli (2015) e Palmer (2007) que se remete a caracterizar e mapear o ambiente interno da caverna sob dois focos principais, sendo o primeiro baseado nos padrões internos da caverna e o outro na geometria dos condutos.

Quanto aos padrões internos, baseados na elaboração de sua planta baixa, é possível classificar a caverna em (WHITE, 1988; FORD; WILLIAMS, 2007): passagens simples e passagens labirínticas. Nas passagens simples tem-se um único corredor ou conduto que são classificados em passagens simples (onde predomina a retilineidade do conduto), sinuosas (são formadas curvas ao longo da passagem) ou angulares (são formados ângulos agudos ao longo da passagem).

As passagens (Figura 03) labirínticas, são formadas por um conjunto de condutos conectados, essas feições representam a maioria das cavernas, Também podem ser diagnosticadas de alguns processos espeleogenéticos como a presença de acentuado controle estrutural ou de processos de erosão fluvial mais marcantes, ou ainda processos hypogênicos. Neste caso, as cavernas podem ser classificadas em padrões do tipo **rede**, neste caso o sistema está muito associado à intersecção de falhas ou fraturas. **Anastomosado**, neste caso o padrão está em geral associado a um fluxo criptorreico e padrão **esponjoso**, neste caso há a confluência de diversos fatores, incluindo uma maior ocorrência de desgaste químico.

Figura 03- Padrões internos a partir de cortes horizontais.

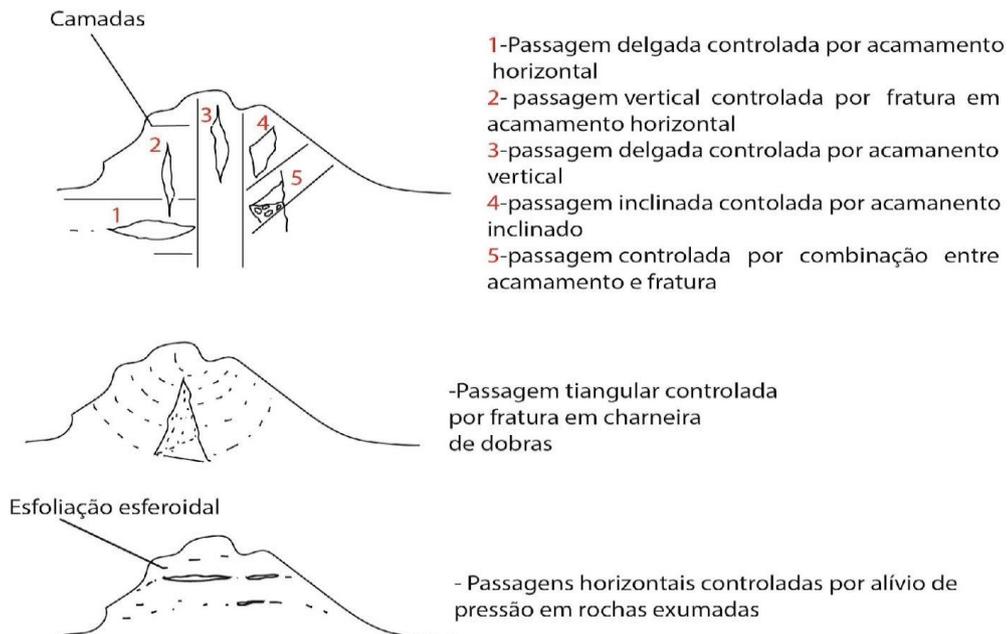
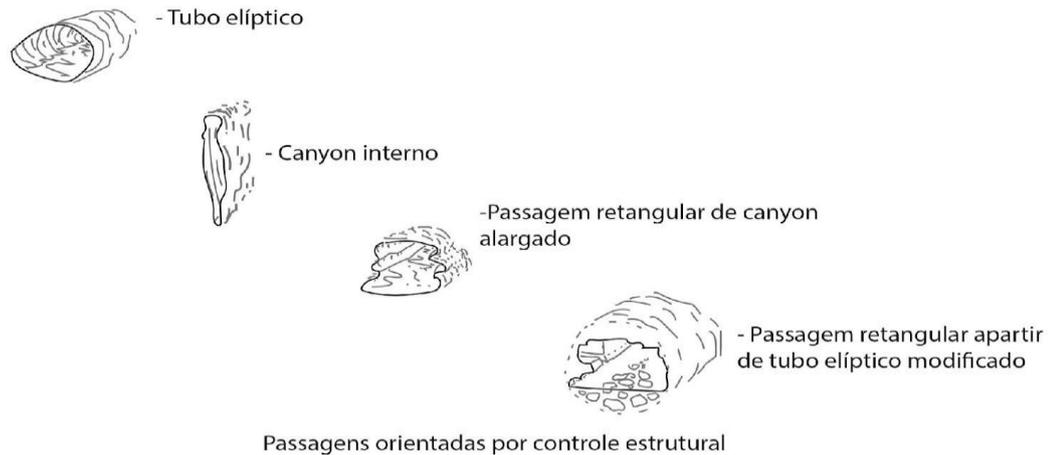


Fonte: Adaptado de WHITE, 1988.

As secções transversais dos condutos apresentam um excelente instrumento para a compreensão do processo de evolução dessas estruturas. Neste sentido, é

possível encontrar padrões relacionados a formas controladas por fraturas e diferenciação de camadas em rochas sedimentares (LINO, 2009; WHITE, 1988). Bouillon (1972) acrescenta o controle estrutural a partir de diaclases desenvolvidas nas charneiras de dobras de regiões de carste geossinclinal (Figura 04)

Figura 04- Padrões internos a partir de cortes transversais



Fonte: Adaptado de WHITE, 1988.

Novas tecnologias vêm sendo utilizadas para melhorar a interpretação e levantamento dos dados obtidos nas cavernas, sobre esse assunto serão retomadas as discussões na Parte II deste trabalho.

4.2- Espeleotemas

No interior das cavernas são encontrados diversos depósitos minerais (LINO; ALLIEVI, 1980). Esses depósitos minerais podem ser de origem clástica, composto pelos materiais desprendidos dos tetos das cavernas, carregados pelos fluxos de água exteriores ao endocarste, ou gerados pela deposição de minerais dissolvidos com a formação de espeleotemas.

O termo espeleotema vem do grego *spelaios* -caverna e *thema*-depósito e significa depósito de cavernas (LINO; ALLIEVI, 1980; MONTEIRO, 2014). São formações concrecionais, sedimentadas e cristalizadas de, principalmente, calcita (carbonato de cálcio romboédrico), mas são possíveis encontrar espeleotemas a partir de outros minerais como: aragonita (carbonato de cálcio ortorrômbico), gipsita (sulfato de cálcio monoclinico), malaquita (carbonato de cobre hidratado monoclinico), calcedônia (sílica amorfa ou microcristalina) e deposição de minerais máficos em rochas graníticas, neste caso específico se configuram como microespeleotemas (finas capas concrecionais).

As formas e tamanhos dos espeleotemas são tão diversas que vários pesquisadores as definem e um mesmo espeleotema pode possuir diferentes nomes dependendo segundo o pesquisador que o descreve e as influências locais, porém a classificações e descrições feitas por Guimarães (1966), Auler e Piló (2010), Scaleante e Scaleante (2010), Lino e Allievi (1980), Lino (2009), Gambirini (2012) e Palmer (2007), os espeleotemas podem ser agrupados em três grupos principais:

1) Depósitos de água circulantes, nestes a gênese está relacionada a soluções minerais contidas em águas que fluem no interior do sistema. Estes se movem por três mecanismos básicos, o gotejamento, escorrimento e turbilhonamento. As formas principais relacionadas a esses depósitos são:

a) Estalactites: são consideradas as formas mais comuns de espeleotemas, estes se formam a partir dos tetos das cavernas, normalmente associados a áreas de intenso faturamento. O gotejamento é o mecanismo que forma esses espeleotemas. A água saturada de mineral dissolvido diminui seu potencial de dissolução ao perder gás carbônico, adquirido do solo e da atmosfera externa, para a atmosfera da caverna, o que faz precipitar parte do mineral em forma de concreções tubulares que ao longo do tempo cresce verticalmente para baixo.

b) Cortinas: são formas semelhantes às estalactites no que concerne aos mecanismos e processos genéticos. Entretanto, a ocorrência desse espeleotema se deve a uma inclinação do teto, onde essa é suave o suficiente para manter a gotícula que precipita aderida ao teto por alguns centímetros ou metros. Deste modo, a tensão superficial da gota consegue resistir à força da gravidade, precipitando lateralmente o material mineral dissolvido. Muitas vezes ocorrem variações da coloração dessas cortinas devido a alterações da solução, por mudanças ambientais externas ou por contaminações de depósitos minerais encontrados e atingidos pela água que precipita.

c) Estalagmites: estes são os espeleotemas que normalmente aparecem no chão das cavernas. A deposição desses minerais se dá através dos resíduos do gotejamento oriundo das estalactites. Nessas, a forma é menos pontiaguda e mais cilíndrica, pois ocorrem capas cilíndricas sobrepostas umas sobre as outras confere essa característica a esses espeleotemas.

d) Cálice: são formas associadas a depósitos de sedimentos muito friáveis que ao caírem no solo formam estruturas aprofundadas, bem como associadas a mudanças no nível de base provocam a exumação dessas estruturas e seu eventual crescimento gerando feições semelhantes a cálices.

e) Colunas: são encontros de estalagmites e estalactites. Estas formam estruturas que vão do teto ao piso da caverna. Podendo por muitas vezes fechar completamente condutos, isolando áreas da caverna.

f) Escorrimento de calcita: são depósitos de fluxo laminar. Estes podem ocorrer nas paredes das cavernas formando cascatas de pedras ou órgãos de igreja e nos tetos formando lustres. Estes escorrimentos também podem revestir outros espeleotemas gerando formas mistas. “Por vezes esses escorrimentos não apresentam uma organização cristalina homogênea, gerando um belo efeito sitiante, quando iluminados” conhecido como “chão de estrelas” (LINO, 2009, p. 143).

g) Represas de travertino: essas formas podem variar de pequenas e imensas formas de represas escalonadas, Segundo Lino (2009) a gênese dessas represas é controversa, mas está fortemente ligada a fluxos de água e a deposição de minerais calcíticos nas bordas superiores. Podem ser chamadas de altares, bolos confeitados, ou micro- represas.

2) **Depósitos de água de exsudação:** são formas que, por capilaridade, são depositados de maneira lenta e descontínua pelos poros das rochas ou através de vazios deixados por espeleotemas anteriormente existentes. A diferença de pressão e temperatura gera um fluxo capilar para o interior da caverna. Neste caso, a pressão atmosférica mais baixa do que seu entorno é o mecanismo de gênese dessas feições. Essa deposição é tão lenta que não há oportunidade da gravidade agir gerando algumas das mais espetaculares formas espeleológicas da terra.

- a) **Helictites:** são formas espiraladas extremamente finas e delicadas encontradas nos tetos das cavernas. Podem ser encontradas em diversas formas e ramificadas.
- b) **Agulhas e flores de caverna:** formadas por água de exsudação que apresentam variações de forma e tipos de minerais. Nestes são encontradas as agulhas formadas por aragonitas, gipsita e formas semelhantes a flores encontradas em diversos minerais de caverna.
- c) **Algodões de caverna:** são depósitos minerais formados de gipsita que apresentam um emaranhado de finíssimos cristais pendurados nos tetos das cavernas.
- d) **Coralóides:** é um conjunto de micro feições compostos de nódulos e ramificações de calcita. Estes podem estar associados a pisos, paredes, tetos e escorrimentos ou a outros espeleotemas.
- e) **Pinheiros:** são espeleotemas encontrados associados às barragens de travertino, quando secas ou cheias sazonalmente, estes são formados por argilas ricas em carbonatos. São feições cônicas individualizadas, normalmente firmemente presas ao chão.
- f) **Pétalas ou folhas de calcita:** são pequenas estruturas em forma de folha que, normalmente, recobrem espeleotemas maiores.
- g) **Discos:** São projeções circulares e semicirculares que se projetam a partir das paredes das cavernas.
- h) **Esferas:** são pequenas protuberâncias esféricas, normalmente de coloração esbranquiçada, geralmente associadas à coralóides, aderidas as estruturas das cavernas.
- i) **Cotonetes:** feições mistas de esferas em helictites ou “flores de caverna”, onde em sua extremidade livre são formadas rugosidades a partir dessas esferas com textura porosa e coloração esbranquiçada.

3) Depósitos de águas estagnadas: são os depósitos que têm seu desenvolvimento atrelado a água parada. Geralmente, associados a acúmulos de água na zona estagnada, freática e nas cavidades.

- a) **Geodos de calcita:** são formadas em zonas alagadas, podendo estar relacionadas aos revestimentos internos de barragens e outros espeleotemas submersos ou parcialmente submersos. Estes espeleotemas apresentam diversas variedades e formas, como as estrelas de calcita, os cristais dentes de cão e as pirâmides de calcita. Essas feições são controladas pelo tempo de permanência da água saturada, associado à temperatura e saturação dessa água e principalmente ao comportamento de cristalização da calcita.
- b) **Jangadas:** são espeleotemas que podem ser livres ou não, surgem em forma de concreções finas de calcitas depositadas na superfície da água, formadas devido a saturação da água em carbonato de cálcio, que torna-se incapaz de dissolver este carbonato que concrecionam na superfície da água. Este espeleotema pode formar desde finas películas milimétricas até grandes formas centimétricas que bóiam na superfície da água, ao atingirem massa suficientemente pesada estas concreções são depositadas no fundo dos lagos subterrâneos. Relacionam-se a gênese das jangadas, as delicadas e raras bolhas de calcita, que são formas circulares, semicirculares e ocas de concreções da superfície da água.
- c) **Castiçais:** são associações de estalactites que por vezes sua extremidade submerge em águas estagnadas saturadas de minerais dissolvidos. Em decorrência dos processos de evaporação e perda de CO_2 , espeleotemas formados por cristais de calcita aderem esta extremidade mergulhada, formando belíssimas formas esféricas que são denominadas de clavas ou castiçais.
- d) **Pérolas de caverna:** é uma das formas mais peculiares e belas encontradas nas paisagens de subsuperfície. Em termos genéricos, representam concreções de calcita que englobam pequenos núcleos formando camadas de precipitação, formadas em pequenas cavidades inundadas. Tais espeleotemas têm sua origem completamente separada do chão da caverna e seus agrupamentos são chamados ninhos de pérolas e geralmente estão associados às barragens de travertino.

- e) **Vulcões:** os vulcões são espeleotemas formados por gotejamento em água estagnada. Sua morfologia é responsável pelo seu nome, pois são como troncos cilíndricos mais grossos na base e estreito no topo. Em seu topo é observada uma pequena cavidade circular côncava, conferindo, a esse espeleotema, uma morfologia semelhante à de um “vulcão clássico”.

Lino (2009) apresenta em seus estudos a existência de espeleotemas de origem biológica e de origem mista. Estando os primeiros relacionados à ação de organismos vegetais e animais nas cavernas e o segundo, as associações de diferentes origens de espeleotemas.

A classificação de espeleotemas de água circulante é de grande interesse para o presente trabalho, pois a partir destes, serão apresentados os agrupamentos de espeleotemas dos quais as análises dos espeleotemas em teto de caverna serão apresentados na parte III deste trabalho.

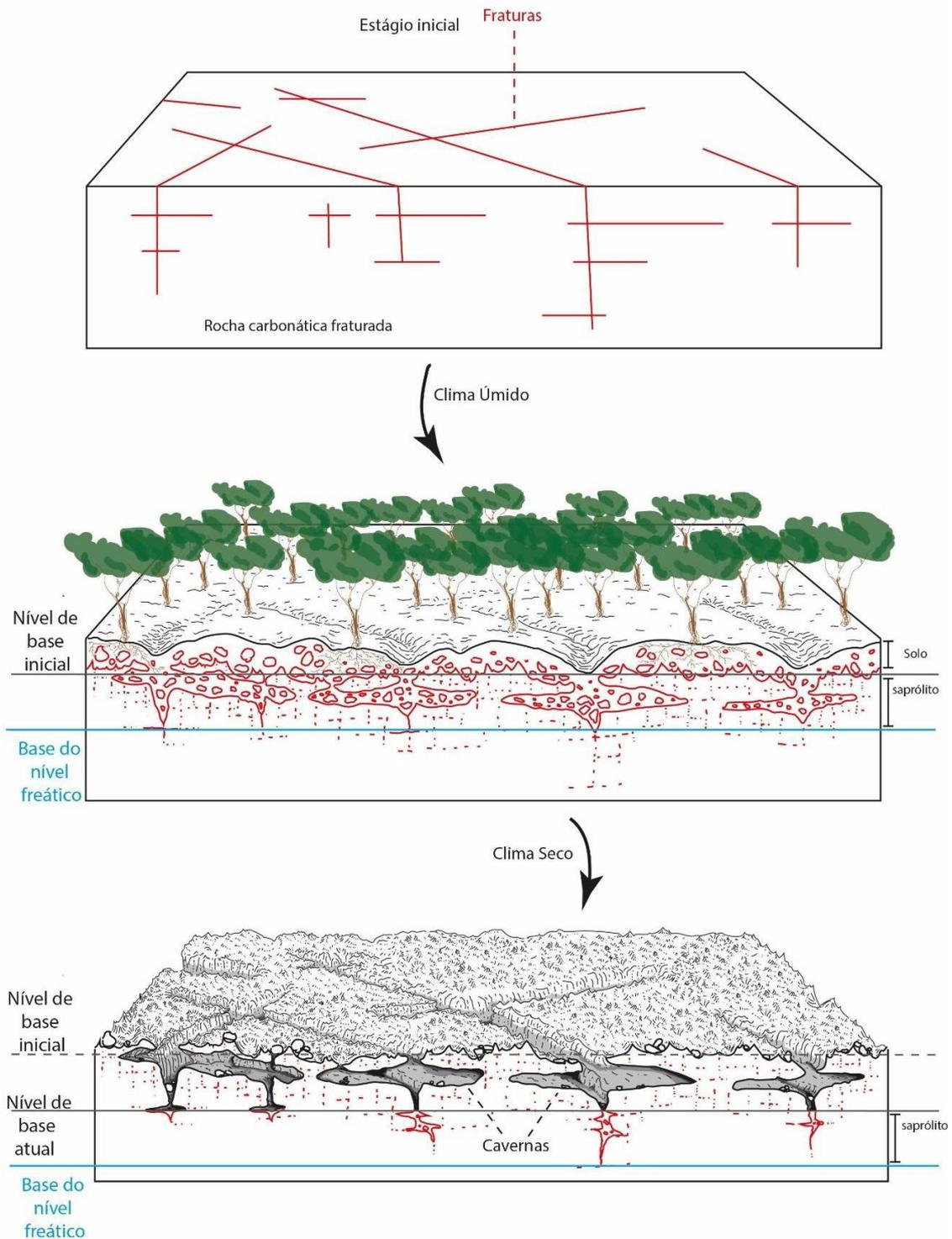
4.3- Modelos evolutivos

A dinâmica dos processos terrestres é marcada por fases de maior e menor intensidade de denudação do relevo. Essa dinâmica é destacada por Huggett (2007) como fator essencial para caracterizar o sistema geomorfológico (mais abrangente sistema do relevo da terra), tendo como principais agentes de *start* dessa dinâmica a relação entre o poder erosivo da água e as forças tectônicas. Consequentemente, essa dinâmica afeta os sistemas subordinados como o sistema cárstico.

Neste ínterim diversos trabalhos como os de Klimchouk (2011), Waltham, (2008) e Veress (2016), Huang (2014), Smart e Whitaker (1991) apresentam modelos evolutivos baseados em processos de mudanças de nível de base taxas de denudação, sendo a concorrência entre esses dois fatores responsáveis por processos evolutivos que podem levar a ciclos de renovação do carste, como é o caso do que apresenta Waltham (2008) para a denudação e erosão em grandes pacotes de rochas calcáreas ou no que apresentam Klimchouk e Ford (2000) com carstes em diferentes processo de origem, incluindo processos hypogenicos que mais tarde são afetados pela alteração dos níveis de bases locais.

Com base nos modelos apresentados pelos autores supracitados Moura (2017) apresenta um modelo evolutivo adaptado para a região semiárida brasileira (Figura 05),

Figura 05- Desenvolvimento do relevo cárstico em relação a variações climáticas e mudanças no nível de base.

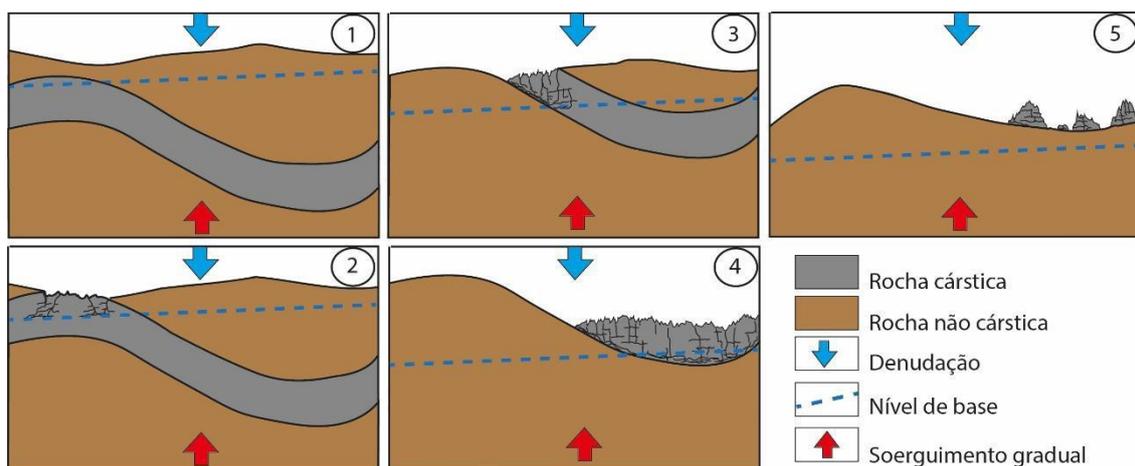


Fonte: MOURA, 2017.

Observando a figura 05 a partir de um ponto inicial, no caso a porosidade secundária presente na rocha carbonática na forma de fraturas e posterior submissão desta rocha a um clima mais úmido, tem-se a formação de um pacote de material saprolítico e solo. A posterior alternância climática para um clima mais seco, provoca a perda da cobertura vegetal desta área e a posterior remoção do solo, este processo ocorre graças a alteração dos níveis de base locais, que permitem o carreamento dos sedimentos e exposição do saprolito, deste modo ao longo do processo de remoção ocorre o alargamento dessas fraturas e a dissolução de camadas mais solúveis da rocha culminando com a formação das cavernas e do carste exposto em superfície. É importante lembrar que as causas para a alteração dos níveis de base locais e regionais podem ser variadas, podem ocorrer desde alterações eustáticas ou soerguimentos e rebaixamentos por processos tectônicos.

O modelo apresentado por Palmer (2007) para a evolução de carstes geossinclinais (Figura 06) é baseado na inversão de relevo a partir de processos concorrentes de soerguimento regional e denudação e o comportamento de rochas clásticas (rochas mais solúveis) e rochas não cársticas (rochas menos solúveis).

Figura 06- Modelo evolutivo para carste geossinclinais.



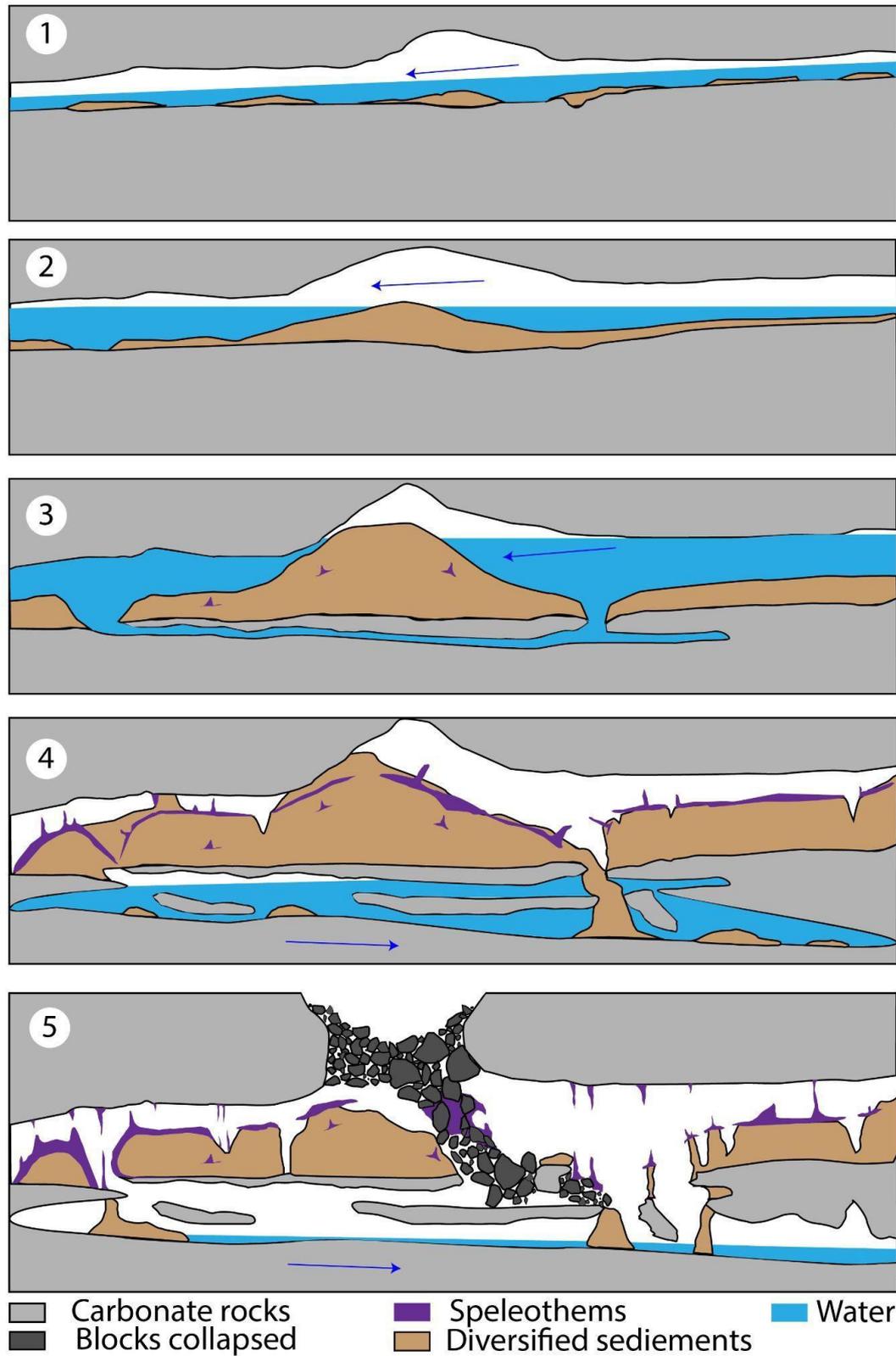
Fonte: PALMER, 2007.

A evolução dessas áreas se dá a partir de cinco estágios 1) tem-se o estágio inicial, com a sobreposição de rochas cársticas e não cársticas em uma área deformada regionalmente; 2) inicia-se o processo de carstificação a partir de fraturas nas charneiras de dobras e alterações no nível de base provocada por soerguimento;

3) nova alteração de nível de base e aprofundamento da espeleogênese; 4) exposição da parte mais basal da rocha cárstica em uma área anticlinal; 5) denudação geral do carste e formação de morros testemunhos, tem-se feições cársticas dissociadas espacialmente formando um carste residual ou reliquial.

Quanto ao comportamento dos espeleotemas e dos depósitos e suas interações com os fluxos de água circulante em zona vadosa, é possível utilizar o exemplo da caverna Otoska Jane na Eslovênia (Figura 07), em 1, 2 e 3 um processo acentuado de formação de depósitos sedimentares internos a caverna, sendo que em 3, há a ocorrência de espeleotemas, que são marcadores na sequência estratigráfica de uma antiga superfície vadosa que foi soterrada. Na sequência da figura 07, tem-se em 4 e 5, a formação de crostas concrecionárias de carbonato de cálcio formadas a partir de espeleotemas sendo que em 5 é notório o rebaixamento do nível freático assim como o colapso do teto da caverna. Em ambas, 4 e 5, os espeleotemas recobrem os depósitos internos e formam superfícies que em 4 são soterradas e em 5 são novamente expostas, preservando antigos processos de sedimentação.

Figura 07- Modelo simplificado de desenvolvimento de caverna.



Fonte: Adaptado de Fairchild e Baker, 2012.

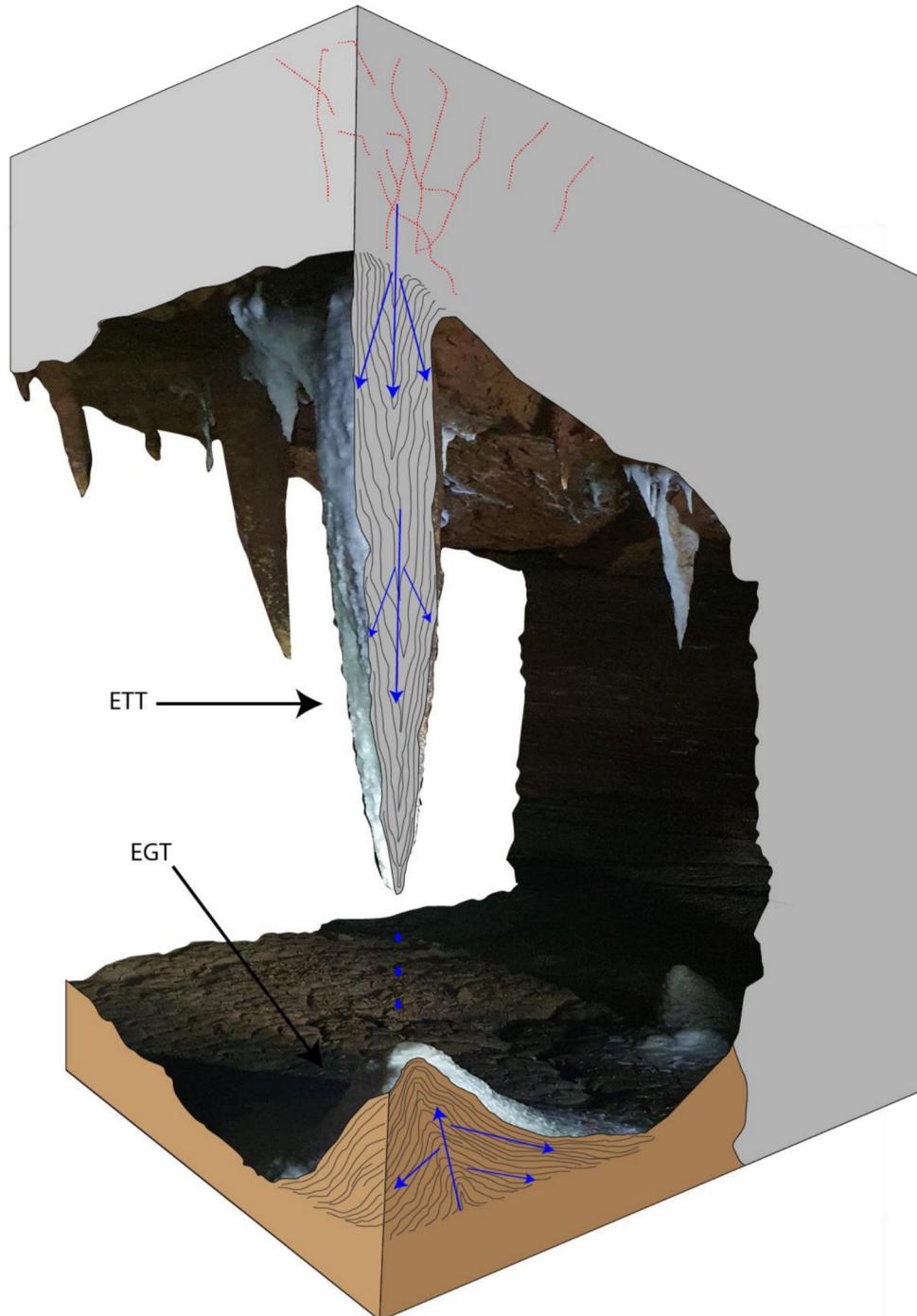
A ornamentação da caverna, apresenta modelos evolutivos diversos e inspirados em cada tipo de espeleotema, porém devemos nos ater aos modelos que

se referem aos espeleotemas de água circulante que surgem a partir da infiltração em fraturas ativas na forma de gotejamento ou de fluxo hídrico. Neste caso, Travassos (2019) distingue esse tipo em dois, estando um relacionado aos fluxos hídricos e o outro especificamente aos gotejamentos.

Ao gotejar, a água saturada de elementos solubilizados como o carbonato de cálcio, perde parte de seu potencial de dissolução ao ser exposto ao ar da caverna. Esse processo é chamado de descarbonatação e se refere a perda de CO_2 dissolvido e a conseqüente precipitação de carbonato de cálcio (FORD; WILLIAMS, 2007).

No estágio inicial do gotejamento é gerada uma estrutura em forma de canudo da qual inicia-se a formação de uma estalactite, essa estrutura evolui gradualmente aumentando em volume e comprimento ao serem acrescentadas camadas sucessivas de carbonato de cálcio semelhante aos anéis de crescimento de uma árvore conforme ilustrado na figura 08, concomitante um pouco do material que precipita na estalactite é derrubado junto com a gota por ação da gravidade e se deposita logo abaixo, neste caso é formada uma estalagmite. Existem algumas variações dependendo da espessura e da porosidade de uma camada sedimentar, onde a água está em fluxo (representados pelas setas azuis na figura 08), ou da inclinação do teto, nestes casos as estalactites podem formar helictites ou cortinas.

Figura 08- Modelo de gotejamento em caverna.



ETT- estalactite e EGT- estalagmite.

Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Gilli (2015) e Travassos (2019).

Se não ocorrerem perturbações no sistema cárstico, as estalactites e as estalagmites tendem a se encontrarem formando colunas, caso haja um conjunto próximo de colunas ao passar do tempo estas podem evoluir para uma coalescência

de colunas que podem ganhar a forma de espeleotemas mais robustos, chegando inclusive a fechar condutos ou formar paredes que dividem um conduto em dois.

Porém o sistema cárstico é mutável e alterações na dinâmica de formação dos espeleotemas devem ser levadas em conta. O modelo apresentado na figura 09 mostra a partir da compilação dos trabalhos de Jeannim (1990), Quinf (1997), Shamov e Kostov (2015) e Guellet (1997) , que os espeleotemas associados ao gotejamento ou águas circulantes têm seu processo associado a fraturas no teto (representadas em linhas vermelhas pontilhadas em 1A, da figura 09), que ao longo do tempo vão alargando à medida que os espeleotemas crescem e os fluxos se mantêm ativos, como é demonstrado na sequência da figura 09 em 1A, 1B, 1C e 1D.

Porém a movimentação da área ou por ação tectônica ou por gravidade pode alterar os alinhamentos de espeleotemas, ou fechar e abrir passagens de água através de novas porosidades formada por fraturas. neste caso tem-se em 2A e 2B, uma sequência que demonstra a alteração de fraturas ativas por movimentação vertical, alterando a posição da saída de fluxo para a área de ocorrência do fraturamento. Já em 3A e 3B, tem-se a alteração horizontal por processos de movimentação crustal, neste caso a estalactite e a estalagmite correspondente são deslocadas, formando um conjunto onde a estalactite forma uma nova estalagmite correspondente.

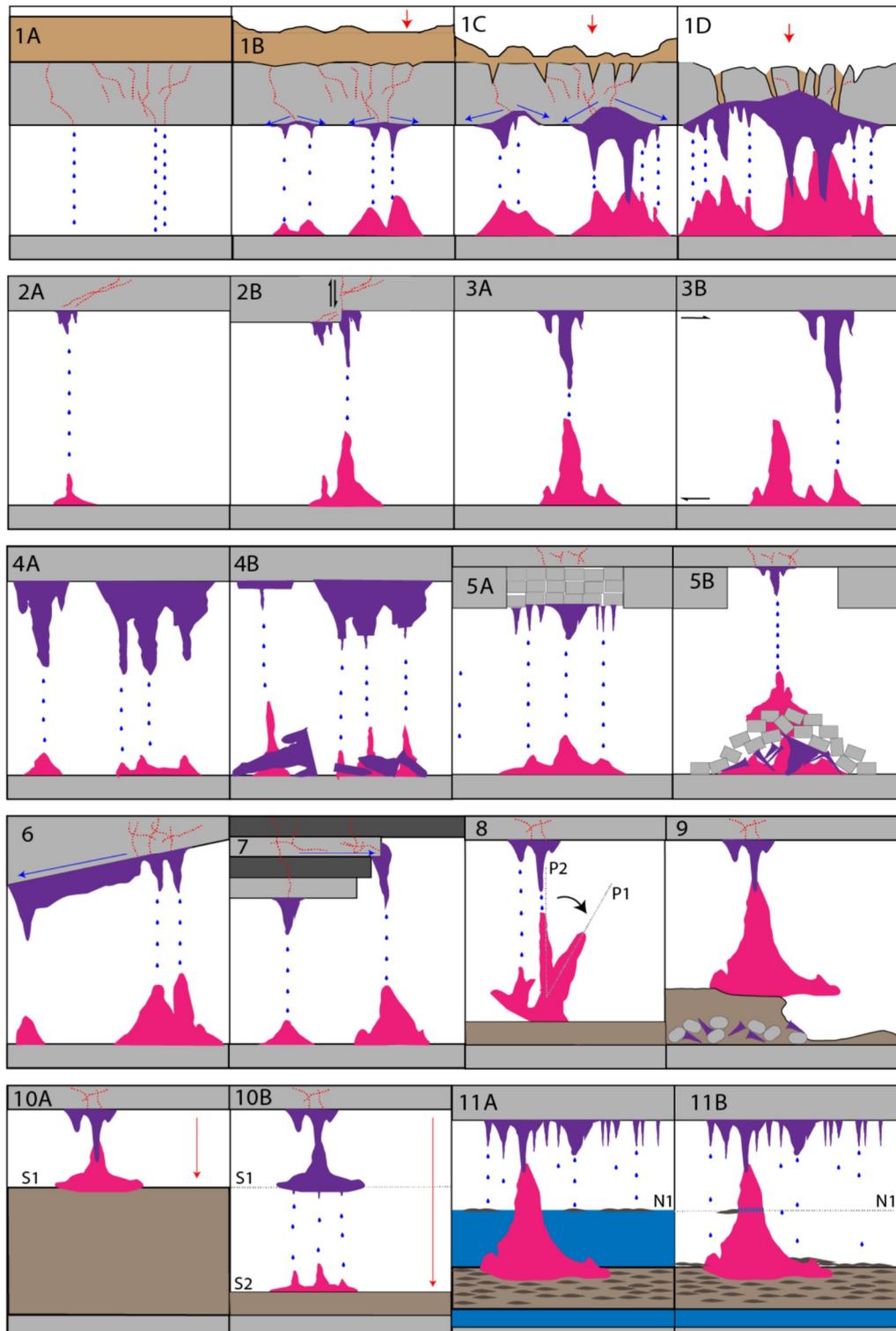
A quebra de espeleotemas, embora pode estar associada a diversos fatores, pode estar associada a processos tectônicos, neste caso, a quebra de um conjunto grande de espeleotemas e a posterior formação de canudos finos na área da extremidade do espeleotema. Deste modo são formadas estalactites de base larga que se afinam de forma abrupta ao chegarem na extremidade como demonstra a sequência 4A e 4B. Também pode estar associado tanto a processos gravitacionais impulsionados por tectônica ou por colapso a partir do próprio peso, a queda de parte do teto enfraquecido como é demonstrado na sequência 5A e 5B. Neste uma “renovação” da ornamentação ocorre, geralmente associada a estas áreas de colapso, estão a formação de salões, o rompimento da área do teto pode ocorrer nos limites entre as camadas sedimentares, deste modo ocorre a formação de áreas com tetos planos, interrompidos por pequenas formações de espeleotemas, estando

associadas a estes espeleotemas grandes depósitos detríticos com intercalações de espeleotemas colapsados, blocos de rochas e estalagmites.

Em 6, 7, 8 e 9 da figura 09 tem-se consecutivamente a formação de cortinas em tetos inclinados, a formação de espeleotemas controladas por diferenças de camadas sedimentares, no caso, as camadas mais susceptíveis à dissolução apresentam maior ornamentação. ocorre, na sequência a formação de espeleotemas em “V”, que pode ser associada a alterações na camada de sedimento que preenche o piso ou a processos tectônicos. por fim a formação de projeções de concreções formadas na base de espeleotemas que estão sendo erodidos.

Já em 10A e 10B, tem-se a formação de espeleotemas com forma de “pata de elefante” a partir das mudanças de nível de base e em 11A e 11B tem-se a formação de jangadas na superfície da água, essas jangadas vão sendo depositadas ao longo do tempo no piso da caverna. Ao rebaixar o nível freático, algumas jangadas podem deixar protuberâncias no espeleotema na forma de incrustação, assim como marcas de água no próprio espeleotema, deste modo a presença dessas feições são indicadores da mudança dos níveis freáticos em carstes ativos e paleo indicadores em carstes inativos.

Figura 09- Modelo de variações de espeleotemas de teto a partir da dinâmica evolutiva da caverna.

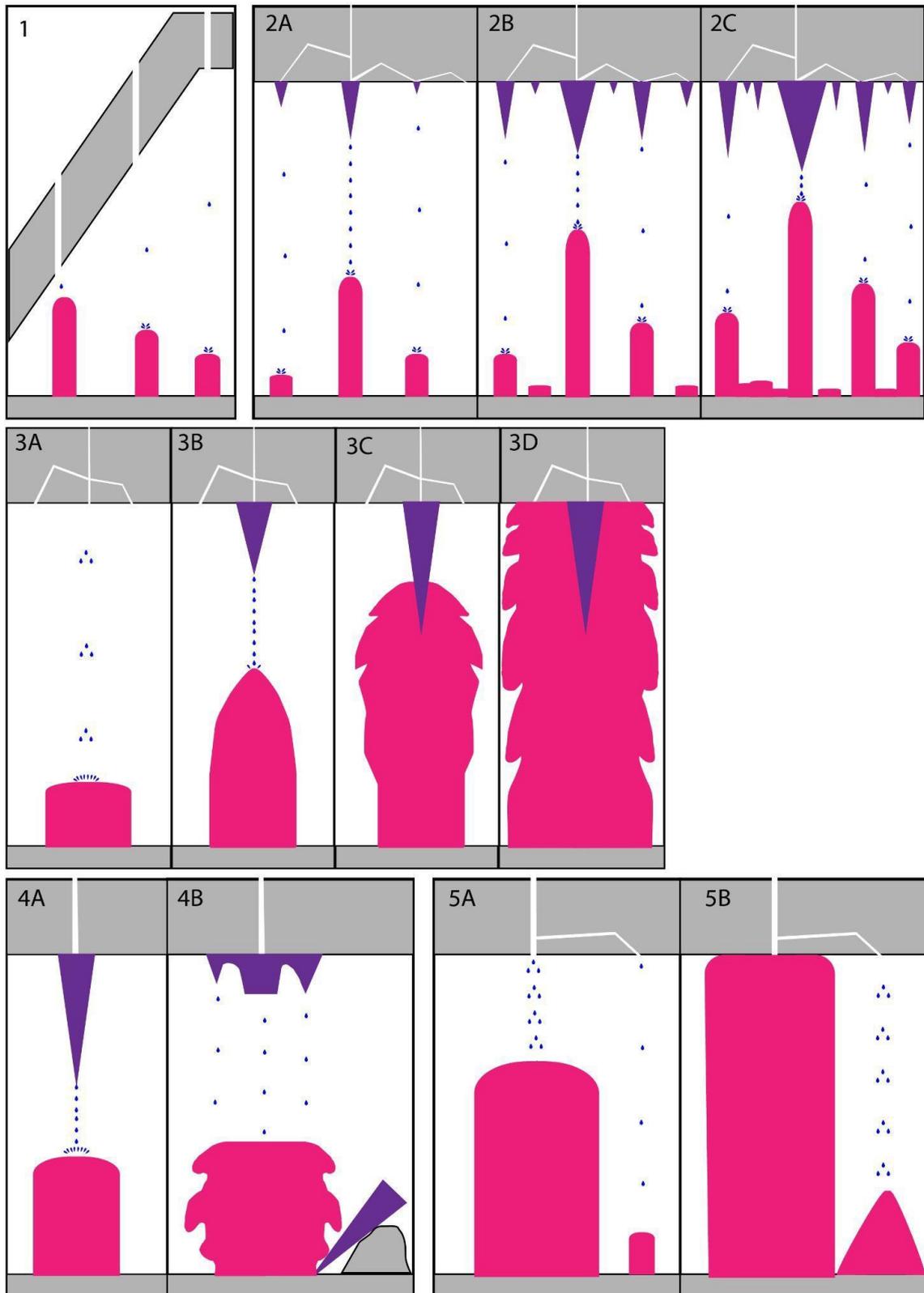


Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Jeannim (1990), Quinf (1997), Shamov e Kostov (2015) e Guellet (1997).

O gotejamento também é um fator interessante para se entender o processo de ornamentação das cavernas, principalmente quando o foco são os espeleotemas de água circulante. No caso da figura 10 tem-se em 1 a relação entre gotejamentos de mesmas intensidades a partir de fraturas em posições diferentes em teto inclinado, em 2A, 2B e 2C, vemos o crescimento das estalactites e estalagmites a partir de fraturas ativas com gotejamentos em intensidades diferentes. Nestes casos, em 1, quanto mais distante do teto, mais lento é o crescimento dos espeleotemas em comparação aos que se posicionam próximos em relação ao chão. Na sequência 2, A, B e C, é possível notar que os espeleotemas com maior intensidade de gotejamento crescem mais rápido que os de menor em situação de teto plano, também nota-se a expansão lateral do conjunto de espeleotemas, esse processo pode ser explicado pela adesão de gotículas que correm por algum tempo no teto devida a tensão superficial da gota.

Na sequência 3, tem-se a mudança na forma da estalagmite e a intensificação do fluxo de gotejamento em 3B, até a formação da coluna em 3C e sua expansão em 3D, neste caso, o espeleotema formado altera a frequência do gotejamento reorganizando o fluxo de saída das gotas. em 4A e 4B, é demonstrada a mudança do fluxo de gotejamento pela quebra do espeleotema, este processo torna o fluxo de gotas que antes era concentrado, em um fluxo mais difuso alterando assim a forma do conjunto estalactites e estalagmites.

Figura 10- Processo de Gotejamento formando espeleotemas



Fonte: Adaptado de Gamas, 1991.

Apresentados alguns dos modelos que representam aos processos em morfologia cársticas (ver quadro resumo dos modelos do carste no apêndice 01), conclui-se que os ambientes cársticos são dotados de complexidade, dependem de fatores climáticos e tectônicos, assim como da ocorrência de litologias solúveis e suas variações estratigráficas. Este sistema engloba desde escalas muito abrangentes até as escalas micro, perpassando por alterações climáticas e variações estáticas até a relação da rocha com poros e a passagem de gotículas.

5 SISTEMA CÁRSTICO NA FORMAÇÃO SALITRE

A área que corresponde ao carste específico é delimitada pelo polígono de aproximadamente 8.800 km², onde encontram-se as três cavernas divididas em dois grupos, no primeiro, as duas cavernas que se encontram integralmente inseridas na porção sul da Bacia de Irecê, também conhecida como sinclinal de Irecê (CRUZ; ALKIMIM, 2004; LEÃO; DOMINGUEZ, 1992): Ioiô e Diva de Maura. Em segundo a caverna Paixão, associada às cotas mais baixas, encontrada na bacia Una-Utinga. Na figura 11 é possível observar que a drenagem principal composta pelo rio Santo Antônio na área interna da Bacia de Irecê capta águas provenientes dos rios Almas, Água de Rega, Cerco e do Riacho São José.

Neste caso, parte da captação se torna subsuperficial, através dos fluxos subterrâneos sugeridos por Cordeiro (2019) e visíveis nessa figura como linhas tracejadas em vermelho. Na área da Bacia de Una-Utinga, a continuação do Rio Santo Antônio até tornar-se o Rio Paraguaçu, é uma drenagem composta por canais paralelos, formada pelos rios Utinga e pelos riachos Baixo do Jacu e da Pedra. De acordo com Cordeiro (2019), a disposição desses canais é a mais marcante evidência de um processo de captura de drenagem associado a pirataria cárstica.

Quando incluídos os dados de localização de cavernas fornecidos pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), através do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), observa-se que a área associada a Bacia de Irecê apresenta grande concentração de cavernas cadastradas, cerca de 90 cavidades por uma área de aproximadamente 800 km² em detrimento da porção norte da bacia, que possui cerca de 30 cavidades cadastradas por uma área de 12.200km². Na bacia de Una-Utinga há poucas cavidades, estas apresentam-se como feições isoladas, também com baixa densidade de cavernas apresentando cerca de 10 cavidades em uma área de aproximadamente de 5.800 km².

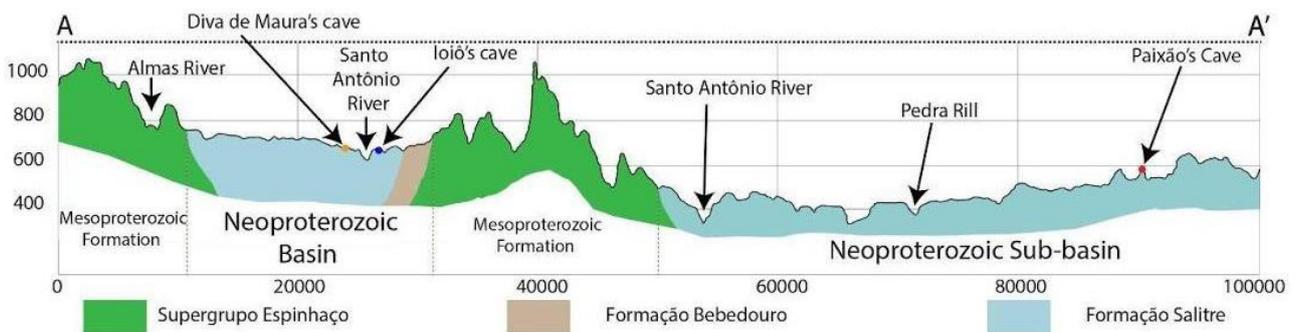
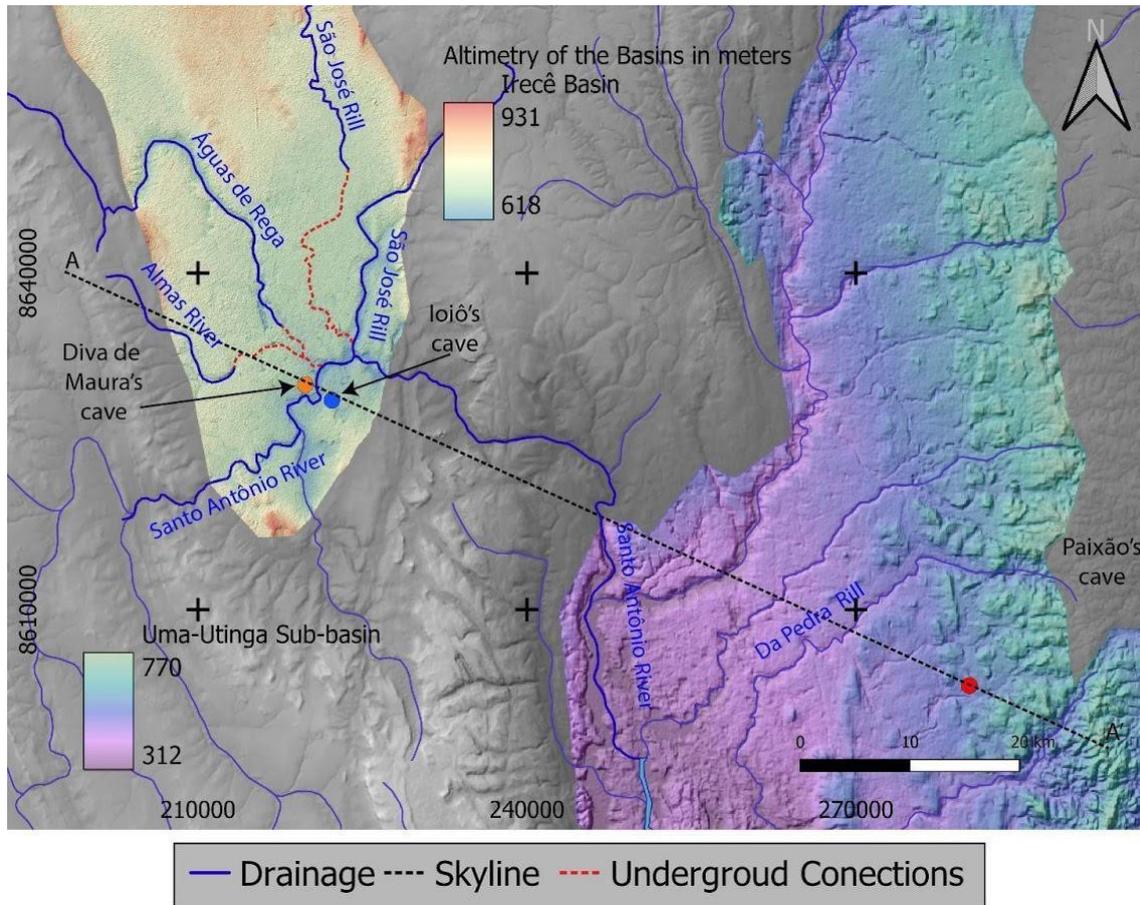
Essa diferença de densidade pode ser explicada pela deformação na bacia, já que as áreas a norte apresentam maior deformação, como visto nos experimentos de modelagem do cinturão de antepaís da Bacia de Irecê apresentados por Reis et al (2013) e, conseqüentemente, maior quantidade de materiais silicosos e quartzosos formando veios e conferindo maior fator de resistência a processos químicos de dissolução pela água (KUCHENBECKER; REIS; FRAGOSO, 2011). Também há a

presença de cavernas formadas por processos hipogênicos. Esse processo ocorre mediante a circulação de fluidos hidrotermais ascendentes, esses processos hidrotermais são essenciais para a silicificação em rochas, também conferindo maior resistência a processos erosivos quando comparadas as rochas menos deformadas do sul da Bacia de Irecê (ENNES-SILVA et al , 2015; KLIMCHOUK, 2015).

Em relação à geologia (Figura 03), tem-se na área a predominância de carbonatos pertencentes ao Grupo Uma, destacando-se a Formação Salitre para o primeiro grupo das cavernas na Bacia de Irecê e litologias indiscriminadas do Supergrupo São Francisco, para as cavernas do segundo grupo. Segundo Rubbioli et al (2019), o Grupo Una possui destaque no calendário espeleológico nacional, pois apresenta as duas das maiores cavernas brasileiras, além de outros sítios espeleológicos de notável valor.

A formação Salitre, apresenta a maior concentração de cavernas desta região, constituída pelas unidades Nova América, Gabriel, Jussara e Irecê (Figura 03), com o predomínio, em relação às cavernas estudadas, da unidade Nova América formada por lamito algais, estromatólito colunar, calcarenito peloidal, dolomitos e nível de brechas intraformacionais (CARVALHO; RAMOS, 2010; HASUI, 2012). A tectônica da área apresenta eventos de compressão ligados ao ciclo Brasiliano, o primeiro afeta principalmente o grupo Chapada Diamantina que foi responsável pela inversão da bacia e geração dos dobramentos empurrões e o segundo afeta diretamente a Bacia de Irecê provocando as deformações e ondulações ortogonais ao primeiro evento de direção NNE (DANDERFER FILHO, 1990; LAGOEIRO, 1990). Destaca-se que a área apresenta extensa planície carbonática com carstes cobertos e parcialmente exumados.

Figura 11- Altimetria, drenagem e geologia básica da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse contexto compõe um sistema cárstico que, sob a ótica de Ford e Williams (1989), é formado por quatro setores:

1- setor extracarste, composto pelas regiões mais elevadas, essa área forma os principais divisores de drenagem da região, também, devido ao gradiente

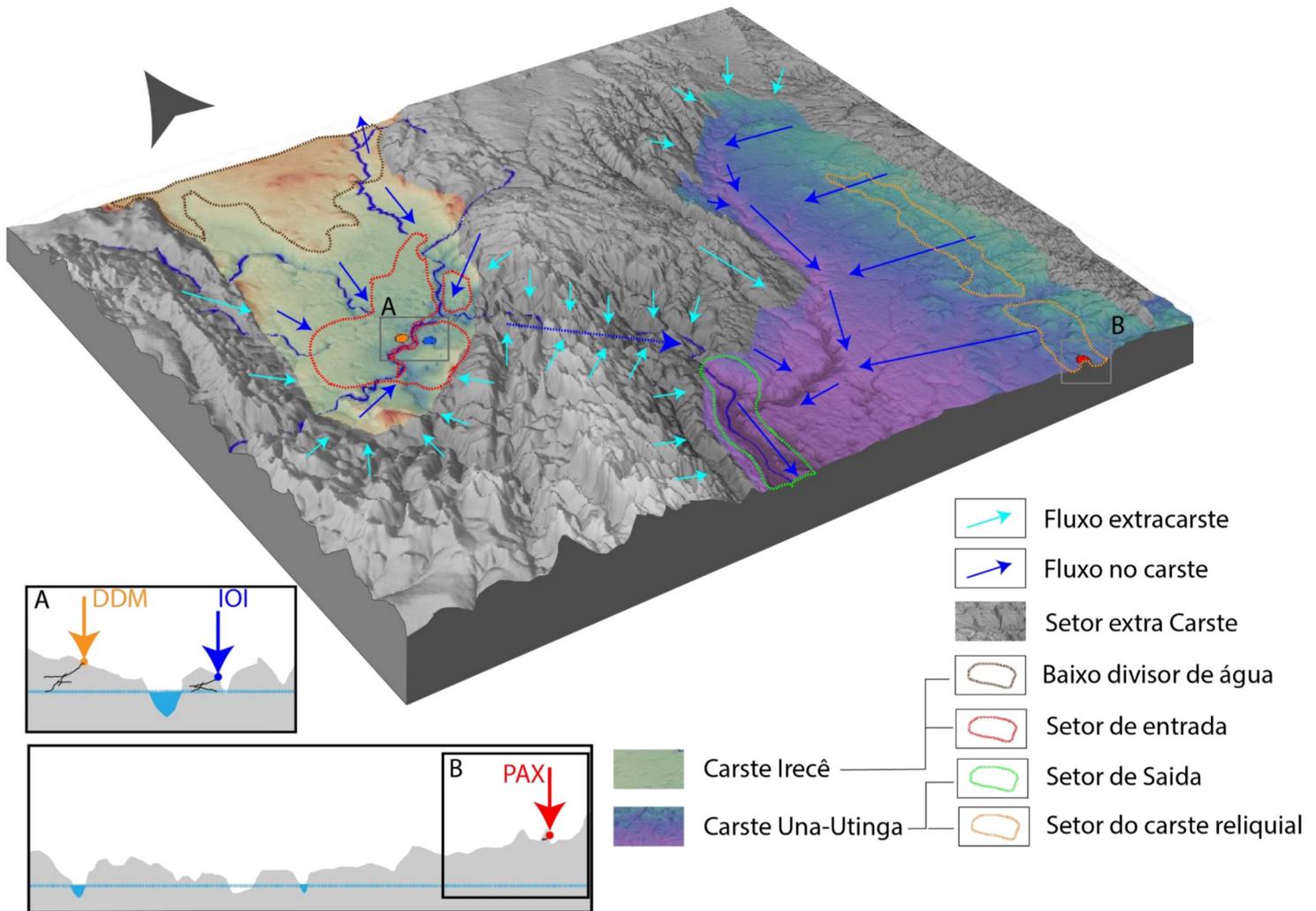
topográfico, nesse setor os rios adquirem maior energia, nesse setor são formados rios incisivos com bastante poder erosivo.

2- setor de entrada, este está inserido na Bacia de Irecê, esta área é onde ocorre a mudança da drenagem exorreica para a criptorréica, também nela estão concentradas as formas cársticas específicas, como as dolinas, uvalas e a maior parte das cavernas. No caso específico da caverna Diva de Maura (DDM) e Ioiô (IOI), temos uma proximidade maior com o afloramento do lençol freático, sendo esse o depocentro do setor sul da bacia de Irecê.

3- setor de saída correspondente a área a jusante do Santo Antônio onde este passa a correr sob a bacia Una-Utinga, nesta fase o rio Santo Antônio se superimpõe (ver seta azul escura com linha tracejada na figura 12) as áreas mais elevadas formando um vale sinuoso que liga as duas bacias, findando com a área de deposição dos sedimentos carregados pelo rio em sua fase mais erosiva.

4- setor de carste reliquial, correspondendo à área onde se insere a caverna Paixão (PAX), que está alçada em relação ao nível de base local, neste setor o carste está isolado da drenagem local, estando a caverna muito distante em relação ao afloramento do nível freático.

Figura 12- Abrangente sistema cárstico de Irecê e Una-Utinga.



Fonte: Elaborado pelo autor baseado em Ford e Willians (1989).

Dada a descrição da área, é possível destacar que os carstes de Irecê e de Una-Utinga apresentam características atuais distintas em relação a seu estágio atual de evolução, em A da figura 12 é possível verificar que as duas cavidades IOI e DDM estão posicionadas próximas ao nível de base local (linha azul), marcada pelo Rio Santo Antônio (destaque em azul) em B nota-se a distância e a variação altimétrica da caverna Paixão em relação ao nível de base local, também marcada pelo rio Santo Antônio (destaque em azul), sendo a variação em relação ao nível de base e a caverna. No caso de IOI e DDM cerca de até 15 metros de altura e no caso da PAX,

esse gradiente é cerca de 100 metros de altura. Deste modo as cavernas do carste de Irecê estão ativas, ainda ligadas ao sistema de drenagem, enquanto a caverna PAX está em estágio reliquial desligada da drenagem local.

Antes de adentrar ao assunto das cavernas, suas características geomorfológicas e seus processos de gênese e evolução, faz-se necessária uma abordagem metodológica a respeito das técnicas e materiais utilizados para a apreensão dos dados que serão utilizados neste trabalho. Portanto, a esse respeito serão tratados os temas apresentados na parte dois deste trabalho.

A parte II deste trabalho abrangerá a análise de dados obtidos por sensores LIDAR para subsidiar o estudo de geomorfologia em caverna, assim como o desdobramento de dados obtidos em ambiente virtual para a estimativa de dados morfométricos.

6- PROPOSTAS METODOLÓGICAS PARA A INTERPRETAÇÃO DE DADOS LIDAR EM GEOMORFOLOGIA DE CAVERNAS.

Os levantamentos em cavernas realizados no presente trabalho contou com a sistemática de se criarem nuvens de pontos a partir de sensores lidar, levantamentos fotográficos em campo e posterior análise de dados em gabinete através de softwares Sigs (Sistemas de Informações Geográficas)

A partir dos levantamentos realizados, as nuvens de pontos foram analisadas utilizando-se dois softwares, o Quantum Gis (Qgis) e o CloudCompare. Obteve-se, portanto, diversos produtos tendo como foco principal a extração de lineamentos estruturais no interior das cavernas e a identificação de feições geomorfológicas em planta e teto de caverna. Também foi foco a medição das áreas de ocorrência de grupos de espeleotemas e medições por amostragem de espeleotemas individuais, contando com o auxílio de fotografias e de recortes das nuvens de ponto.

Esse tipo de levantamento, mostrou-se muito eficiente em termos de representação das feições endocársticas, permitindo sua quantificação e interpretação, o que subsidiou a elaboração de modelos mais realísticos e detalhados dos processos atuais e pretéritos de gênese e evolução das cavernas analisadas.

Diversos trabalhos vêm sendo realizados com enfoque na confecção de modelos geomorfológicos em cavernas com a utilização do sensor LIDAR, destaca-se os trabalhos de Robson-Brown et al (2001); Westeman, Pringle e Hunter (2003); Jaillet et al (2011); Ronginer, Collon-Droaillet e Filipponi (2014); Fabbri et al (2016); Idress e Pradhan (2016); Zhang et al (2017) e Waele et al (2018). No Brasil a utilização do LIDAR com enfoque em ambientes de caverna, ainda não representa uma vasta produção, embora, existam trabalhos na área de geomorfologia, monitoramento florestal, engenharia, arquitetura e geotecnologias, com destaque para os trabalhos de Zandoná, Lingnau e Nakajaima (2007); Pereira, Gomes e Perez-Alberti (2013); Coelho e Bähr (2005); Moro e Centeno (2010); Silva, Rocha e Aquino (2016) e Santos e Galo (2016).

Inicialmente é importante sanar algumas questões conceituais, como: i) o que é um sensor LIDAR; ii) o que são nuvens de pontos e iii) o que é geomorfologia de caverna.

6.1 Geomorfologia de caverna, Nuvem de pontos e LIDAR.

A primeira questão que nos propomos a discutir é referente aos conceitos básicos de “geomorfologia de cavernas”. Nesse caso, entendemos que cavernas são ambientes subterrâneos ligados a processos de dissolução de rochas solúveis, no caso de rochas dolomíticas, carbonáticas, siliciclásticas e, em alguns casos, rochas compostas por minerais máficos ou processos epigenéticos (WHITE, 1988; PALMER, 2000; PALMER, 2007; FORD; WILLIAMS, 2007; LINO, 2009; VERESS, 2016; TRAVASSOS, 2019). A gênese das cavernas também pode relacionar-se aos processos hidrotermais ou de circulação de ácidos capazes de solubilizar as rochas que não são solúveis em condições normais de temperatura e acidez ou processos hipogenéticos (KLIMCHOUK, 2009; AUDRA; D'ANTONI-NOBERCOURT; BIGOT, 2010; KLIMCHOUK, 2014;; KLIMCHOUK, 2017).

Em cavernas, também é comum encontrar depósitos minerais denominados espeleotemas. Esses podem ser classificados de acordo com seus processos de formação estando ligados diretamente a circulação de fluidos e a processos de dissolução, descarbonatação, precipitação e mineralização (LINO; ALLIEVI, 1980; PALMER, 2007; LINO, 2009; FAIRCHILD; BAKER, 2012).

Outras feições também podem ser encontradas nos ambientes cavernícolas como depósitos detríticos, estruturas como falhas, fraturas e diaclases ou ainda feições morfoesculturais associadas à passagem da água. Neste caso são observados cúpulas nos tetos das cavernas que podem relacionar-se a processos epigenéticos remetendo-se ao turbilhonamento da água pressurizada em ambiente freático dissolvendo descontinuidades litológicas e estruturais ou hipogenéticos, com a circulação de ácidos ou fluxos hidrotermais ascendentes, ou também a paragênese, que está relacionada as diversas fases sucessivas de entupimento de cavernas (AUDRA; PALMER, 2015; KLIMCHOUK, 2017; WAELE et al, 2018; TRAVASSOS, 2019).

Dedicada a estudar esses processos, a geomorfologia de cavernas pode ser definida como o ramo da geomorfologia dedicada ao estudo das formas de relevo e dos seus processos de gênese e evolução em ambiente cavernícola.

O segundo ponto apreciado, refere-se ao significado do que é uma nuvem de pontos. Definindo-a como composta pela intersecção de três eixos de coordenadas, “X”, “Y” e “Z” que representam a longitude, a latitude e a altura de um ponto em relação aos demais pontos que compõem o conjunto, a partir de um sistema de coordenadas georreferenciadas (WESTOBY, et al 2012; LONGLEY et al, 2013; HOVAD et al, 2013).

O terceiro enunciado, refere-se a o que são os sensores LIDAR. Segundo Jensen (2009) o LIDAR:

[...] consiste de um sistema de controle e um transmissor e receptor. [...] A maioria dos sistemas LIDAR usados para mapeamento topográficos utilizam a luz laser no infravermelho próximo (Boland et al, 2004). [...] Os LIDAR podem ser obtidos, se necessário, à noite, por ser um sistema ativo, não depende da iluminação solar passiva.

Essa característica faz do LIDAR um excelente instrumento para ambientes com baixa ou nenhuma iluminação, como é o caso das cavernas.

6.2 A utilização de dados LIDAR em cavernas

Os dados obtidos por sensores LIDAR são utilizados em diversas áreas da ciência, por exemplo na reconstrução tridimensional da superfície terrestre, na preservação de artefatos arqueológicos, na modelagem de áreas florestais, entre outras.

Segundo Idrees e Praghan (2016), os primeiros estudos com a utilização da tecnologia LIDAR 3D em caverna foram realizados no norte da Espanha, na caverna Altamira, em 1988. A partir deste momento, diversos outros estudos foram realizados tendo em vista a quantificação de feições, representação de modelos e aprimoramento de técnicas de prospecção e processamentos de dados LIDAR, destacam-se Robson-Brown et al (2001); Westerman, Pringle e Hunter (2003); Sadier (2011); Rongier, Collon-Drouaillet e Filipponi (2014); Gutting (2017); Joves et al (2017); Mitchell e Gutting (2017); Zhang et al (2017) e Waele et al (2018).

Na análise geomorfológica de feições endocársticas utilizando tecnologia LIDAR, destacam-se os trabalhos de Fabbri et al (2016) na identificação e mensuração

de feições hipogênicas dômicas em cavernas na região central-sul dos Alpes italianos no Regional Park of the Lessimini Mountains. Também ressalta-se o trabalho de Waele et al (2018) que estudou a caverna Ca' Castellina próximo ao rio Sintra no norte da Itália, onde foram identificadas e classificadas as marcas de dissolução associadas a antigos rios em fase freática preservados no teto desta cavernas.

Em linhas gerais, o LIDAR, seguindo o exemplo dos sensores orbitais e terrestres, podem ser classificados mediante o tipo de plataforma aos quais são acoplados (visualizar figura 05). Estes sensores são utilizados em diversas missões orbitais, produzindo dados para o sensoriamento remoto (JENSEN, 2009) ou até mesmo em missões de prospecção de dados interplanetário para interpretação geomorfológica, como no trabalho de Liu et al (2018) que trata da mensuração e classificação de domos e crateras lunares a partir de algoritmos de classificação em MDE (Modelos Digitais de Elevação). Também existem os LIDAR aerotransportado que pode estar acoplado a aeronaves convencionais (JENSEN, 2009; EL-SHEIMY; VALECO; HALIB, 2005) ou aos VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados), convencionalmente chamados de “drones”. Cita-se o trabalho realizado por Zhang et al (2017), que, inicialmente utiliza fotogrametria feita por VANT em ambientes de caverna, mas que, vislumbra a possibilidade de uma futura substituição do sensor óptico fotográfico pelo LIDAR.

Os LIDAR terrestres (Figura 13) são distinguidos em duas categorias, os TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) em plataformas fixas e os TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) *Mobile*, acoplados a plataformas móveis. É importante lembrar que, há uma distinção entre os dados obtidos por sensor LIDAR e sensores ópticos fotográficos, estando o primeiro associado a leitura de sensores ativos calibrados por sistemas computacionais capazes de mensurar a posição e distância relativa entre pontos (SANTOS; GALO, 2016). Enquanto os sensores ópticos obtêm as nuvens de pontos a partir de procedimentos computacionais em ambiente de SIG (Sistema de Informação Geográfica) que simulam os efeitos estereoscópicos e fotogramétricos (ANDRADE, 2003; JENSEN, 2009; LONGLEY et al, 2013).

No presente trabalho, iremos abordar o sensor LIDAR do tipo TLS *Mobile*. Geralmente esse sensor está associado a veículos automotores, como é demonstrado nos trabalhos de Weibring, Edner e Svanberg (2003) e Williams et al (2013), sendo

bastante utilizado em levantamentos urbanísticos para o planejamento das cidades. Em cavernas, torna-se impraticável a utilização do LIDAR acoplada a veículo automotor (Figura 13 B), devido a dificuldades de acesso e locomoção, assim, nesses ambientes, é utilizado LIDAR TLS *Mobile* de modelo “ZEB-Revo Lidar” a exemplo do que é apresentado na figura 13 A (ISLAM, 2019), sendo possível acrescentar maior agilidade, precisão e detalhamento, quando comparado ao levantamento espeleométrico tradicional. Ademais, o LIDAR terrestre do tipo móvel é operado a partir de um referenciamento mais simples, partindo de um ponto conhecido na entrada da caverna e prosseguindo com uma caminhada livre, sendo necessário atenção à posição das estruturas e das feições que se pretende mapear, de modo a evitar efeitos de sombra que gerem falhas ou artefatos na imagem (ISLAM, 2019).

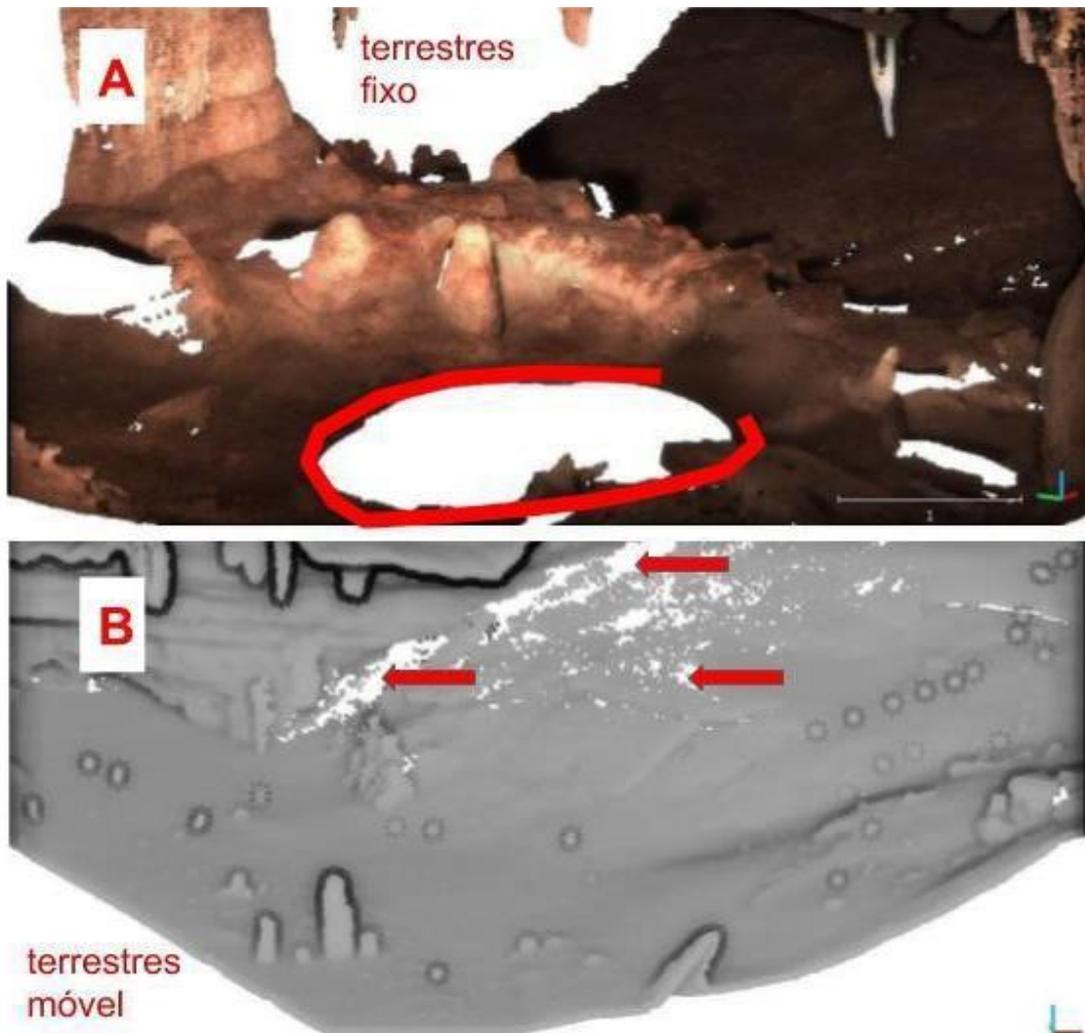
Figura 13- Tipos de LIDAR segundo a plataforma do sensor.



Fonte: Adaptado de ISLAM, 2019;

Em relação às características dos dados obtidos em levantamentos de caverna a partir de sensores LIDAR TLS fixo e *Mobile*, é possível visualizar algumas diferenças. Tomando como exemplo dois levantamentos, um com sensor fixo e o outro com sensor *Mobile*, feitos em uma mesma caverna e apresentada a mesma área (Figura 14), note que em “A” é possível visualizar um círculo branco, bordejado por uma linha vermelha, gerado devido a limitação de captura de dados por varredura decorrente da base deste mesmo sensor, essa característica gera muitos artefatos na imagem “A”. Já em “B” é notória a menor quantidade de artefatos relacionados à falta de informação espacial derivado da captação e transmissão do sensor, embora haja a presença de artefatos relacionados a menor densidade de pontos em alguns setores destacados pelas setas vermelhas.

Figura 14- Nuvens de pontos provenientes de LIDAR fixo e *mobile*.

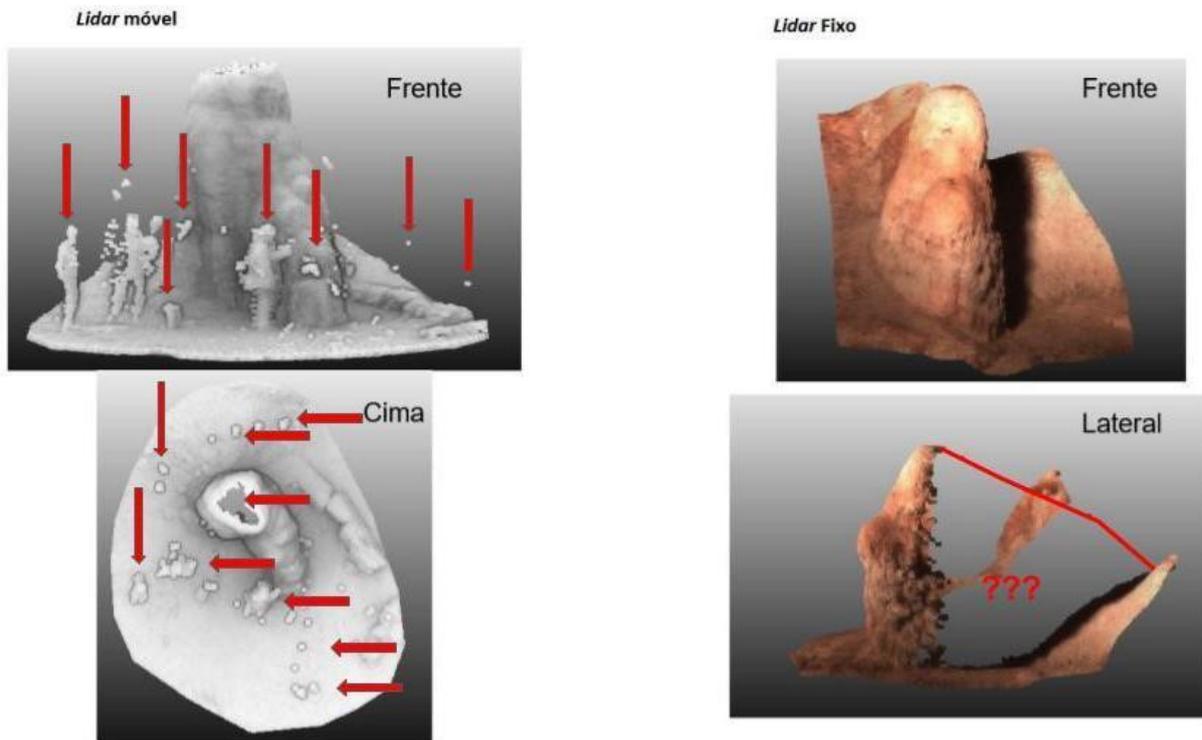


Fonte: Elaborado pelo autor

Embora esse problema, em relação ao LIDAR TLS fixo, possa ser resolvido com uma quantidade maior de levantamentos em posições diferentes, o procedimento de repetição de varreduras com o intuito de diminuir a quantidade de artefatos na imagem, torna os dados mais pesados em termos de processamento, havendo assim um maior custo computacional para análise de uma nuvem de pontos obtidas por esse tipo de LIDAR. As nuvens de pontos obtidas por LIDAR *Mobile* tendem a ser mais contínuas, apresentando menos falhas relacionadas a falta de informações (como visto na figura 15 representada pelas interrogação em vermelho),

no entanto esse tipo de levantamento tende a apresentar uma maior quantidade de artefatos relacionados a movimentação de pessoas ou animais, principalmente morcegos, no interior da caverna (Figura 15 setas vermelhas).

Figura 15- Artefatos nas nuvens de pontos obtidas por LIDAR fixo e *Mobile*.



Fonte: Elaborado pelo autor

É importante destacar que as zonas de oclusão como apresentadas na figura 15, independente de qual tipo de sensor esteja sendo utilizado, pode vir a inviabilizar algumas análises, como o cálculo de volume através da ferramenta de calcular volume do Cloud Compare. Esse erro denota a falta de referência formada pela ausência de pontos, neste caso o software irá entender que os volumes de, por exemplo, espeleotemas, são muitas vezes maiores que o seu volume real.

Os softwares Qgis e CloudCompare, utilizados neste trabalho, são classificados como livres, ou seja, softwares criados por uma comunidade de usuários para atender determinado fim. O site oficial do Qgis, o define como:

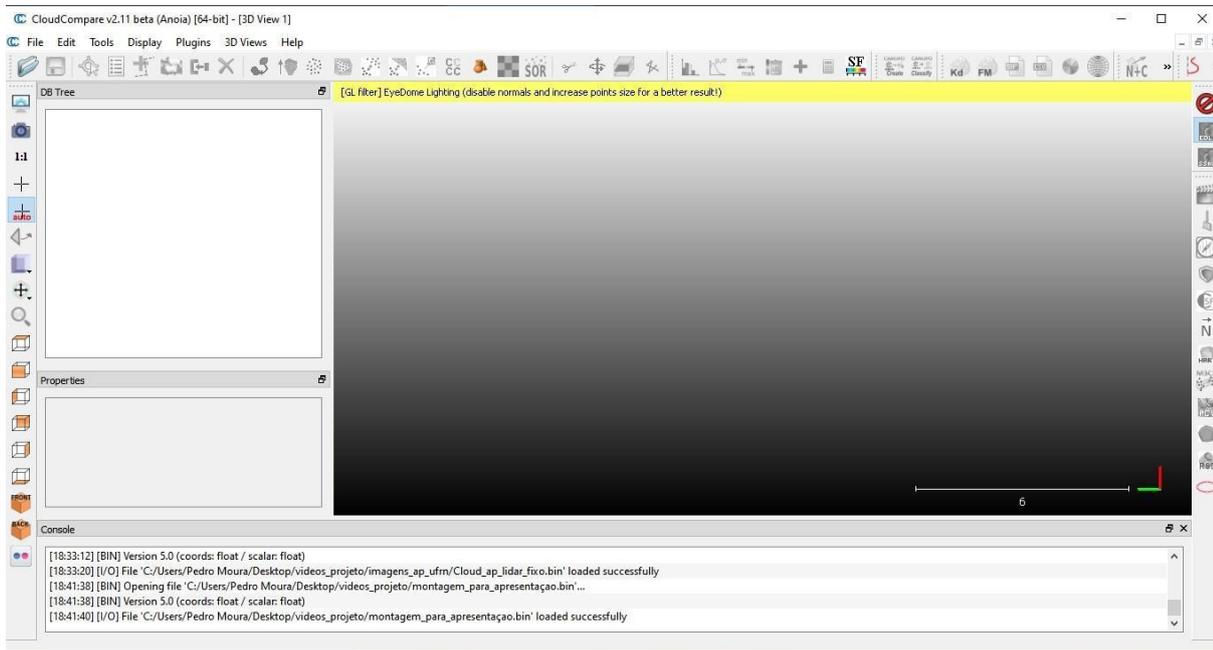
[...] um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de Código Aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. O QGIS é um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Funciona em Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android e suporta inúmeros formatos de vetores, rasters e bases de dados e funcionalidades.(QGIS, 2020).

O CloudCompare é um software utilizado para edição, análise e processamento de nuvens de pontos, essas últimas podem ser importadas em diversos formatos, sendo os “.las”, “.bim” e “.lascloud” as extensões de preferência do software. Sendo definido pelo site oficial como:

[...] is a 3D point cloud (and triangular mesh) processing software. It has been originally designed to perform comparison between two dense 3D points clouds (such as the ones acquired with a laser scanner) or between a point cloud and a triangular mesh. It relies on a specific octree structure dedicated to this task. Afterwards, it has been extended to a more generic point cloud processing software, including many advanced algorithms (registration, resampling, color/normal/scalar fields handling, statistics computation, sensor management, interactive or automatic segmentation, display enhancement, etc.) (CLOUDCOMPARE, 2020).

A interface do software CloudCompare (Figura 16) segue o que é apresentado na maioria dos Sigs e gis conhecidos, apresentando ferramentas de edição e medição em janelas ao redor da tela de visualização.

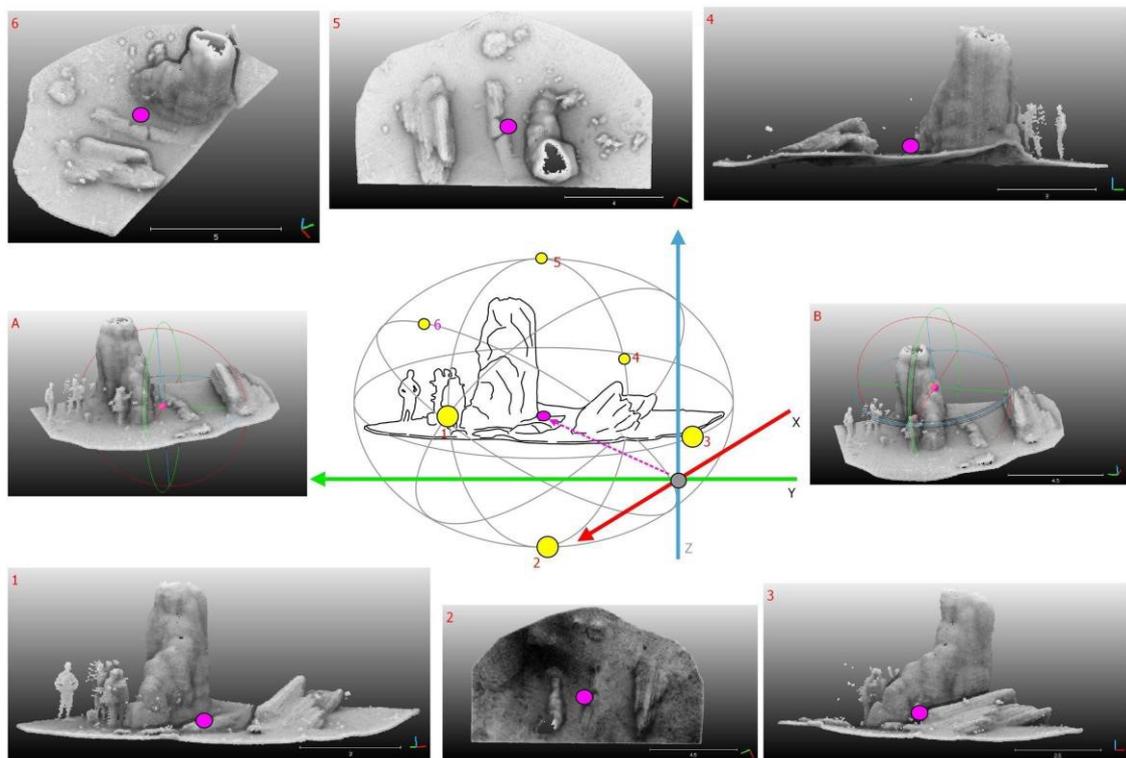
Figura 16- Interface do software CloudCompare.



Fonte: Elaborado pelo autor

A visualização das feições representadas pelas nuvens de pontos se dá a partir da seleção de um ponto de referência do qual é possível movimentar a feição visualizando-a em qualquer direção (Figura 17). Também é possível trocar o ponto de referência da imagem de acordo com a preferência do usuário, como demonstrado na figura 17 A e B, neste caso a ilusão oferecida pelo software é de um voo livre em qualquer ponto desejado, ampliando e diminuindo a distância. A ferramenta de referência para a visualização, embora simples, é fundamental para a análise e corte de feições da imagem, pois esse processo é realizado a partir da acuidade visual do usuário.

Figura 17- Perspectiva e visualização da nuvem de pontos no CloudCompare



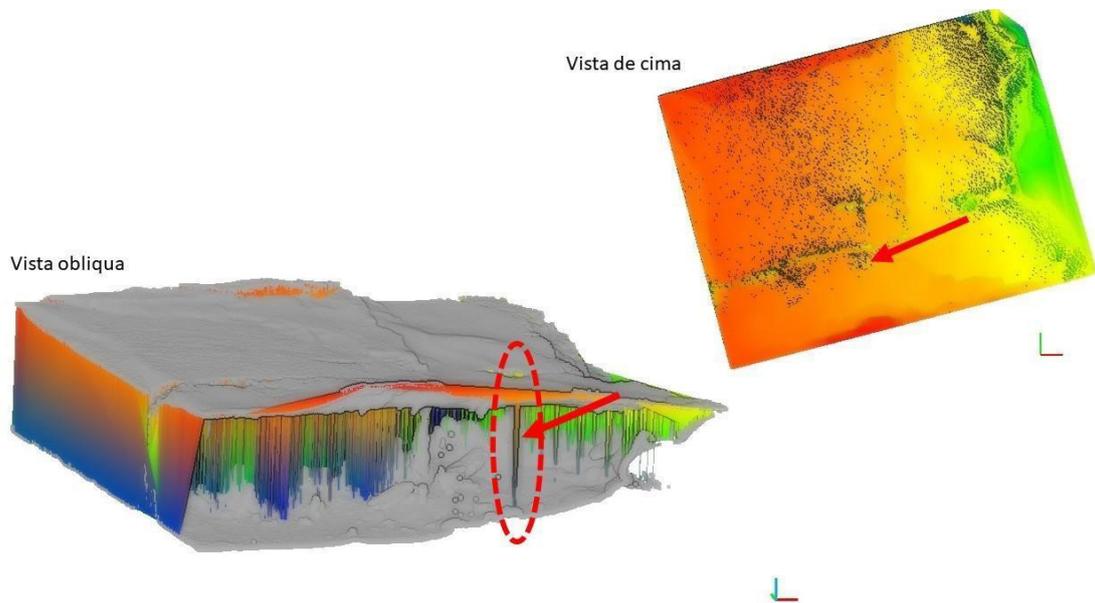
Fonte: Elaborado pelo autor

A nuvem de pontos apresenta falhas em alguns setores, devido a baixa densidade de pontos em uma determinada área, provocada por limitações no alcance do sensor ou por interrupções decorrentes de obstáculos “gerando efeitos de sombra”. Essas falhas induzem uma leitura errônea ao se fazer a interpolação dos pontos através da ferramenta de criação de raster do CloudCompare.

Um exemplo disso é o que acontece quando existem falhas da nuvem de pontos no teto da caverna e essa nuvem é usada para gerar o modelo digital de superfície. Neste caso é observado que as falhas apresentadas na imagem são interpretadas pelo software como uma cavidade que se liga do teto até o piso da caverna (vistos destacados por setas vermelhas na Figura 18). Assim, o ponto que está no teto da caverna vai ligar-se ao ponto proximal, neste caso a interpolação considerará o ponto que está no piso da caverna como o proximal e o ponto que está no piso novamente irá se ligar ao próximo ponto que estará no teto (representado no esquema da figura 19). Essa falha gera um efeito que ao ser visualizado no software cria um conjunto de linhas que partem do teto até o piso (observados na figura 18

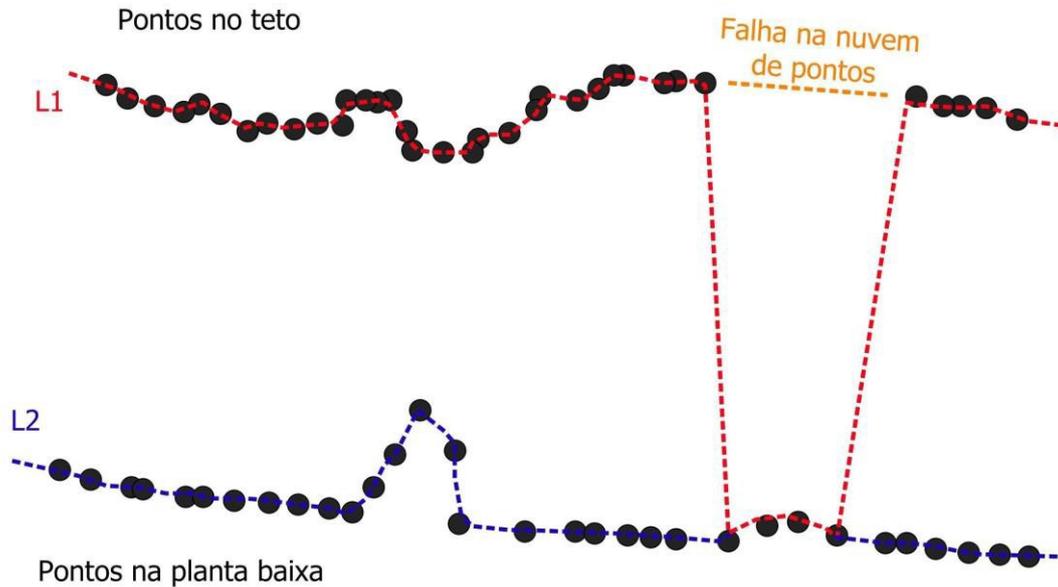
“vista oblíqua” destacada por elipse pontilhada vermelha). Esse efeito pode impossibilitar as análises geoespaciais.

Figura 18- Falha na nuvem de pontos no CloudCompare



Fonte: elaborado pelo autor

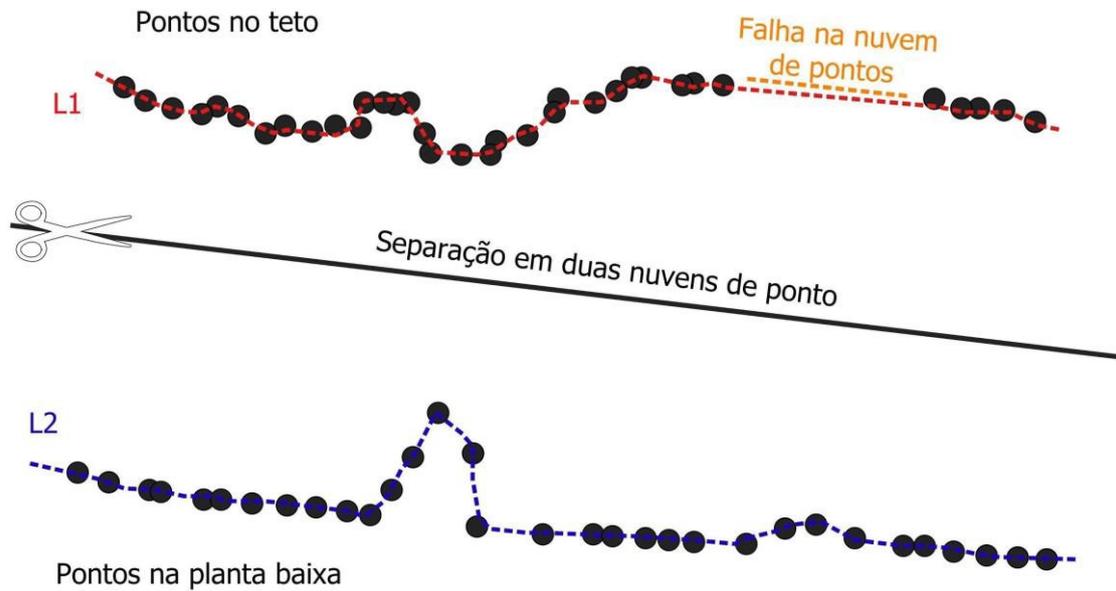
Figura 19- Falha na nuvem de pontos exemplo esquemático



Fonte: elaborado pelo autor

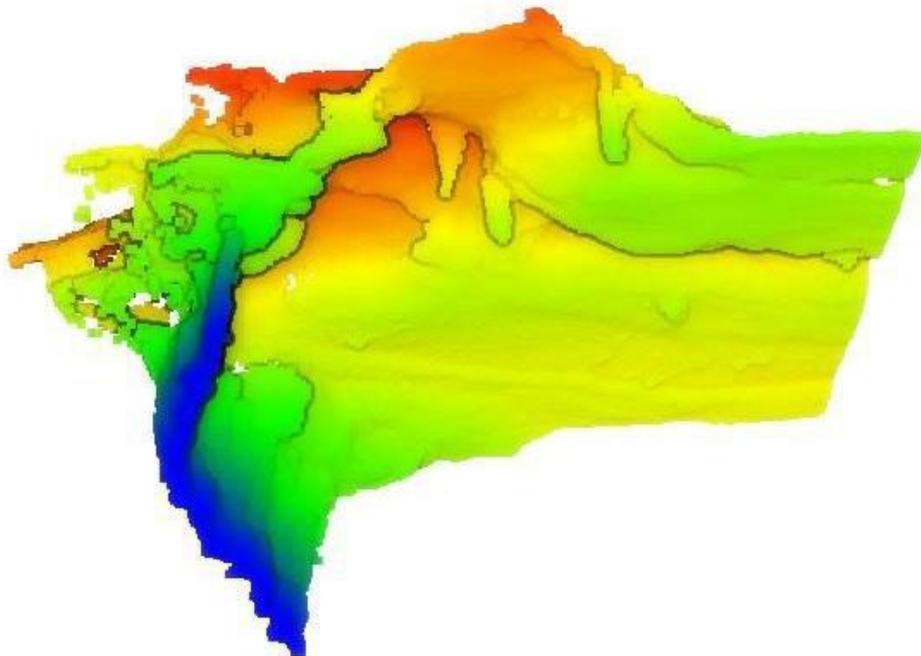
Por conta deste problema e para a melhor visualização dos elementos das cavernas, em termos cartográficos, optou-se por separar duas feições distintas para cada caverna, o teto e o piso ou planta baixa. Neste caso, foi utilizada a ferramenta de corte manual de nuvens de pontos do CloudCompare. Essa ferramenta, permite decompor a nuvem de pontos em partes individualizadas, deste modo é possível gerar modelo digital de superfície com a menor interferência das falhas na interpolação da nuvem de pontos (visualizados em esquema na figura 20 e seu respectivo resultado na figura 21).

Figura 20- Ferramenta de corte manual de nuvens de pontos do CloudCompare exemplo esquemático.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21- Resultado da utilização da ferramenta de corte no CloudCompare



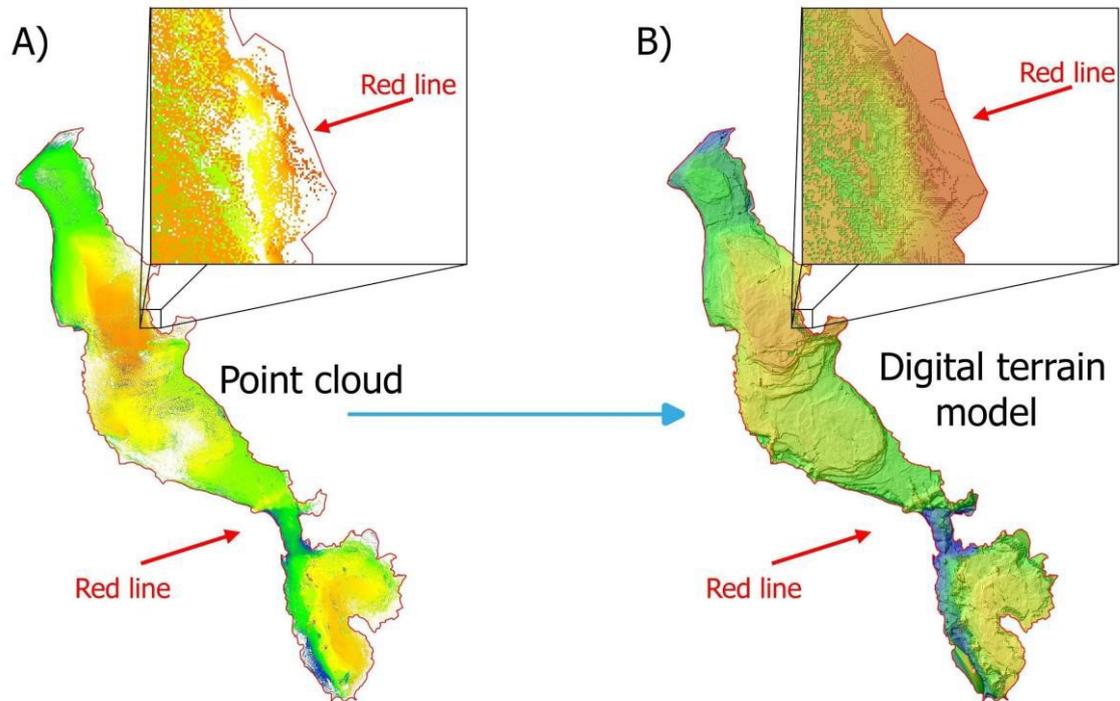
Fonte: Elaborado pelo autor

Ao criar a malha triangular ou *merch*, outra característica desse dado pode ser observada através dos pontos que compõem o modelo, neste caso, a interpolação dos pontos gera uma superfície muito maior do que a levantada, assim dificulta a interpretação visual do modelo já que não se sabe ao certo, a partir do produto já processado, onde termina a área levantada e onde começa as superfícies criadas pelo excesso de triangulação na formação do *merch*. É importante lembrar que esse problema gera falhas em processamento que dependem dos modelos interpolados, portanto algumas análises como densidade e volume devem ser feitas a partir da nuvem de pontos.

Uma maneira sugerida para minimizar o problema com o limite dos modelos e suprimir o excesso de triangulação que cria áreas excedentes, pelo menos em termos visuais, em um ambiente de SIG, é a elaboração de uma feição vetorial do tipo polígono, com a inserção de um anel que permita a visualização da área útil do modelo, no caso do Qgis, da inclusão de um “anel” vetorizado tendo como base a nuvem de pontos do levantamento (visualizados na figura 22 como *Red line*, em “A”, apresenta-se a nuvem de pontos em formato raster para a vetorização do limite e em

“B” apresenta-se o modelo gerado delimitado). Fato esse decorrente da nuvem de pontos conter as formas exatas e os limites corretos e desejáveis do modelo.

Figura 22- Delimitação da área útil do dado LIDAR.

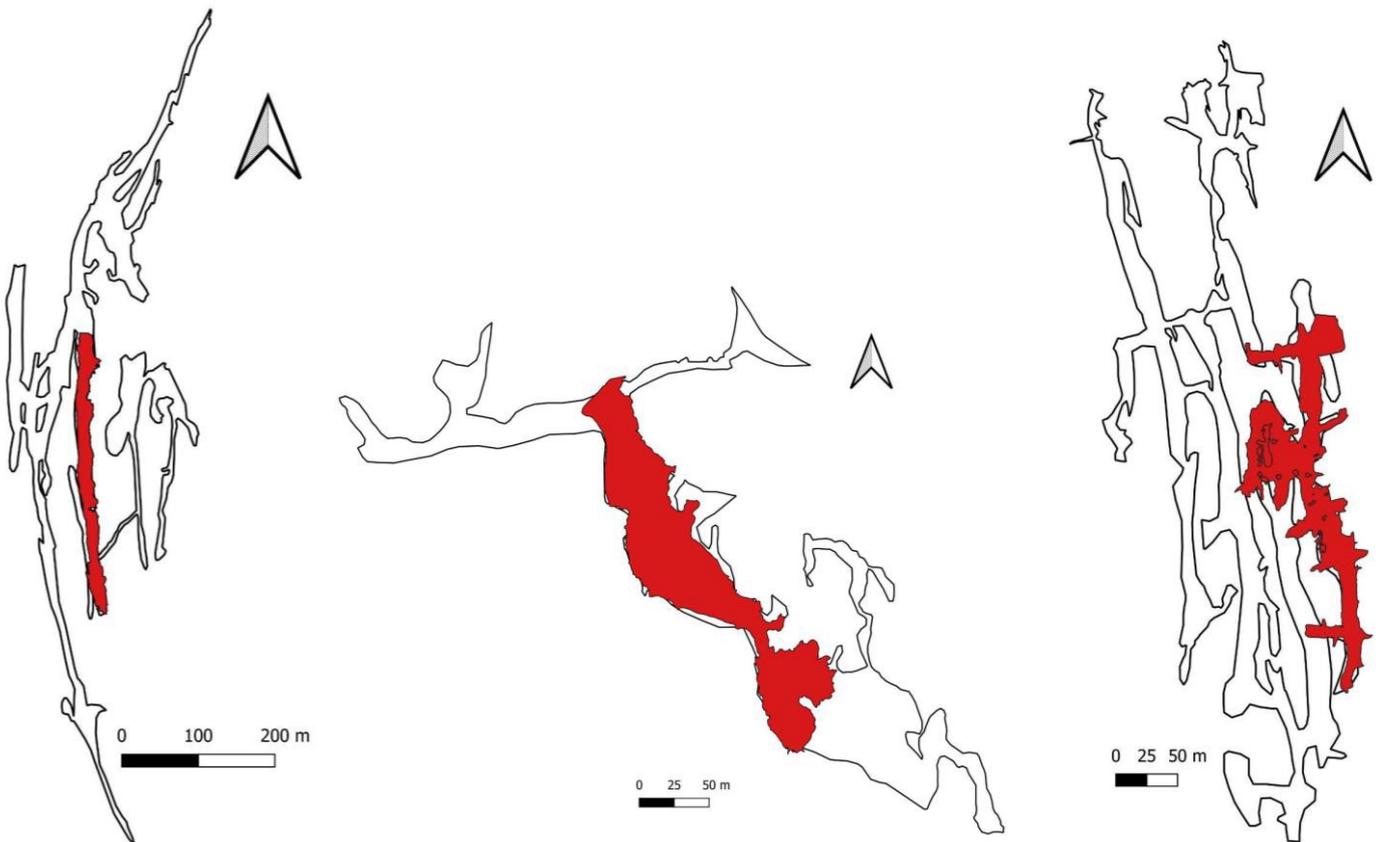


Fonte: Elaborado pelo autor

07 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE DE DADOS LIDAR EM TRÊS CAVERNAS DO CARSTE IRECÊ E UNA-UTINGA

Neste tópico apresenta-se uma proposta para a utilização de dados LIDAR aplicados a geomorfologia de cavernas utilizando-se os softwares, CloudCompare versão v2.11beta, 64 bits, Qgis versão 3.14.15, com GRASS 7.8.3. A área na qual as descrições e dados foram obtidos correspondem aos trechos onde foram feitos os levantamentos de nuvens de pontos por sensores Lidar nas áreas internas das cavernas, os trechos correspondem às áreas em vermelho representadas na figura 04, sendo respectivamente loiô com 6.007m² levantados, correspondendo a 20% do total da caverna, Diva de Maura com 10.832m² correspondendo a 40% da caverna e Paixão com 9.001m² correspondendo a 30% do total da caverna (Figura 23).

Figura 23- Sobreposição do levantamento de LIDAR aos levantamentos espeleométrico de cavernas loiô, Diva de Maura e Paixão respectivamente.

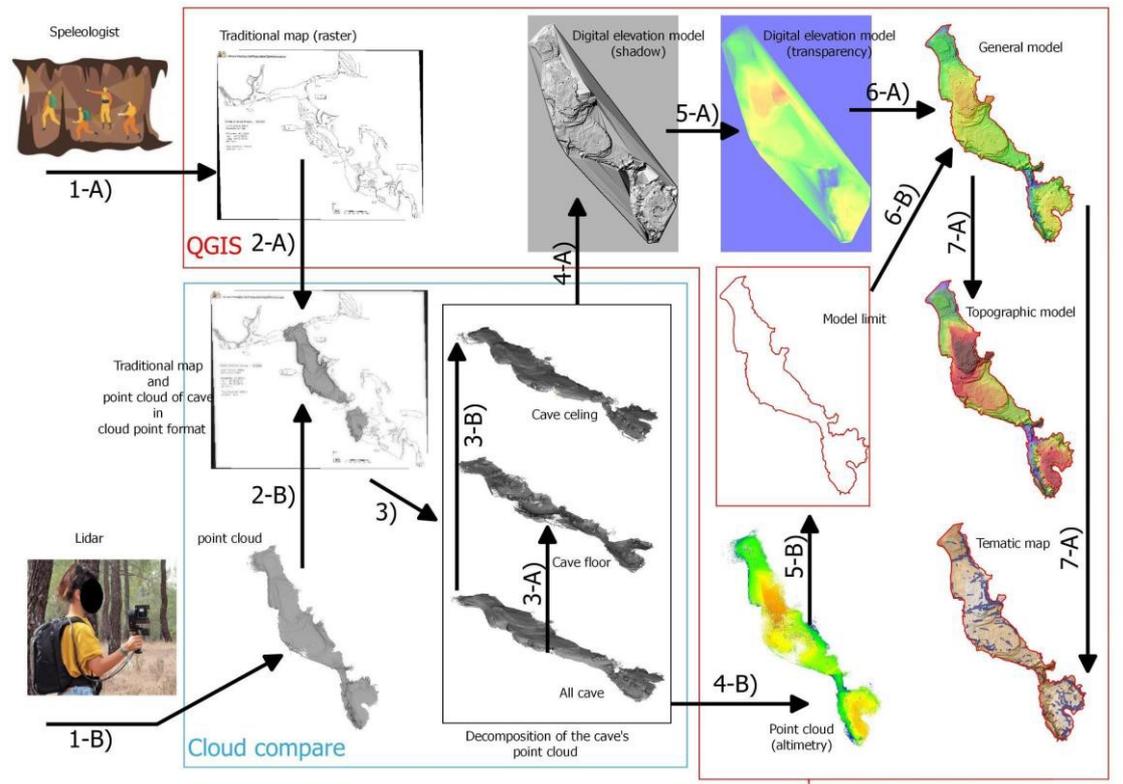


Fonte: Elaborado pelo autor

Os procedimentos que serão apresentados foram realizados a fim de, 1) georreferenciar a nuvem de pontos, tendo como base de dados a espeleometria

tradicional realizada pelo grupo Bambuí; 2) criar um modelo digital de superfície ou terreno a partir da nuvem de pontos e 3) criar mapas temáticos interpretativos da caverna a partir das extrações manuais e automáticas de feições. Portanto, segue-se a sequência apresentada na figura 24.

Figura 24- Quadro esquemático das etapas procedimentais da utilização de dados LIDAR em softwares livres .



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em 1-A e 1-B, são apresentadas, respectivamente, as etapas iniciais do levantamento dos dados através da espeleometria tradicional das cavernas realizadas pelo Grupo Bambuí de Pesquisa Espeleológica, bem como a etapa de levantamento de dados com LIDAR móvel. Em 2-A apresenta-se a inserção da imagem raster no software Qgis, a fim de georreferenciar o mapa espeleométrico no formato raster. Em 2-B é realizado o input da nuvem de pontos no CloudCompare, seguido pela inserção e georreferenciamento da nuvem de pontos a partir do raster já georreferenciado agora inserido no CloudCompare.

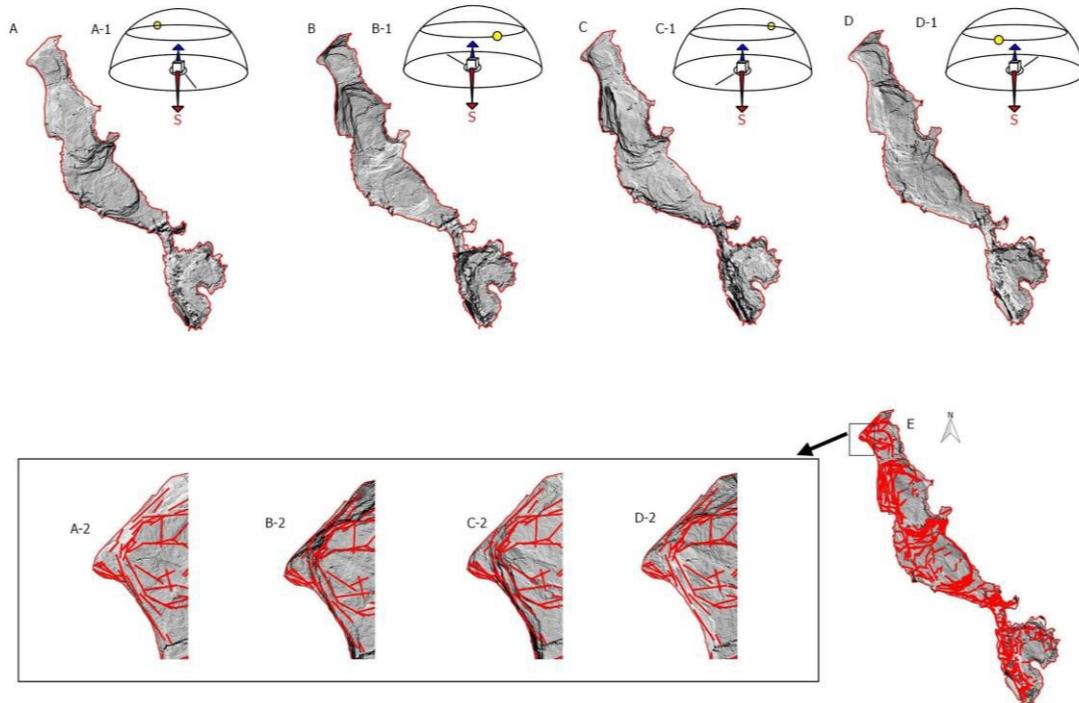
Em 3 é realizado o procedimento de separação da nuvem de pontos em dois arquivos de extensão popular contendo separadamente o teto da caverna 3-A e o piso

ou planta baixa 3-B. Em 4-A, realiza-se a conversão da nuvem de pontos em modelo a partir da interpolação dos pontos exportados para o formato raster (.geotiff.), em seguida o modelo novamente é inserido no Qgis onde é realizado o procedimento de criação de composição de cores categorizadas a partir da cota altimétrica. Esse procedimento é realizado tanto para o teto quanto para o piso das cavernas.

Em 4-B é exportado, a partir do CloudCompare, a nuvem de pontos em formato raster que auxilia a elaboração do shape contendo polígono com o limite do modelo da caverna (visualizar 5-B). A partir deste ponto é possível utilizar o software Qgis para fazer diversas interpretações tanto manuais quanto supervisionadas, utilizando as ferramentas de calculadora raster, as análises ou ferramentas avançadas como o Grass.

Também foram realizadas extrações de lineamentos a partir da adaptação dos procedimentos elencados por Amaro (1998) e reiterados por Rodrigues e Maia (2019) para a extração manual. Neste caso, foi realizada análise de sombreamento dos tetos das cavernas tendo como base quatro direções distintas: “A”, “B”, “C” e “D” que correspondem, respectivamente, aos azimutes 45° , 225° , 315° e 135° . Esses parâmetros permitem que a sombra se projeta de modo a ressaltar as estruturas associadas a essas direções azimutais, como visto em A-1, B-1, C-1 e D-1 (Figura 25). Para garantir uma posição oblíqua da projeção da sombra em relação ao ponto de iluminação (esfera amarela na figura 25), foi estabelecida uma altitude angular de 45° em relação ao ponto central da imagem. Por fim, os lineamentos são marcados utilizando-se a ferramenta de vetorização de linhas, tomando como base a interpretação visual das sombras projetadas nas quatro diferentes posições azimutes acima mencionadas. deste modo são obtidas as respostas A-2 para o azimute 45° , B-2 para o azimute 225° e B-3 e B-4 para os azimutes 315° e 135° , respectivamente.

Figura 25- Extração de manual de lineamentos

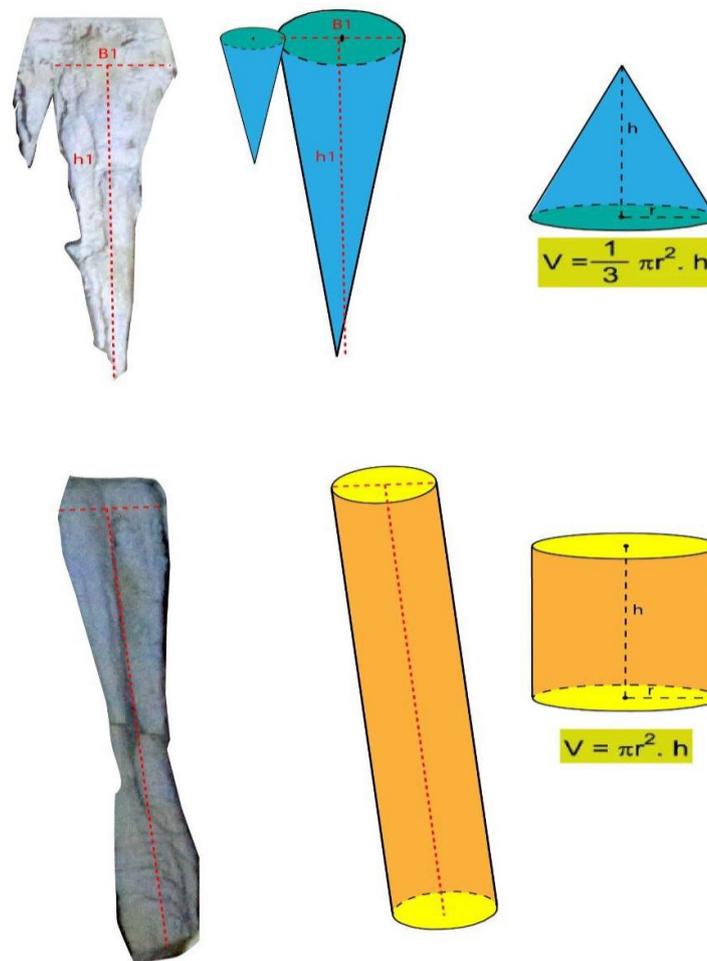


Fonte: Elaborado pelo autor

Esses procedimentos foram seguidos em todas as cavernas, utilizando-se os mesmos parâmetros de azimute e altitude angular já mencionados, obtendo-se, os resultados apresentados nos dois grupos de cavernas, as que fazem parte da Bacia de Irecê e as que estão fora da área da bacia.

Uma das questões chaves para as análises posteriores realizadas neste trabalho é a quantificação e espacialização dos espeleotemas. Inicialmente foram utilizados os MDEs das cavernas para identificar as regiões de ocorrência no teto. Já para a quantificação dos espeleotemas foram feitas medições utilizando-se as ferramentas do Cloud compare de medição entre pontos, nesse ínterim duas medidas foram feitas por amostragem aleatória de espeleotemas individuais em grupos de espeleotemas. Assim foram retiradas as medidas da base do espeleotema e do comprimento como sugere a figura 26.

Figura 26- Analogia geométrica entre os espeleotemas e os volumes dos cones e cilindros.

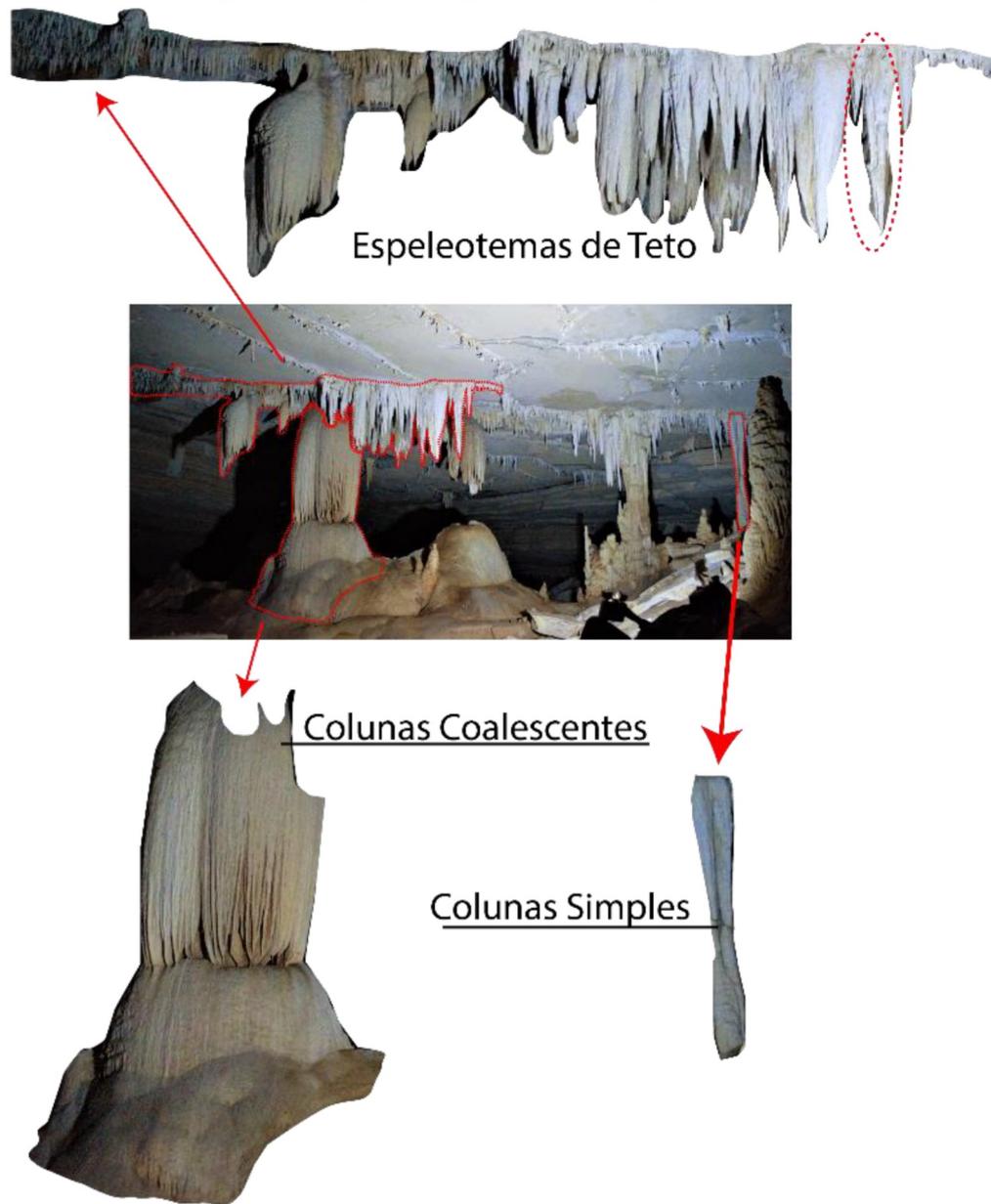


Elaborado pelo autor.

Com os dados obtidos do comprimento e do tamanho da base, foi aplicada por analogia as fórmulas do volume do cone $V = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$, sabendo que $\pi = 3,14$ e r é o comprimento da base do espeleotema dividido por dois. Para as colunas, tanto colunas coalescentes quanto colunas simples o volume é dado pela equação $v = \pi \cdot r^2 \cdot h$ considerando-se a mesma regra para π e para r da equação anterior. Com o resultado destas equações, obteve-se o valor do volume médio de cada grupo de espeleotemas, que ao ser multiplicado pelo valor da áreas de ocorrência de cada grupo obteve-se um valor aproximado do volume total dos grupos dos espeleotemas (os gráficos podem ser observados nos apêndices II).

É importante ressaltar quais os grupos de espeleotemas que serão abordados nesse trabalho e o por que da escolha desses grupos ilustrados na figura 27.

Figura 27- tipos de grupos de espeleotemas.



Fonte: elaborado pelo autor.

O primeiro grupo a ser definido são os espeleotemas de água circulantes formados a partir do teto das cavernas. Esses espeleotemas serão divididos em três grupos principais, no primeiro os **espeleotemas de teto**, nestes estão incluídos as estalactites, cortinas, helictites etc, são espeleotemas que surgem no teto das cavidades a partir de facilitadores de permeabilidade como fraturas, diáclases, justas estilo líticas e discontinuidades estratigráficas.

O segundo grupo é referente aos das **colunas simples**, estes são espeleotemas que juntam-se as estalagmites e estalactites para formar um único

espeleotemas que vai do teto até o piso da caverna, este tipo de espeleotema foi inserido na análise pois pode ser, segundo os modelos de Shamov e Kostov (2015), indicadores de processos tectônicos ou de mudanças no nível de base. O último grupo, o das **colunas coalescentes**, possuem a mesmas características morfológicas das colunas simples porém com dimensões bem maiores, sendo formados por junção ou alargamento e coalescência de espeleotemas formando uma grande massa indiferenciada de espeleotemas, estes correspondem às grades colunas, bolos de noiva, corrimentos e etc.

8 IDENTIFICAÇÃO DE FEIÇÕES COM USO DE ÍNDICES MORFOMÉTRICOS

Também foram realizadas extrações supervisionadas utilizando-se os índices de declividade e de rugosidade do terreno. Estes índices são definidos por Fumiya et al (2016), como uma abordagem computacional para a identificação de feições morfológicas do relevo. Estando esses dois índices intrinsecamente ligados, ambos compartilham os princípios matemáticos que relacionam a razão entre a área planar superficial (irregularidades de superfície) e a área planar (superfície reduzida ao plano) (PIKE; EVANS; HENGL, 2009; FUMIYA et al, 2016). Esses índices foram aplicados com o intuito de auxiliar na extração de lineamentos estruturais e na identificação de espeleotemas em cavernas.

Esses métodos geomorfométricos já são bastante utilizados em diversas áreas da geomorfologia geral, principalmente na geomorfologia fluvial onde através de MDEs e MDTs são extraídos ou realçadas as feições (SILVA; MOURA, 2013; SAMPAIO; AUGUSTIN, 2014; OLIVEIRA et al 2016; PINHEIRO et al 2016; GUIMARÃES et al 2017). Historicamente, o índice de rugosidade em ambiente digital vem sendo utilizado desde a década de 1970 (EVANS, 1972; HOBSON, 1972).

Fumiya et al (2016) expõe que a principal limitação são os custos computacionais, porque os *softwares* e os *hardwares* não são capazes de processar grande volume de informações. Hoje os *softwares* SIGs do tipo *desktop* apresentam ferramentas que são capazes de fornecer, através de servidores, algoritmos que fazem cálculos por meio de informações contidas tanto em dados rasters quanto em dados vetoriais associando-se a maior capacidade de processamento dos dados em computadores pessoais e a maior capacidade e variedade dos sistemas de aquisição de dados. Tem-se uma grande quantidade de possibilidades para a ampliação do nosso entendimento a respeito de fenômenos e de suas escalas (LONGLEY et al 2013, JENSEN, 2009).

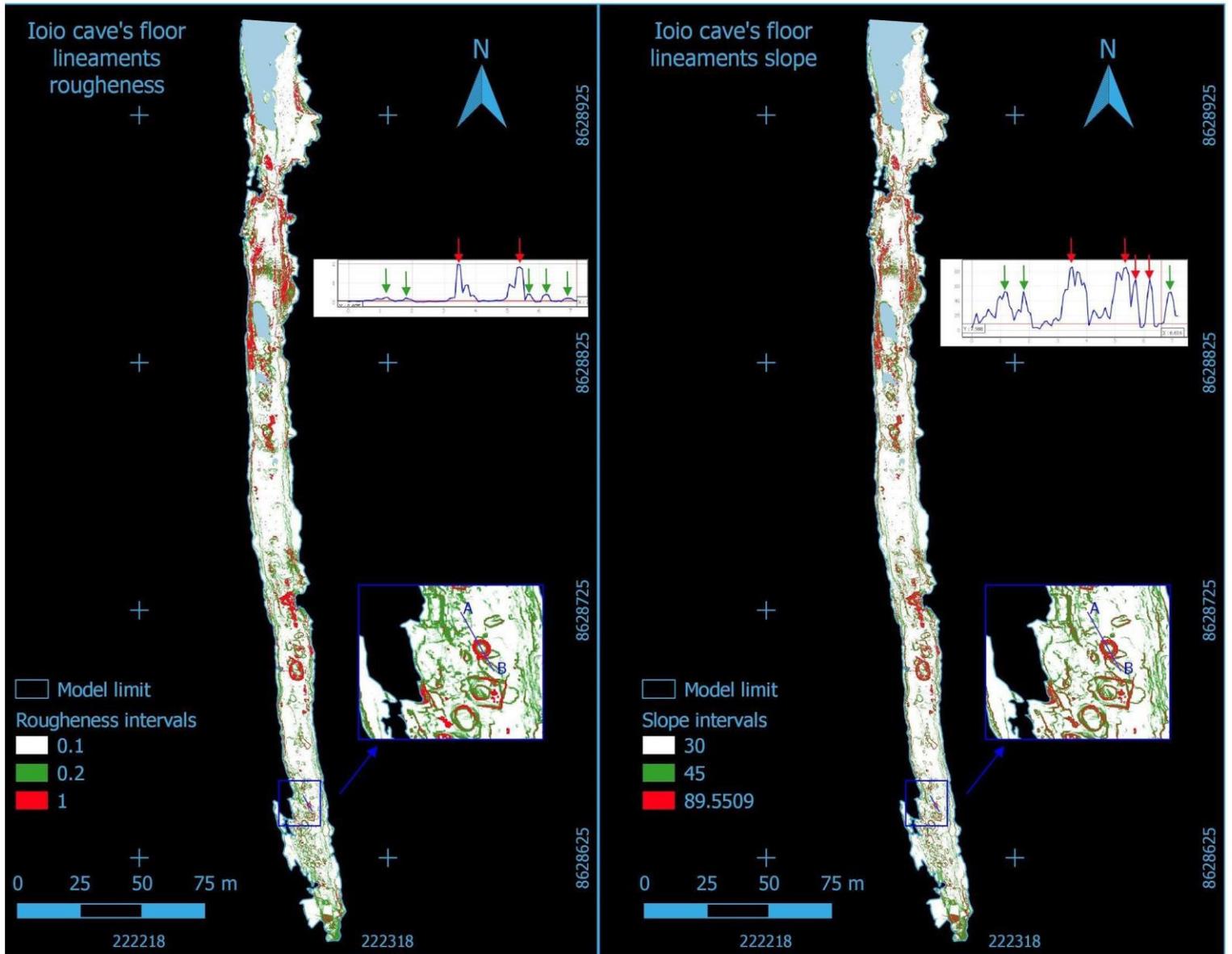
Dito isso, é apresentado neste tópico uma proposta que visa fomentar a utilização destas tecnologias em ambientes espeleológicos, tendo em vista a obtenção de dados que auxiliem na acuidade visual das feições de lineamentos estruturais, nos espeleotemas e nos depósitos de material detrítico oriundos de colapsos de teto no interior das cavernas.

O *software* utilizado para a análise foi o SIG *desktop* Qgis 3.14.15 com o servidor Gress 7.8.3, consistindo em um programa aberto de colaboração livre mediado por um grupo interdisciplinar de técnicos/ pesquisadores/ desenvolvedores. As análises foram realizadas a partir de duas ferramentas de análise de dados matriciais do Qgis: análise de rugosidade e a análise de declividade, onde foram utilizados os parâmetros automáticos apresentados pela ferramenta. Neste momento, foram realizados os processamentos com as ferramentas mencionadas e obtidos dados rasteiros contendo as informações de rugosidade e declividade.

Utilizando-se os dados mapeados através das extrações manuais das feições foi possível sobrepor as imagens de declividade e rugosidade aos mapas de lineamentos do teto, espeleotemas do teto e morfologia do piso da caverna, aplicando o Plugin "*profile tool*" e em seguida o "*terrain profili*" que constrói perfis topográficos a partir de imagens raster, possibilitando a identificação nos perfis, dos intervalos que correspondem às feições e identificados pelas cores, conforme a listagem abaixo:

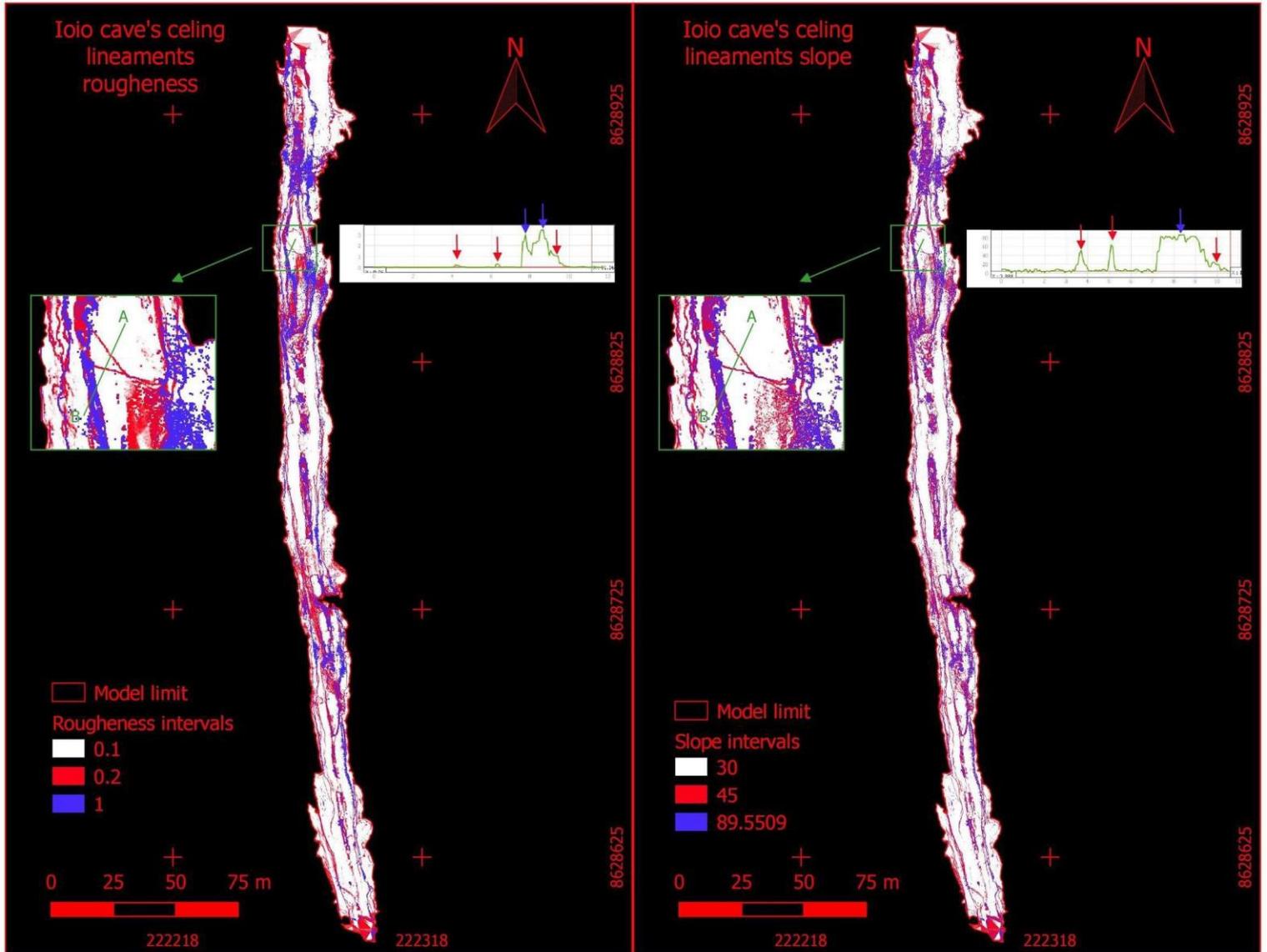
- 1 - Espeleotemas no teto - rugosidade: > 6.549 - cor azul;
- 2 - Espeleotemas no teto - declividade: > 89.5509 - cor azul;
- 3- Lineamentos no teto - rugosidade: $> 6 < 6.548$ - cor vermelha;
- 4- Lineamentos no teto - declividade: $> 45 < 89.5508$ - cor vermelha;
- 5- Espeleotema no piso - rugosidade: > 13 - cor vermelha;
- 6- Espeleotemas no piso - declividade: > 89.7721 - cor vermelha;
- 7-Material detrítico no piso - rugosidade: $> 2 < 12.9$ - cor verde;
- 8-Material detrítico no piso - declividade: $> 87.9 < 89.7720$ - cor verde.

Figura 28- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e sedimentos detríticos no piso da caverna Ioiô.



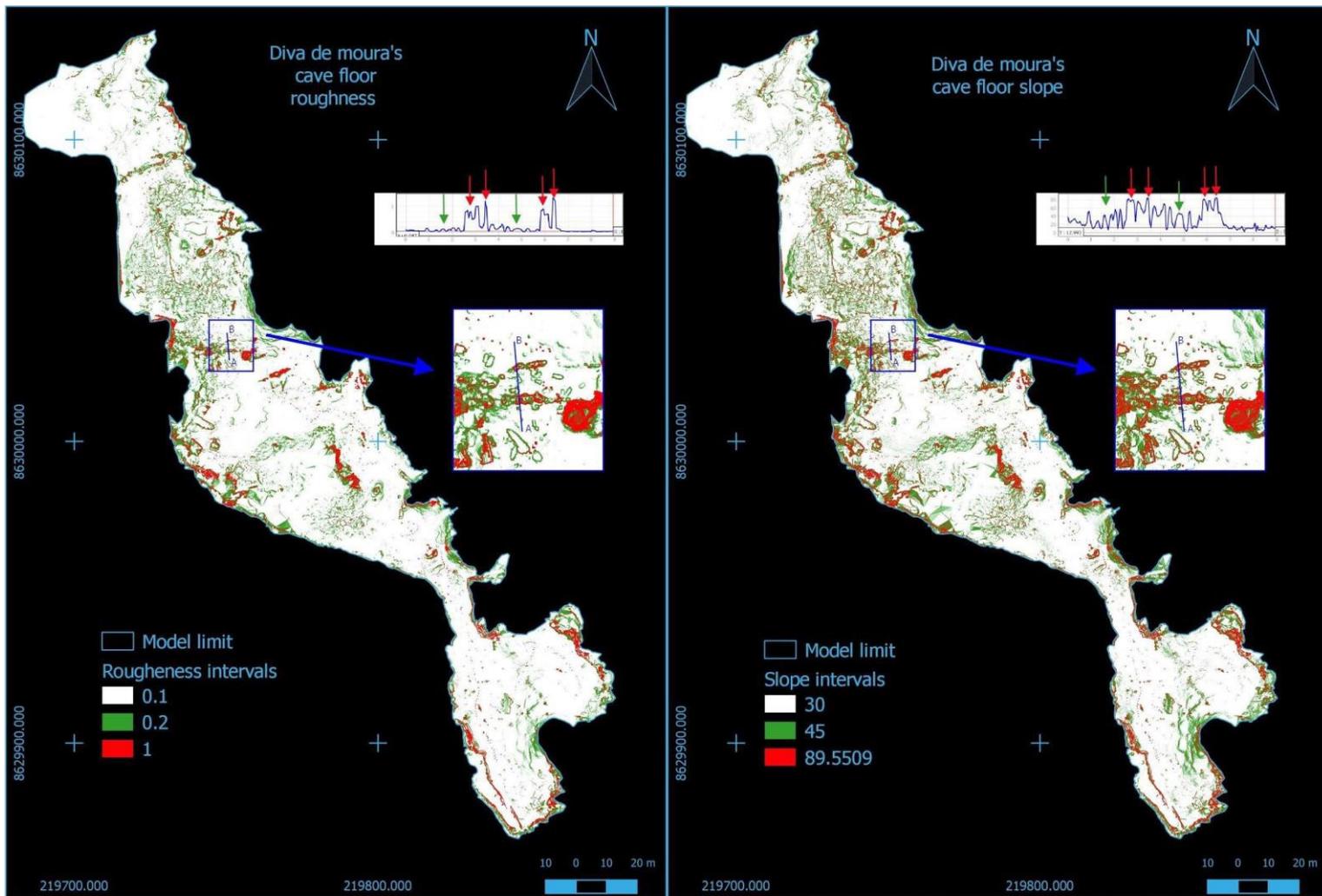
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e lineamentos no teto da caverna Ioiô.



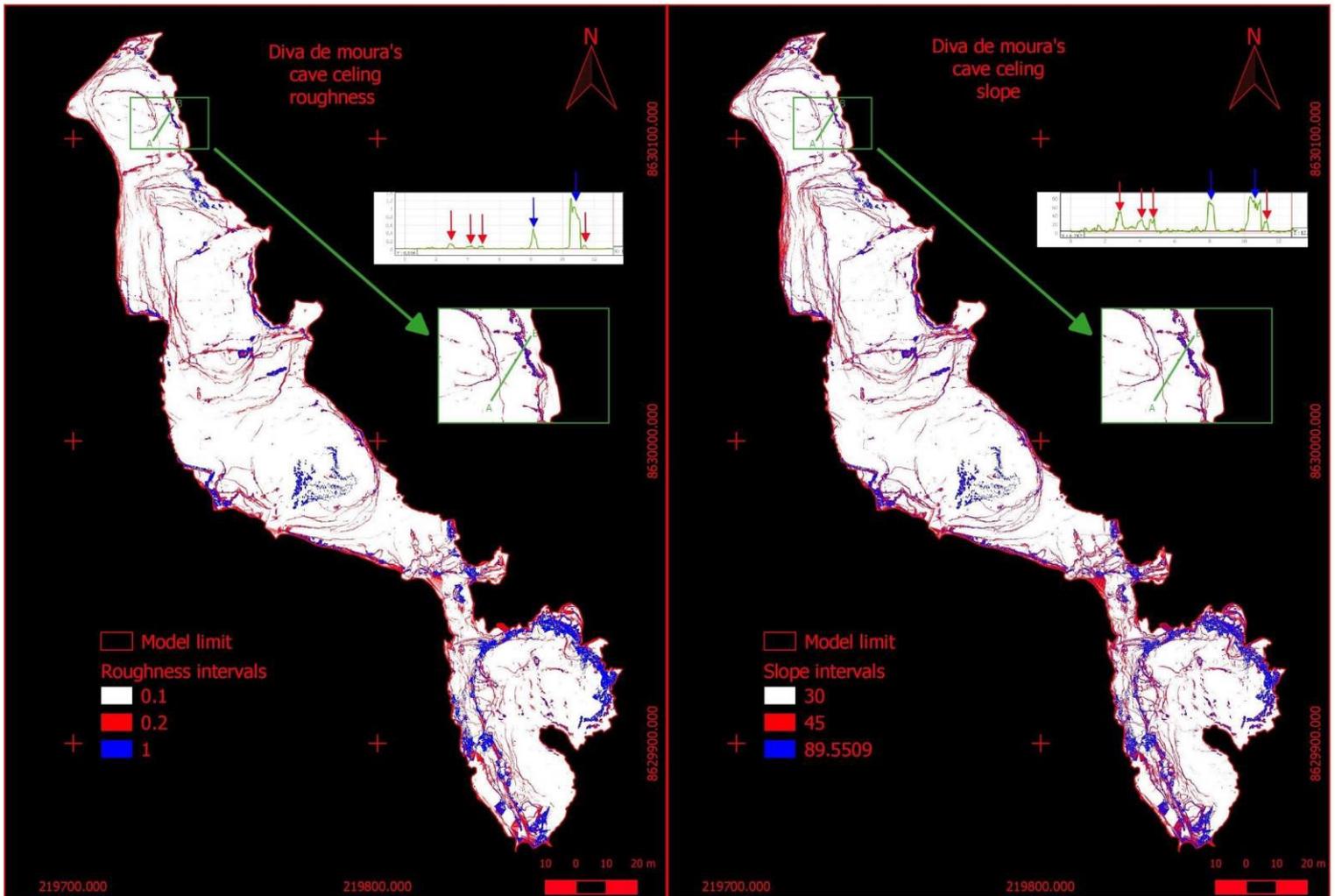
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 30- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e sedimentos detríticos no piso da caverna Diva de Maura.



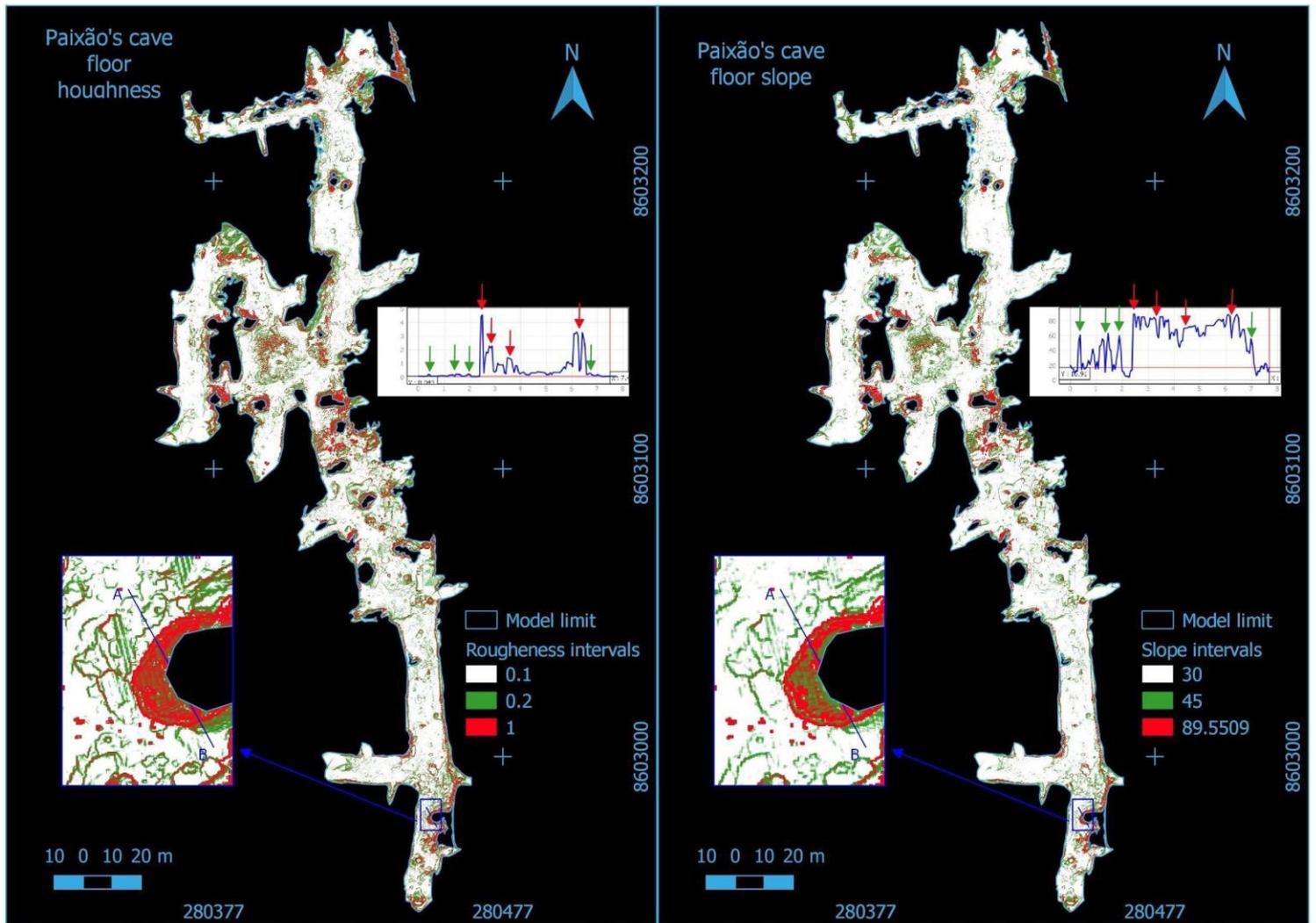
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e lineamentos no teto da caverna loiô.



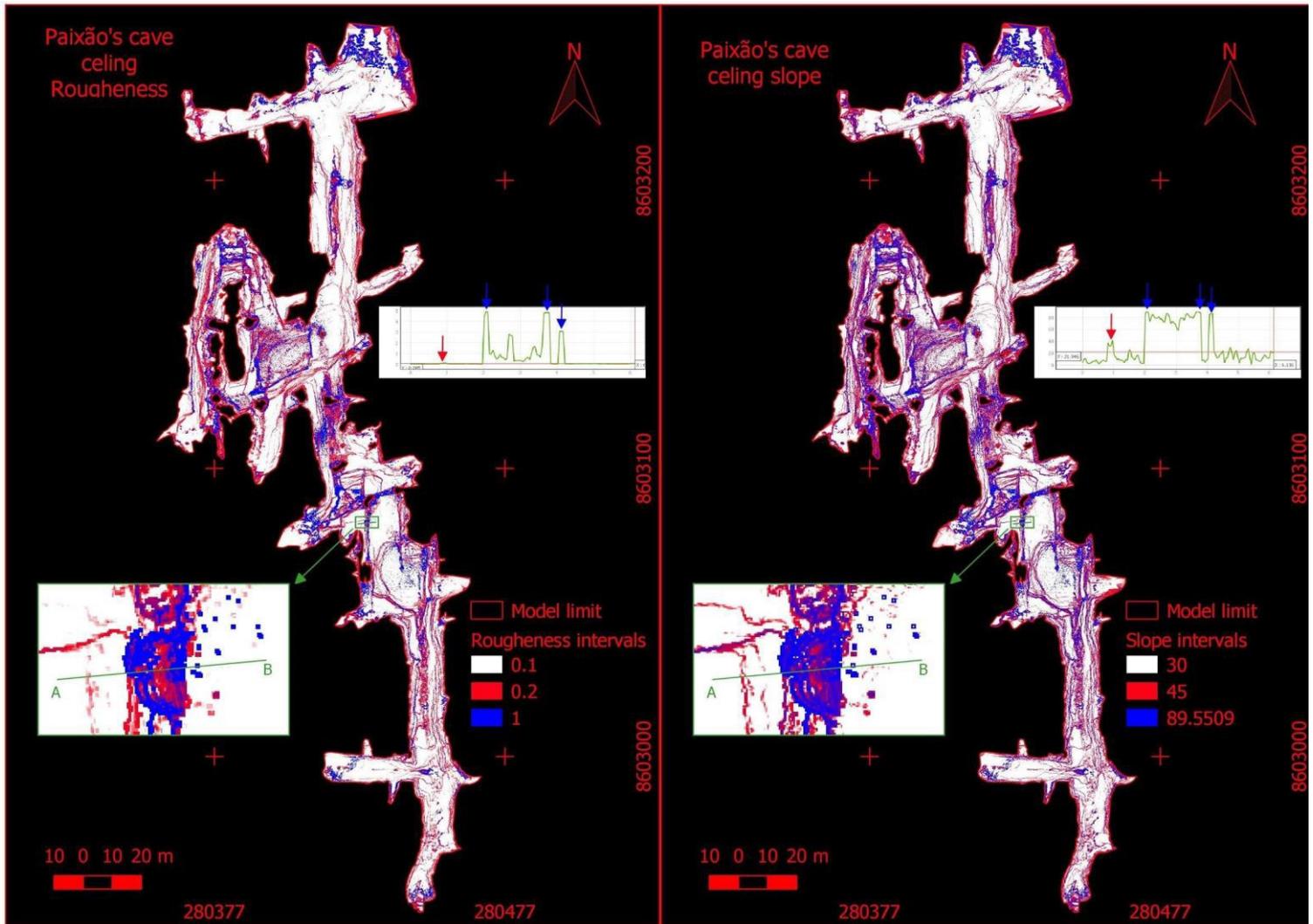
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 32- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e sedimentos detríticos no piso da caverna Paixão.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 33- Aplicação dos índices de declividade e rugosidade para identificação de espeleotemas e lineamentos no teto da caverna Paixão.



Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de os produtos obtidos com a aplicação dos dados possuírem um grande potencial para auxiliar na análise e identificação das feições de cavernas, é importante lembrar que esses dados sofrem influência do modo sob o qual foram coletados. Portanto para haver uma grande acurácia e uma melhor resolução dos dados, faz-se necessário eliminar ou reduzir ao máximo ruídos na imagem obtida, como por exemplo, áreas de oclusão de pontos e artefatos, deste modo a precisão dos levantamentos vai ser determinante para a precisão dos produtos finais.

9 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS/GEOMORFOLÓGICAS DAS CAVERNAS IOIÔ, DIVA DE MAURA E PAIXÃO

As cavernas estão situadas na região das bacias sedimentares de Irecê Una-utinga, como é mostrada na figura 01 no início deste trabalho. Estudando as cavernas PAX e DDM inseridas em um contexto geomorfológico dominado por feições negativas como dolinas, valas e poujes, e em um contexto sistêmico associadas às zonas de entrada dos fluxos de drenagem. Já a PAX está em um contexto geológico semelhante as duas cavernas já citadas, porém apresenta contexto geomorfológico e sistêmico bem diferente, apresentando relevo positivo, no caso associada a um morro testemunho e área de ocorrência de carstes reliquias, com a predominância de formas residuais. Serão, neste tópico, abordadas cada caverna e suas características morfológicas e geológicas.

9.1- Geologia das cavernas

Em **Ioio** as seções colunares dentro da caverna de ioio são compostas basicamente por calcários muito finos/cristalinos, com intercalações de siltitos. Esses intervalos são mais espessos para cima e coincidem com as galerias do teto. Os estilólitos na base das seções são isolados, mas no topo as redes de estilólitos são mais frequentes. A brecha sedimentar/lamelar é a única característica que sugere depósitos de águas rasas. Esta fácies também coincide com o teto e ocorre ao longo de todos os condutos de tendência N-S, com centímetros de espessura (PONTES et al 2021).

A análise de seções delgadas mostra dolomitos com dolomitos bem preservados ao longo das características dos estilólitos. Dolomitos são minerais de carbonato, mais difíceis de serem dissolvidos. Além da estilolitização, a estratificação laminar está relacionada ao processo de compactação química e não representa uma estratificação deposicional, mas sim uma estratificação diagenética (PONTES et al 2021).

Na **Diva de Maura** a seção colunar descrita no Sítio C dentro da caverna Diva de Maura é composta por fácies carbonatadas na base, representadas por calcários muito finos. Estes calcários apresentam intervalos de “pétalas de gesso” e sílex boudinado também ocorre nesta fácies. As camadas de tepee ocorrem para cima com intervalos de laminação paralelos ao plano. As camadas carbonáticas no topo da

seção são aparentemente fácies lamitos, com teor de lama maior que as fácies carbonáticas da base. Importante silicificação é observada em lâminas finas e é afetada por processos de estilolitização. A rede de estilólitos provavelmente preserva minerais menos dissolvidos, diferentemente dos minerais carbonáticos.

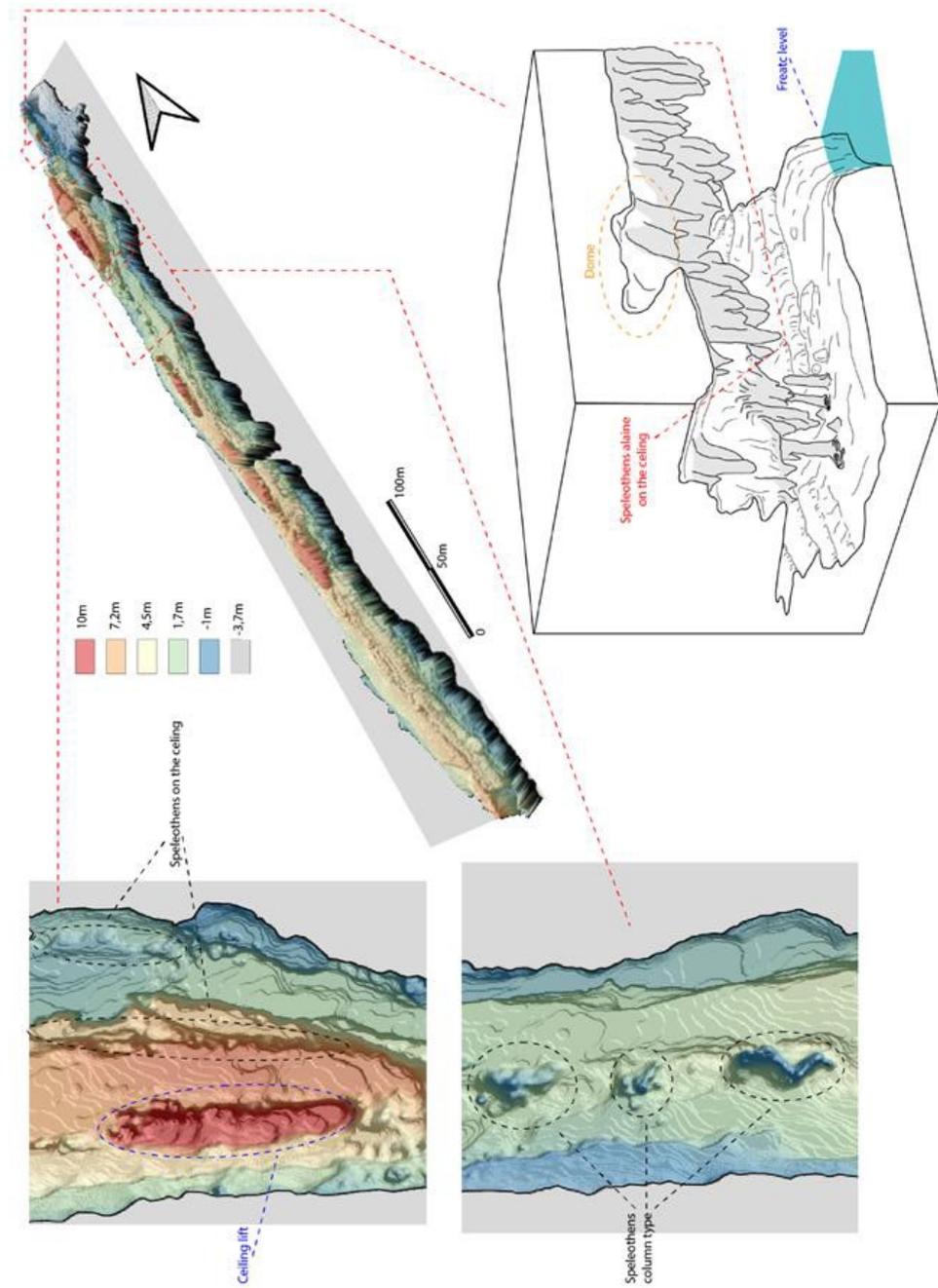
Na **Paixão** os ciclos de lamitos calcários e calcarenitos com intercalações siliciclásticas são as principais fácies da caverna. O conteúdo siliciclástico pode ser proveniente de sedimentos terrígenos lançados em bacia carbonatada ou de fluido secundário. A primeira é vista em intercalações de camadas finas que se encontram mais altas para cima e coincidem com as galerias dos tetos. O segundo é representado por nódulos de chert. Os minerais siliciclásticos (quartzo, feldspato, clorita, biotita, etc.) são mais freqüentes nas porções superiores da seção colunar e bem preservados ao longo dos estilólitos e os minerais carbonatos (principalmente calcita) são totalmente dissolvidos (PONTES et al 2021).

9.2- Características morfométricas das cavernas

O trecho da caverna **loiô** (Figura 34) tem sua geometria, associada a passagem simples do tipo linear, formando um extenso corredor cujo comprimento possui cerca de 330 metros. Ainda apresenta 25m de diferença entre a parte mais baixa do piso e a parte mais alta do teto, bem como um corredor com largura máxima de 25m e mínima de 5m. Nessa caverna, encontram-se afloramentos do lençol freático, formando lagos internos.

Os fluxos de água nesta caverna (ver mapas no anexo III), de modo geral, tendem a seguir de sul para norte, porém materiais detríticos foram divisores de águas ao longo dessa passagem onde o fluxo é direcionado e reorganizado para áreas mais baixas, geralmente direcionando-se para os lagos internos. Os espeleotemas no piso da caverna ocupam, em sua maioria, a porção central, geralmente na forma de estalagmites e colunas, mas com ocorrências, em menor proporção, de barragens e escurrimentos.

Figura 34- Aspectos morfológicos gerais da caverna loiô.



Fonte: Elaborado pelo autor.

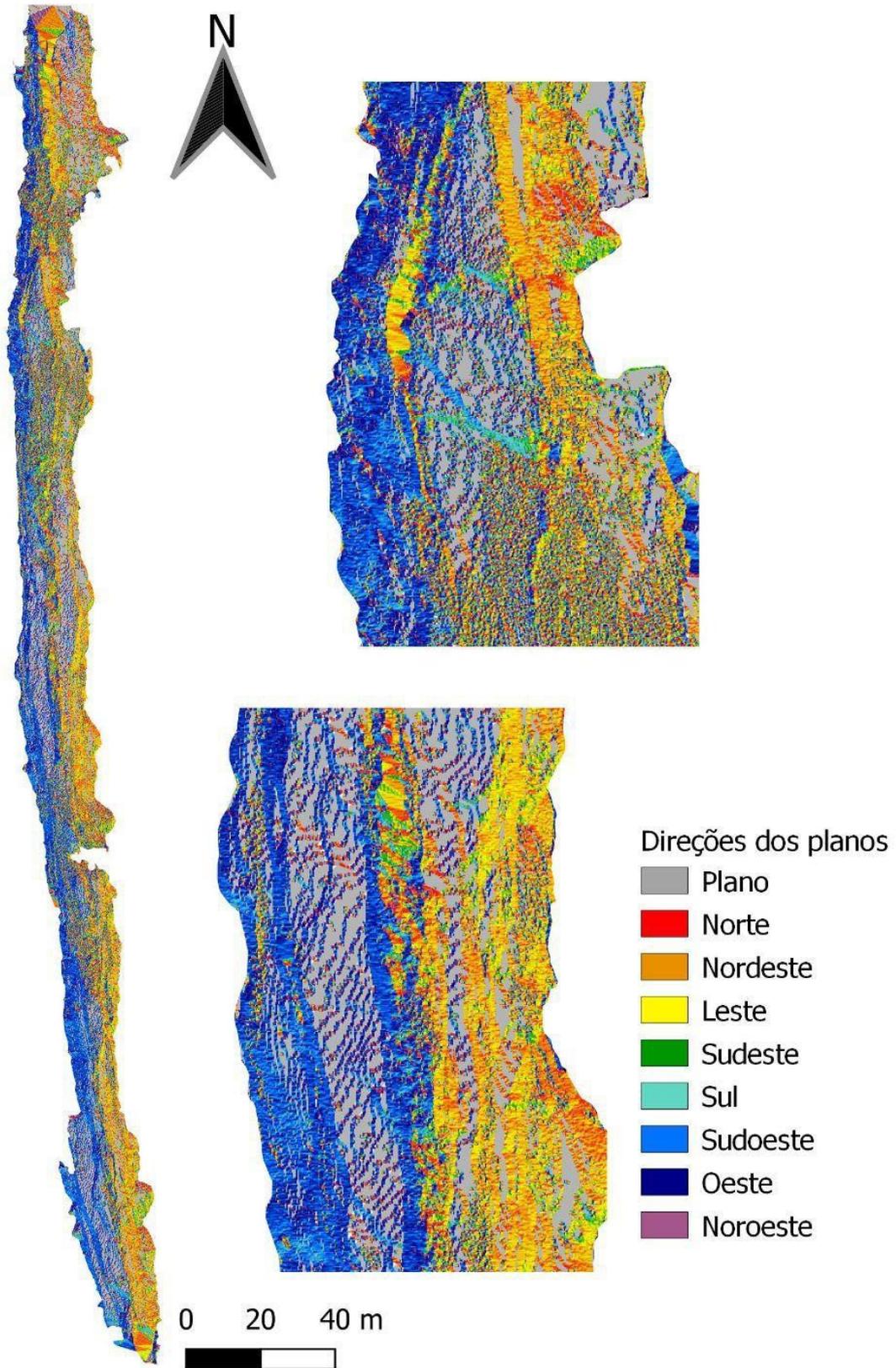
Outra característica encontrada nos tetos das cavidades é a presença de espeleotemas alinhados, essas feições são possibilitadas pela passagem livre de fluxos através de facilitadores de permeabilidade como as fraturas diáclases e falhas encontradas no pacote rochoso que forma a caverna. Na caverna loiô, este processo de alinhamento é mais evidente, quando comparada às demais cavernas apresentadas, estando presente em todo o conduto principal da cavidade.

A caverna loiô, apresenta-se como uma passagem simples do tipo retilínea, sugerindo um forte controle estrutural. Nela também é possível verificar áreas de maior elevação de teto que não estão associadas a colapsos, mas a fases freáticas pretéritas. A geometria do conduto principal sugere uma feição do tipo tubo elíptico alargado.

Também é possível verificar características associadas à morfologia dos pisos, neste caso verifica-se que na caverna loiô a existência de estalagmites associadas aos espeleotemas de tetos no mesmo eixo e direção. Ainda na caverna loiô existem áreas onde o lençol freático aflora formando lagos internos.

O teto da caverna apresenta uma configuração que sugere a presença de uma dobra, esta afirmação é corroborada por (PONTES et al 2021). Ao aplicarem-se a ferramenta de aspecto no NDE teto da caverna IOI, verifica-se a existência de uma simetria referente às laterais da caverna. Esta simetria refere-se a existência de um flanco voltado para leste, em tons amarelos, e outro voltado para oeste em tons de azul escuro (Figura 35). Também é possível notar, em cinza a posição plana em zênite do teto.

Figura 35 - aspecto do teto da caverna loiô



Fonte: elaborado pelo autor.

O trecho da caverna **Diva de Maura** (Figura 36) tem sua geometria associada à passagem simples do tipo sinuosa, formando um conjunto com duas galerias principais ligadas por uma passagem estreita. O comprimento máximo do trecho mapeado é cerca de 140 metros, com altura máxima da parte mais baixa do piso até a parte mais alta do teto de 30m. O corredor dessa caverna apresenta largura máxima em torno dos 40m e mínima em torno dos 10m.

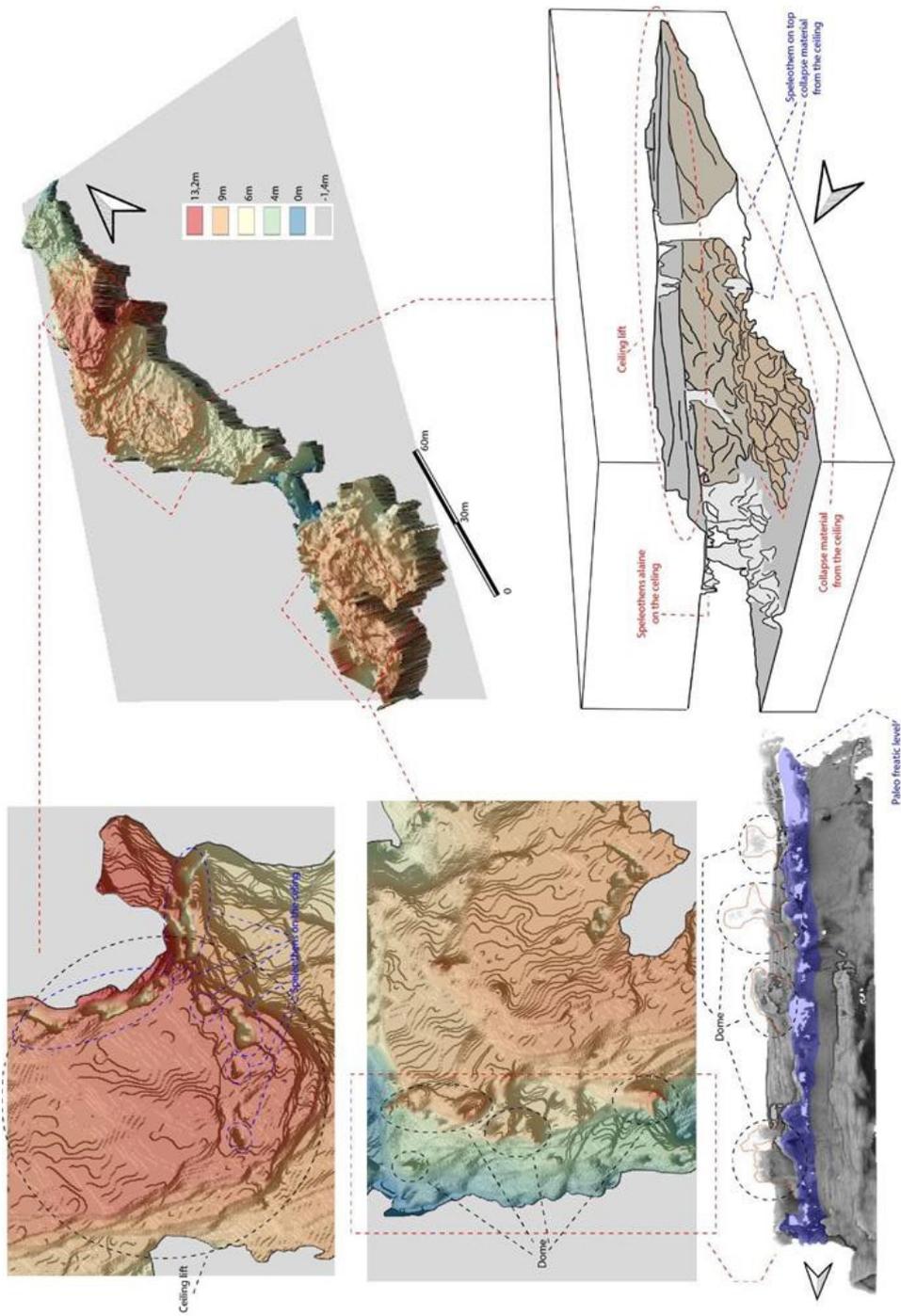
Os fluxos de água nesta caverna, de modo geral, tendem a seguir de norte para sul, porém materiais detríticos formam divisores de águas ao longo de seu desenvolvimento, onde o fluxo é direcionado e reorganizado para áreas mais baixas, neste caso, parte considerável dos fluxos internos são direcionados para a porção central da caverna que funciona como um sumidouro. Os espeleotemas no piso da caverna ocupam, em sua maioria, a porção leste com alguns alinhamentos de espeleotemas perpendiculares à parede leste. A maioria dos espeleotemas são, estalagmites, colunas e escorrimentos, mas há ocorrência, em menor proporção, de barragens.

No teto desta caverna são encontradas marcas de turbilhonamento que evidenciam a passagem de níveis freáticos antigos, semelhantes aos que apresenta Travassos 2019 (apud Slabbe e Prelovsek 2013) e reiterado por Audra e Plaumer 2013 e 2015. Neste caso, a Caverna Diva de Maura apresenta esse tipo de feição com mais evidente quando comparada às demais cavernas.

A caverna Diva de Maura apresenta-se, no trecho levantado como uma cavidade com padrão meandante em uma geometria de conduto retangular com áreas de domos formados por colapsos de teto.

Na caverna Diva de Maura, o piso é caracterizado pela presença de um grande volume de material colapsado decorrente do teto da caverna. Também é possível verificar que esses depósitos estão sendo retrabalhados por um fluxo de água interno mais atual, formando um microssistema de drenagem. As estalagmites e colunas, por vezes, estão sobrepostas a blocos colapsados. Na diva de Maura, nos setores levantados pelo Lidar, não foi verificado afloramento de nível freático.

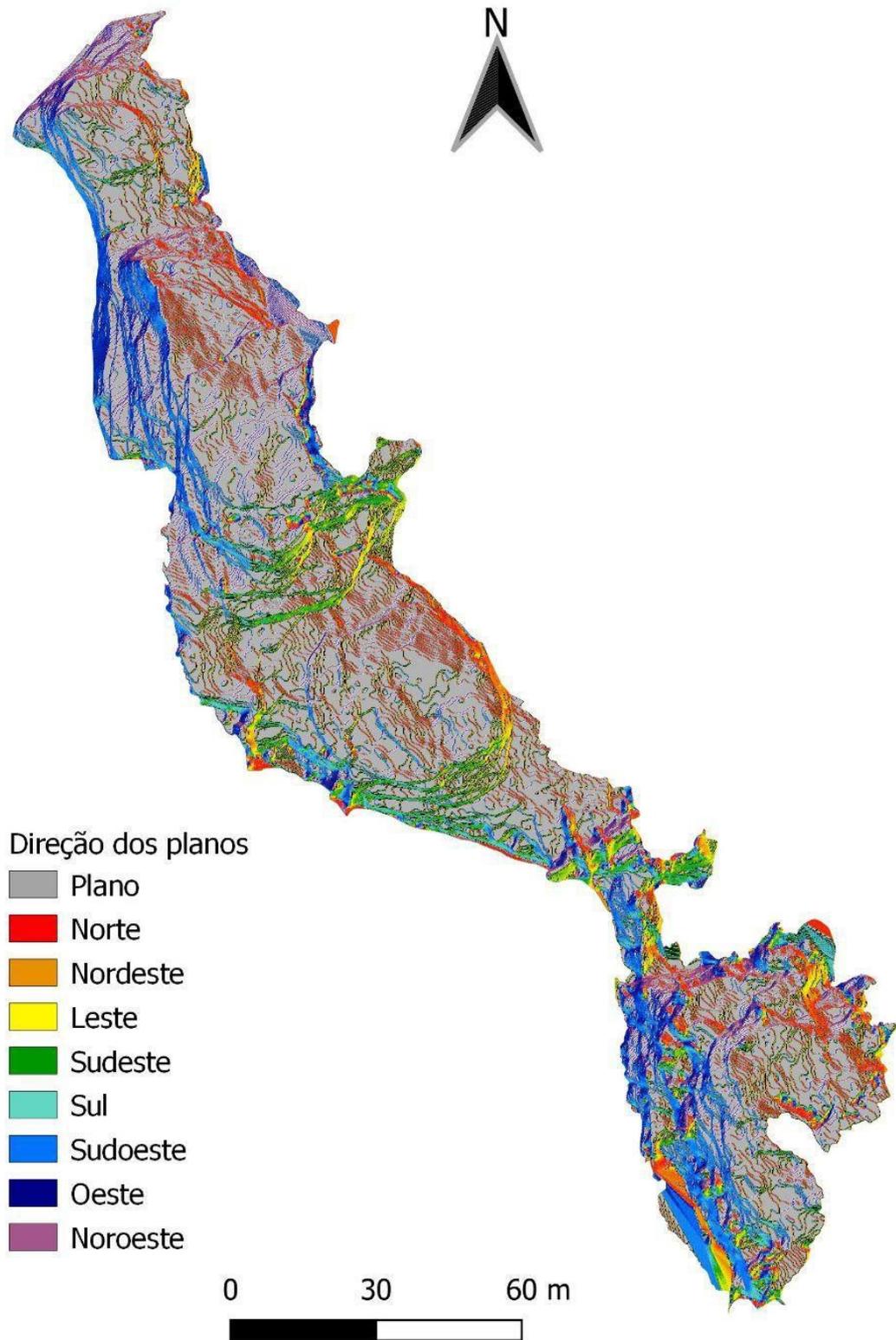
Figura 36: Aspectos morfológicos gerais da caverna Diva de Maura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O teto da caverna apresenta uma configuração que sugere uma forte presença de processos de colapsos gravitacionais do teto. Ao aplicarem-se a ferramenta de aspecto no teto da caverna DDM, verifica-se a existência de uma assimetria. Esta assimetria refere-se a existência de diversas direções de caimento do teto, intercaladas por áreas de teto plano, o que é compatível com morfologias de "escadas invertidas" entendidas como morfologia formada pelo limite de áreas de tetos abatidos, com sua geometria correspondente aos limites da estratigrafia (Figura 37) outra posição que se destaca na configuração do teto desta caverna é a plana em zenite (caracterizado pela cor cinza), neste caso a área mais predominante.

Figura 37 - Aspecto do teto da caverna Diva de Maura.

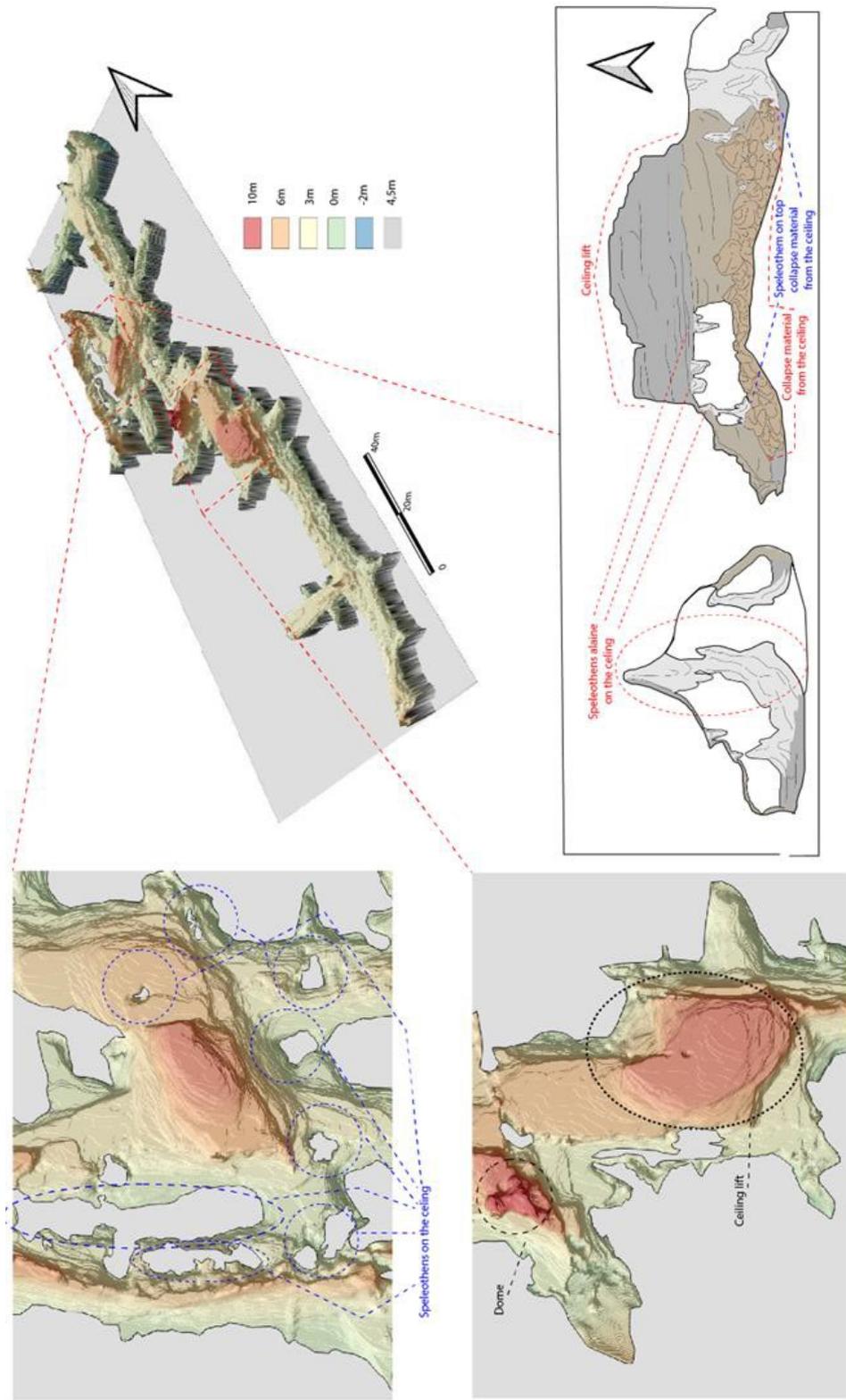


Fonte: elaborado pelo autor.

O trecho da caverna **Paixão** (Figura 38) possui geometria que mistura formas como passagens labirínticas em rede com salões formados por áreas de tetos colapsados em encontro de condutos. A análise de sua geometria também sugere um padrão do tipo *spongework*, com desenvolvimento linear de 500 metros e altura máxima, da parte mais baixa do piso até a parte mais alta do teto possui 28m. Essa caverna possui largura máxima de 60m e mínima em torno de 1m. Apresenta também um padrão de condutos do tipo rede, com geometria variável, nos condutos menores, a caverna apresenta uma geometria de tubo elíptico, nas áreas de interseção entre os condutos tem-se a formação de salões com geometria do tipo retangular modificada por colapso de teto.

A caverna Paixão apresenta a maior variedade de feições do conjunto de cavernas analisados, embora não apresente nível freático aflorante, pois está alçada em relação ao sistema de drenagem atual que a circunda, esta caverna possui em seu piso depósitos de sedimentos de caverna, depósitos de colapso, sobreposição de espeleotemas em blocos colapsados, coalescência de colunas e estalagmites, diferenças abruptas nos níveis de base da caverna, formação de uma micro rede de drenagem retrabalhando os depósitos e sedimentos de caverna.

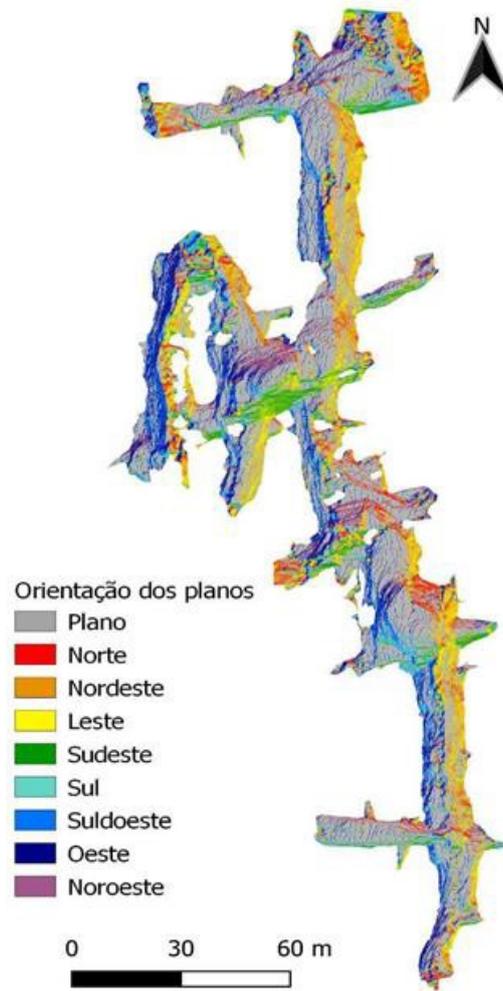
Figura 38- Aspectos morfológicos gerais da caverna Paixão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao analisar o teto da caverna PAX sob a perspectiva do mapa de aspecto (figura 39) é possível verificar uma simetria semelhante à encontrada na caverna IOI, com os tons azul escuro e amarelos, representando flancos de dobras associadas às direções oeste e leste. Mas também apresenta padrões semelhantes aos encontrados na caverna DDM, com áreas formando bordas em várias direções a partir de uma extensa área de teto plano, assim como também sugere áreas de possíveis flancos em simetria nas cores verde e roxo, respectivamente representando áreas do teto voltadas para sudeste e noroeste.

Figura 39 - Aspecto do teto da caverna Paixão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

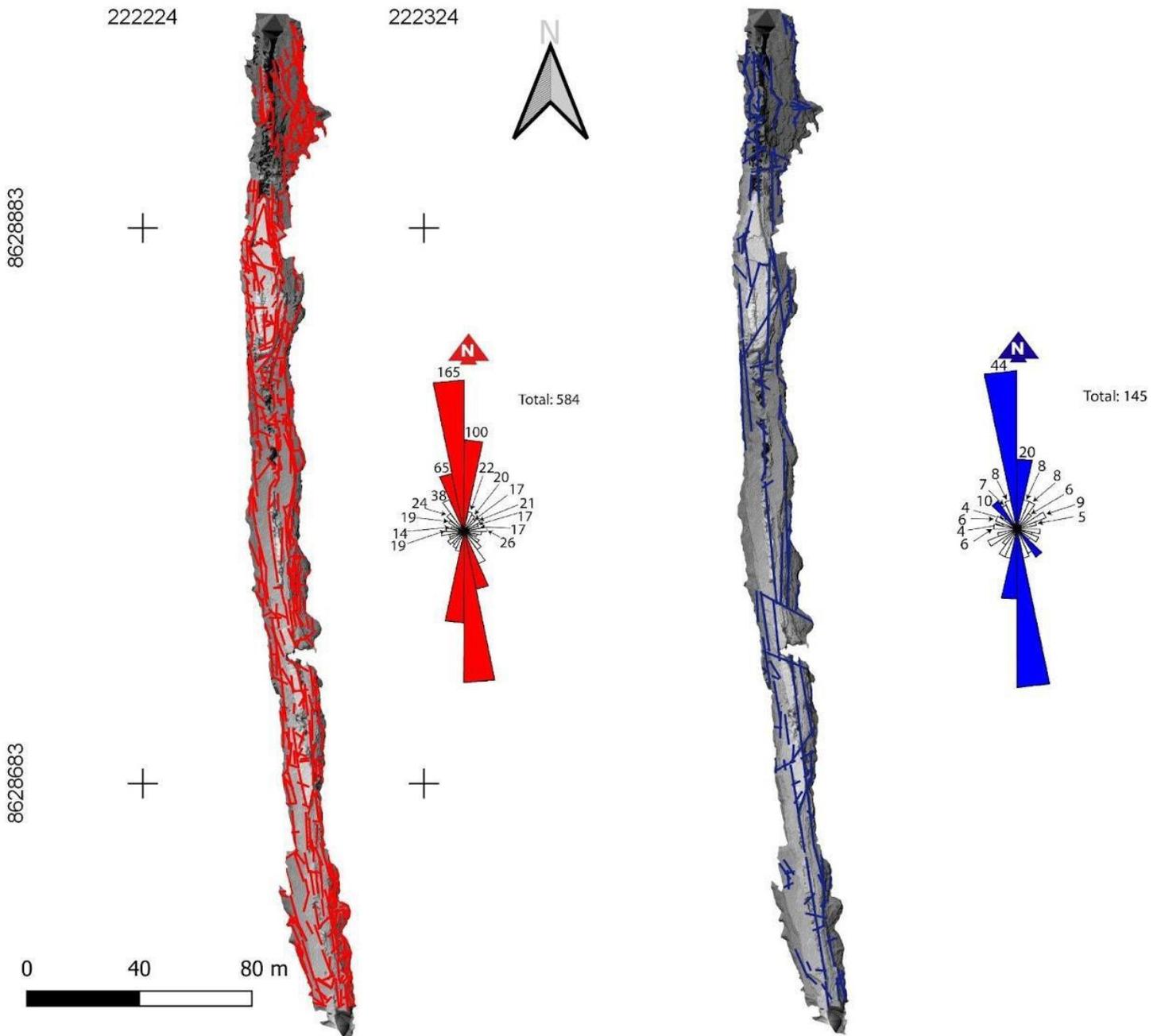
10 CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS DOS TETOS E DOS ESPELEOTEMAS DE TETO

Uma vez analisadas as características geomorfológicas das cavernas, com ênfase em sua geometria do teto, faz-se necessário uma análise das estruturas do teto, e compará-las com os alinhamentos dos conjuntos de espeleotemas do teto.

Portanto segue as análises dos tetos das cavernas sob uma perspectiva estrutural:

A caverna **loiô**, no trecho levantado pelo LIDAR apresenta uma orientação que corresponde a forte tendência N-S, assim como os espeleotemas. Essa tendência reflete um rígido controle estrutural que orienta a espeleogênese para a mesma direção das estruturas, assim como a própria formação do conduto representado na figura 40.

Figura 40- Mapa de lineamentos (linhas vermelhas) e mapa de alinhamento de espeleotemas (linhas azuis) da caverna Ioiô.

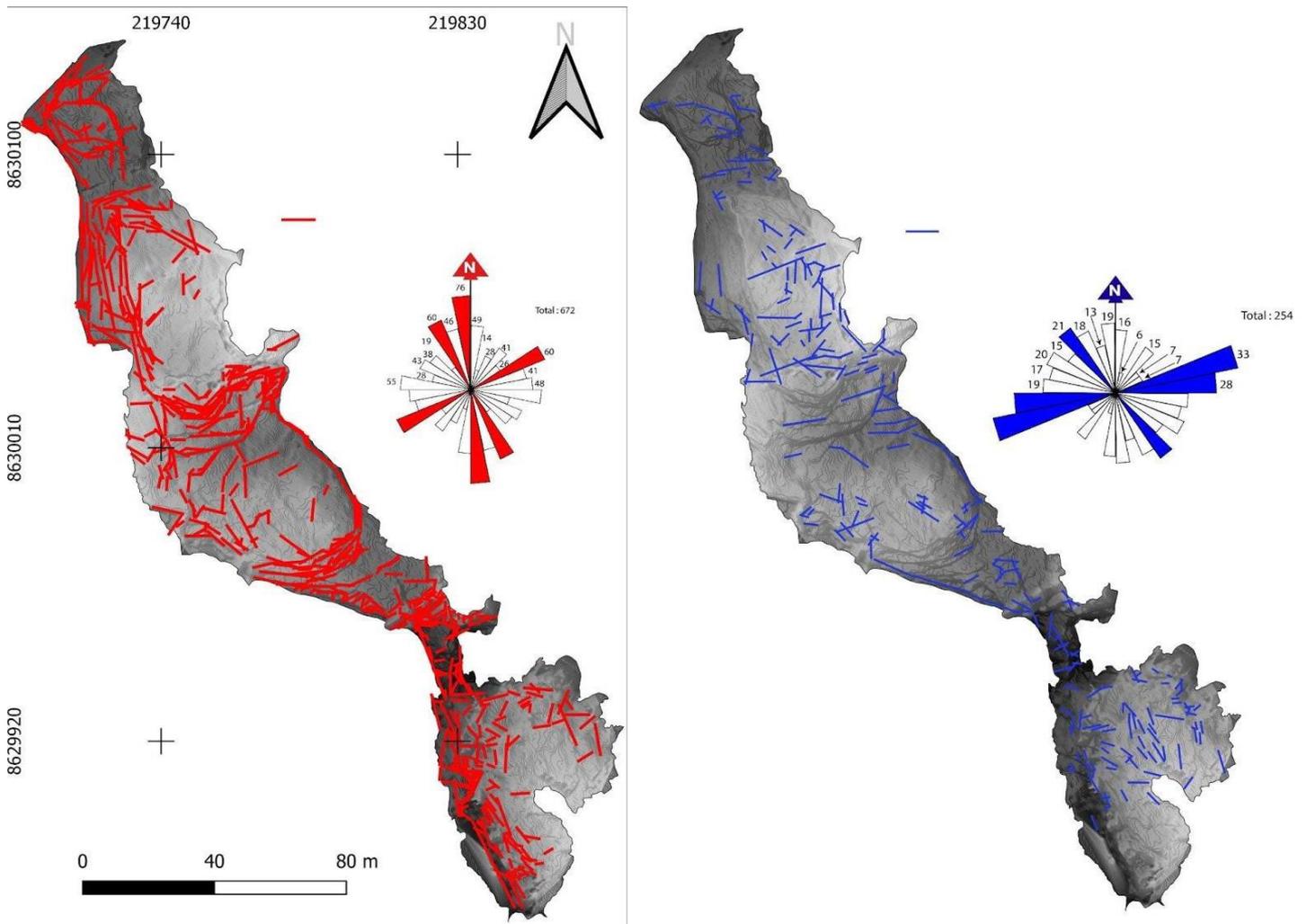


Fonte: elaborado pelo autor.

A caverna **Diva de Maura** (Figura 41) apresenta orientação dos lineamentos com certo espalhamento das estruturas em todas as direções, porém é identificada uma tendência maior ao trend NW-SE que corresponde a orientação da área representada. Já os espeleotemas, embora apresentem trend NW-SE, no caso o segundo mais relevante, tem sua direção principal associada ao trend orientado para

W-E. Neste caso, a orientação dos espeleotemas apresenta essa tendência mais forte discordando da tendência das estruturas, devido às características estratigráficas que conferem ao teto da caverna um mergulho/ou inclinação para W-E, fazendo com que o fluxo de gotejamento no teto apresente tendência a se direcionar no sentido da inclinação.

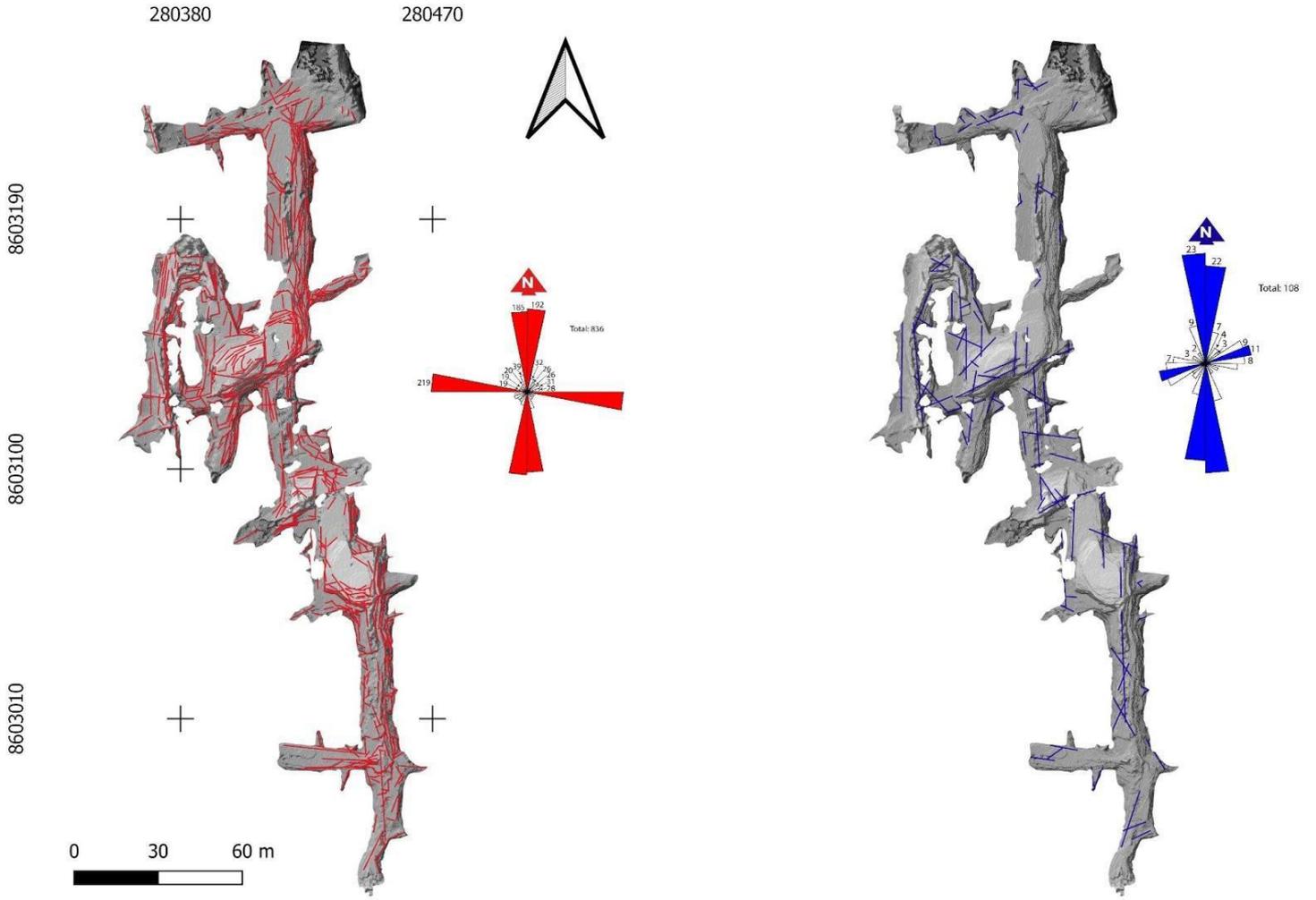
Figura 41- Mapa de lineamentos (linhas vermelhas) e mapa de alinhamento de espeleotemas (linhas azuis) da caverna Diva de Maura.



Fonte: elaborado pelo autor.

A caverna Paixão (Figura 42) apresenta na orientação dos lineamentos e dos espeleotemas uma forte tendência N-S. Embora, quando observadas as direções de menor relevância estatística na roseta, há uma tendência à discordância análoga às que ocorrem na caverna Diva de Maura devido às características de inclinação da estratigrafia da rocha que hospeda a caverna.

Figura 42- Mapa de lineamentos (linhas vermelhas) e mapa de alinhamento de espeleotemas (linhas azuis) da caverna Paixão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

11 MAPEAMENTO DOS ESPELEOTEMAS E MODELOS DE ORNAMENTAÇÃO DAS CAVERNAS

A presença de espeleotemas nas três cavernas mencionadas neste estudo é bastante diversa, porém para fim de análise será descrito o comportamento das estalactites, colinas e estalagmites deste conjunto de cavernas.

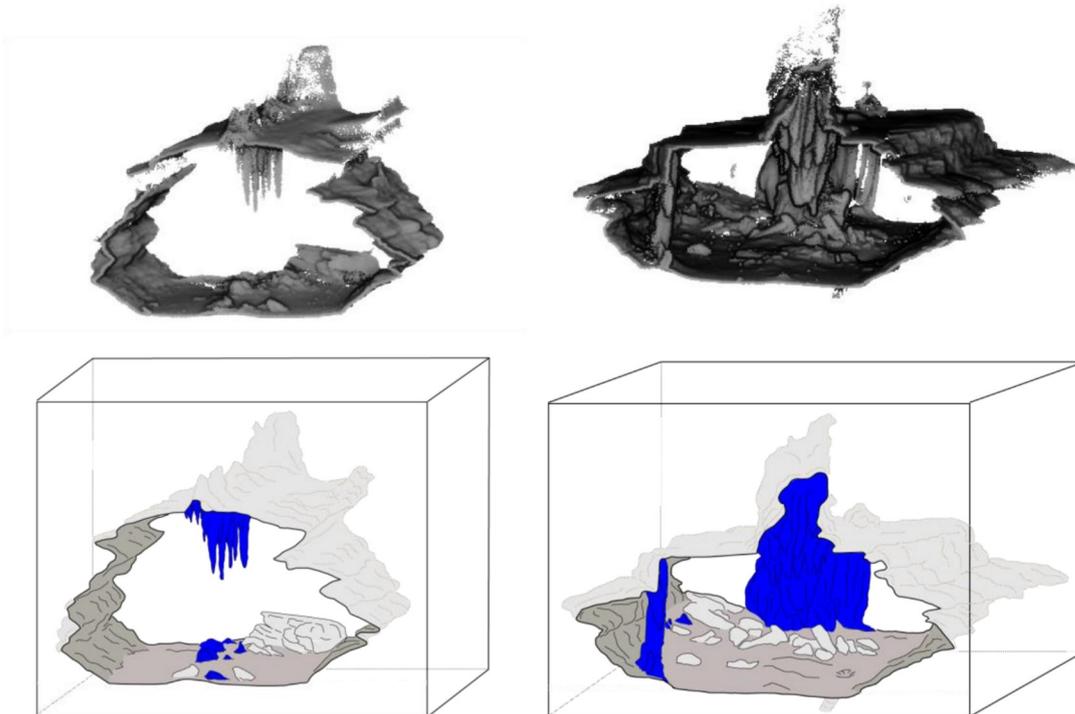
Os espeleotemas de piso não serão levados em conta devido a dois fatores: 1)- Os modelos apresentados sugerem que existem muitos fatores que alteram os espeleotemas de piso, como gravidade, tectônica e ascensão e retrogradação do lençol freático; 2)- as cavernas apresentam grandes quantidades de material de preenchimento, sendo estimado que em IOI, presente em alguns setores em torno de 5 metros de material preenchido, na DDM em torno de 10 metros, e na PAX, possivelmente mais de 10 metros.

Os conjuntos de espeleotemas serão analisados segundo o descrito no cap 07 figura 27.

Na caverna **loiô**, é notório a presença de um corredor de espeleotemas de teto, no centro do conduto principal, neste caso, nota-se a existência de uma dobra, evidenciado pelas laterais do conduto que formam os flancos da dobra.

Existem também áreas onde ocorre a formação de colunas e coalescência das mesmas, porém, mesmo nessas áreas, a formação de colunas mantém, salvo poucas exceções, o alinhamento com o centro do conduto (conforme verifica-se na figura 43), que corresponde ao eixo central da dobra. Também é notória a pouca presença de material detrítico no piso da caverna, há apenas a existência de pequenos blocos desagregados do teto, assim como ocorrem por vezes a presença de espeleotemas colapsados, geralmente estalactites.

Figura 43- Posição dos espeleotemas na caverna loiô.

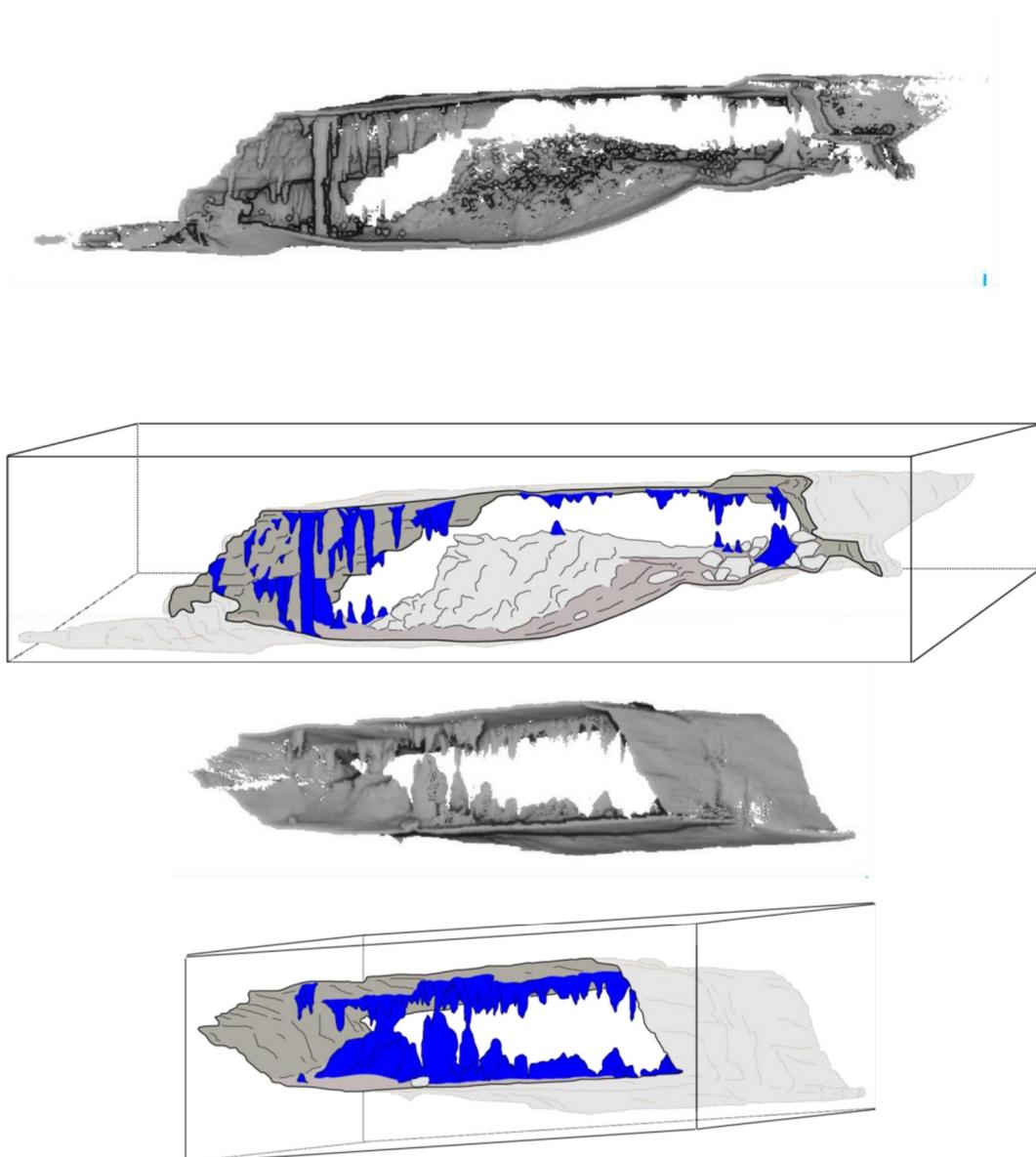


Fonte: elaborado pelo autor.

A caverna Diva de Maura, apresenta uma ornamentação posicionada de maneira distinta da posição da ornamentação da caverna loiô, tanto em termos de dimensões dos espeleotemas, quanto em termos das disposições destes no teto. É observado que os espeleotemas de teto seguem principalmente a direção do mergulho das camadas estratigráficas que formam as paredes e teto da caverna. Deste modo, a influência de processos gravitacionais é observada quando se analisa a disposição dos espeleotemas no teto da Diva de Maura, estando as estalactites, estalagmites e colunas, concentradas principalmente nas áreas de teto mais baixo.

O colapso do teto desta caverna, gerou grandes rampas de material detríticos. Esse material é por vezes recoberto por espeleotemas que sugere processo avançado de espeleogênese, como demonstrado nos modelos apresentados na figura 09 em 5A e 5B. Também é importante observar que existem espeleotemas formando colunas, e linhas de estalagmites e estalactites correspondentes Observadas nos destaques em azul escuro da figura 44.

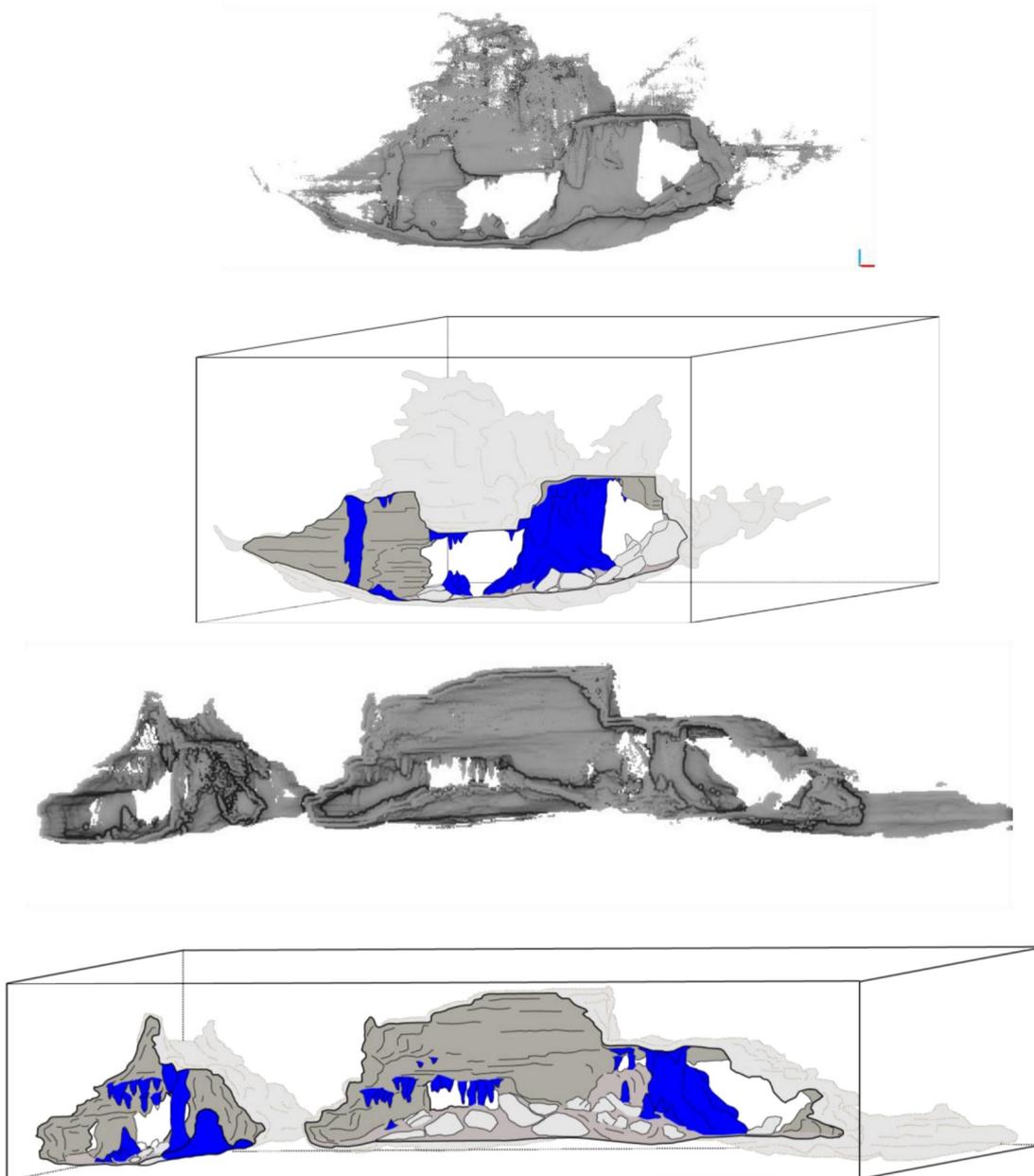
Figura 44- Posição dos espeleotemas na caverna Diva de Maura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os espeleotemas da caverna Paixão agrupam-se de assemelhando-se tanto aos agrupamentos nos centros dos condutos, como o visto na caverna Ioiô, ou nas áreas de tetos planos em regiões de teto mais baixo como apresentado na caverna Diva de Maura (figura 45). Apresenta também, várias áreas de descontinuidades topográficas, ocasionadas em geral por colapsos de teto, gerando muitas variações de altimetria.

Figura 45- Posição dos espeleotemas na caverna Paixão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

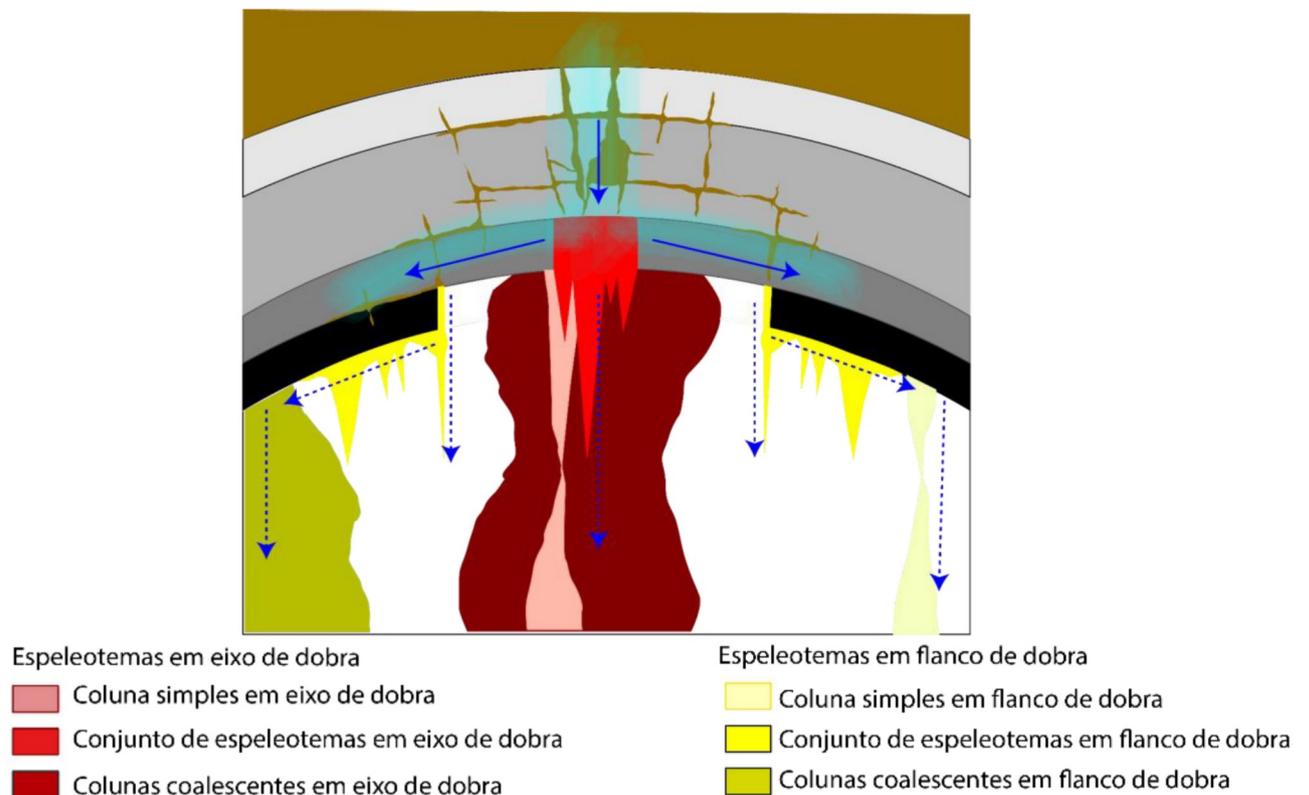
A partir dessa abordagem é possível pensar em um modelo de classificação para esses espeleotemas baseados nos seguintes critérios:

Geometria do teto: sob este critério é concebível determinar qual tipo de geometria é apresentada em uma determinada área ou setor da caverna, neste caso é importante utilizar o MDE do teto da caverna, para assim aplicar o filtro de aspecto.

O segundo critério é definido pelo tipo de espeleotema, levando-se em conta o local do teto onde ele se desenvolve e o volume de material que o compõe, neste caso tem-se os espeleotemas de tetos, as colunas e as colunas coalescentes (correspondentes aos grupos apresentados no cap 07 figura 27). Portanto, tem-se:

Em tetos desenvolvidos a partir de dobras, obtêm-se os seguintes conjuntos de ornamentação: a) espeleotemas em eixo de dobras (EED), b) coluna simples em eixo de dobra (CSED), c) colunas coalescentes em eixo de dobras (CCED), d) espeleotema em flanco de dobra (EFD), e) coluna simples em flanco de dobra (CSFD) e f) coluna coalescente em flanco de dobra (CCFD) (figura 46).

Figura 46- Modelo conceitual de ornamentação em teto de caverna formado a partir de dobra.



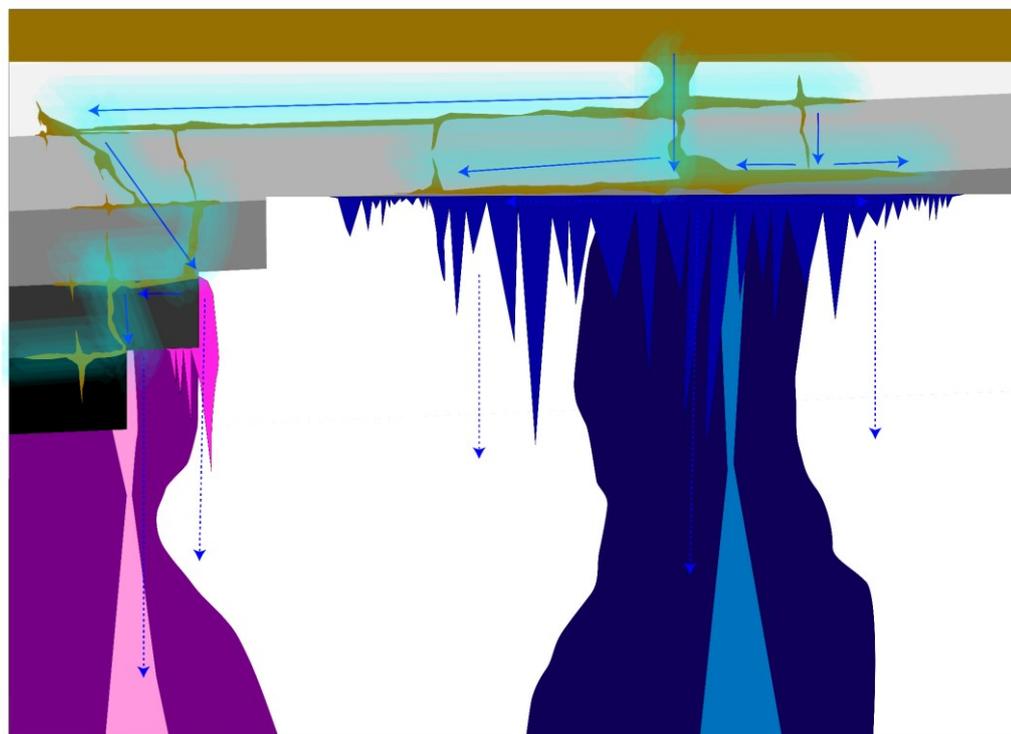
Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 45 representa o modelo conceitual dos espeleotemas onde predominam os processos gravitacionais de colapsos de teto, onde é demonstrada a percolação de fluxos através das fraturas, formadas pela região de maior fraqueza da dobra, essa área forma um conjunto de poros que facilita a formação de espeleotemas, neste caso, esses poros podem estar relacionados a antigas estruturas de dobras, descaracterizadas pelos processos de colapso, ou a estruturas de

movimentação ou por tectônica ativa ou acomodação gravitacional de parte do teto. Também ocorrerá controle estratigráfico, ao depender das variações de permeabilidade e porosidade das camadas. Isso faz com que em algumas áreas na zona em que se forma a “escada invertida” no teto da caverna ocorra presença de espeleotemas em camadas intercaladas.

Nesta circunstância ocorrem a presença dos espeleotemas do tipo: a) espeleotema em teto plano (ETP); b) coluna simples em teto plano (CSTP); c) coluna coalescente em teto plano (CCTP); d) espeleotema em zona de colapso (EZC); e) coluna simples em zona de colapso (CSZC); e f) coluna coalescente em zona de colapso (CCZC).

Figura 47- Modelo conceitual de ornamentação em teto de caverna formado a partir de zonas de colapso gravitacional.



Espeleotemas em zona de colapso

- Coluna coalescente em zona de colapso
- Espeleotemas alinhados em zona de colapso
- Coluna simples em zona de colapso

Espeleotemas em teto plano

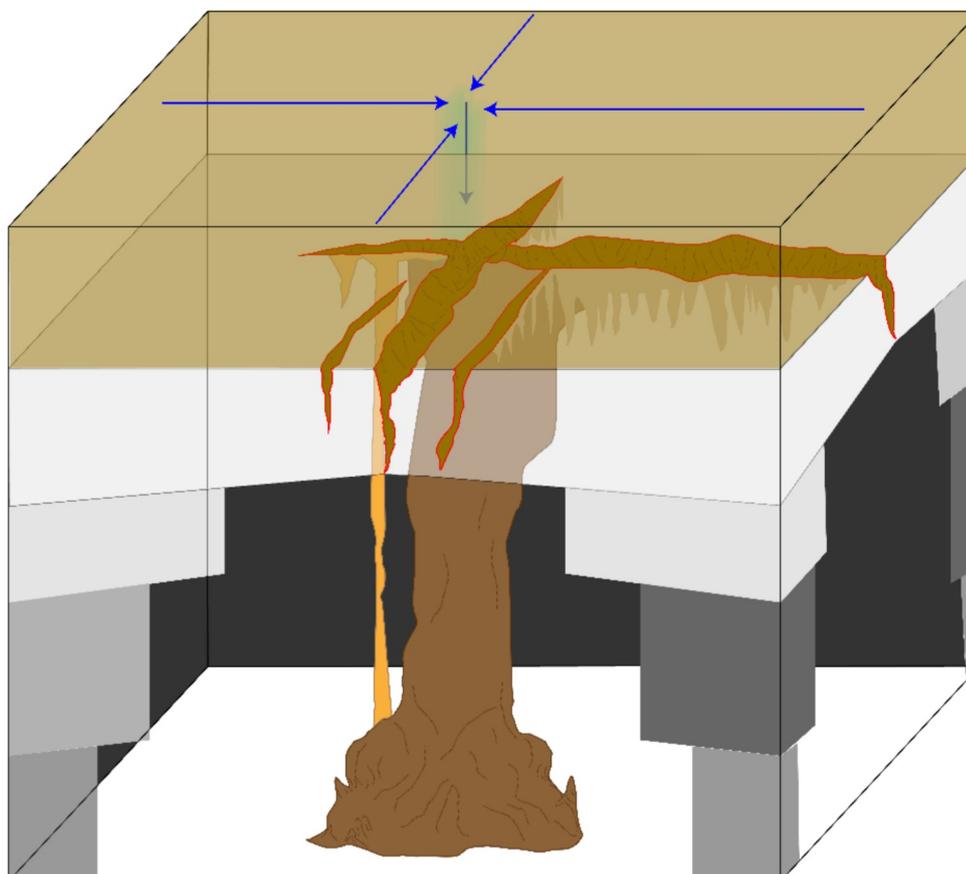
- Colunas coalescente em teto plano
- Espeleotemas alinhados em teto plano
- Coluna simples em teto plano

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em sequência, existem cavernas que apresentam em sua morfologia áreas onde ocorre o encontro de condutos formando grandes salões, neste caso os tipos de espeleotemas que são formados por um encontro de fluxos concentrados em um ponto, neste caso oriundo de direções diferentes das estruturas que formam facilitadores de permeabilidade nos tetos. Isso significa que nessas áreas ocorre a formação dos espeleotemas no encontro de direções.

Este tipo de ornamentação será dividido em: a) espeleotema em teto em encontro de direção (ETED); b) coluna simples em encontro de direção (CSECD); c) coluna coalescente em encontro de direção (CCTED), como observado na figura 48. No que foi possível observar a partir das cavernas analisadas neste trabalho, para as cavernas que apresentam este tipo de ornamentação é possível encontrar concomitantemente às outras classificações sugeridas nas figuras 46 e 47.

Figura 48- Modelo conceitual de ornamentação em teto de caverna formado a partir de encontro de direções.



- Espeleotemas em encontros de direções
- Coluna coalescente no encontro de direções
 - Espeleotemas de teto no encontro de direções
 - Coluna simples no encontro de direções

Fonte: Elaborado pelo autor.

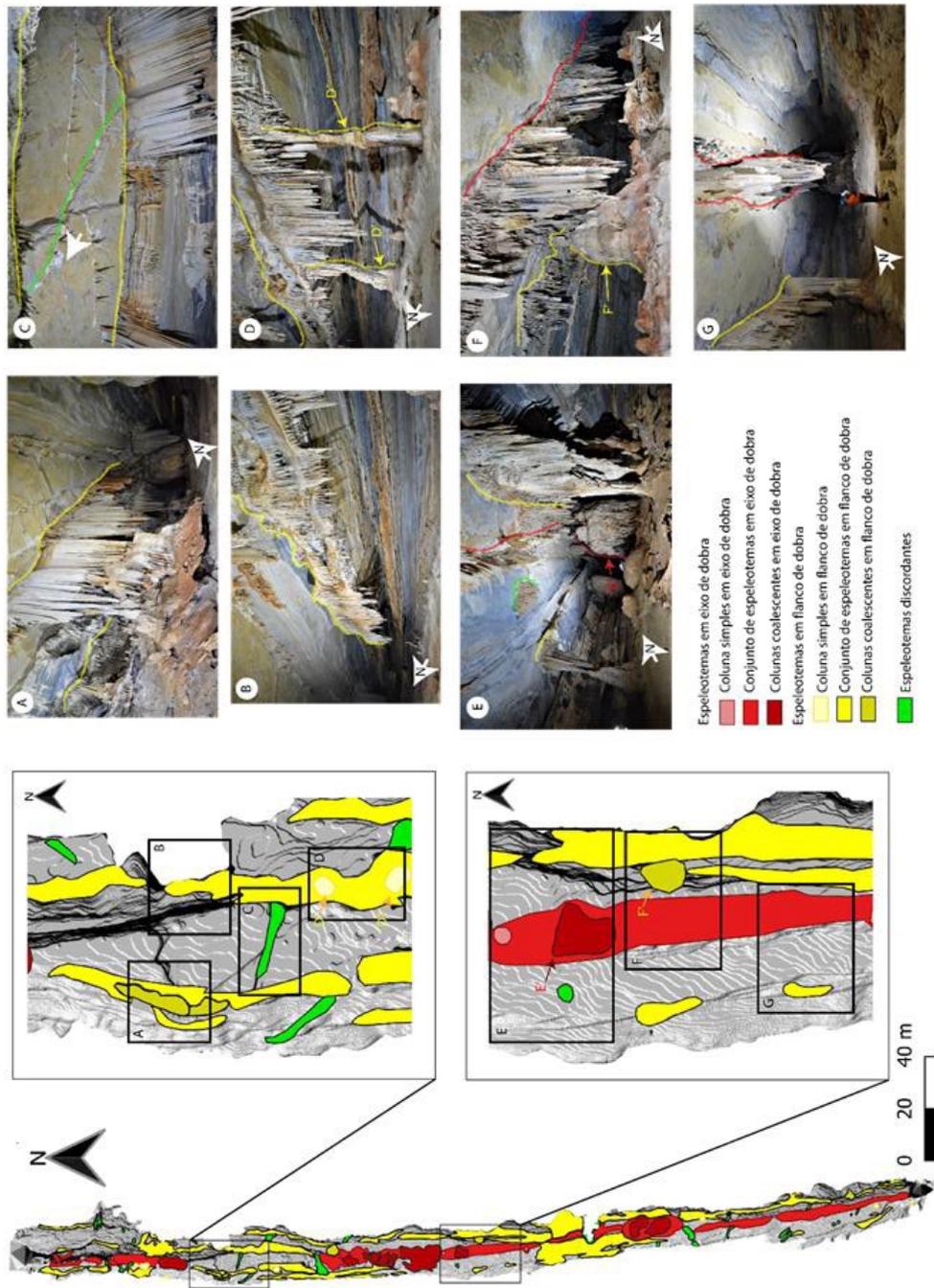
11.1- Mapeamento da ornamentação da caverna

Ao aplicar-se os modelos acima citados nas cavernas IOI, DDM e PAX, foram mapeados seus espeleotemas obtendo-se os seguintes resultados:

Para a caverna Ioiô, como já demonstrado nos mapas de aspecto apresentados no capítulo 9.2 deste trabalho, onde foram encontrados os espeleotemas em eixo de dobra e em flanco mapeados na figura 49, a), b), c) No qual são demonstrados os espeleotemas os temas do tipo, espeleotemas em franco de dobras (EFD), em d) d' e d'', são exemplos de colunas simples em flanco de dobra (CSFD). Em e', f) e g) tem-se

exemplos de espeleotemas em eixo de dobra (EED), sendo e) um exemplar de coluna coalescente em eixo de dobra. Em f' existe um exemplo de coluna coalescente em flanco de dobra. Alguns espelhos temas não foram incluídos na classificação, pois suas características não permitiram agrupá-los em qualquer dos grupos predominantes na caverna, no caso tem-se o exemplar da figura 49 e) e C) na linha em destaque tracejado verde.

Figura 49- Mapeamento da ornamentação de teto da caverna Ioiô.

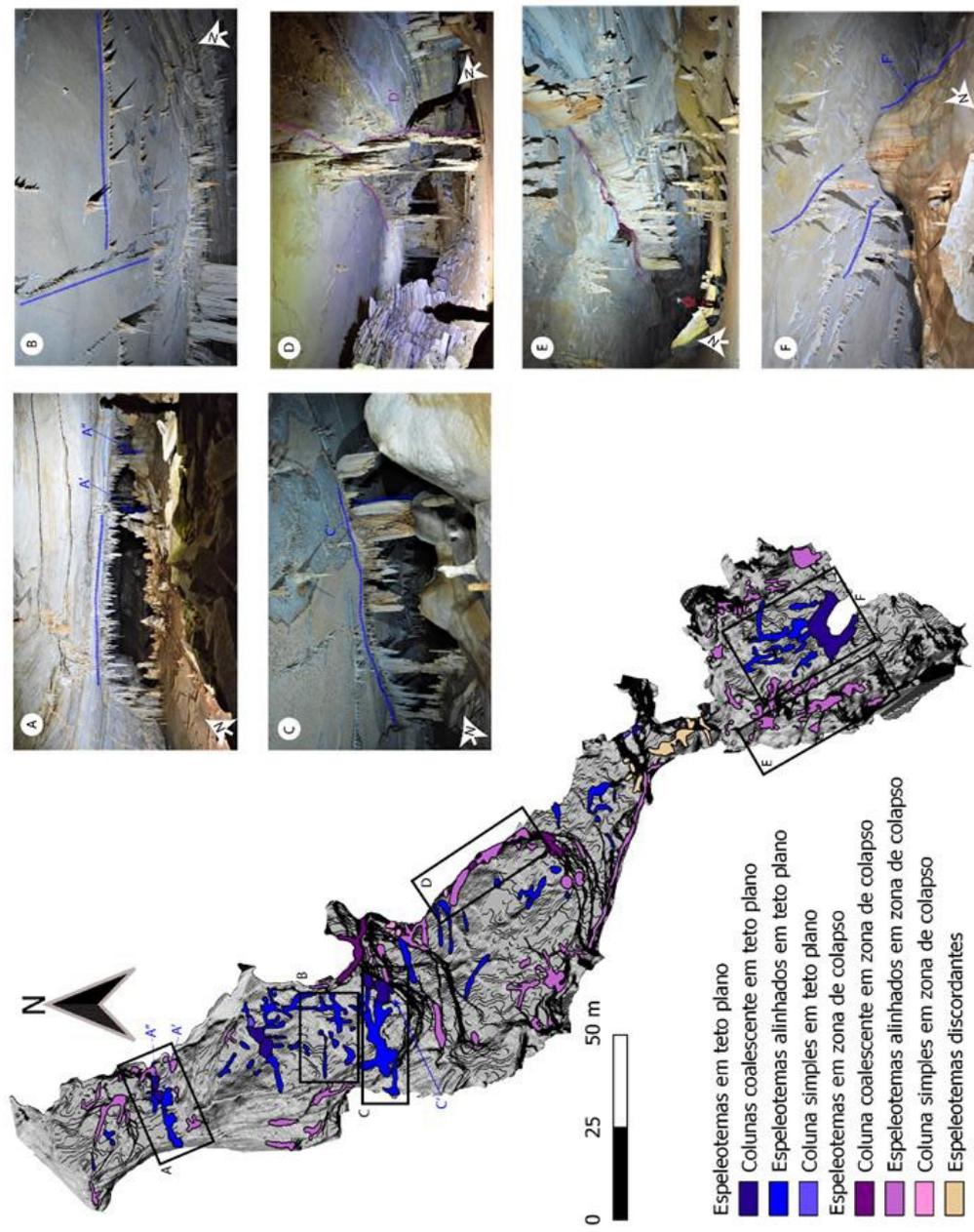


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na caverna Diva de Maura, A ocorrência de duas feições onde predomina a ocorrência de espeleotemas, as escadas invertidas que serão chamadas de zonas de colapso e as abrangentes planícies de teto, ou áreas de teto plano, portanto foram identificados em a) b) c) e f) os espeleotemas em teto plano, sendo em a', a'' c' e f', exemplos de colunas coalescentes em teto plano, e em d) e e), os espeleotemas em zona de colapso, sendo d' exemplo de coluna simples em zona de colapso.

Na caverna Diva de Maura, há ocorrência de duas feições onde incidem os espeleotemas, as “escadas invertidas” que são chamadas de zonas de colapso e as áreas de teto plano. Foram identificados, neste cenário o que se segue: em a) b) c) e f) os espeleotemas em teto plano, sendo em a', a'' c' e f', exemplos de colunas coalescentes em teto plano, e em d) e e), os espeleotemas em zona de colapso, sendo d' exemplo de coluna simples em zona de colapso (figura 50).

Figura 50- Mapeamento da ornamentação de teto da caverna Diva de Maura.

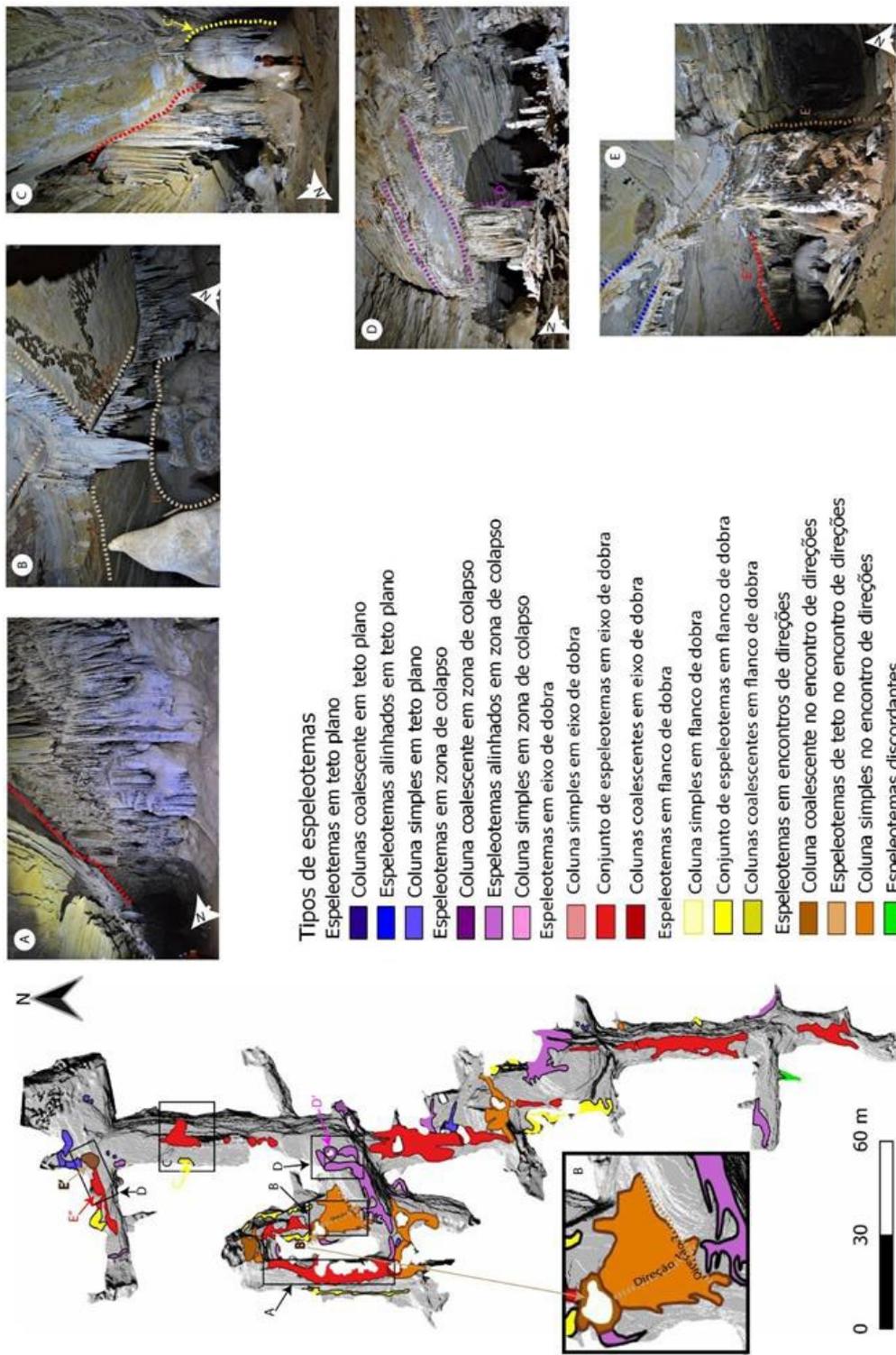


Fonte: Elaborado pelo autor.

Na caverna Paixão são vistos os espeleotemas em encontro de direções, mas, também ocorrem as outras classificações de espeleotemas como mapeado na figura 51. Em a), c) da figura 51, é possível notar a semelhança dos conjuntos de espeleotemas aos da caverna IOI, neste caso são mostrados as colunas coalescentes em eixo de dobra, espeleotemas em eixo de dobra e coluna coalescentes em flanco de dobra.

Em d) tem-se os espeleotemas em zona de colapso, d' sendo uma coluna coalescente em zona de colapso. já em b) e e) tem-se a presença dos espeleotemas no encontro de direções, sendo que em e), se destaca a ocorrência de espeleotemas em teto plano que forma uma direção ao encontro de espeleotemas em eixo de dobra que forma a outra, culminando com e' que se trata de uma coluna coalescente no encontro de direções.

Figura 51- Mapeamento da ornamentação de teto da caverna Paixão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

11.2- Quantificação das ornamentações das cavernas IOI, DDM e PAX.

Ao quantificar os dados (ver gráficos detalhados com comprimento, largura e área de cada grupo de espeleotemas no anexo II), pode-se determinar que os espeleotemas são distribuídos de forma diferente nas cavernas. Na IOI, tem-se que em termos de área total do teto levantado pelo lidar, cerca de 6.077m² 58% é formada por áreas não ornamentadas, e 18,2% de áreas com espeleotemas, colunas e colunas coalescentes em eixo de dobra e 23% da área é ornamentada por espeleotemas em flanco de dobra, os espeleotemas discordantes foram desconsiderados (em todas as cavernas) pois ocupavam menos de 0,1% da área.

A caverna DDM possui cerca de 10.832m² de área levantada por LIDAR, onde 87% desta área não é ornamentada e 5,7% são ocorrências dos conjuntos de espeleotemas em zona de colapso 6,3% são ocorrências de espeleotemas em área de teto plano. Na PAX, são 74,8% da área não ornamentada porém ganham destaque os espeleotemas em eixo de dobra com 9,7% e os espeleotemas em encontro de direções com 6,3% da área total da caverna (ver gráficos da figura 52).

Figura 52- Área de ocorrência dos espeleotemas nas três cavernas.

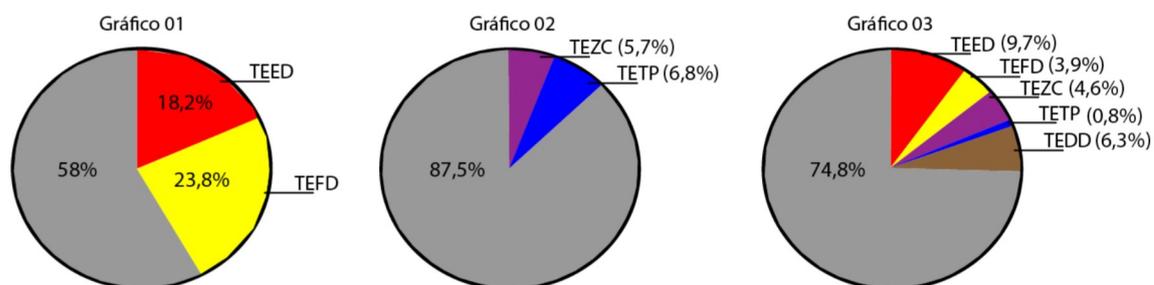


Gráfico 01-IOI, Gráfico 02-DDM e Gráfico 03-PAX.

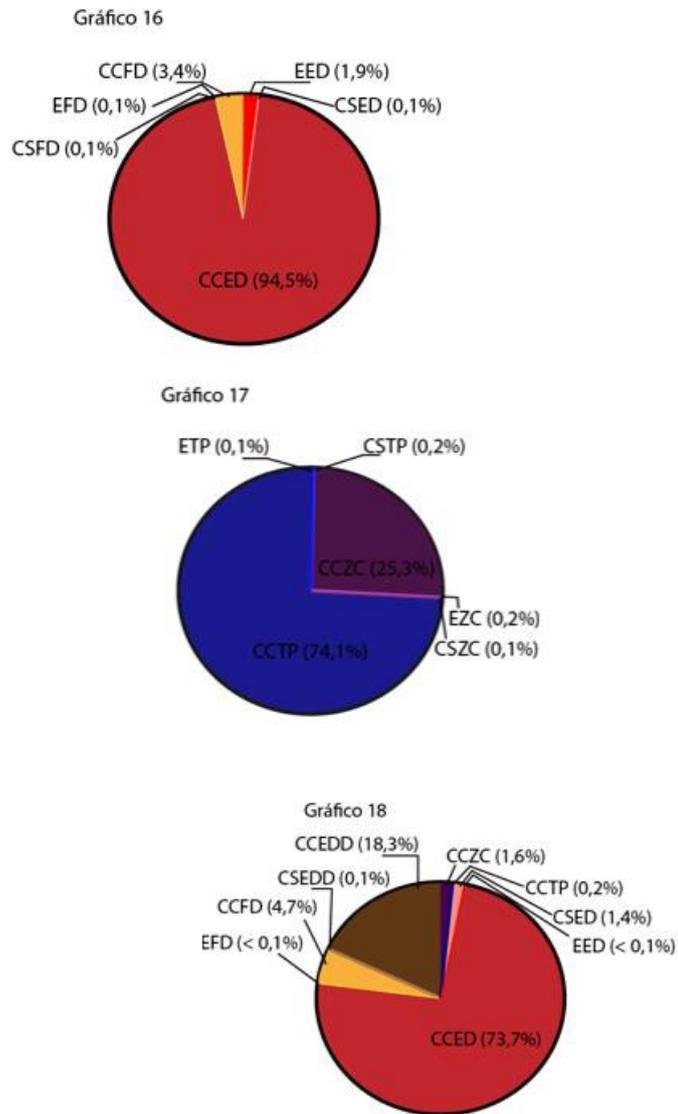
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos volumes de espeleotemas (ver figura 53), tem-se uma estimativa por caverna baseado na metodologia apresentada no capítulo 07 figura 25. por conseguinte, na caverna IOI o maior volume de espeleotema é representado pelas colunas coalescentes em eixo de dobra, exibindo 94% do volume total dos espeleotemas, seguidos pelas colunas coalescentes em flanco de dobra com 3,4% do volume total de espeleotemas.

Na caverna DDM, o maior volume de espeleotemas se refere às colunas coalescentes em teto plano, representando 74,1% deste total, seguidos pelas colunas coalescentes em zona de colapso com 25,3% do volume total dos espeleotemas.

Já a PAX tem maior volume nas colunas coalescentes em eixo de dobra, representando 73,7% do volume total dos espeleotemas seguidos pelas colunas coalescentes em encontro de direções com 18,3% do volume total de espeleotemas.

Figura 53- Volume dos espeleotemas nas três cavernas.

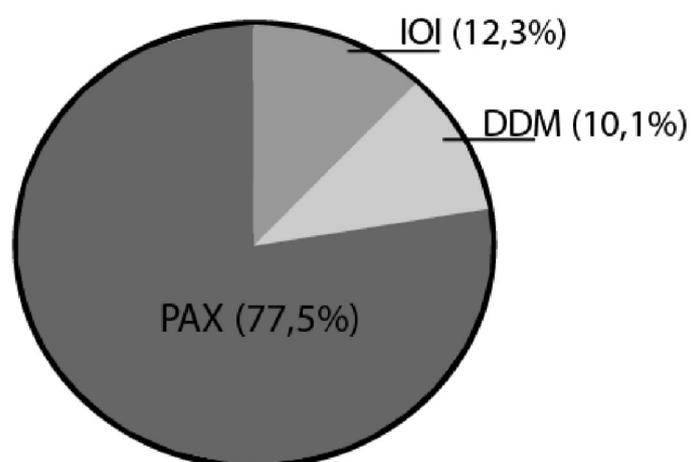


Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando comparados os volumes totais de espeleotemas das três cavernas (ver figura 54), verifica-se que a PAX é a caverna com maior volume de espeleotemas 77,5% do total da soma de todos os espeleotemas das cavernas levantadas. Este número é seguido por IOI e por fim DDM, porém ao se levar em conta a área de cada levantamento, IOI apresenta proporcionalmente maior ornamentação seguida pela PAX e DDM permanece como a caverna menos ornamentada.

Figura 54- Volume totais dos espeleotemas somados nas três cavernas.

Gráfico 19



Fonte: Elaborado pelo autor.

12 MODELO DE DESENVOLVIMENTO DA ORNAMENTAÇÃO DAS CAVERNAS IOIÔ, DIVA DE MAURA E PAIXÃO

Ao analisar os dados apresentados no capítulo 11, os modelos discutidos no capítulo 04, e a classificação juntamente com os mapeamentos dos espeleotemas feitos nos capítulos 10 e 11, é possível estabelecer um modelo sistêmico das cavernas estudadas a fim de explicar o desenvolvimento de sua ornamentação.

Iniciaremos com caverna **loiô**, a configuração de dobra simétrica com baixo ângulo desta caverna, permite a existência de áreas nos flancos das dobras com presença de espeleotemas assim como no centro dos condutos, que corresponde a área fraturada.

A figura 55 é um setor da caverna loiô onde é possível verificar essa estruturação e através de interpretação e pensar na maneira que a espeleogênese funciona nesta caverna. De início as estruturas facilitadoras de permeabilidade (linhas vermelhas na figura 55), são formadas pelas fraturas no eixo da dobra que forma o teto da caverna, através desses poros secundários ocorre a percolação de fluidos que possibilita o gotejamento. Esse processo forma a zona preferencial de espeleogênese, definida como uma área onde haverá maior formação de espeleotemas.

Os dados de volume expressam que os espeleotemas em eixo de dobra estão mais concentrados nessa zona. também é nela que se encontra o maior volume de espeleotema por área. Esse fato corrobora que a zona preferencial de espeleogênese é uma área de maior permeabilidade na caverna e, conseqüentemente, esta área corresponde a área do eixo da dobra.

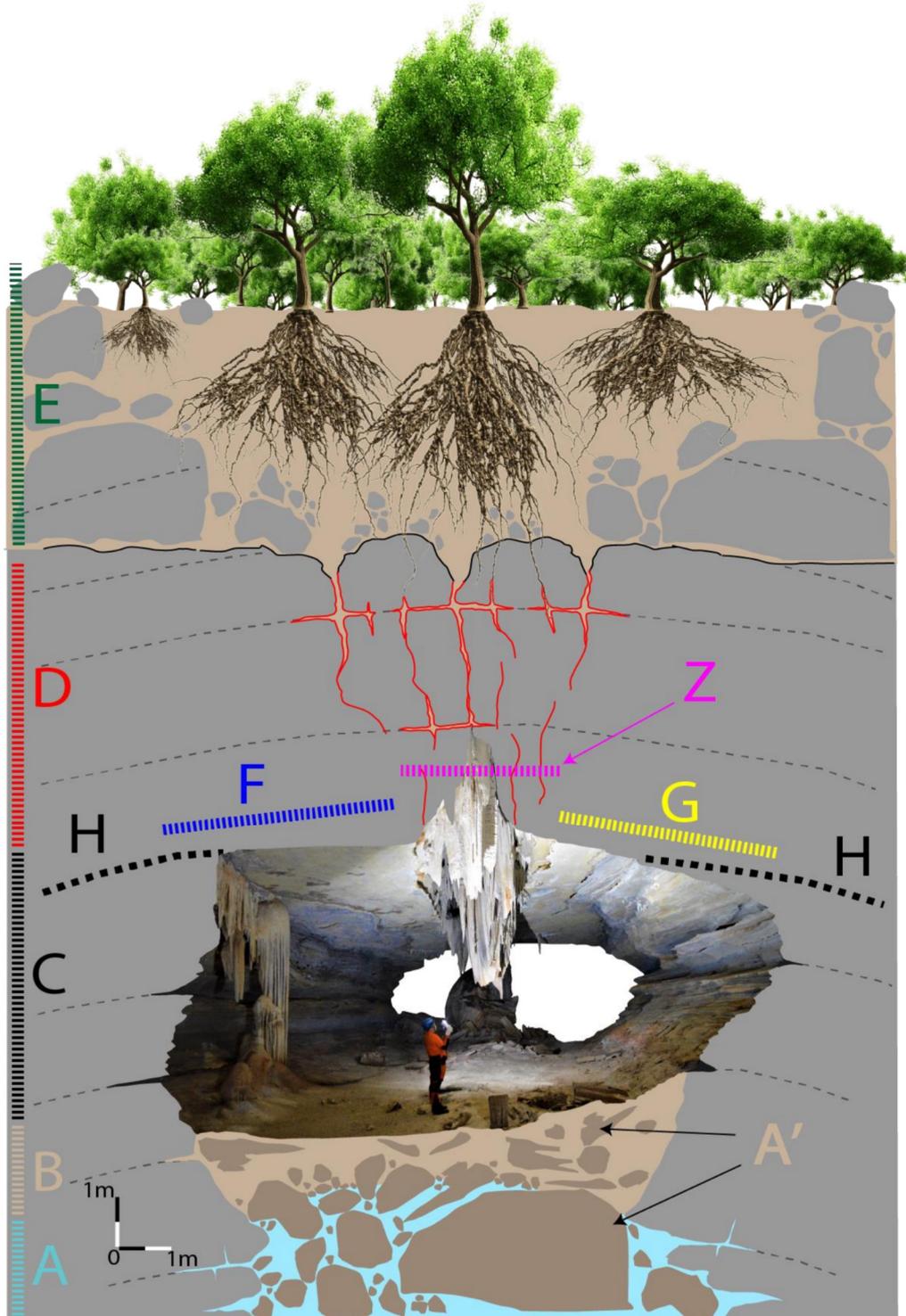
Já a ornamentação nos flancos tem uma distribuição em área pouco maior, que os espeleotemas em eixo de dobra, porém apresenta espeleotemas menos volumosos. Esta afirmação sugere que os espeleotemas em flanco são uma ornamentação secundária, podem estar associadas a um controle gravitacional, gerado pela migração de gotas aderidas por coesão superficial das moléculas de água, e também pelo controle estratigráfico onde ocorre gotejamento nas camadas mais permeáveis.

Essas afirmações também são corroboradas pelos dados estruturais da caverna loiô associados aos dados de alinhamentos de grupos de espeleotemas

de teto, neste caso as rosetas geradas são praticamente idênticas, sendo possível estabelecer uma relação de forte controle estrutural da ornamentação da loiô.

Em termos evolutivos é difícil estabelecer uma relação precisa do estágio na qual essa caverna se encontra, já que seu piso é preenchido por sedimentos verificando-se a presença de espeleotemas quebrados. O nível freático é aflorante em algumas áreas da caverna, cerca de 5m em relação a entrada, também são vistas marcas de ascensão do nível freático em alguns setores (ver apêndices IV, foto 11, F10, círculo tracejado em vermelho "a"). Deste modo, para entender com precisão a morfologia do conduto, faz-se necessário uma prospecção com aparelhos de penetratividade no solo, como GPR. No entanto é possível imaginar que esta caverna tenha uma geometria associada a passagens do tipo tubo freático alongado formando um Canyon que passou por processo de preenchimento devido às variações de nível de base locais e regionais.

Figura 55- Modelo de desenvolvimento de ornamentação da caverna IOI.



A- Freático, **A'-** Blocos e espeleotemas abatidos, **B-** Sedimentos de piso de caverna, **C-** Zona Vadosa, **D-** Zona de fraturamento, **E-** Solum (epicarste), **F-** Flanco oeste, **G-** Flanco leste, **Z-** Zona preferencial de espeleogênese, **H-** camada de selo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

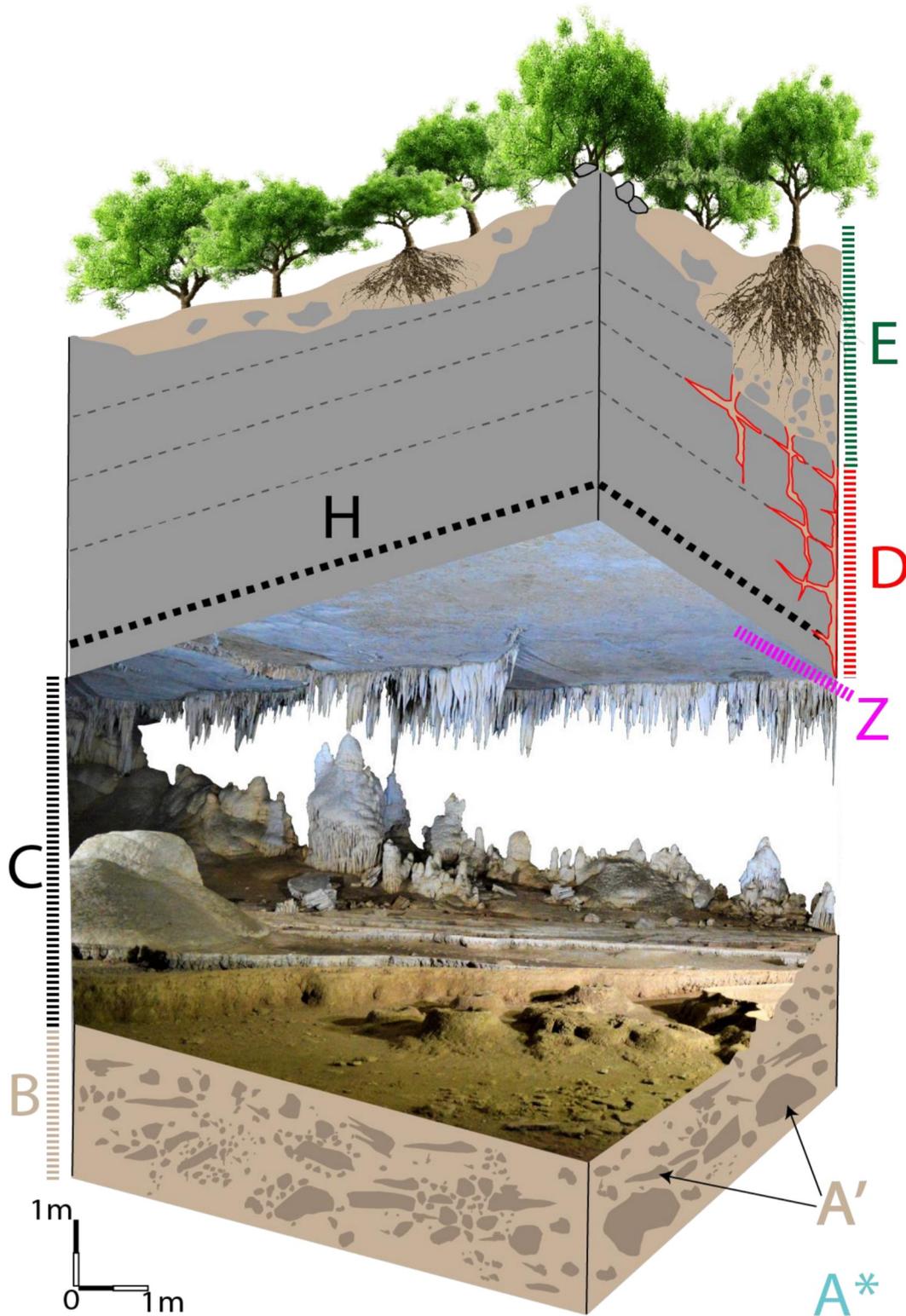
A caverna **Diva de Maura**, embora inserida em um contexto geológico e sistêmico cárstico muito semelhante ao da caverna IOI, ambas apresentam grandes diferenças em sua ornamentação e morfologia. A primeira diferença notória é devido a DDM se desenvolver na forma de um amplo conjunto de salões, enquanto a caverna IOI está estruturada com um corredor estreito com uma direção de desenvolvimento bem definida, praticamente retilínea.

A segunda diferença encontra-se na geometria do teto, estando a DDM associada a amplos desenvolvimentos de tetos planos, bordejadas por áreas de zona de colapso, que marcam os limites dos desmoronamentos de tetos através das feições de “escadas invertidas”. Outra diferença notória se dá em virtude do volume total de ornamentação, neste caso, a caverna IOI apresenta uma maior proporção de ornamentação em relação a área que a DDM, que apresenta a menor proporção. Ou seja, mesmo com semelhanças em termos de contexto geológico e função sistêmica, essas cavernas são evidentemente diferentes ao que se refere às suas ornamentações.

Essas diferenças podem estar associadas a um estágio mais avançado em relação aos processos evolutivos na DDM quando comparados aos que ocorrem na IOI. Sabe-se que a DDM está situada em uma área pouco mais elevada que a IOI e que seu nível freático aflora em uma cratera de cerca de 15m de profundidade (inferido a partir de um setor não mapeado pelo LIDAR, ver fotografia em apêndices V/extra levantamento 01 pág. 193). Portanto, os processos gravitacionais nesta caverna são preponderantes, isto explica os grandes depósitos de material detrítico encontrados dentro da caverna, assim como a presença dos aprofundamentos de tetos nestes setores.

Na figura 56 é possível verificar a presença de espeleotemas alinhados em zona de teto plano, isso corresponde a uma zona preferencial de formação de espeleotemas neste setor. Esta zona está associada a uma fratura que perpassa todo o teto, facilitando a migração de água, ou a fratura se encontre em um setor específico e o gotejamento percorra por gravidade e tensão superficial a direção da inclinação do teto, que embora se aproxime de 0° nesse setor é suficiente para direcionar o fluxo de gotejamento. É possível que os dois processos ocorram de maneira concomitante nesta caverna.

Figura 56- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em teto plano da caverna DDM.



A*- Freático (ocorrência inferida) , **A'**- Blocos e espeleotemas abatidos, **B**- Sedimentos de piso de caverna, **C**- Zona Vadosa, **D**- Zona de fraturamento, **E**- Solum (epicarste), **Z**- Zona preferencial de espeleogênese, **H**- camada de selo.

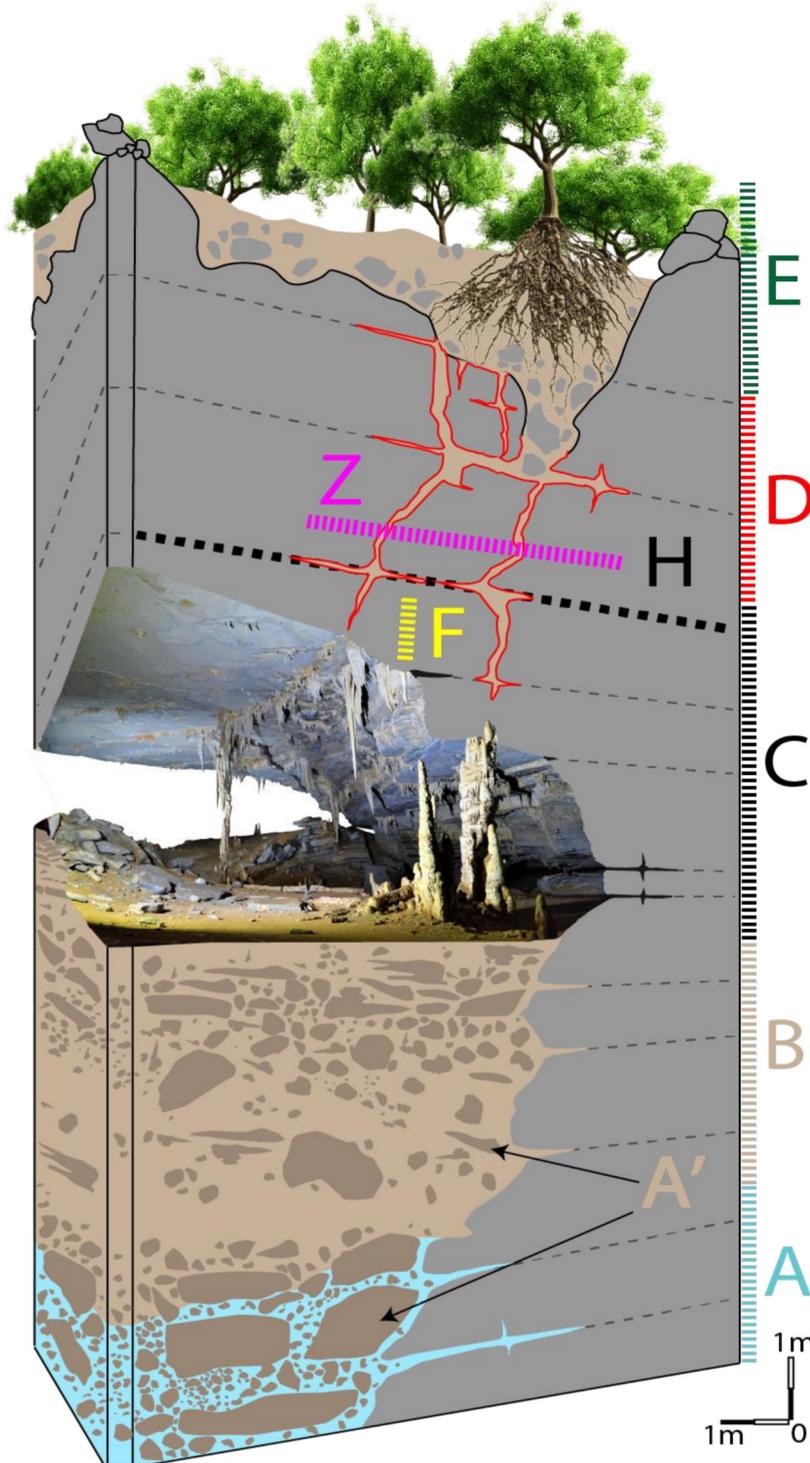
Fonte: Elaborado pelo autor.

Ainda na caverna **Diva de Maura**, as áreas associadas às zonas de colapso são marcadas por espeleotemas alinhados de menor volume, também, são os conjuntos de espeleotemas com menor quantidade de áreas ornamentadas (figura 57). Talvez esse fator se deva justamente ao fato destes estarem se desenvolvendo em zonas de colapso, sendo estas áreas locais preferenciais para o progradação lateral e vertical do teto da caverna, ou seja nesses local o espeleotema não detém um dos principais fatores morfogenéticos para seu desenvolvimento, o tempo. Nesse contexto, o espeleotema cresce só até o momento em que seu crescimento é interrompido pelos colapsos, desta maneira os espeleotemas nessas áreas mantêm-se pequenos e pouco volumosos.

O fator gravitacional é extremamente importante no desenvolvimento desta caverna, sendo assim a menor ornamentação desta, em comparação com as outras três, se explique pelo fato de esta ter passado por um processo mais intenso de ampliação de sua área interna, é possível que a não correspondência das direções das estruturas de teto e dos alinhamentos de espeleotemas, estejam relacionadas a perturbação da ornamentação gerada pelos colapsos de teto.

No entanto, isso não impede que haja uma correlação evolutiva entre as duas cavernas Ioiô e Diva de Maura, estando a primeira em um estágio de ornamentação primitiva, ou seja com pouca interferência de fatores como processos gravitacionais de colapso e a segunda apresenta-se como um estágio mais avançado de ornamentação, onde os alinhamentos e estruturas foram desorganizados pelos eventos de colapsos e possíveis alargamento de condutos até ocorrer a união destes e a formação de salões. Mas, é importante ressaltar que para se analisar estas questões de evolução de maneira mais aprofundada é necessário uma prospecção das feições que estão soterradas sob a camada de sedimentos, assim como a apresentação de dados de datação absoluta.

Figura 57- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em zona de colapso da caverna DDM.



A- Freático, **A'-** Blocos e espeleotemas abatidos, **B-** Sedimentos de piso de caverna, **C-** Zona Vadosa, **D-** Zona de fraturamento, **E-** Solum (epicarste), **Z-** Zona preferencial de espeleogênese, **F-** fim da zona de colapso, **H-** camada de selo.

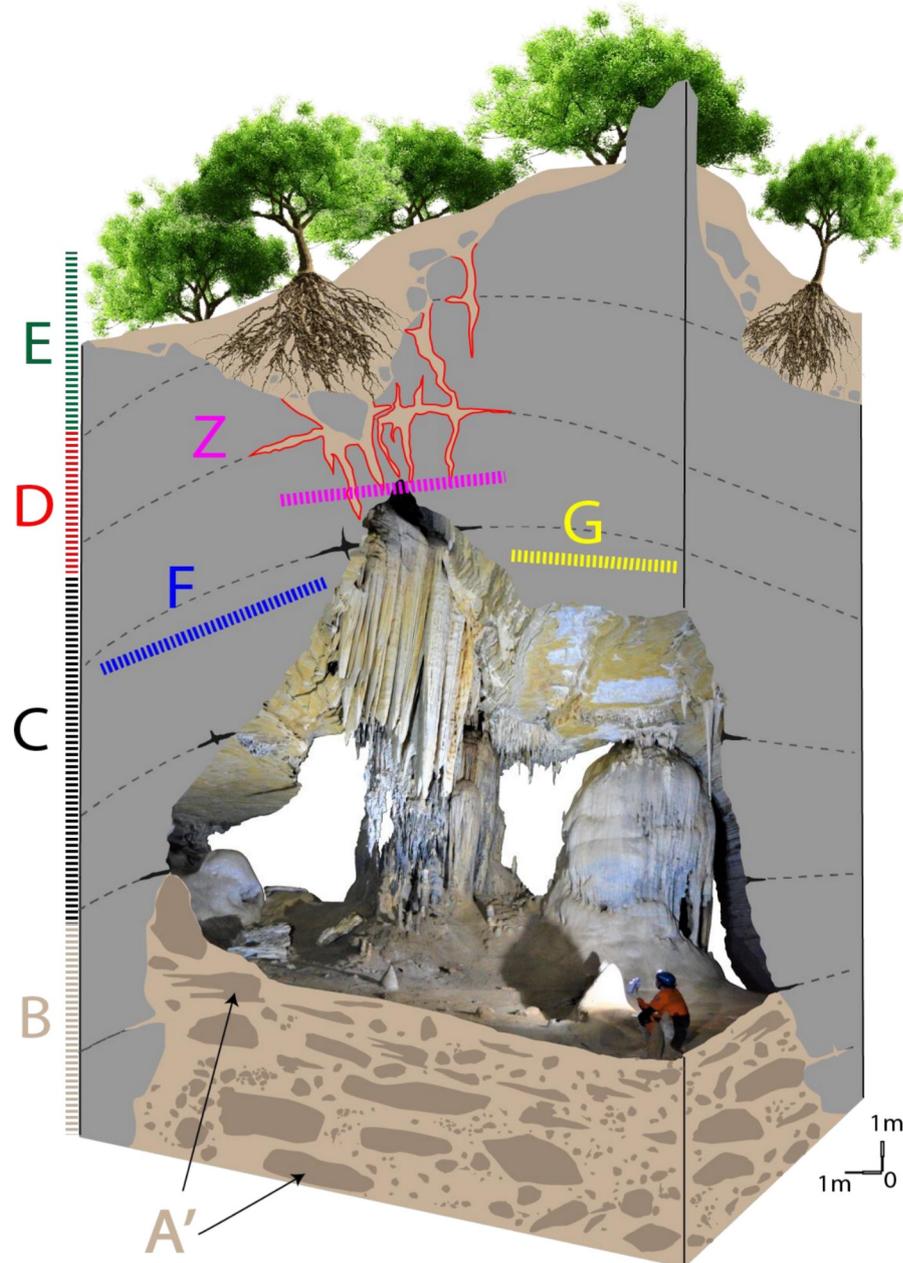
Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora a caverna **Paixão** esteja em um contexto geológico semelhante ao das duas cavernas anteriores, seu contexto sistémico cárstico é bastante diferente. Estando, esta caverna, em um contexto de carácter reliquial, isso significa que esta caverna encontra-se em um estágio mais avançado de evolução em relação às duas outras anteriores.

Também não foi possível encontrar afloramentos do nível freático em seu interior o que a configura como uma carste que possui recarga autogênica. porém, ainda sim, esta caverna ao ser mapeada segundo os critérios estabelecidos na classificação dos tipos de ornamentação apresentados no capítulo 10 e 11 deste trabalho, apresenta semelhanças entre as cavernas IOI e DDM.

Muito de sua geometria de teto é similar a encontrada na caverna loiô, o que sugere a presença de dobras com focos como mostra a figura 58. A segunda semelhança são as áreas de teto plano e de colapso como apresentadas na caverna Diva de Maura, como se sugere na figura 56.

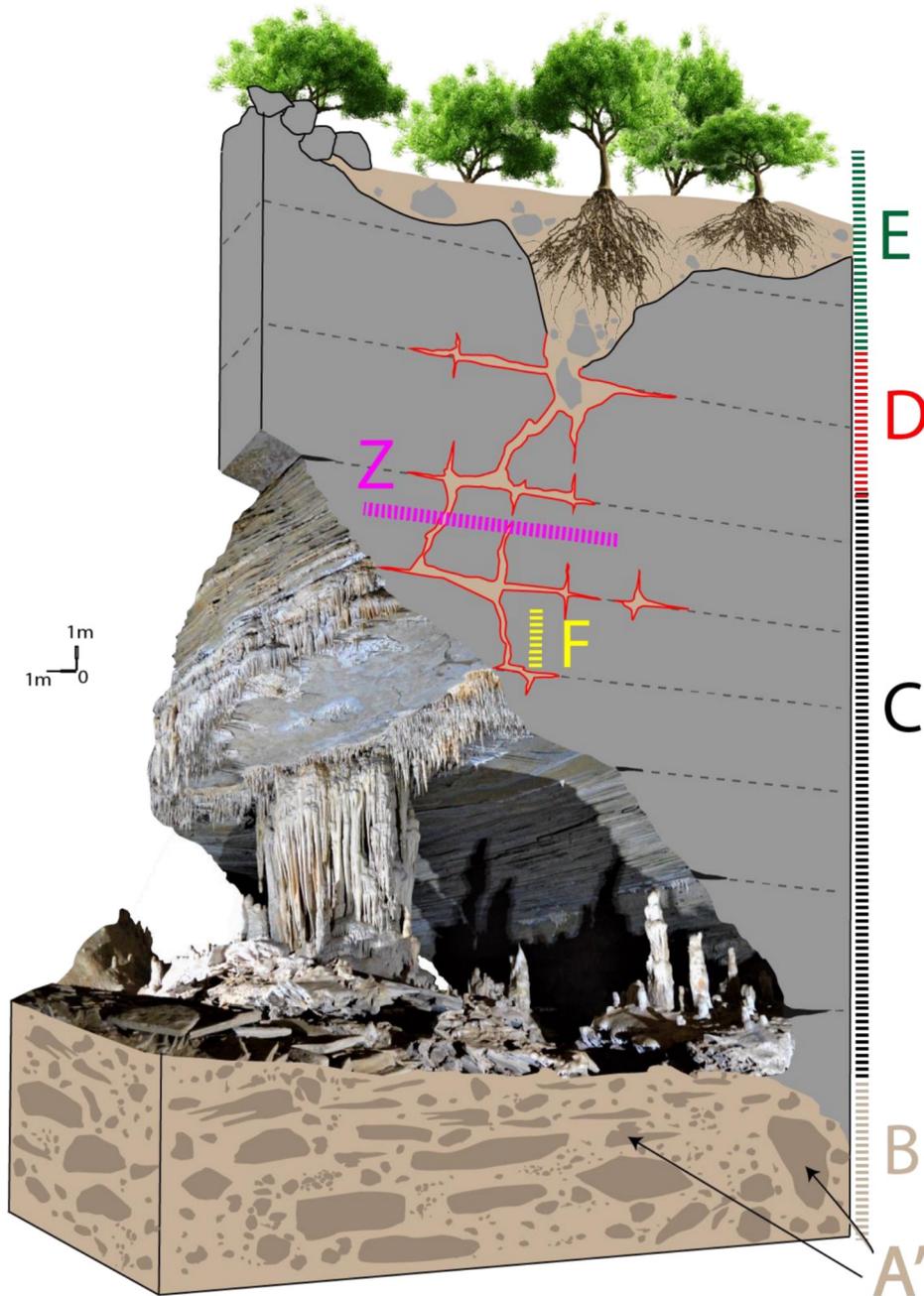
Figura 58- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em eixo de dobra da caverna PAX.



A'- Blocos e espeleotemas abatidos, **B**- Sedimentos de piso de caverna, **C**- Zona Vadosa, **D**- Zona de fraturamento, **E**- Solum (epicarste), **F**- Flanco oeste, **G**- Flanco leste, **Z**- Zona preferencial de espeleogênese.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em zona de colapso da caverna PAX.



A'- Blocos e espeleotemas abatidos, **B**- Sedimentos de piso de caverna, **C**- Zona Vadosa, **D**- Zona de fraturamento, **E**- Solum (epicarste), **Z**- Zona preferencial de espeleogênese, **F**- fim da zona de colapso, **H**- camada de selo.

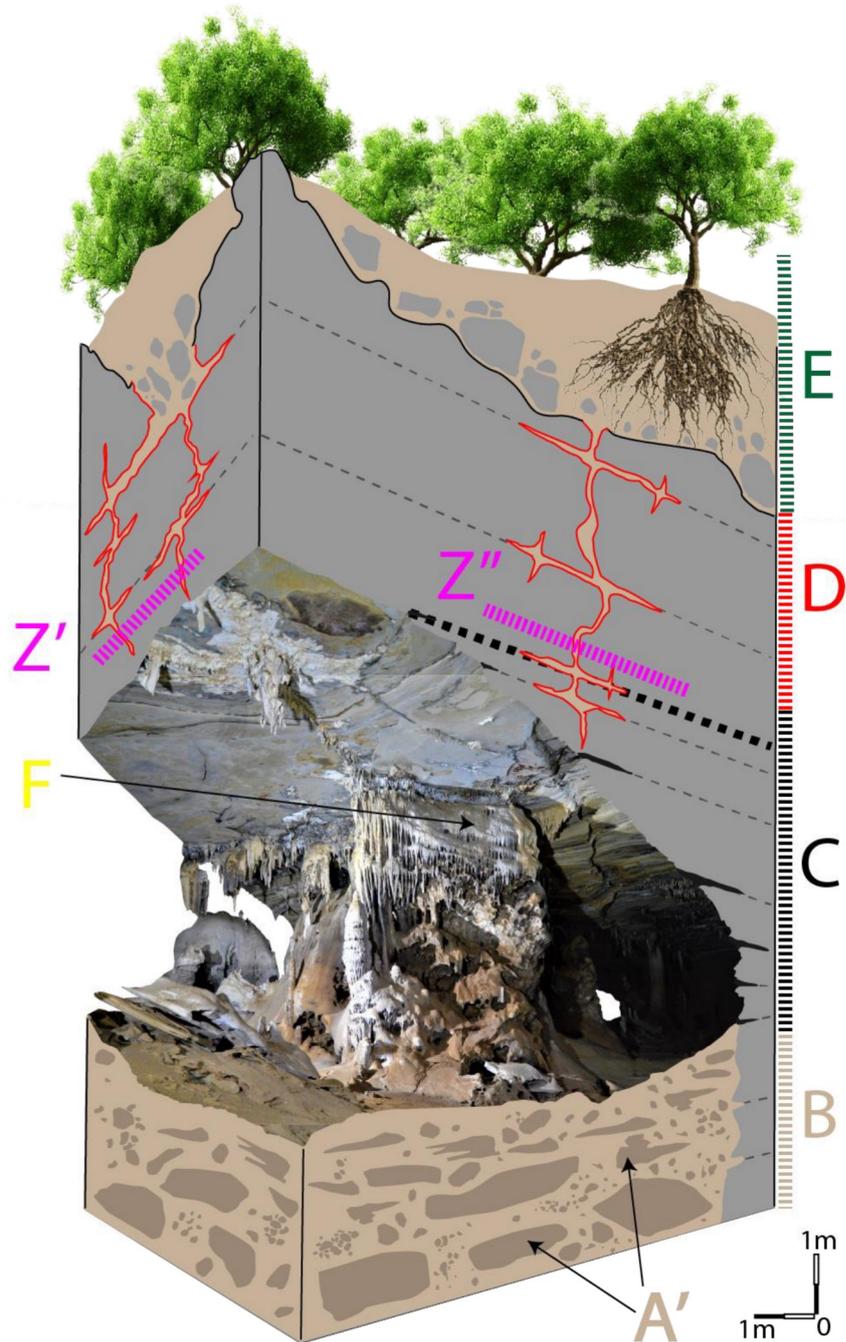
Fonte: Elaborado pelo autor.

A diferença da PAX em relação à IOI e DDM reside no fato desta apresentar ambos os tipos de ornamentação e ainda desenvolver a ornamentação em encontro de direções. Essas áreas de encontro de direções formam grandes espeleotemas volumosos, no caso da caverna PAX relacionados as direções L-W e N-S (figura 60), porém não são os encontros de direções que formam o maior volume de um grupo de espeleotema, sendo estes os conjuntos de espeleotemas em eixo de dobra. Isso indica uma coexistência de diversas zonas preferenciais de formação de espeleotemas, mais ainda, que os eixos das dobras são os setores onde ocorre a maior parte do desenvolvimento da ornamentação de cavernas que apresentam esse tipo de controle morfoestrutural.

Essa característica torna a PAX semelhante, em termos de ornamentação de teto, à caverna loiô, embora também apresente semelhanças, menos representativas, com a caverna DDM.

O fato desta caverna herdar essas semelhanças, está em uma área de carácter reliquial, e apresentar um tipo próprio de espeleotemas leva a concluir que esta caverna apresenta uma ornamentação com estágio mais avançado de desenvolvimento.

Figura 60- Modelo de desenvolvimento de ornamentação em encontro de direções da caverna PAX.



A'- Blocos e espeleotemas abatidos, **B**- Sedimentos de piso de caverna, **C**- Zona Vadosa, **D**- Zona de fraturamento, **E**- Solum (epicarste), **F**- Flanco oeste, **F**- Encontro de direções, **Z'**- Zona preferencial de espeleogênese na direção 1, **Z''**- Zona preferencial de espeleogênese na direção 2, **H**- camada de selo.

Fonte: elaborado pelo autor.

13 CONCLUSÃO

Ao avançarmos no entendimento da utilização da ferramenta LIDAR para o estudo da geomorfologia de caverna e ao analisar-se os resultados obtidos e as interpretações realizadas a partir desses resultados é possível concluir que:

A utilização de nuvens de pontos vem como uma forma inovadora de se obter e extrair dados prospectados em cavernas.

Através das nuvens de pontos é possível obter dados morfométricos a partir da conversão dos arquivos .bim em geotif. convertendo-a em um Modelo Digital de Elevação/ superfície.

O LIDAR é uma das ferramentas mais eficientes na obtenção de nuvens de pontos, mas sua precisão dependerá das rotinas de prospecção.

A ornamentação do teto de uma caverna pode ser estabelecida segundo critérios de quantificação, esses critérios são: geometria do teto da caverna baseada na criação do mapa de aspecto, na quantificação e separação dos grupos de espeleotemas, na média do volume de cada grupo de espeleotema e na área total destes grupos.

Em relação a aplicação dos dados nas cavernas estudadas conclui-se que:

A caverna Ioiô é estruturalmente controlada por uma direção preferencial N-S, apresenta uma ornamentação ligada aos espeleotemas em eixo de dobra e que esses sugerem uma zona preferencial de espeleogênese associada a áreas mais permeáveis da caverna.

A caverna Diva de Maura é apresentada como uma caverna onde os processos gravitacionais de colapso de tetos e a estratigrafia controla a ornamentação. Sua ornamentação está associada a uma fase secundária nas fases iniciais da caverna Ioiô.

A caverna Paixão, assim como a Ioiô também é uma caverna estruturalmente controlada, mas sua ornamentação, embora preferencialmente ocorra nas zonas de eixo de dobra e zonas de encontro de direções, também se desenvolvem em áreas onde ocorrem processos gravitacionais semelhantes aos da caverna Diva de Maura.

Isso não significa necessariamente que os espeleotemas da caverna Ioiô são mais recentes que os da caverna Diva de Maura ou Paixão, essa relação

apenas sugere que a ornamentação da caverna Ioiô está em um estágio mais primordial em relação ao tempo atual que do a caverna Diva de Maura, que aparece em um estágio intermediário e a Paixão que apresentam-se em um estágio mais avançado.

As relações de idade das cavernas ou dos espeleotemas estão relacionadas as questões como tipo climático, alterações nos níveis de base locais, eventos tectônicos e só podem ser determinadas por métodos de datações absolutas.

REFERÊNCIAS

- AMARO, V. E. **Análise conjunta de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto do setor extremo nordeste da Província Borborema, nordeste do Brasil, com ênfase nas zonas de cisalhamento dúcteis Neoproterozoicas**. 1998, 393f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. 2 ed. Curitiba: SBEE, 2003.
- AUDRA, P.; D'ANTONI-NOBECOURT, J. C.; BIGOT, J. Y. Hypogenic caves in France: speleogenesis and morphology of the cave systems. **B. Soc. Geol. France**, v. 181, n. 4, p. 327-335, 2010.
- AUDRA, P.; PALMER, A. N. Research frontiers in speleogenesis: Dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. **Acta Carsologica**, v. 3, n. 44, 2015.
- AULER, A. PILÓ, L. B. Introdução à Espeleologia. *In*: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Curso de Espeleologia e licenciamento ambiental. Brasília: USP Editora, 2010. p.7-23.
- AULER, A. S; SMART, P. L. 2003. The influence of bedrock-derived acidity in the development of surface and underground karst: evidence from the precambrian carbonates of semi- arid Northeastern Brasil. **Earth Surf, Process and Landforms**. v. 28, p. 157-168, 2003.
- AULER, A; ZOGBI, L. **Espeleologia**: noções básicas. 1 ed. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005.
- BARBOSA, J. S. F.; SABATÉ, P. Archean and Paleoproterozoic crust of the São Francisco Craton, Bagia, Brazil: geodynamic features. **Precambrian Research**, v. 32, p. 1-27, 2004.
- BIGARELLA, J. J. The barreiras group in northeastern Brazil. **Academia Brasileira de Ciências**. *s.l.*, v. 47. p. 365-393, 1975.
- BONFIM, L. F. C.; CAVEDON, A. D. **Projeto Chapada Diamantina**: Parque Nacional da Chapada Diamantina-BA. Salvador: CPRM/IBAMA, v. 104, p. 182-194, 2005.
- BRITO NEVES, B. B. et al, A discordância angular e erosiva entre os grupos Chapada diamantina e Bambuí (Una) na folha Mirangaba-bahia. **Geologia USP**, São Paulo, v.12, p. 99-114, 2012.
- BRITO NEVES, B. B. et al, The Brasiliano collage in South America: a review. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, September, p. 193-518, 2014.
- CARVALHO, L. M. de.; RAMOS, M. A. B. **Geodiversidade do estado da Bahia**. 3 ed. Salvador: CPRM, 2010.

COELHO, A. H.; BÄHR, H. P. Visualização de dados CAD e LIDAR por meio de Realidade Aumentada. *In: ANAIS DO XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 2005, Goiânia. **Anais**. Goiânia: UFG, 2005. p. 30-42.

CORDEIRO, C. M. **Evolução da rede de drenagem na Bacia do Alto Rio Paraguaçu: capturas fluviais, drenagem transversa e pirataria de bacias**. 2019, 183f. Tese (Doutorado em Geografia) Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

CRUZ, S. C. P.; ALKIMIM, F. F. The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí Belt, São Francisco Craton region, Eastern Brazil. *In: ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS*, 2004, São Paulo. **Anais**. São Paulo: USP, 2004. p. 23-33.

DANDERFER FILHO, A. **Análise estrutural descritiva e cinemática do Supergrupo Espinhaço na Região da Chapada Diamantina (BA)**. 1990, 119f. Dissertação (Mestrado em Geologia) Universidade de Ouro Preto, Minas Gerais, 1990.

EL-SHEIMY, N.; VALECO, C.; HALIB, A. **Digital Terrain Modeling: acquisition, manipulation and applications**. London: Artech House, 2005.

ENNES-SILVA, R. A.; et al. Superposed folding and associated fracturing influence hypogene karst development in Neoproterozoic carbonates, São Francisco Craton, Brazil. **Tectonophysics**, *s.l.* v. 12. p. 1-16, 2015.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistic. *In: CHORLEY, R. J. Spatial analysis in geomorphology*. New York: Routledge, 1972.

FABBRI, S. et al. High-resolution 3-D mapping using terrestrial laser scanning as a tool for geomorphological and speleogenetical studies in caves: an example from the Lessini mountains (North Italy). **Geomorphology**, v. 280, p.16-29, 2016.

FAIRCHILD, I. J.; BAKER, A. **Speleothem Science: from process to past environments**. West Sussex: Wiley-Blackwell, 2012.

FORD, D. C; WILLIAMS, P. W. **Karst geomorphology and hydrology**. Boston: Unwin Hyman, 1989.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P.W. **Karst geomorphology and hidrology**. United Kingdom: Wiley, 2007.

FUMIYA, M. H. et al. Emprego do índice de concentração da rugosidade para a identificação de feições morfológicas associadas as crostas ferruginosas no nordeste do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 3, p. 465-480, 2016.

GAMS, I. **The origin of the term karst in the time of transition of karst (Kras) From deforestation to forestation, proceedings of the international conference**

on environmental changes in Karst Areas (IGU/UIS), Quaderni del Dipartimento di Geografia 13, Niversità di Padova. s. l. p. 1-8 1997.

GAMBARINI, A. **Cavernas no Brasil**. São Paulo: Metalivros, 2012.

GILLI, E. **Karstology**: karst, caves and springs. 1 ed. London: CRC Press, 2015.

GONÇALVES, T. dos S.; LEAL, L. R. B. Potencialidades hídricas no Aquífero Cárstico Salitre na região de Irecê, Bahia. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 32, n. 2, p. 191-199. 2018.

DUBOIS, P. GRELLET, B. Les concrétions des grottes enregistrent climats et séismes. **Pour la Science**, n. 231, p. 28-35. Janvier, 1997.

GUIMARÃES, F. S. et al. Uma proposta para automatização do índice de dissecação do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 1, p. 155-167, 2017.

HASUI, Y. Cráton São Francisco. In: HASUI, Y. et al (org). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012.

HOBSON, R. D. Surface in topography: quantitative approach. *In*: CHORLEY, R. J. **Spatial analysis in geomorphology**. New York: Routledge, 1972.

HOVAD, J. et al. Analysis performed using LIDAR mobile mapping. **International Journal of Mathematics and Computers in Simulation**, s.l. v. 4, p. 9-20, 2013.

HUANG, W. **Spatial dimensions of Tower Karst and Cockpit Karst: A Case Study of Guilin, China**, 100f, 2014. Dissertation of masters. The University of Wisconsin-Milwaukee-E.U.A, December 2014.

HUGGETT, J. R. **Fundamentals of Gemorphology**, 2.Ed. New York-USA: Routledg, 2007.

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.

ISLAM, H. D. **Geometry and stability analysis of caves in Bahia, Brazil**. 2019, 44f, 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências da Terra), Delft University of Technology, 2019.

JAILLET, S. et al. Topographie, representation et analyse morphologique 3D de drains de conduits et de parois du karst. **Imagens et modèles 3D en milieux naturels**, v. 23, p. 119-130, 2011.

JAKUCS, L. **Morphogenetics of karst regions**. Adam Hilgar: Britol, 1977.

JEANNIN P. Y. Neotectonique dans le karst du nord du Lac de Thoune (Suisse). **Ecologia Geol Helvet**, v. 2 p. 323-342, 2013.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São Paulo: Parêntese, 2009.

JOUVES, J. et al. Speleogenesis, geometry and topology of caves: a quantitative study of 3D karst conduits. **Geomorphology**, v. 14, p. 86-106, 2017.

KLIMCHOUK, A. Morphogenesis of hypogenic caves. **Geomorphology**, p. 100-117, 2009.

KLIMCHOUK, A. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. **Acta Carsologica**, v. 44, n. 3, p. 289-313, 2015.

KLIMCHOUK, A. The methodological strength of the hydrogeological approach to distinguishing hypogenese speleogenesis. **Karst Waters Institute**, v. 18, p. 4-12, 2014.

KLIMCHOUK, A. Types and settings of hypogene karst. In: KLIMCHOUK, A. et al. (org). **Hypogene karst regions and caves of the world**. Tuscaloosa: Springer 2017.

KLIMCHOUK, A. B; FORD, D. C. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. In: Klimchouk, A. B. et al. **Speleogenesis: evolution of karst aquifers**. Huntsville: National Speleological Society, 2000.

KUCHENBECKER, M.; REIS, H. L. S.; FRAGOSO, D. G. C. Caracterização estrutural e considerações sobre a evolução tectônica da Formação Salitre na porção central da Bacia de Irecê, norte do Cráton do São Francisco (BA). **Geonomos**, v. 19, n. 2, p. 42-49, 2011.

LAGOEIRO, L. E. **Estudo da deformação nas sequências carbonáticas do Grupo Uma na Região de Irecê, BA**. 1990, 106f. Dissertação (Mestrado) Universidade de Ouro Preto, Minas Gerais, 1990.

LAUREANO, F.V. **Idades de soterramento $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ em grãos de quartzo e o assoreamento de sistemas de cavernas na região de Iraquara (BA): 2 milhões de anos de registro sedimentar no quaternário**. 2014. 132 f. Tese de Doutorado (geociências)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

LAUREANO, F.V. et al Two millions years of river and cave aggradation in NE Brsazil: Impactions for speleogenesis and landscape evolution. **Geomorphology**. v. 273, p. 63-77, 2016.

LAURITZEN, S. E.; LUNDBERG, J. Solutional and erosional morphology. In: KLIMCHOUK, A. et al (ed). **Speleogenesis: evolution of karst aquifers**. Huntsville: National Speleological Society, 2000.

LEÃO, Z. M. A. N.; DOMINGUEZ, J. M. L. Plataformas carbonáticas pré-cambrianas: o exemplo da Formação Salitre, proterozóico superior, estado da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 4, p. 407-421, 1992.

LINO, C. F. **Cavernas: o fascinante Brasil subterrâneo**, 2.ed. São Paulo: Gaia, 2009.

LINO, C. F.; ALLIEVI, J. **Cavernas brasileiras**. São Paulo: Edições Melhoramento, 1980.

LIU, J. et al. Extraction of Lunar Domes from Chang'E-2 Data with new method. **Icarus**, v. 321, p. 20-33, 2018.

LONGLEY, P. A. et al. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MONTEIRO, F. A. D. **A espeleologia e as cavernas no Ceará: Conhecimento, Proteção ambiental e panorama atual**. 170f, 2014. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 170f, 2014.

MORO, R de C.; CENTENO, J. A. S. **Filtragem e classificação de nuvens de pontos para a geração de modelo digital de terreno**. In: ANAIS DO III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO. Recife, PE, 2010, p. 16-29.

MOURA, P. E. F. **Evolução geomorfológica do relevo cárstico do município de Martins-Rio Grande do Norte**. Fortaleza, 2017, 153f. Dissertação (mestrado em Geografia) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

OLIVEIRA, G. de C. et al. Automated mapping of permanente preservation areas on Hilltops. **Cerne**, v. 22, n. 1, p. 111-120, 2016.

PALMER, A. N. **Cave Geology**. Dayton-USA: Cave Books Editions, 2007.

PALMER, A. N. Hydrochemical interpretation of cave patterns in the Guadalupe Mountains, New Mexico. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 62, n. 2, p. 91-108, 2000.

PEREIRA, A.; GOMES, A.; PEREZ-ALBERTI, A. Vantagens da utilização de dados ALS (LIDAR) na caracterização morfológicas das vertentes costeiras da Galiza (Espanha): aplicação ao setor de Mougás. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, n. 4, p. 220-235, 2013.

PIKE, R.; EVANS, I.; HENGL, T. Geomorphometry: a brief guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. (eds). Geomorphometry: concepts, software and applications. **Geological Society of American Bulletin**, v. 1, p. 1-707, 2009.

PILÓ, L. B. Revisão de Literatura: Geomorfologia cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, n.1 p. 88-102, 2000.

PINHEIRO, H. S. K. et al, Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. **Pesquisa Agropecuária**, n.9, v. 47, p. 1384-1385, 2016.

PINHEIRO, H. S. K. et al. Modelos de elevação para obtenção de atributos topográficos utilizados em mapeamento digital de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 62-74, 2012.

PONTERS, C. C. C. et al, Flow pathways in multiple-direction fold hinges: implications for fractured and karstified carbonate reservoirs. **Jornal of structural geology**, v 146, p. 60-75, 2021.

RADAMBRASIL. **Projeto: folha SD**. Rio de Janeiro: IBGE, 1981.

REIS, H. L. S. et al. O cinturão epidérmico de antepaís da Bacia de Irecê, Cráton São Francisco: principais elementos estruturais e modelagem física analógica. **Revista Geologia USP**, v. 13, n. 4, p. 125-139, 2013.

ROBSON-BROWN, K. A.; et al. An automated laser scan survey of the Upper Paleolithic rock shelter of Cap Blanc. **Journal Archeol**, v 28, p. 283-289, 2001.

RODRIGUES, W. F.; MAIA, R. P. Condicionamento Morfoestrutural dos relevos no entorno do distrito de Taperuaba, sertão central do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 20, n. 1, 2019.

RODRIGUES, M. L., et al. **Glossário de termos cársticos**. Lisboa: Edições Colibri, 2007.

RONGIER, G.; COLLON-DROUAILLET, P.; FILIPPON, M. Simulation of 3D karst conduits with na object-distance based method integrating geological knowledge. **Geomorphology**, p. 152-164, 2014.

RUBBIOLI, E. et al. **Cavernas: atlas do Brasil subterrâneo**. Brasília: ICMBio, 2019.

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índices desconcentração da rugosidade: uma proposta para o mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, p. 47-60, 2014.

SANTOS, R. C. dos.; GALO, M. Classificação de nuvens de pontos laser utilizando o conceito de análise de componentes principais e o fator de não ambiguidade. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 2, p. 196-216, 2016.

SCALEANTE, J. A. B; SCALEANTE, O. A. F. **curso básico de espeleologia**. Campinas: GESCAMO, 2010.

SCHOBENHAUS, C. As tafrogêneses superpostas Espinhaço e Santos Onofre, estado da Bahia: revisão e novas propostas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 4, p. 265-276, 1996.

SHANOV, S.; KOSTOV, K. **Dynamic tectonics and karst**. Tuscaloosa: Springer, 2015.

SILVA, F. J. L. T. da.; ROCHA, D. F.; AQUINO, C. M. S. de. Geografia, geotecnologias e nas novas tendências de geoinformação: indicação de estudos realizados na região Nordeste. **InterEspaço**, v. 2, n. 6, p. 176-197, 2016.

SILVA, J. R.; MOURA, A. C. M. Delimitação automática de sub-bacias hidrográficas no município de Ouro Preto-MG. In: **IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**. Anais, Paraná, 2013.

SMART, P. L.; WHITAKER, F.F. Karst processes, hydrology and porosity evolution. In: Wright, V. P, Estesban, M. e SMART, P. L. (Ed) **Paleokastic and paleokarstic reservoirs**. London: Occasional Publication, 1991.

SOUSA, T e AULAR, A. org. **O carste de Vazante-Paracatu-Unai**: Revelando importâncias, recomendando refúgios, Belo Horizonte, Carste e ciência, Meio ambiente, 2018.

SUGUIO, K. **Geologia do quaternário e mudanças ambientais**. São Paulo, Oficina de textos, 2010.

TRAVASSOS, L. E. P. Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica. Brasília: ICMBio, 2019.

VERESS, M. **Covered Karsts**. Szombathely- Hungary: Springer, 2016.

WAELE, J. D. et al. Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave. **Geomorphology**, p. 47-61, 2018.

WALTHAM, T. fengcong, fenglin, cone karst and tower karst. **Cave and karst Science**, v. 35, n. 3. p. 77-88. 2008.

WEIBRING, P.; EDNER, H.; SVANBERG, S. Versatile mobile lidar system for environmental monitoring. **Applied Optics**, v. 42, n. 18, p. 3583-3594, 2003.

WESTERMAN, A. R.; PRINGGLE, J. K.; HUNTER, G. Preliminary LIDAR survey results from Peak Cavern Vestibule, Derbyshire, UK. **Cave and Karst Science**, v. 30, n. 3. P. 129-130, 2003.

WESTOBY, M. J. et al. "Structure-from-motion" photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.

WHITE, W. B. **Geomorphology end hydrology of karst terrains**. New York-USA: Oxford University Press. 1988.

WILLIAMS, K. et al. Synthesis of transportation applications of mobile LIDAR. **Remote Sensing**, v. 5, p. 4652-4692, 2013.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. **Utilização da tecnologia LIDAR para obtenção de altura individual e delimitação automática de copas em**

povoamento de *Pinus sp.* In: ANAIS DO XIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. Florianópolis, Brasil, 2007.

ZHANG, G. et al. **Smartcavedrone: 3D cave mapping using UAVs as robotic co-archaeologists**. International Conference on Unmanned Aircraft Systems-ICUAS, Miami, FL, USA, 2017.

**APÊNDICE A - QUADRO COMPILATÓRIO DOS MODELOS
TEÓRICOS UTILIZADOS NO TRABALHO**

Descrição dos Modelos	Autor	Abrangência	Função do modelo	Ênfase	Comentário
Sistema Cárstico Abrangente	Ford e Williams (1989).	Regional (rocha carbonática e entorno)	Descritiva e Funcional	Hidroológica e morfológica	Modelo que descreve e classifica o carste de acordo com sua função no relevo
Diferentes Tipologias Cársticas	Gvozdetkiy, (1965) apud Veress, (2016).	Regional (apenas a rocha carbonática)	Descritiva	Morfológica	Modelo que classifica e descreve grandes ocorrências de relevo cárstico
Sistema Hidrogeológico Cárstico	Veress (2016).	Local (escala de afloramento)	Descritiva e Funcional	Hidroológica e morfológica	Descreve as interações entre os fluxos de água do exocarste e endocarste
Relação entre o carste epigênico e hipogênico com o clima e a denudação	Auler e Smart (2003)	Regional (apenas a rocha carbonática)	Evolutiva	Climática	Gráfico que estabelece e compara a relação evolutiva entre o carste hipogênico e o epigênico a partir da dependência climática
Sistema de Recarga	Ford e Williams (2007).	Local (escala de afloramento)	Funcional e descritiva	Hidroológica	Modelo que demonstra os principais tipos de entradas de fluxos de água em caverna
Principais Feições Exocársticas	Moura (2017) compilado de Bigarella et al (1994); Auler e Zogbi (2005); Ford e Williams, (2007); Sugio (2010);	Regional (apenas a rocha carbonática)	Descritiva	Morfológica	Descreve as feições cársticas com base em padrões de relevo excepcionalmente exocársticas

	Piló, (2000).								
Tipos de Passagens e Padrões em Cavernas	White (1988).	Local (escala de afloramento)	Descritiva	Morfológica	Descreve as principais formas de desenvolvimento de condutos no conjunto da caverna a partir de sua planta baixa.				
Formas de Passagens (padrões internos a partir de cortes transversais)	Adaptado de White (1988) por Moura (2017).	local (Escala de afloramento)	Descritiva	Morfológica	Descreve as principais formas de passagens ou condutos de cavernas a partir da análise de perfis transversais.				
Modelo Evolutivo Para Carste Geossinclinal	Palmer (2007).	Regional (rocha carbonática e entorno)	Evolutiva	Morfológica	Modelo que demonstra como áreas de carste deformadas são rebaixadas a partir de processos de denudação do relevo.				
Modelo Evolutivo dos <i>Femgcong</i> s e <i>Feglins Karsts</i> (com base na maturidade do carste)	Waltham (2011).	Regional (apenas a rocha carbonática)	Evolutiva e climática	Climática e morfológica	Modelo que demonstra a ciclicidade dos relevos cársticos submetidos a climas úmidos.				
Desenvolvimento do relevo cárstico em relação a variação climática e mudanças no nível de base	Moura (2017).	Regional (apenas a rocha carbonática)	Evolutiva e climática	Climática e morfológica	Modelo que demonstra o rebaixamento do relevo a partir das variações de climas úmidos para áridos ou semiáridos.				
Processos de evolução no interior da caverna baseado no preenchimento, mobilização por sedimentos e recobrimentos por espeleotemas.	Adaptado de Fairchild e Baker (2012)	Micro (escala de amostra)	Evolutiva	hidrológica e Morfológica	Originalmente representa uma caverna na eslovênia (<i>Otoska Jama cave</i>) foi simplificado e adaptado pelo autor, para simular os complexos processos que ocorrem no interior da caverna, levando-se em conta a mudança de				

						nível de base, os processos de erosão, os processos gravitacionais de colapso, o carreamento de sedimentos e o desenvolvimento de espeleotemas.
Exemplos de modificadores em espeleotemas a partir do gotejamento	Adaptado de Fairchild e Baker (2012) apud Gams (1981)	Micro (escala de amostra)	evolutiva	hidrológica e Morfológica	Demonstra como a frequência e a intensidade do gotejamento afeta a morfologia do espeleotema	
Gotejamento formando espeleotemas	Elaborado pelo autor do presente trabalho Baseado em Travassos 2019, Gilli (2015) e Palmer (2007)	Micro (escala de amostra)	evolutiva	hidrológica e Morfológica	Demonstra como o gotejamento forma os espeleotemas a partir das camadas de precipitação de carbonato de cálcio	
Modelo de variações de espeleotemas de teto a partir da dinâmica evolutiva da caverna	Elaborado pelo autor do presente trabalho baseado em Jeannim (1990), Quinf (1997), Shamov e Kostov (2015) e Guellet (1997).	Micro (escala de amostra)	Evolutiva	hidrológica, Morfológica e tectônica	Demonstra como processos gravitacionais, erosivos e de alteração de nível de base e de nível freático alteram as formas dos espeleotemas	
Modelo de carste hipogênico	Klimchouk (2007)	Local (escala de afloramento)	descritiva e funcional	hidrológica, Morfológica e tectônica	Demonstra como ocorre o desenvolvimento de cavernas hipogênicas a partir dos fluxos hidrotermais que ascendem através de feeders formando feições como cúpulas.	

Apêndice I- Quadro compilatório dos modelos teóricos utilizados no trabalho. Elaborado pelo autor

APÊNDICE B - GRÁFICOS DE MORFOMETRIA DOS GRUPOS DE ESPELEOTEMAS DA IOI

Gráfico 04

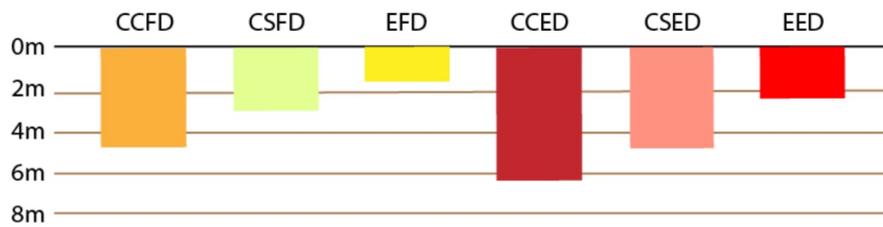


Gráfico 05

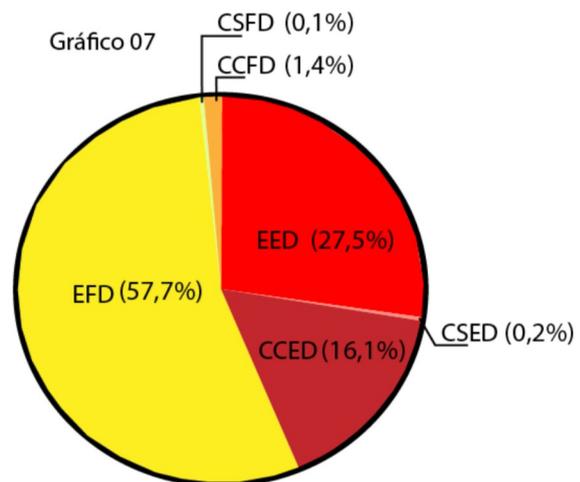
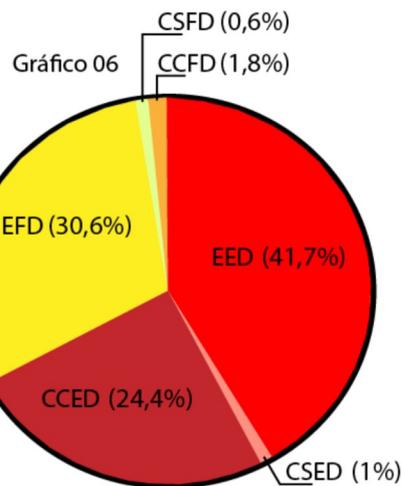
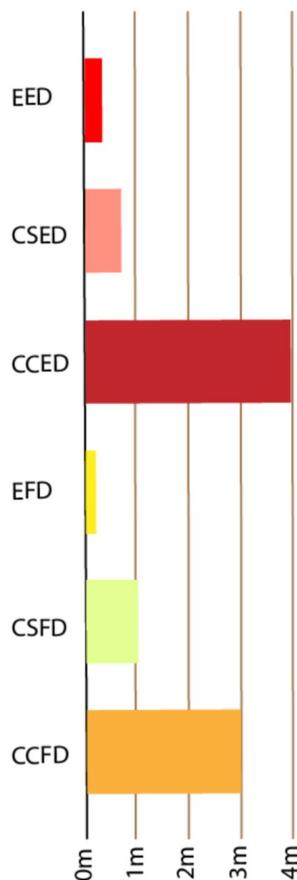


Gráfico 04- comprimento médio dos grupos de espeleotemas, Gráfico 05- comprimento médio da base dos grupos de espeleotemas, Gráfico 06- média das áreas dos grupos de espeleotemas, Gráfico 07- soma das áreas dos grupos de espeleotemas

Elaborado pelo autor

APÊNDICE C - GRÁFICOS DE MORFOMETRIA DOS GRUPOS DE ESPELEOTEMAS DA DDM

Gráfico 08

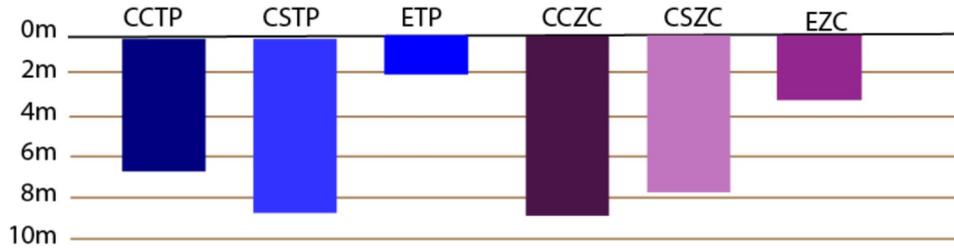


Gráfico 09

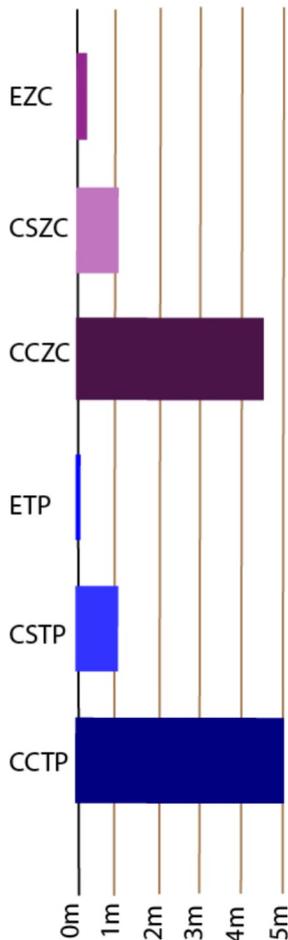


Gráfico 10

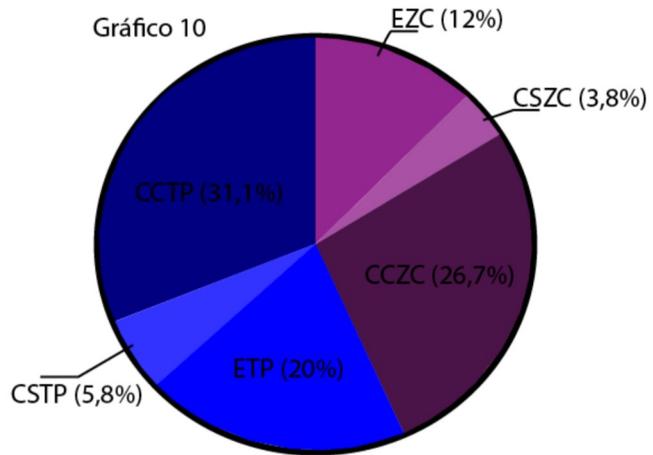


Gráfico 11

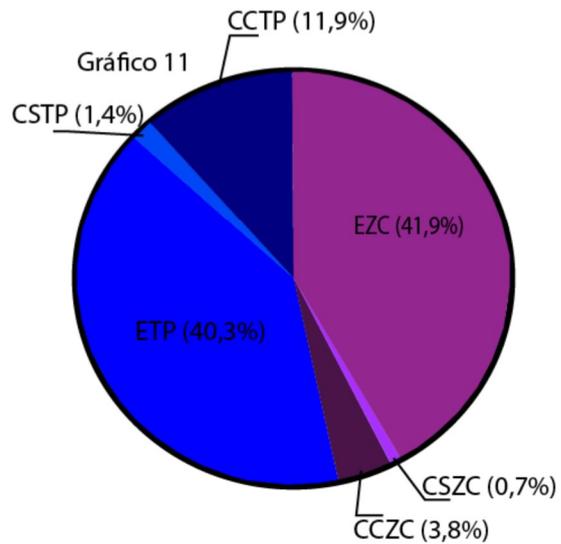


Gráfico 08- comprimento médio dos grupos de espeleotemas, Gráfico 09- comprimento médio da base dos grupos de espeleotemas, Gráfico 10- média das áreas dos grupos de espeleotemas, Gráfico 11- soma das áreas dos grupos de espeleotemas.

Elaborado pelo autor

APÊNDICE D - GRÁFICOS DE MORFOMETRIA DOS GRUPOS DE ESPELEOTEMAS DA PAX

Gráfico 12

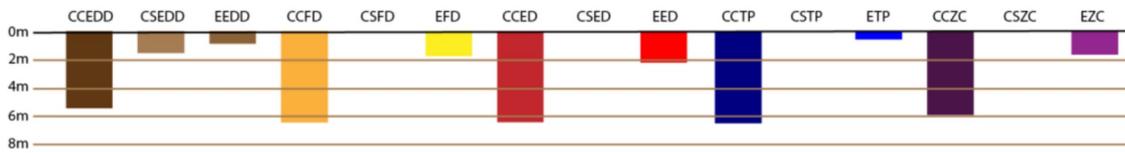


Gráfico 13

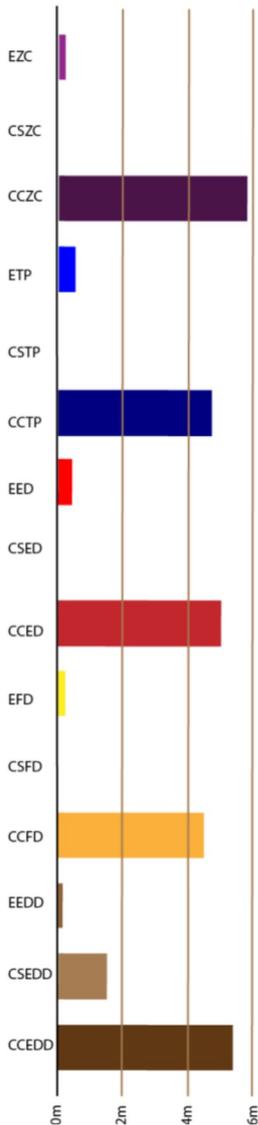


Gráfico 14

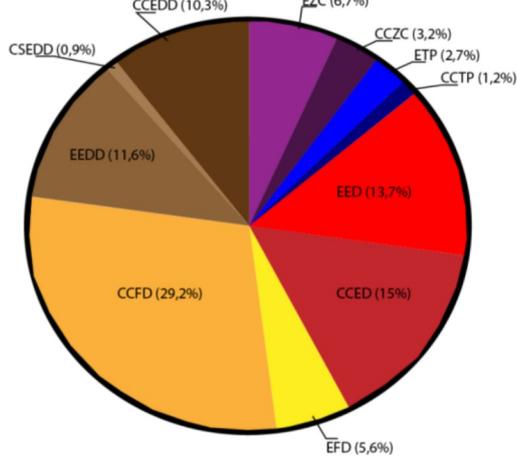


Gráfico 15

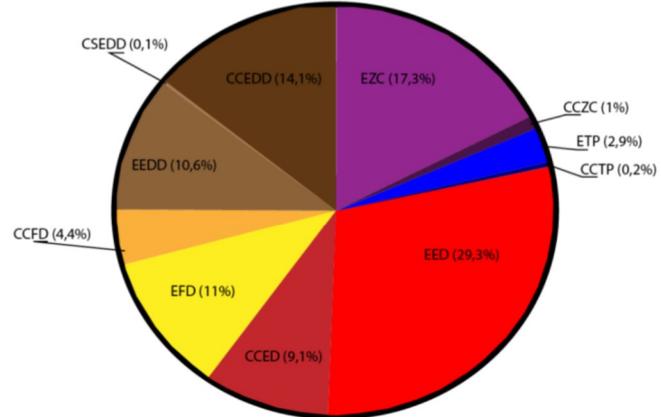
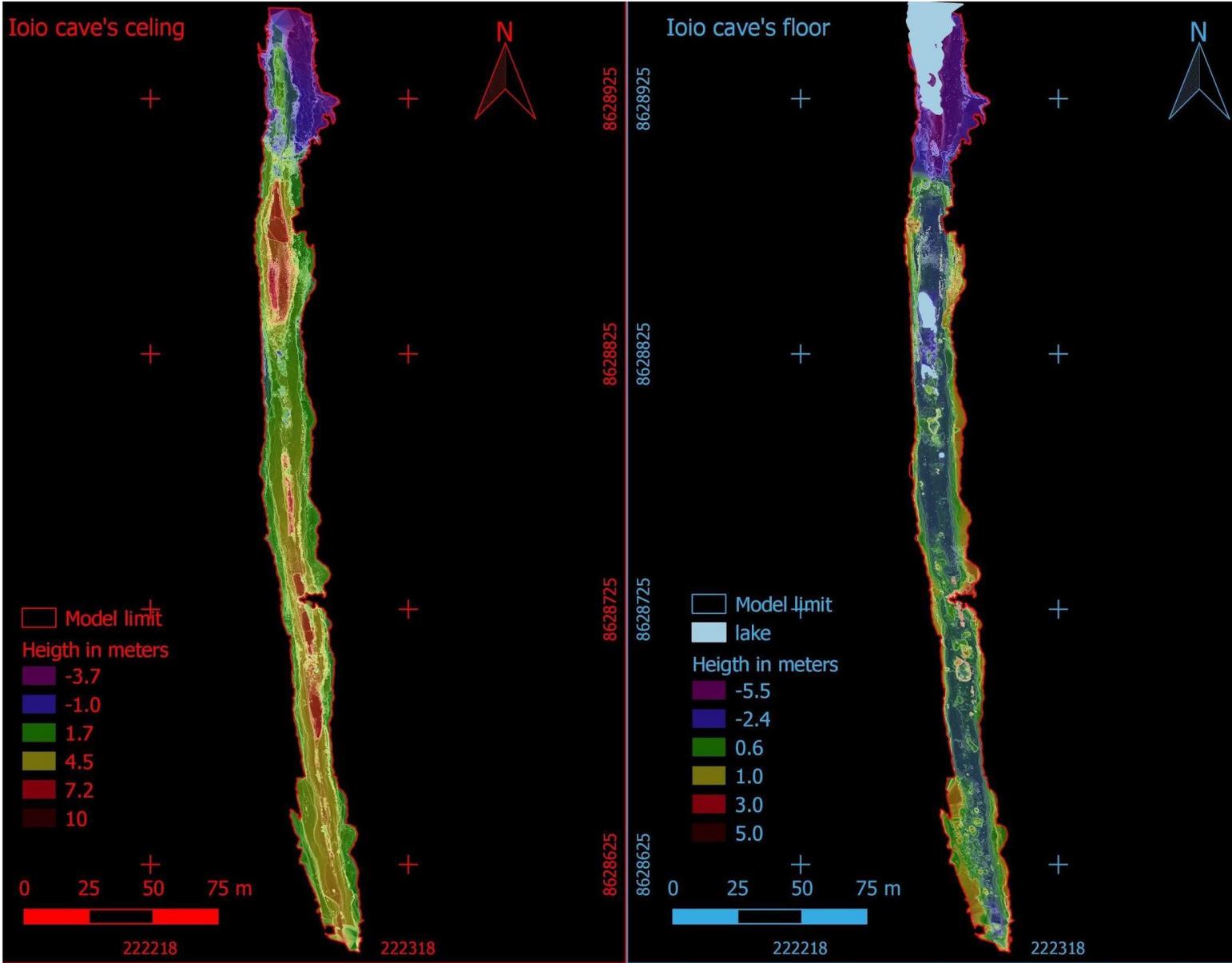


Gráfico 12- comprimento médio dos grupos de espeleotemas, Gráfico 13- comprimento médio da base dos grupos de espeleotemas, Gráfico 14- média das áreas dos grupos de espeleotemas, Gráfico 15- soma das áreas dos grupos de espeleotemas.

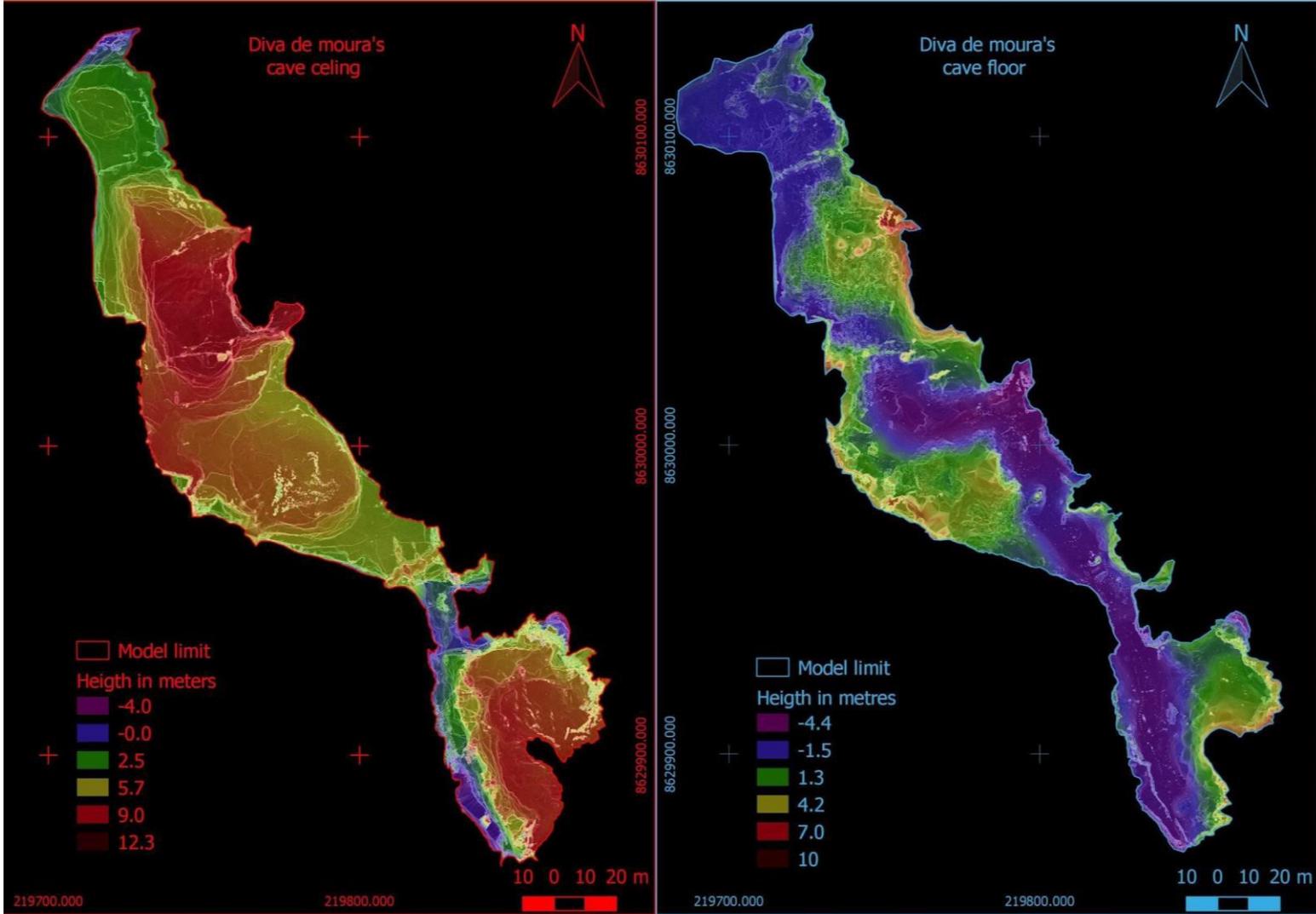
Elaborado pelo autor

APÊNDICE E - MAPA DE ALTIMETRIA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA IOI



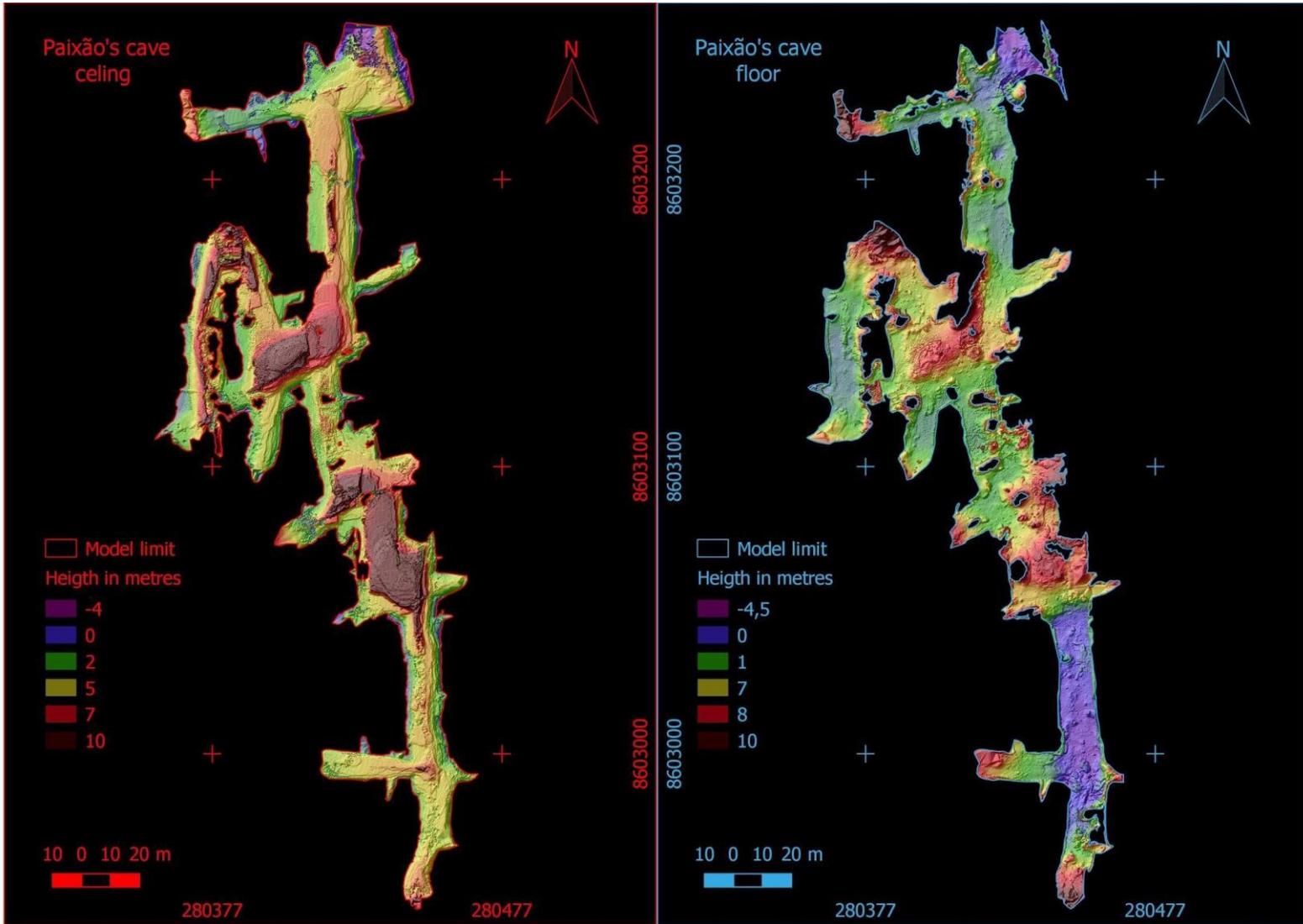
Elaborado pelo autor

APÊNDICE F - MAPA DE ALTIMETRIA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA DDM



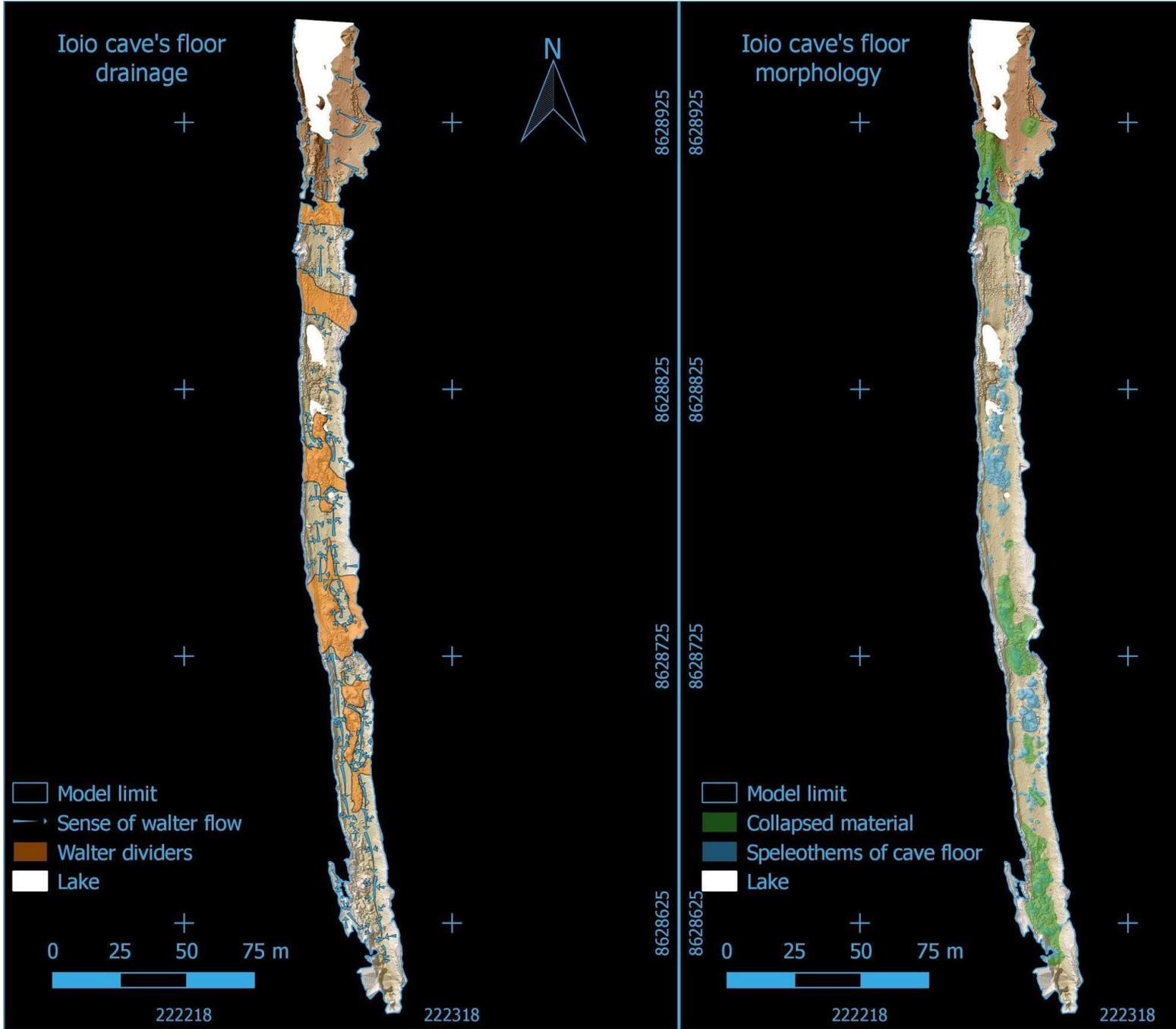
Elaborado pelo autor

APÊNDICE G - MAPA DE ALTIMETRIA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA PAX



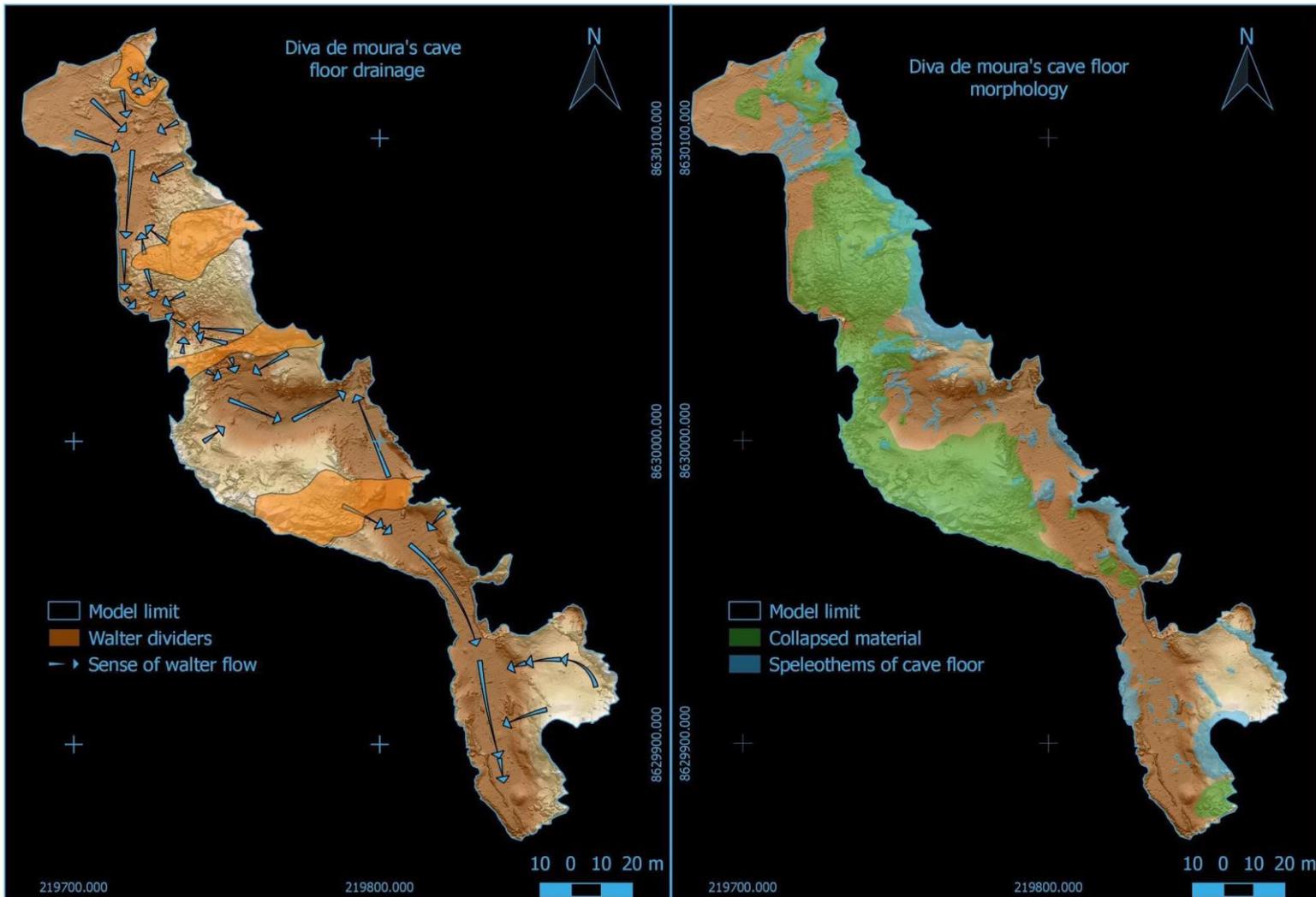
Elaborado pelo autor

APÊNDICE H - MAPA DE FLUXOS E MORFOLOGIA BÁSICA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA IOI



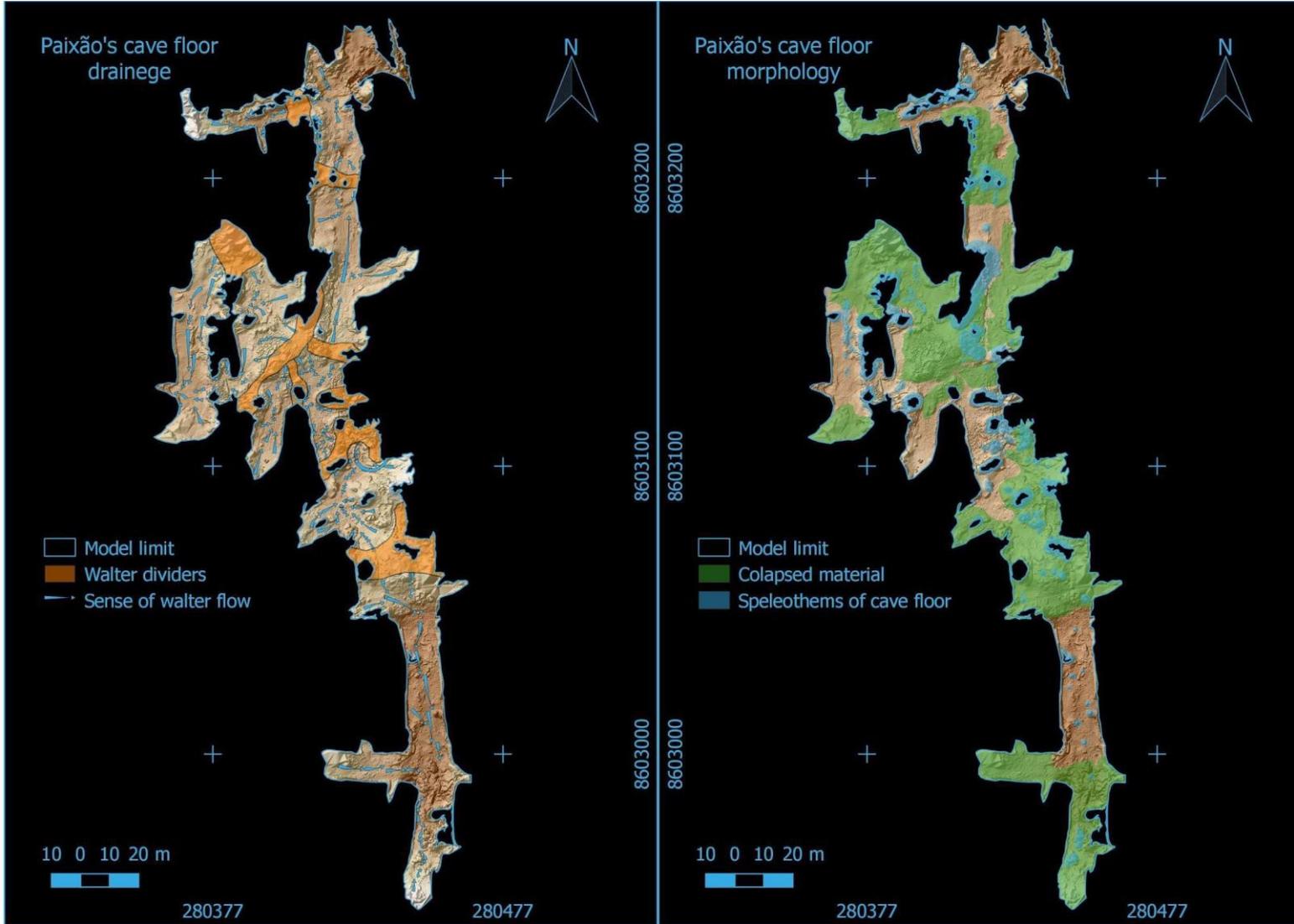
Elaborado pelo autor

APÊNDICE I - MAPA DE FLUXOS E MORFOLOGIA BÁSICA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA DDM



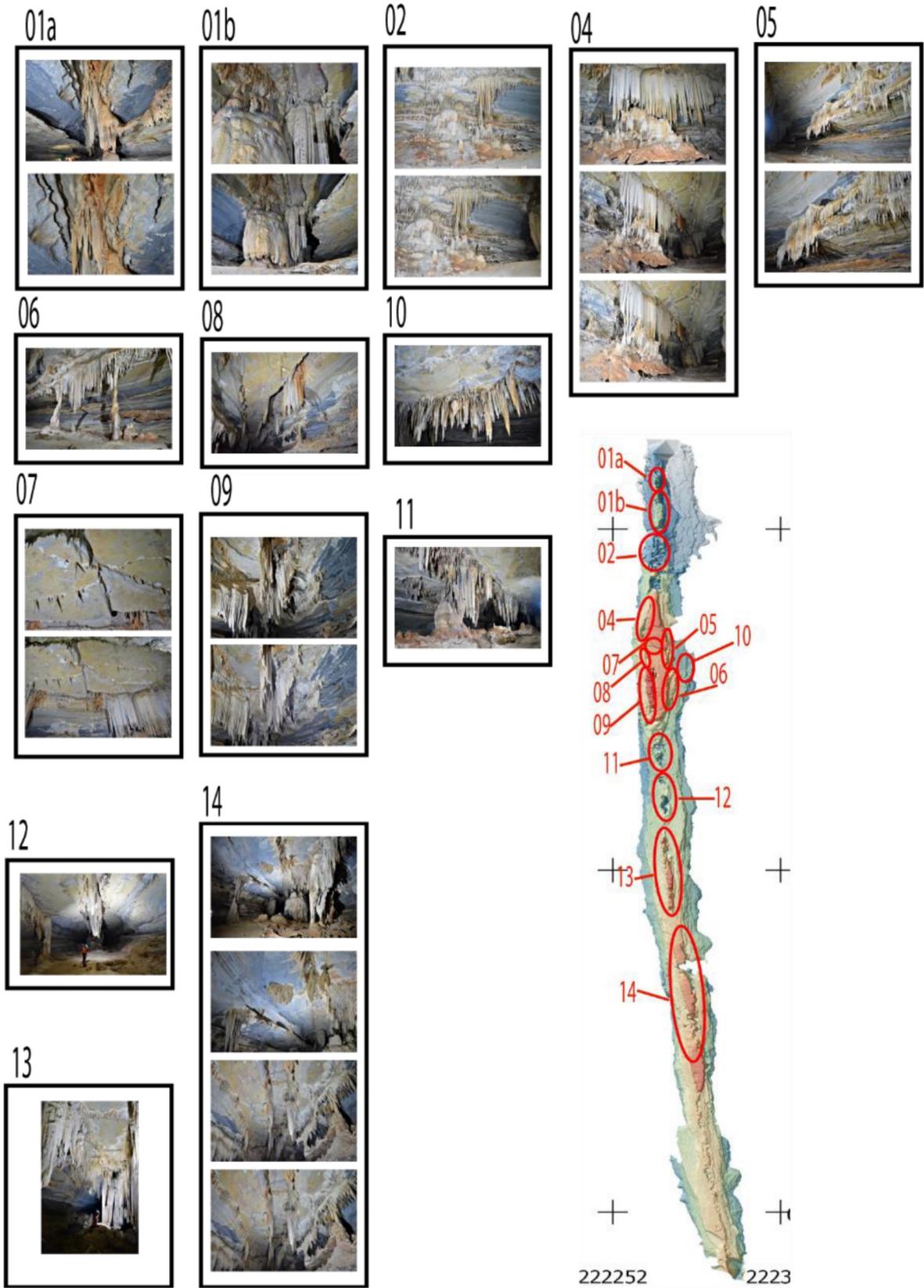
Elaborado pelo autor

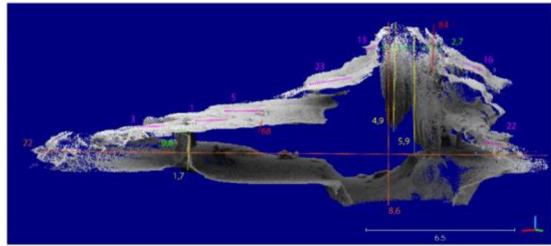
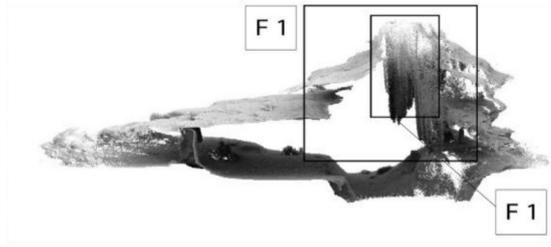
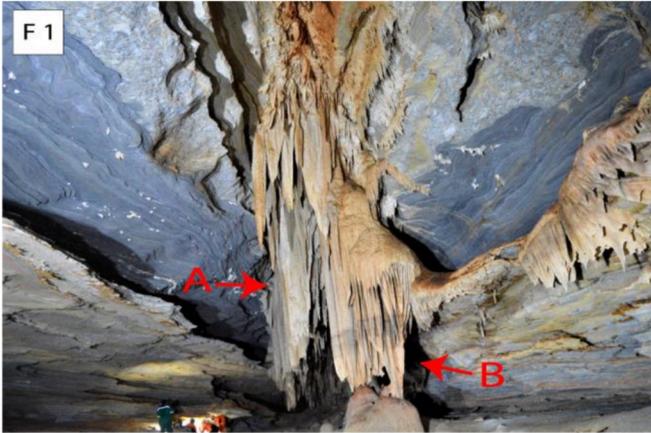
APÊNDICE J - MAPA DE FLUXOS E MORFOLOGIA BÁSICA DO TETO E DA PLANTA DA CAVERNA PAX



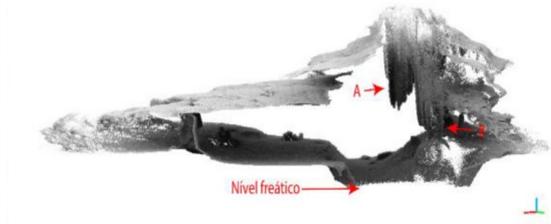
Elaborado pelo autor

APÊNDICE K- MAPAS DE LOCALIZAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS E RECORTES 3D UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DE MEDIDAS E DESCRIÇÕES DA CAVERNA IOI

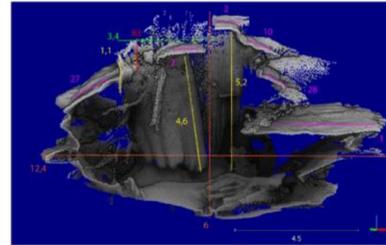
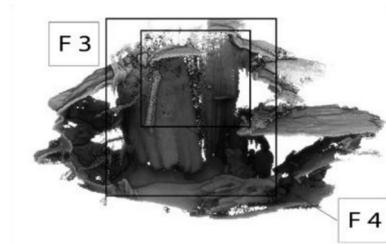
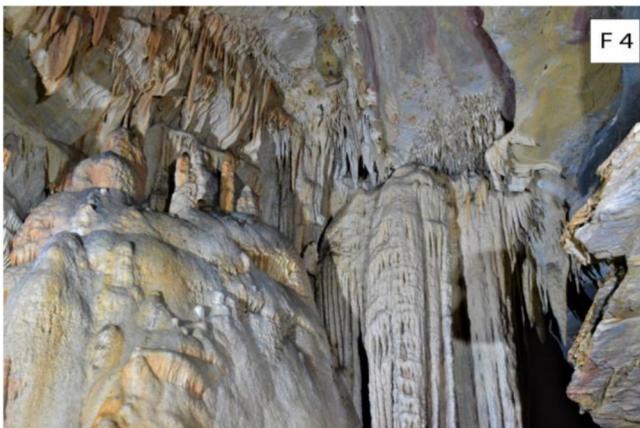
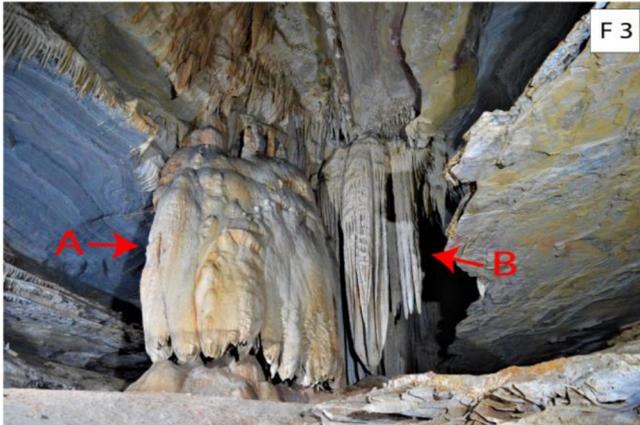




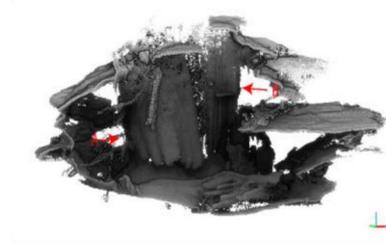
- Inclinação
- Abertura
- Plano da fratura
- Altura e Largura máxima
- Comprimento do espeleotema



Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no centro do conduto, conjunto. Coluna e escorrimento.
 Tipo de teto: rugoso;
 Tipo de conduto: Tubo elíptico alargado na base formado em eixo de dobra
 Descrição geral: Conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.



■ Inclinação em graus ■ Plano da fratura em graus ■ Comprimento do espeleotema
■ Abertura (m) ■ Altura e Largura máxima metros

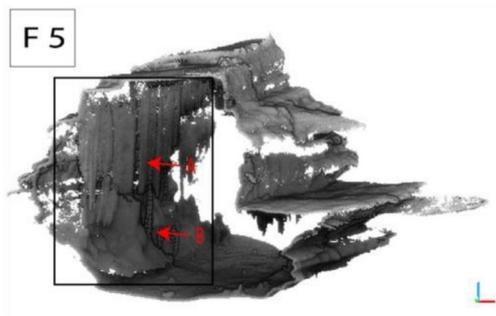


Tipo de espeleotema: Estalactites alinhadas no centro do conduto, conjunto com coluna e escorrimento. Estalactites alinhadas no teto, tamanho consistente (quina superior).

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.



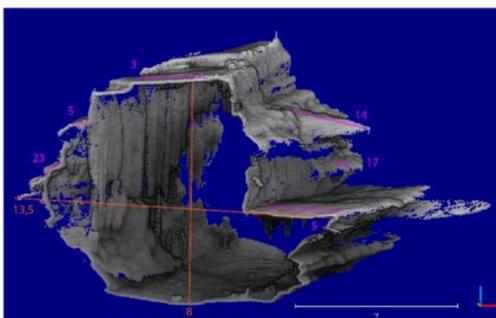
- Inclinação em graus
- Abertura (m)
- Plano da fratura em graus
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

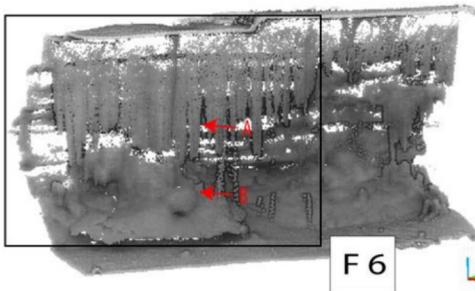
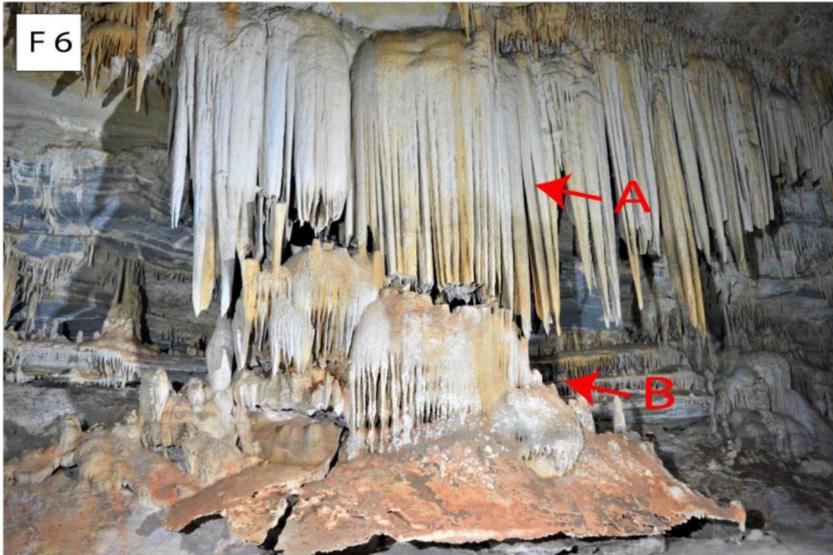
Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no canto superior esquerdo (tamanho variável), entrecalado por colunas. Todo o conjunto está suspenso (evidência de paleo nível de piso)

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.





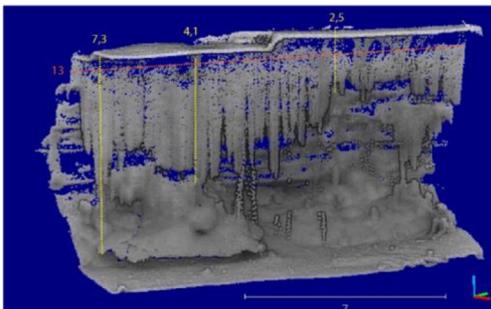
- Inclinação em graus
- Plano da fratura em graus
- Abertura (m)
- Comprimento do corte
- Comprimento do espeleotema

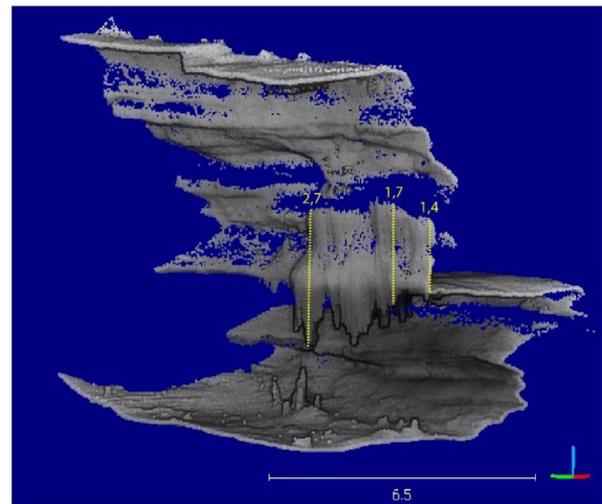
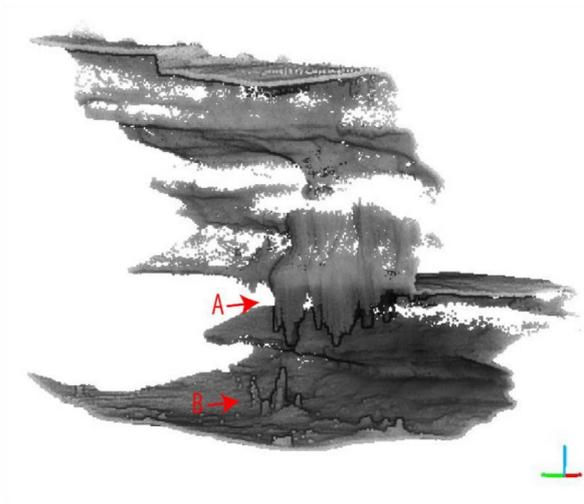
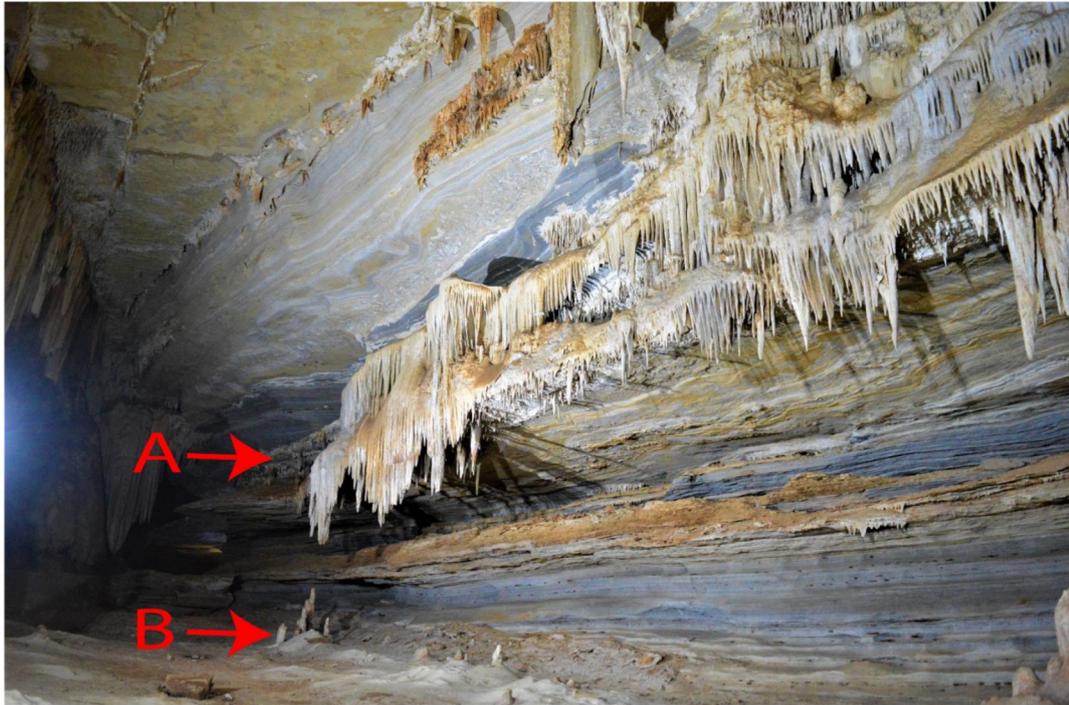
Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no canto superior esquerdo (tamanho variável), entrecalado por colunas. Todo o conjunto está suspenso (evidência de paleo nível de piso)

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra

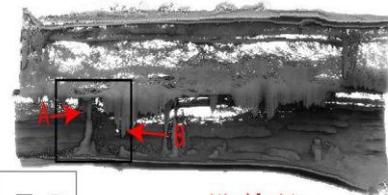
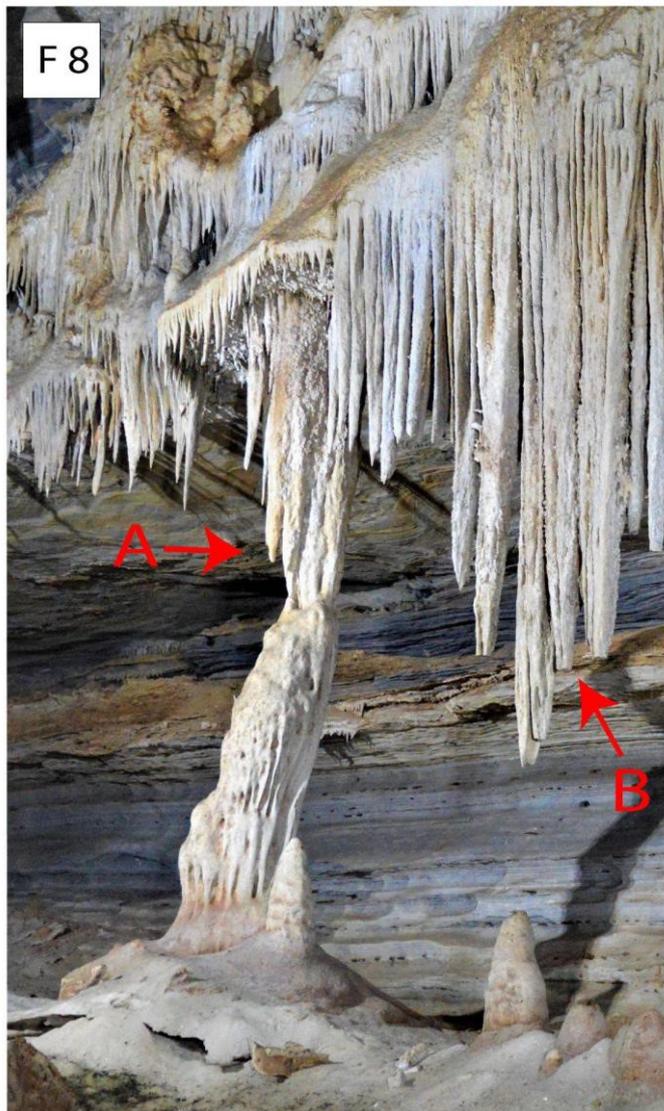
Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.





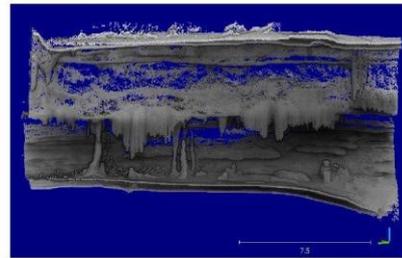
■ Comprimento do espeleotema

Tipo de espeleotema: estalactites alinhadas com alturas variáveis
 OBS: todas as demais condições e descrições se repetem das feitas na F5 e F6,
 pois trata-se da parede em frente a parede descrita em F5 e F6



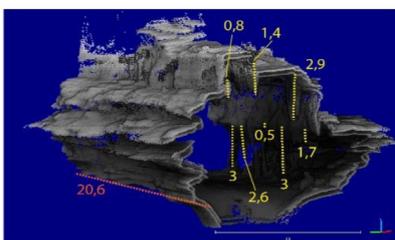
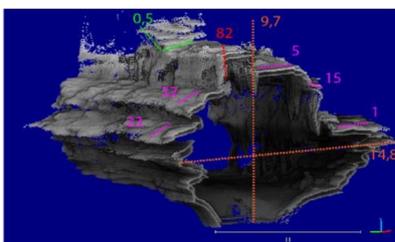
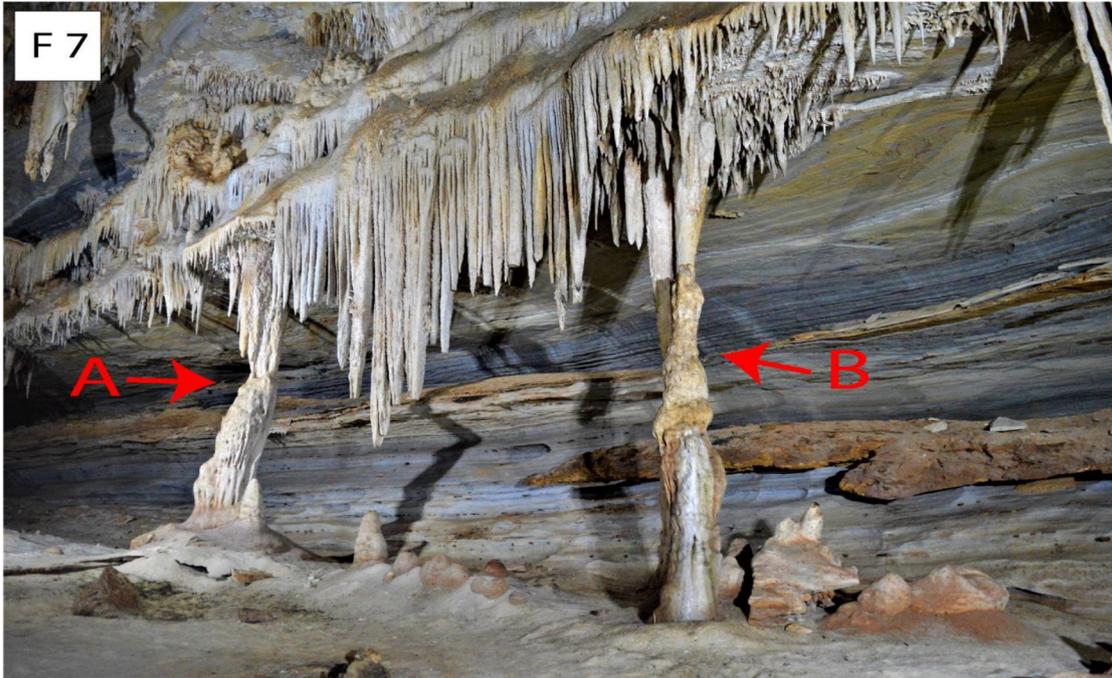
F 8

Nível freático



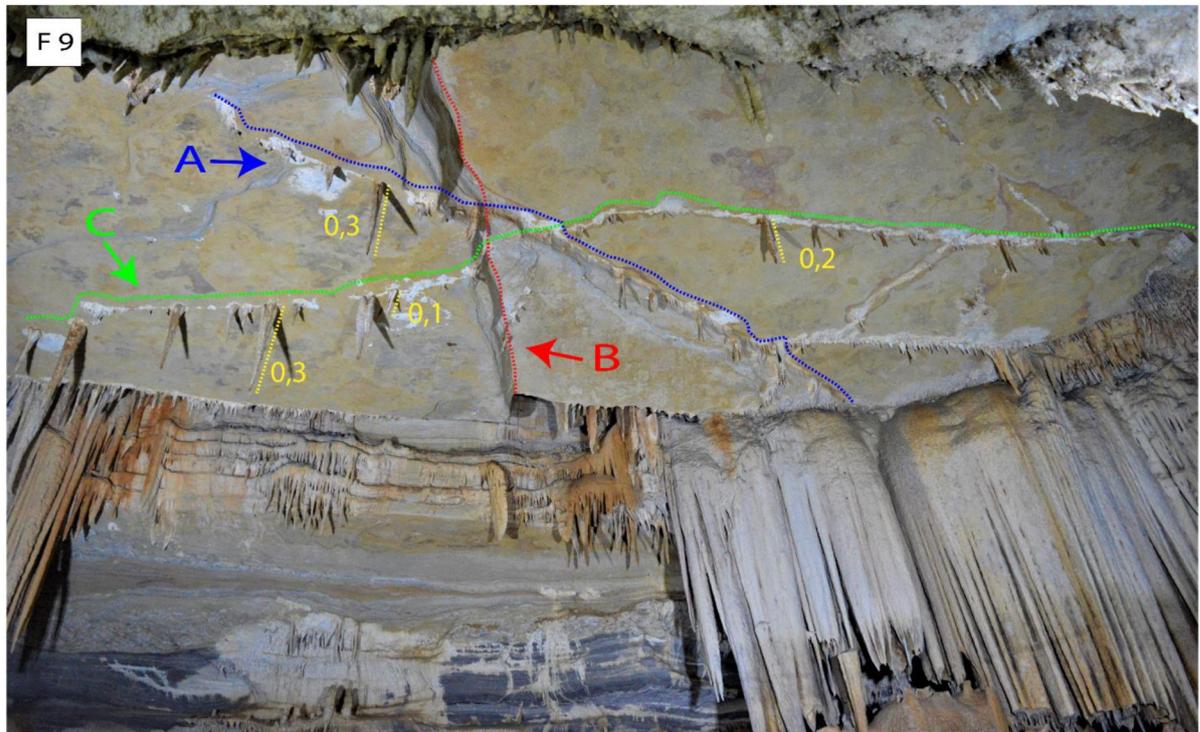
Tipo de espeleotema: estalactites alinhadas com alturas variáveis

OBS: todas as demais condições e descrições se repetem das feitas na F7, pois trata-se da parede em frente a parede descrita em F7

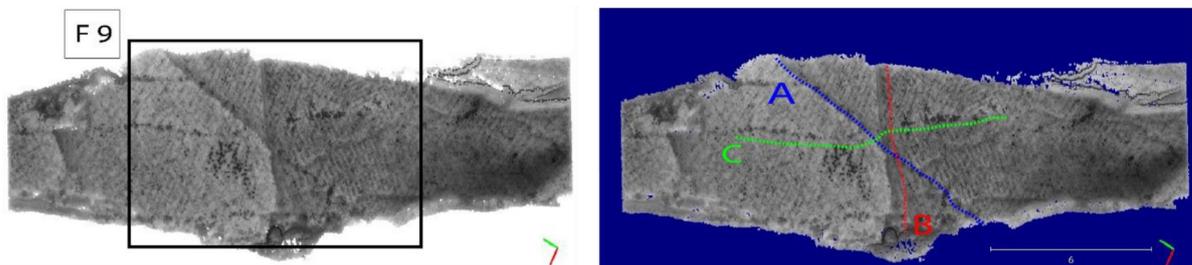


- Inclinação em graus
- Abertura (m)
- Plano da fratura em graus
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados na lateral do conduto, conjunto com coluna e escorrimento tamanho variavel. Estalactites alinhadas no teto, tamanho consistente (quina superior).
 Tipo de teto (rugoso):
 Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra
 Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.



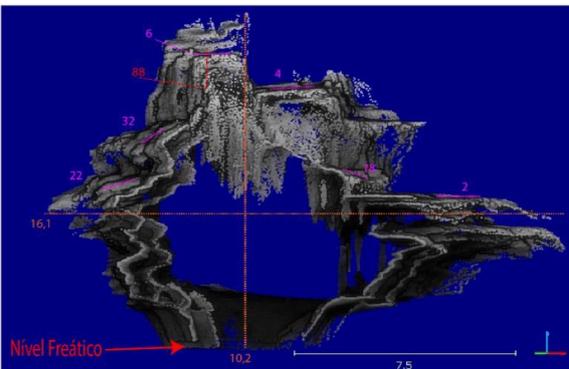
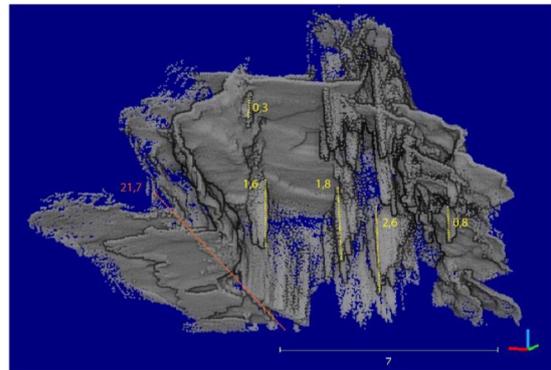
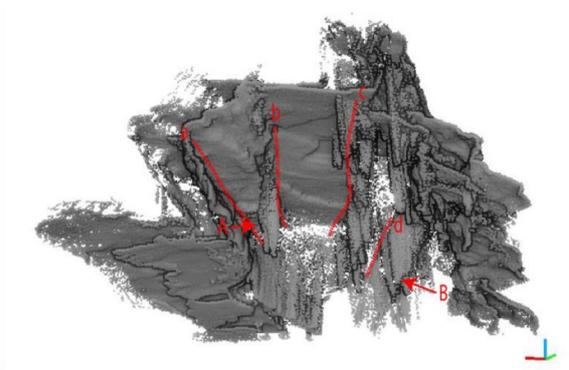
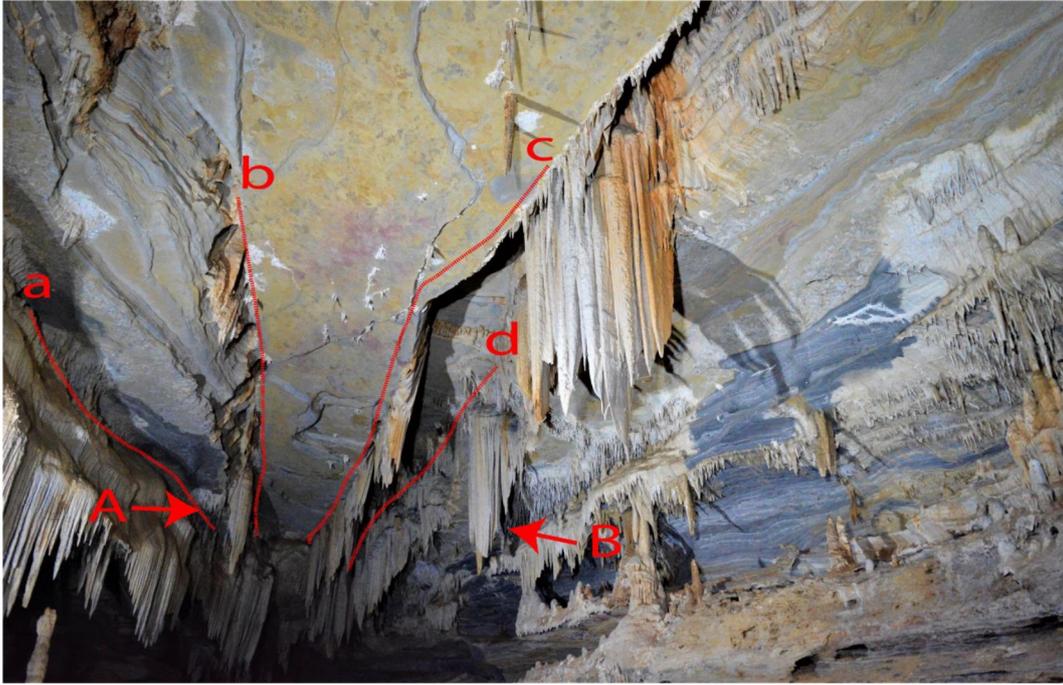
■ Comprimento do espeleotema



OBS: as linhas pontilhadas (azul, vermelha e verde) indicam as estruturas (fraturas) no teto.

Tipo de espeleotema: estalactites alinhadas com alturas variáveis

OBS: todas as demais condições e descrições se repetem das feitas na F7, pois trata-se da parede em frente a parede descrita em F7



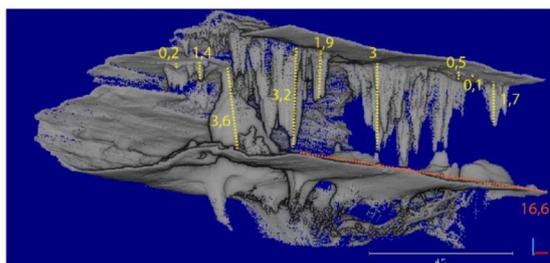
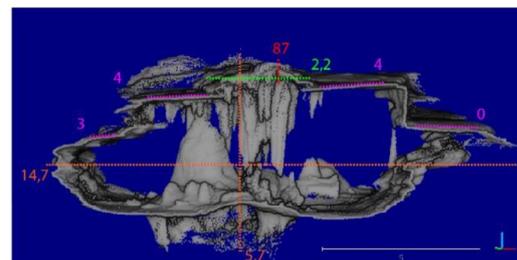
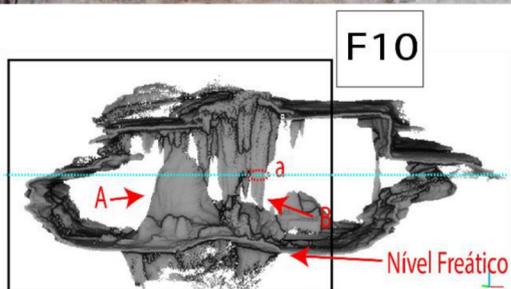
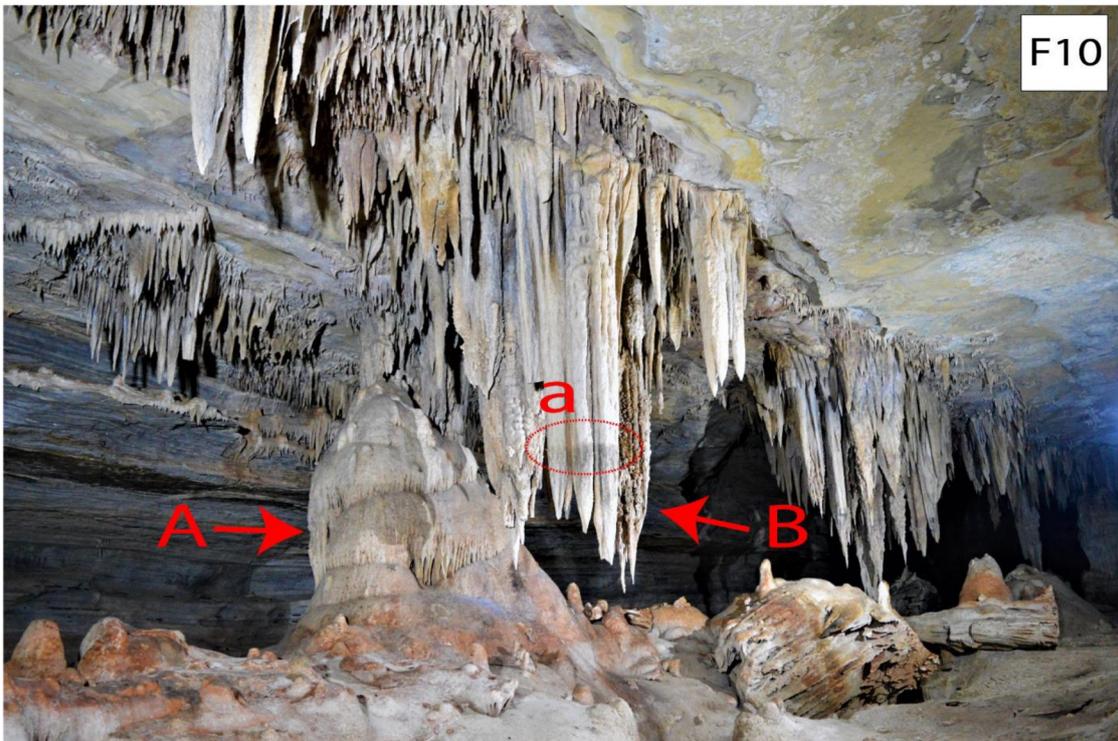
- Inclinação em graus
- Abertura (m)
- Plano da fratura em graus
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites alinhadas em quatro conjuntos diferentes no centro, lateral direita e lateral esquerda. Todos os conjuntos possuem tamanhos de espeleotemas variáveis.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.



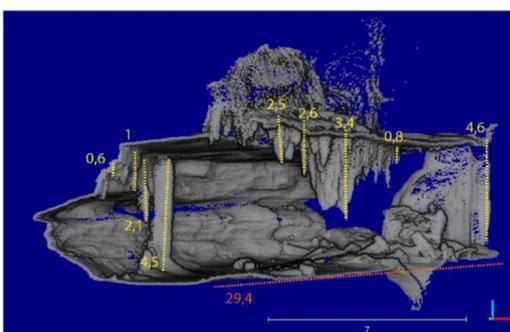
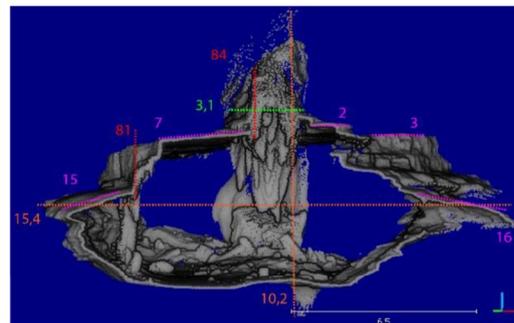
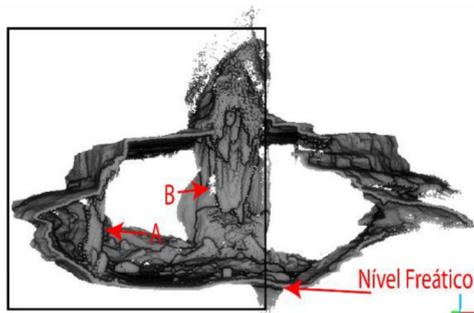
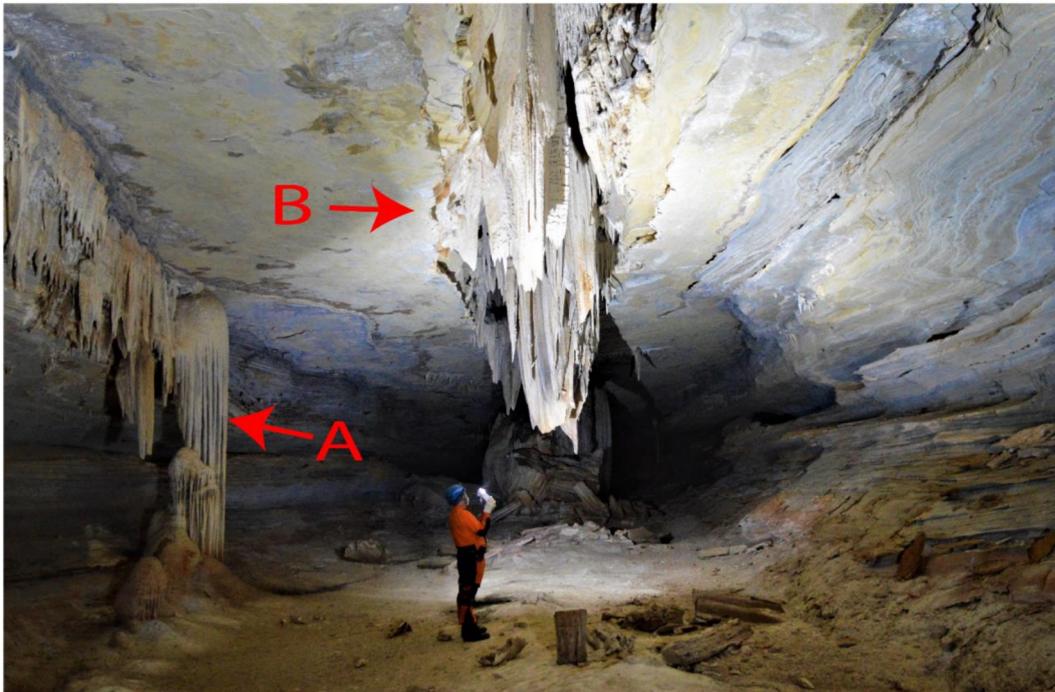
- | | |
|--|--|
| ■ Inclinação em graus | ■ Plano da fratura em graus |
| ■ Abertura (m) | ■ Altura e Largura máxima metros |
| ■ Marca do nível da água | ■ Comprimento do espeleotema |

Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites alinhadas no centro do conduto, o conjunto possui tamanhos diferentes, colina a direita do centro do conduto. espeleotemas variáveis.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.



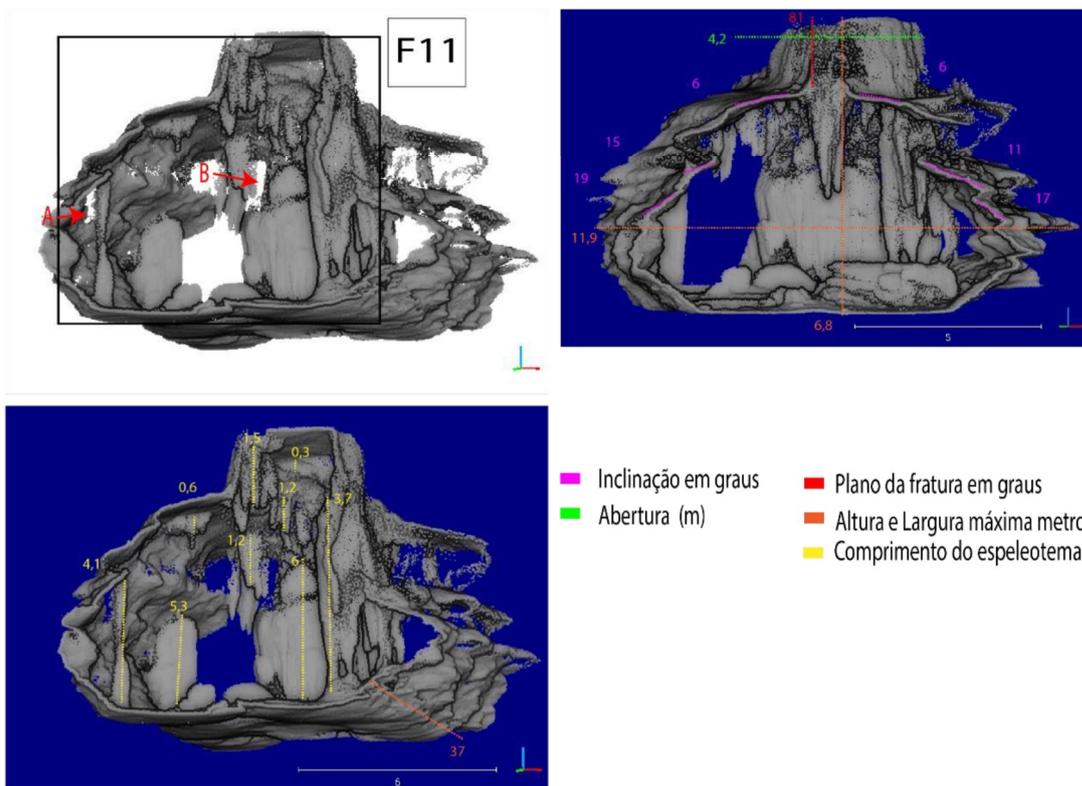
- █ Inclinação em graus
- █ Abertura (m)
- █ Plano da fratura em graus
- █ Altura e Largura máxima metros
- █ Comprimento do espeleotema

Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites alinhadas no centro do conduto, o conjunto possui tamanhos diferentes. colina a direita do centro do conduto. coluna coalescente ao fundo do conduto.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.



Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites alinhadas no centro do conduto, o conjunto possui tamanhos diferentes. colina a direita e esquerda do centro do conduto. coluna coalescente a direita e no centro do conduto.

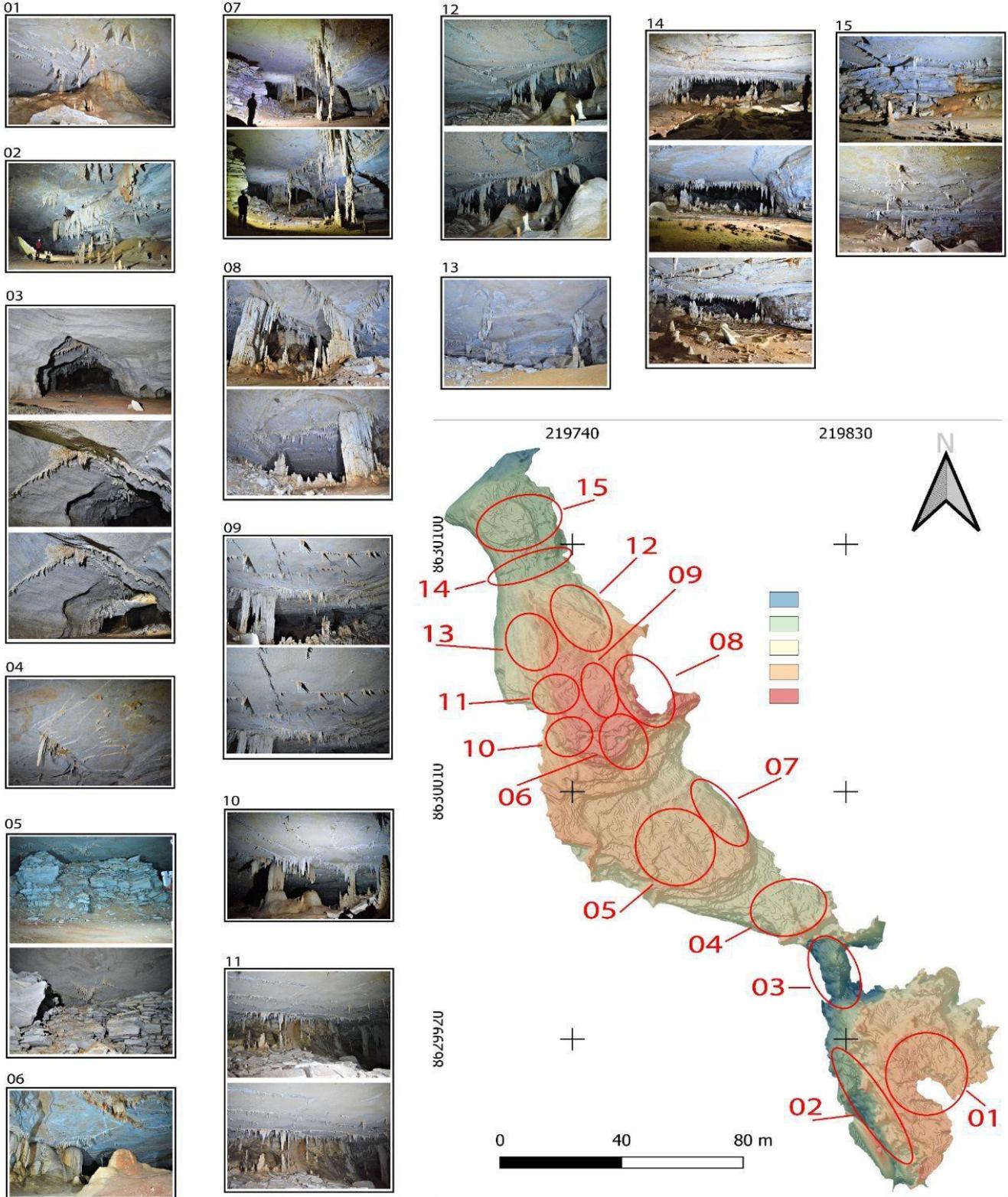
Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra

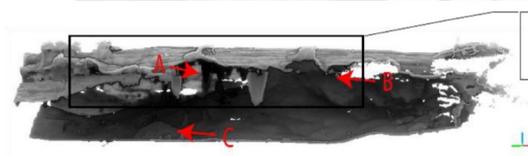
Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.

APÊNDICE L - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS E RECORTES 3D UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DE DESCRIÇÕES

DA CAVERNA DDM

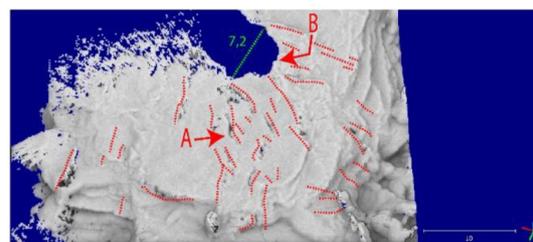
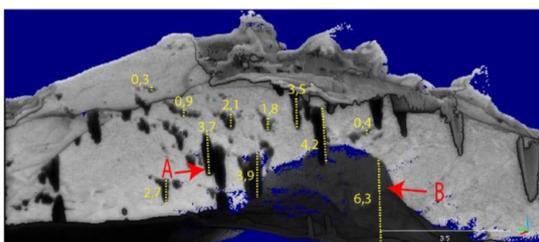
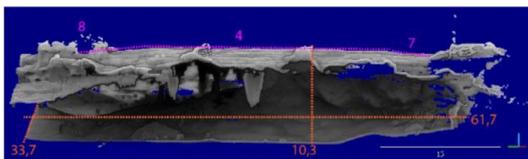


Elaborado pelo autor



F 12

- Inclinação em graus
- Abertura (m)
- Alinhamentos de espeleotemas
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

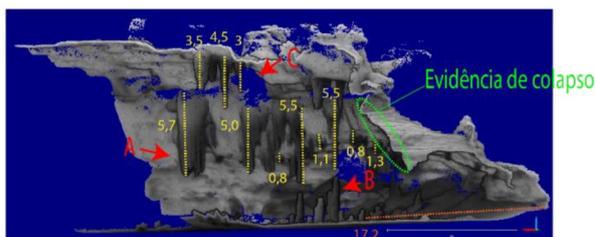
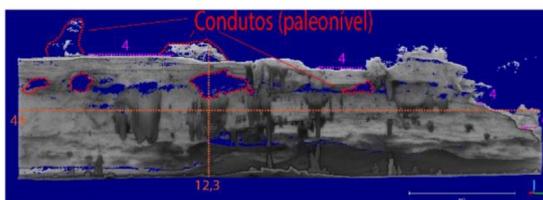
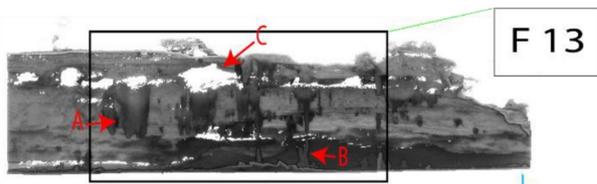
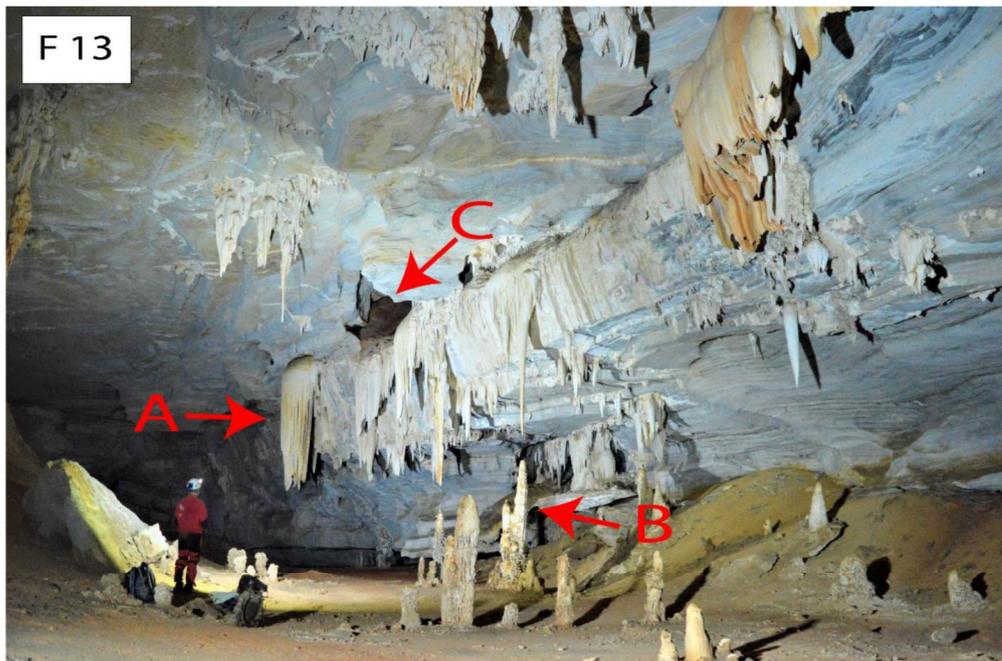


Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos variados não contínuos em todo o comprimento do alinhamento. Ao fundo uma coluna coalescente que se estende até o solo.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento fino siltoso muito bem selecionado, é possível verificar em alguns setores da caverna a presença de afloramento do lençol freático. Também fica evidente em setores não mapeados pelo lidar a espessura de pelo menos 15m do pacote de sedimentos finos intercalados por materiais clásticos que forma o solo da caverna.



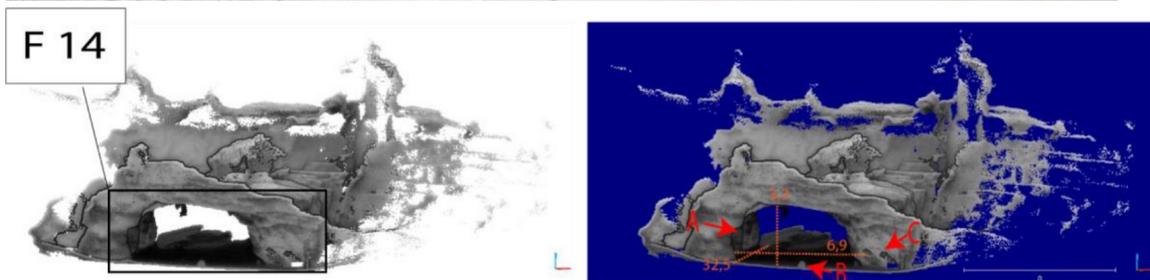
- Inclinação em graus
- Comprimento do espeleotema
- Alinhamentos de espeleotemas
- Altura e Largura máxima metros

Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos variados

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base). Lateral do salão possui um nível estratigráfico com carstificação muito evidente formando condutos.

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento fino silteoso muito bem selecionado, é possível verificar em alguns setores da caverna a presença de afloramento do lençol freático. Também fica evidente em setores não mapeados pelo lidar a espessura de pelo menos 15m do pacote de sedimentos finos intercalados por materiais clásticos que forma o solo da caverna.



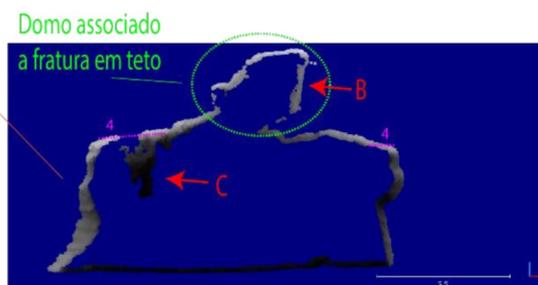
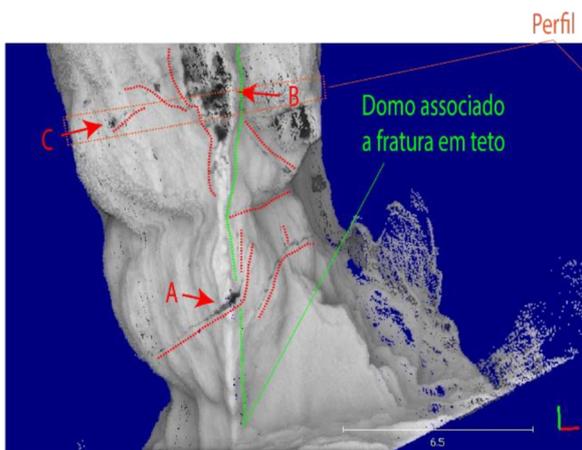
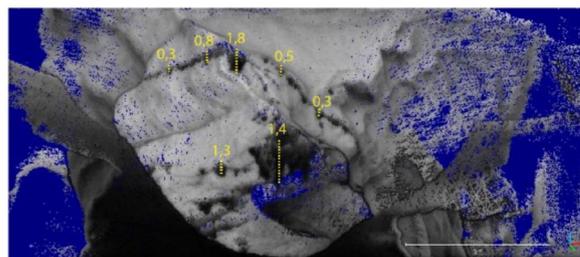
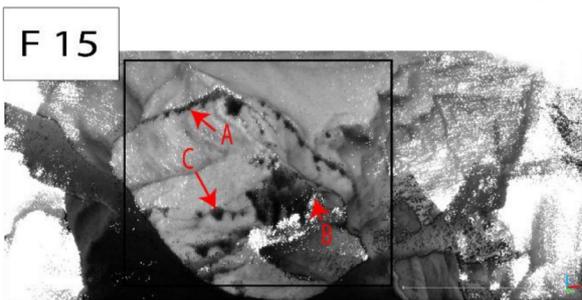
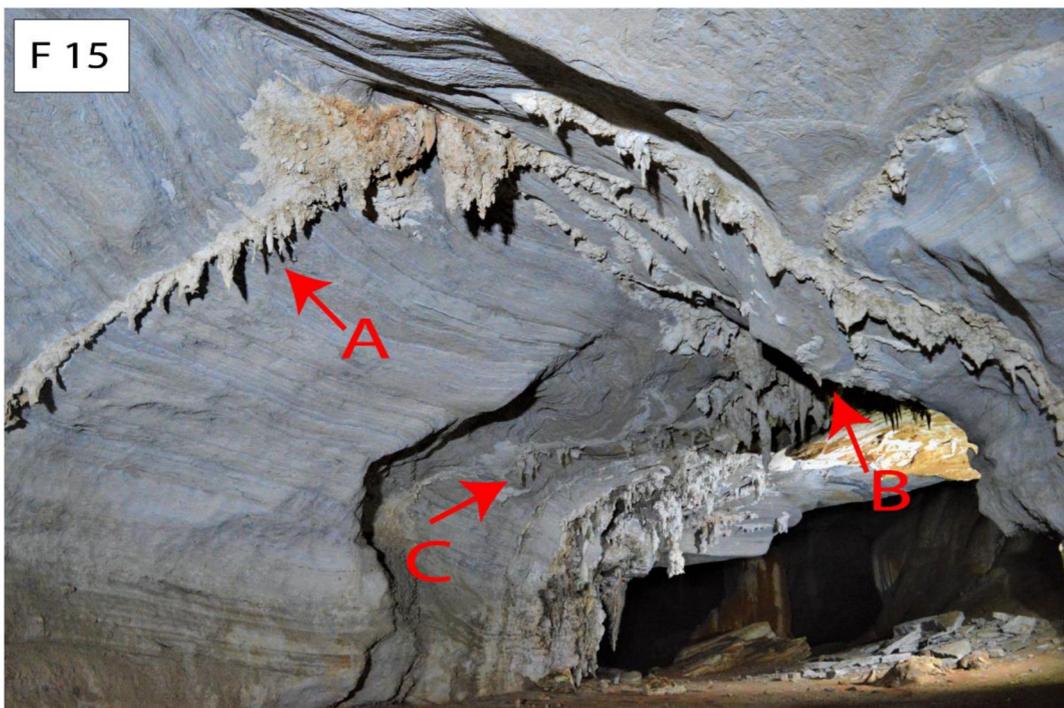
Tipo de espeleotema: As descrições contarão em F15.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Conduto do tipo tubo freático com seni tubo formndo domo alongado (formado por dissolução ao londo de fratura)

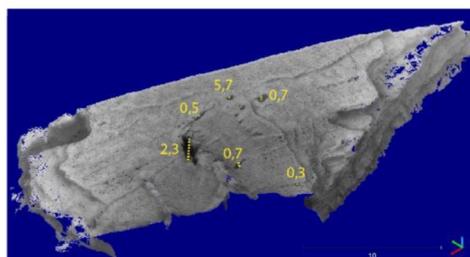
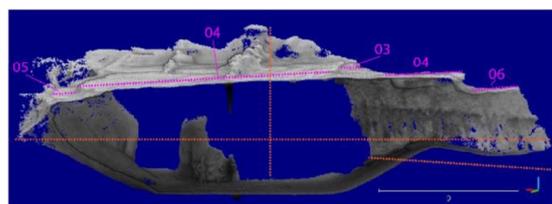
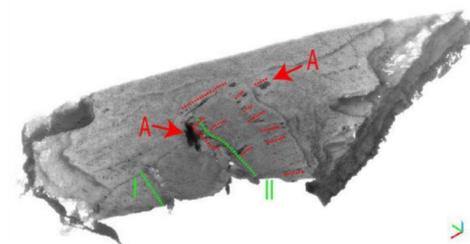
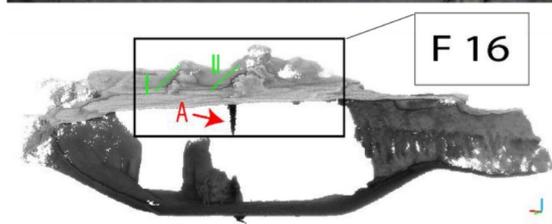
Descrição geral: Conduto mais estreito e baixo do setor mapeado pelo lidar. Conduto preenchido por sedimento fino siltoso muito bem selecionado, é possível verificar em alguns setores da caverna a presença de afloramento do lençol freático. Tabém fica evidente em setores não mapeados pelo lidar, a espessura de pelo menos 15m do pacote de sedimentos finos intercalados por materias clasticos que forma o solo da caverna.

■ Altura e Largura máxima metros



- █ Inclinação em graus
- █ Domo
- █ Alinhamentos de espeleotemas
- █ Comprimento do espeleotema

Tipo de espeleotema: Os espeleotemas se formam ao longo de fratura, tamanhos variados com acumulos nas proximidade do domo.
 Tipo de teto (rugoso):
 Tipo de conduto: Conduto do tipo tubo freático com seni tubo formndo domo alongado (formado por dissolução ao londo de fratura)
 Descrição geral: Conduto mais estreito e baixo do setor mapeado pelo lidar. Conduto preenchido por sedimento fino siltoso muito bem selecionado, é possível verificar em alguns setores da caverna a presença de afloramento do lençol freático. Tabém fica evidente em setores não mapeados pelo lidar, a espessura de pelo menos 15m do pacote de sedimentos finos intercalados por materias clasticos que forma o solo da caverna.



- Inclinação em graus
- domos
- Alinhamentos de espeleotemas
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

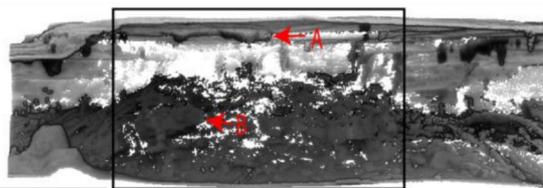
Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos consistentes e paralelismo entre os grupos de alinhamentos. A exceção é o espeleotema maior associado aos domos.

Ao fundo uma coluna coalescente que se estende até o solo.

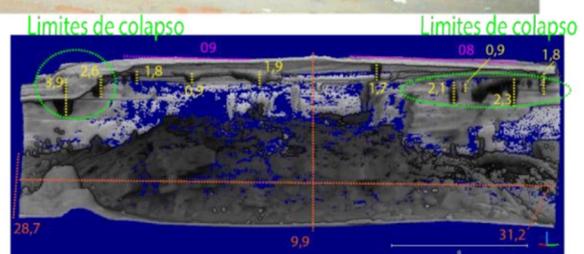
Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento fino siltoso muito bem selecionado, é possível verificar em alguns setores da caverna a presença de afloramento do lençol freático. Também fica evidente em setores não mapeados pelo lidar a espessura de pelo menos 15m do pacote de sedimentos finos intercalados por materiais clásticos que forma o solo da caverna.



F 17



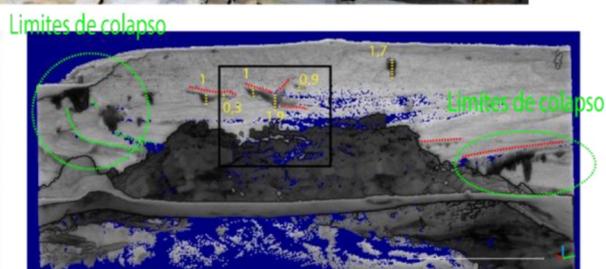
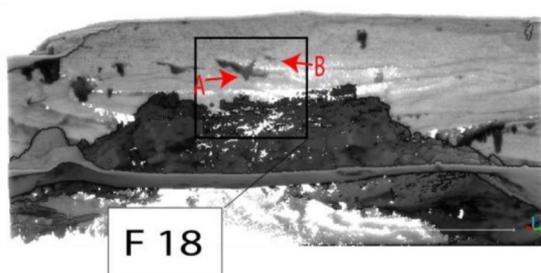
- | | | |
|--|--|--|
| — Inclinação em graus | ← Alinhamentos de espeleotemas | — Comprimento do espeleotema |
| — Limites de colapsos | — Altura e Largura máxima metros | |

Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos variados não contínuos em todo o comprimento do alinhamento, bordejado por estalactites dispostas ao longo das áreas limitrofes do colapso que forma o salão.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: espeleotemas formados em pontos específicos, no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



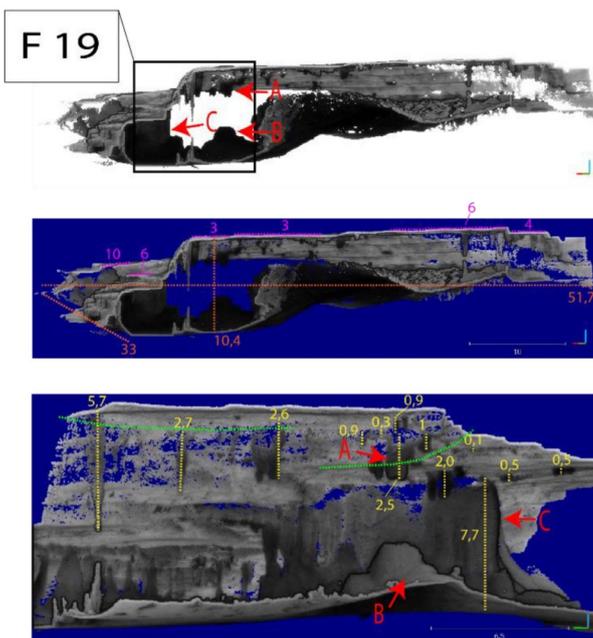
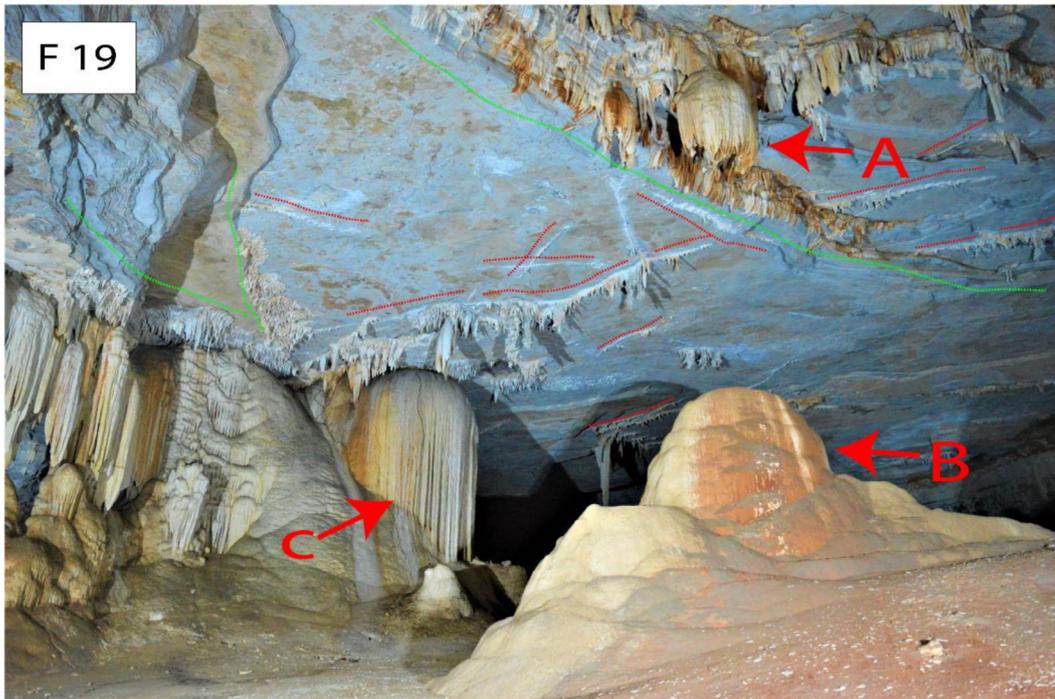
- | | |
|--|--|
| ■ Inclinação em graus | ■ Alinhamentos de espeleotemas |
| ■ Limites de colapsos | ■ Comprimento do espeleotema |

Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos variados não contínuos em todo o comprimento do alinhamento, bordado por estalactites dispostas ao longo das áreas limitrofes do colapso que forma o salão.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: espeleotemas formados em pontos específicos, no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



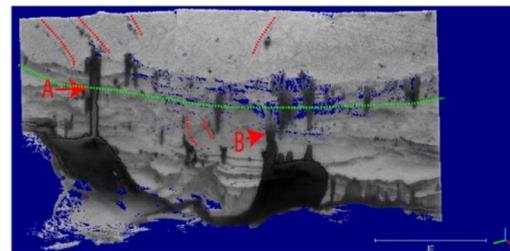
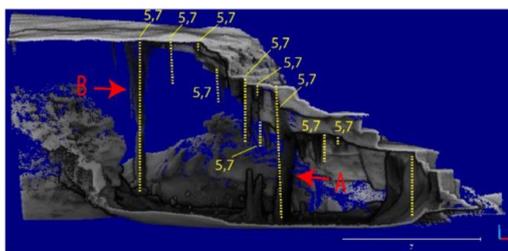
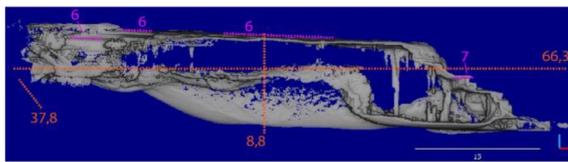
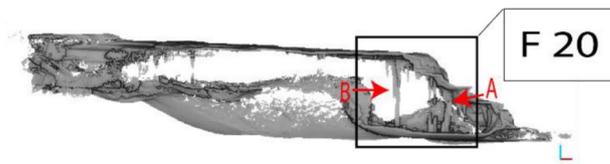
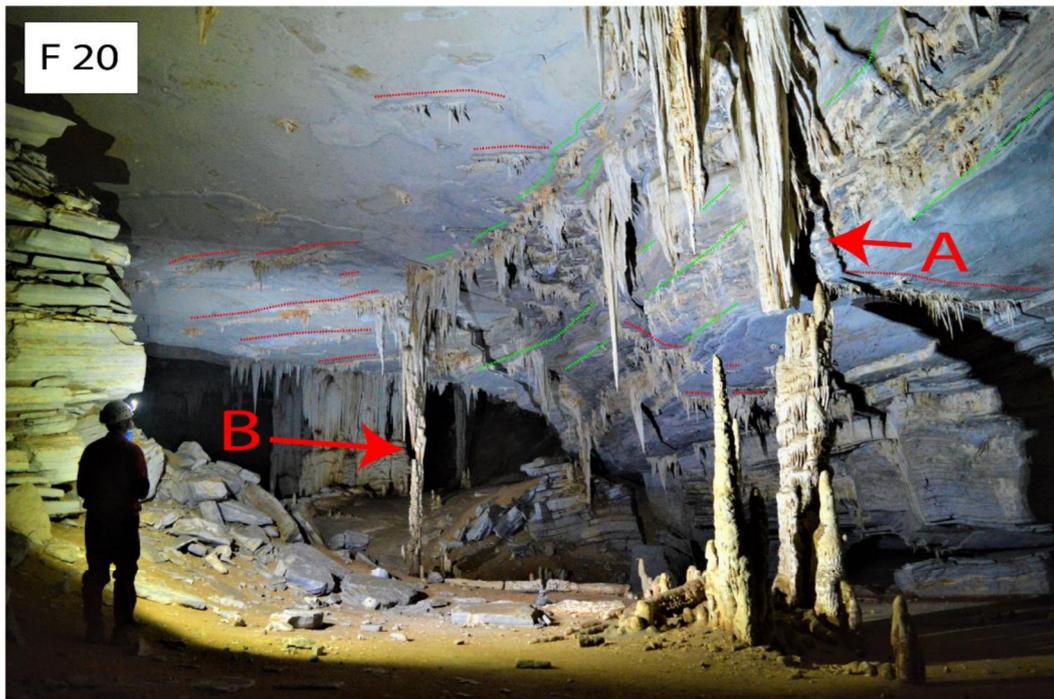
- Inclinação em graus
- Limites de colapsos
- Alinhamentos de espeleotemas
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos variados não contínuos em todo o comprimento do alinhamento, bordejado por estalacitites dispostas ao longo das áreas limitrofes do colapso que forma o salão.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: espeleotemas formados em pontos específicos, no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



- Inclinação em graus
- Limites de colapsos
- Alinhamentos de espeleotemas
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

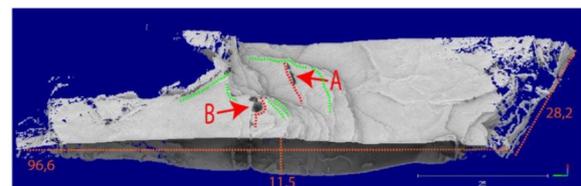
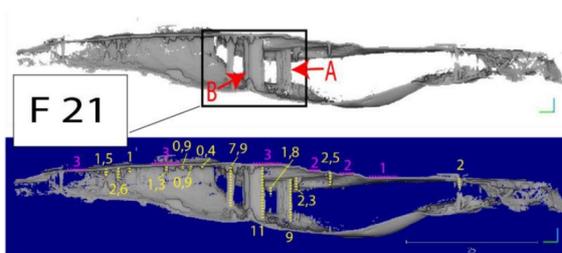
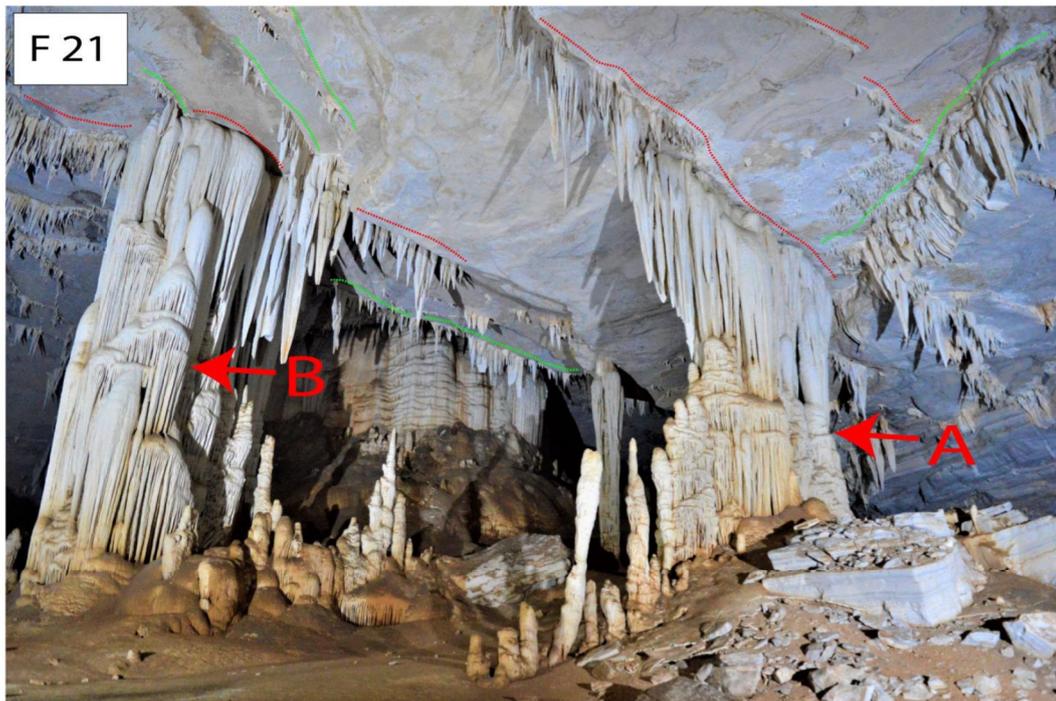
Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos variados não contínuos em todo o comprimento do alinhamento, bordejado por estalacitites dispostas ao longo das áreas limitrofes do colapso que forma o salão (há a presença de uma coluna com deslocamento da parte superior em relação a inferior)

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: salão formado por colapso de teto com espeleotemas formados em pontos específicos.

no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



- Inclinação em graus
- Limites de colapsos
- Alinhamentos de espeleotemas
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

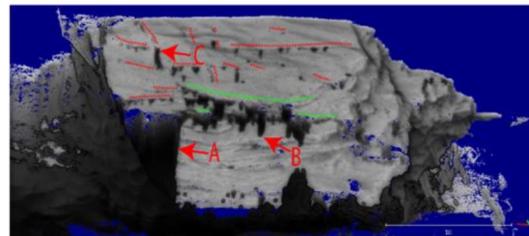
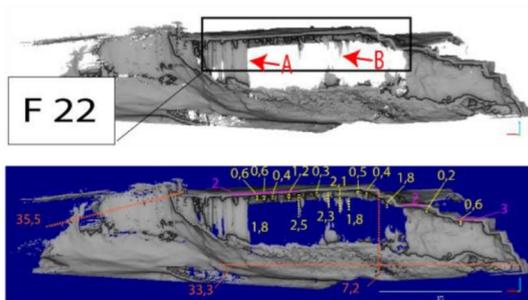
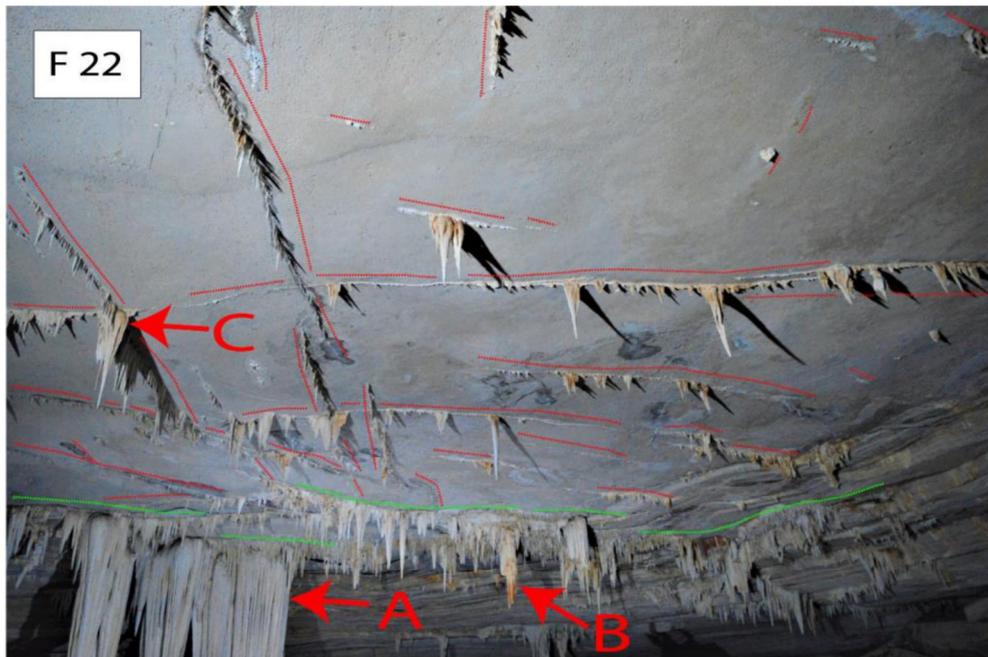
Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos variados não contínuas em todo o comprimento do alinhamento. Bordejado por estalactites dispostas ao longo das áreas limitrofes do colapso que forma o salão. Colunas bem alinhadas em estrutura.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: salão formado por colapso de teto com espeleotemas formados em pontos específicos.

no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



- | | | |
|--|--|--|
| █ Inclinação em graus | █ Alinhamentos de espeleotemas | █ Comprimento do espeleotema |
| █ Limites de colapsos | █ Altura e Largura máxima metros | |

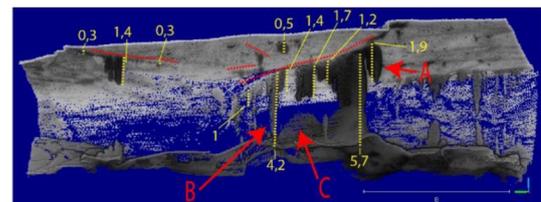
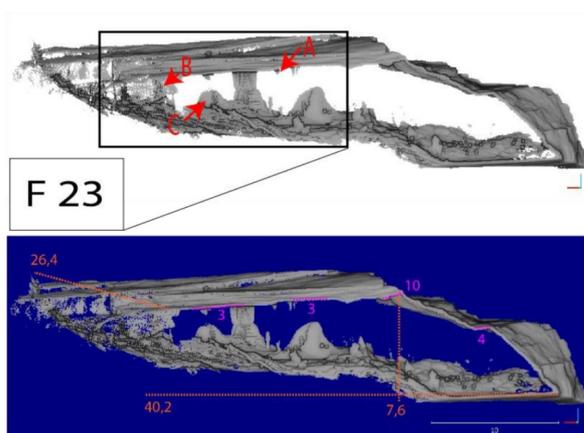
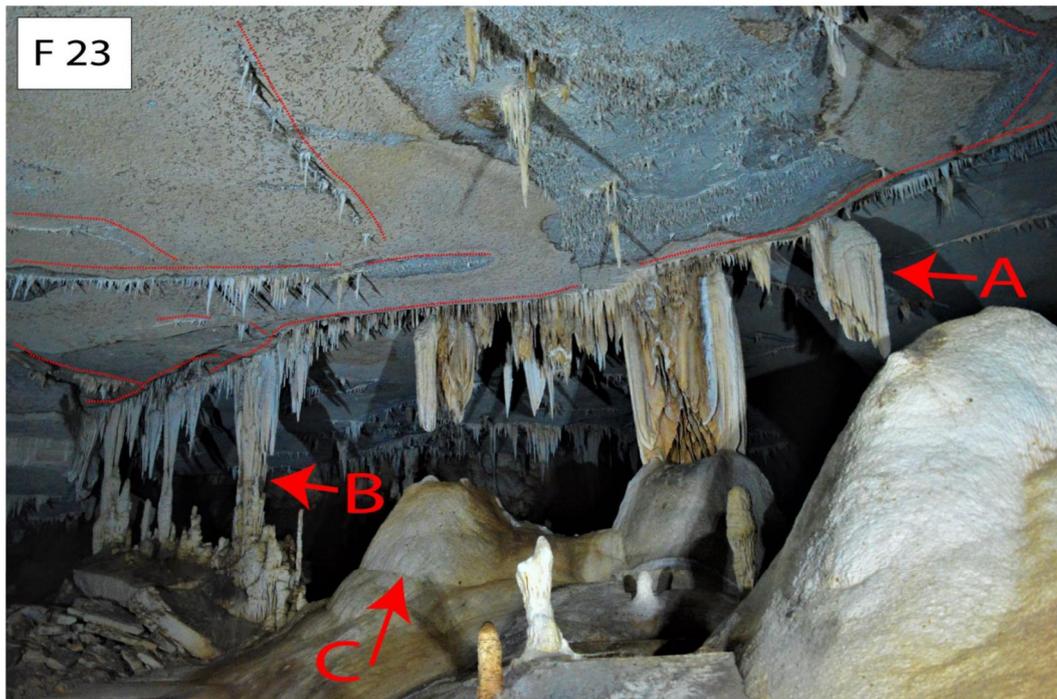
Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos com pouca variação contínuas em todo o comprimento do alinhamento. Bordejado por estalactites dispostas ao longo das áreas limitrofes do colapso que forma o salão. Evidente cruzamento de duas direções no alinhamento dos espeleotemas

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: salão formado por colapso de teto com espeleotemas formados em pontos específicos.

no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



- Inclinação em graus
- Alinhamentos de espeleotemas
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

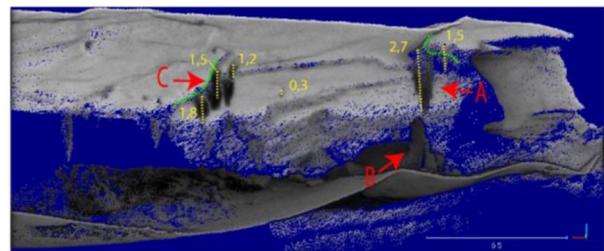
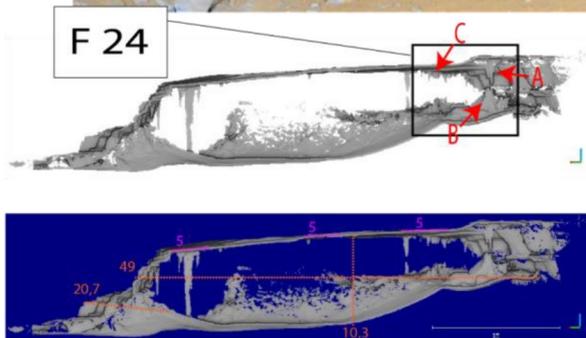
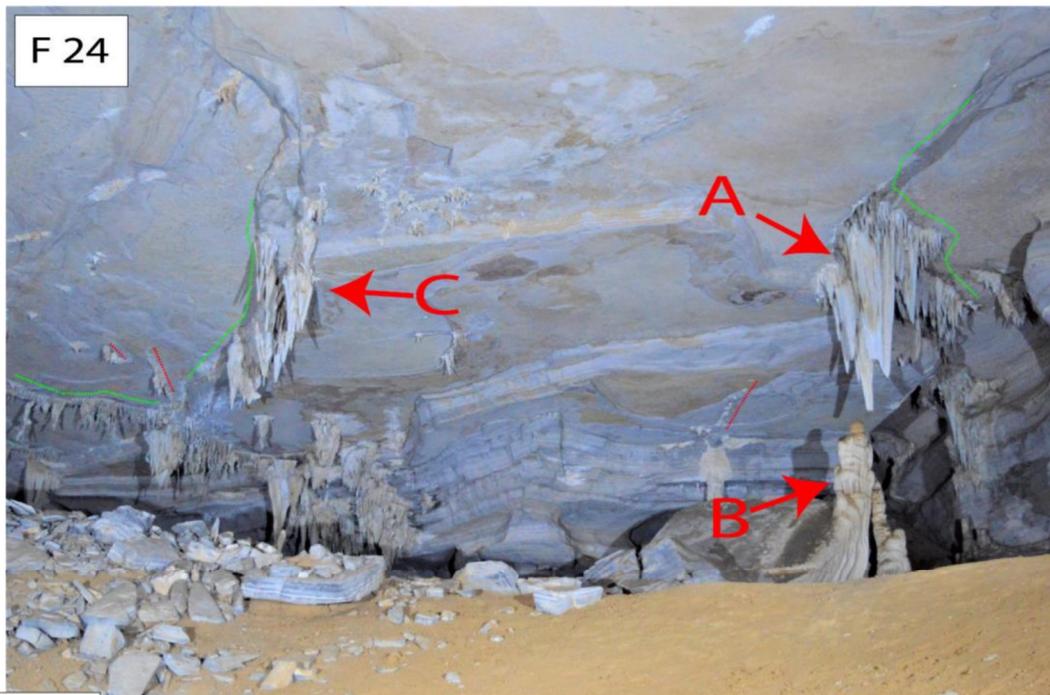
Tipo de espeleotema: Estalactites alinhados no teto com tamanhos com pouca variação contínuas em todo o comprimento do alinhamento. Bordejado por estalactites dispostas ao longo das áreas limitrofes do colapso que forma o salão.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base)

Descrição geral: salão formado por colapso de teto com espeleotemas formados em pontos específicos.

no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



- █ Inclinação em graus
- █ Alinhamentos de espeleotemas
- █ Comprimento do espeleotema
- █ Limites de colapsos
- █ Altura e Largura máxima metros

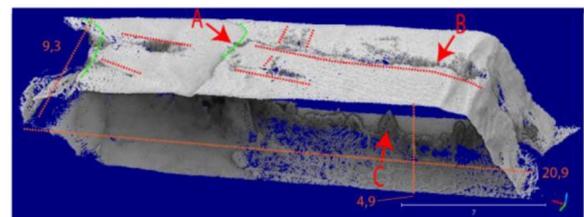
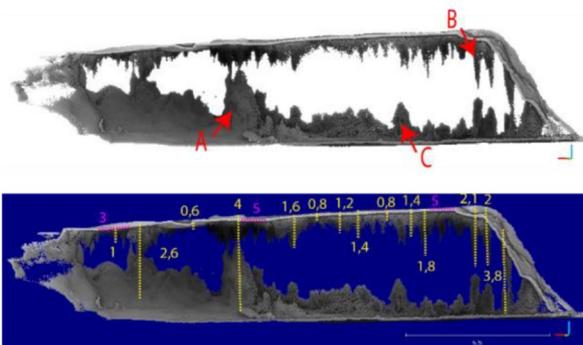
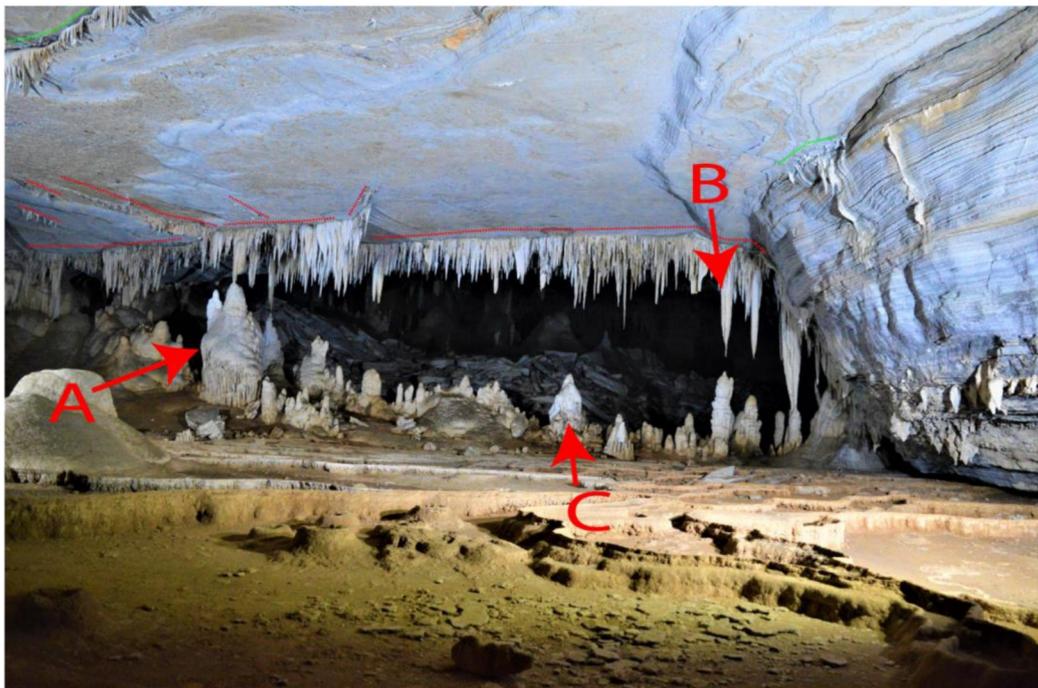
Tipo de espeleotema: Bordejado por estalacites dispostas ao longo das áreas limítrofes do colapso que forma o salão.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base). Duna formada por Material fino bem selecionado de coloração amarelada.

Descrição geral: salão formado por colapso de teto com espeleotemas formados em pontos específicos.

no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



- Inclinação em graus
- Alinhamentos de espeleotemas
- Comprimento do espeleotema
- Limites de colapsos
- Altura e Largura máxima metros

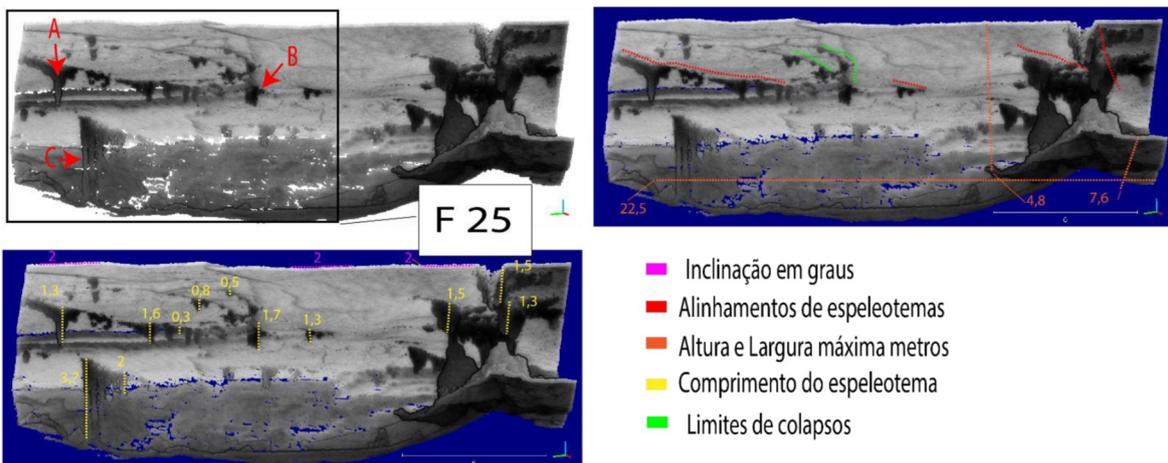
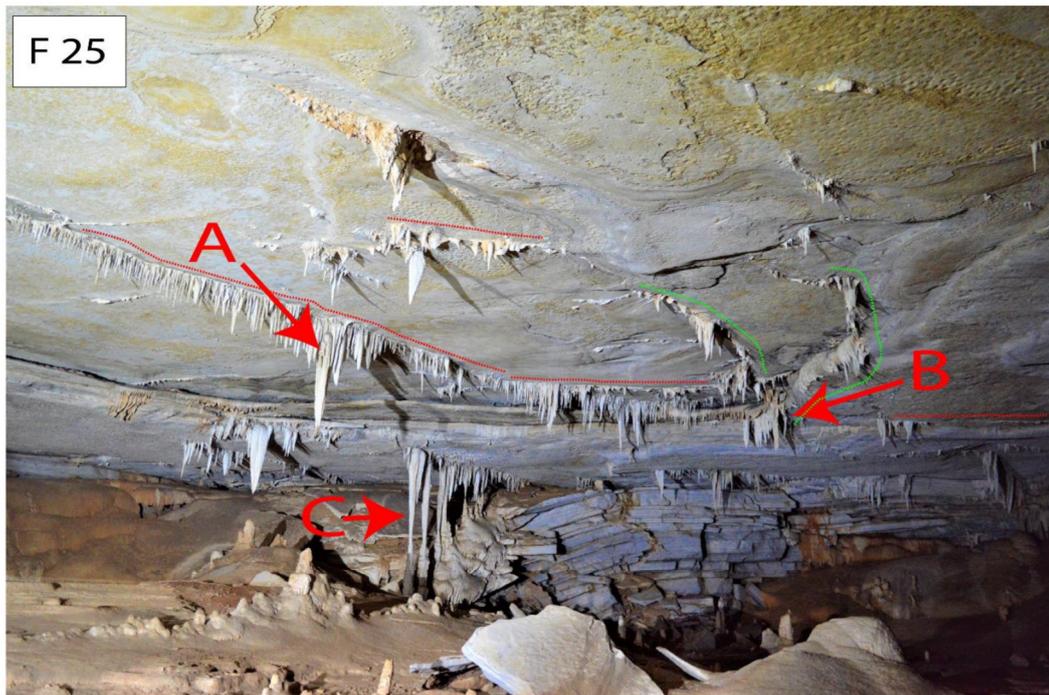
Tipo de espeleotema: espeleotemas alinhados em estrutura (o alinhamento é perpendicular aos sentido do desenvolvimento do salão.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base). Duna formada por Material fino bem selecionado de coloração amarelada.

Descrição geral: salão formado por colapso de teto com espeleotemas formados em pontos específicos.

no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.



Tipo de espeleotema: espeleotemas alinhados no teto, alinhamentos irregulares.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por colapso de teto (possivelmente formado a partir da coalescência de antigos condutos e aprofundamento dos condutos pela ação de processos de alteração de nível de base). Duna formada por Material fino bem selecionado de coloração amarelada.

Descrição geral: salão formado por colapso de teto com espeleotemas formados em pontos específicos.

no centro do teto e nas laterais (laterais onde ocorrem os limites das áreas de colapso). Tamanhos variados e formas consistentes.

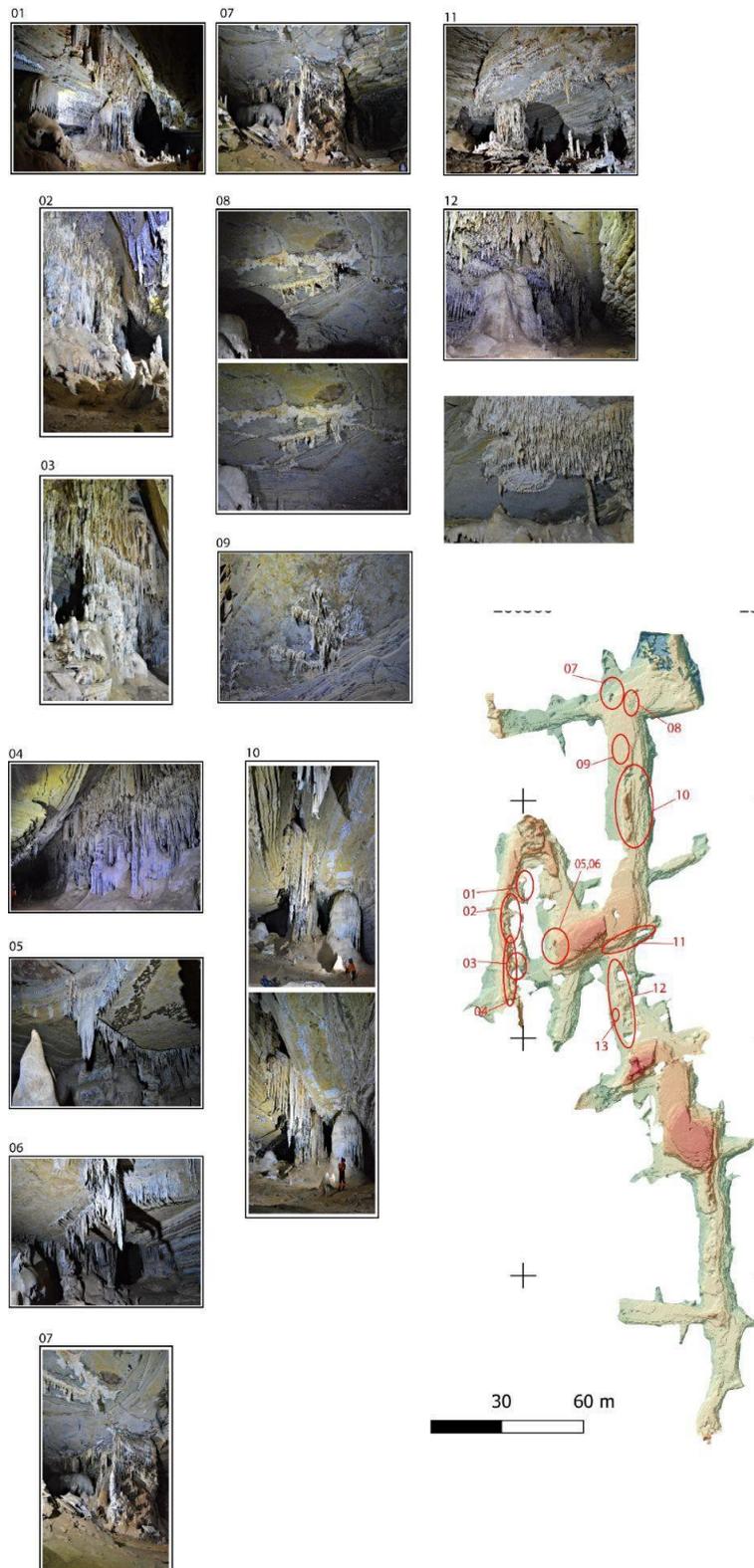
**APÊNDICE M - FOTOGRAFIA DA CRATERA QUE POSSUI NÍVEL
FREÁTICO NA CAVERNA DDM**



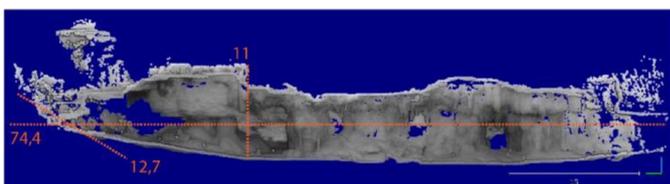
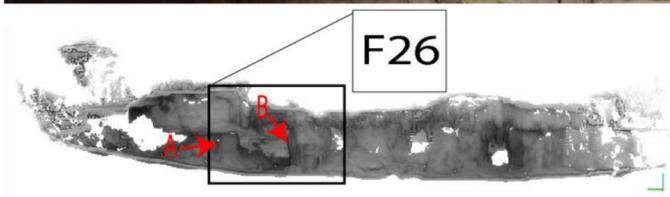
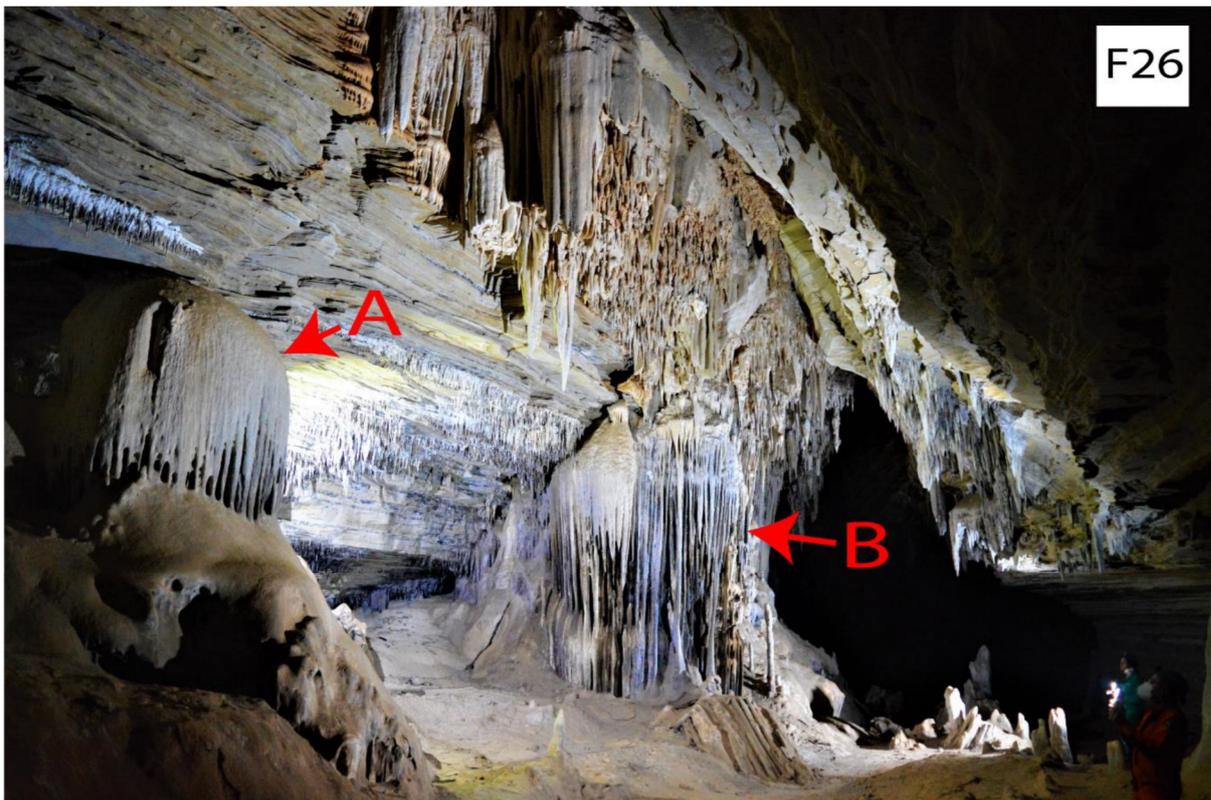
Esta carteira apresenta cerca de 15 m de profundidade, onde aflora o nível freático.

-É perceptível que esse preenchimento possa ocorrer em toda a extensão da caverna.

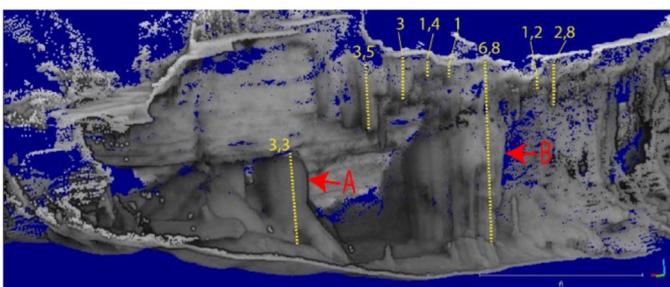
**APÊNDICE N - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DAS FOTOGRAFIAS E
RECORTES 3D UTILIZADOS PARA OBTENÇÃO DE MEDIDAS E
DESCRIÇÕES DA CAVERNA PAX**



Elaborado pelo autor



— Altura e Largura máxima metros
— Comprimento do espeleotema

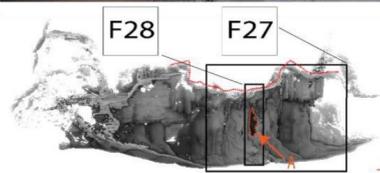


Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites e espeleotemas coescentes alinhadas no centro do conduto, o conjunto possui tamanhos diferentes.

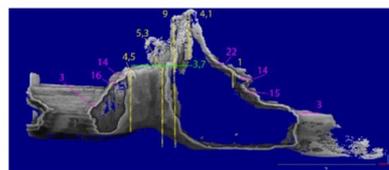
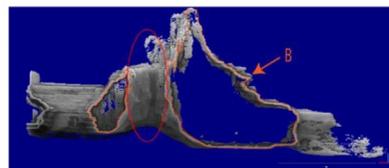
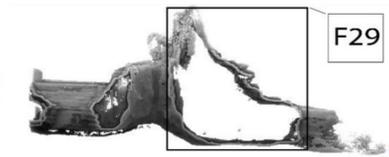
Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico alargado formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento finos apresentando por vezes crostas de carbonato de cálcio indicando possíveis variações de nível de inundação/ou preenchimento sedimentar do conduto.



- Espeleotemas alinhados em estrutura
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema
- Inclinação em graus
- Abertura (m)



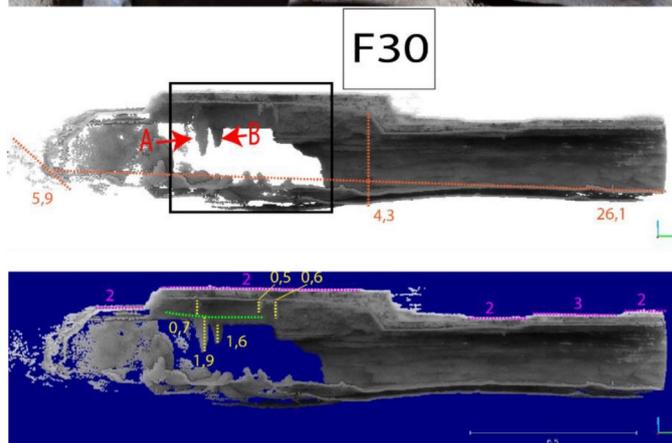
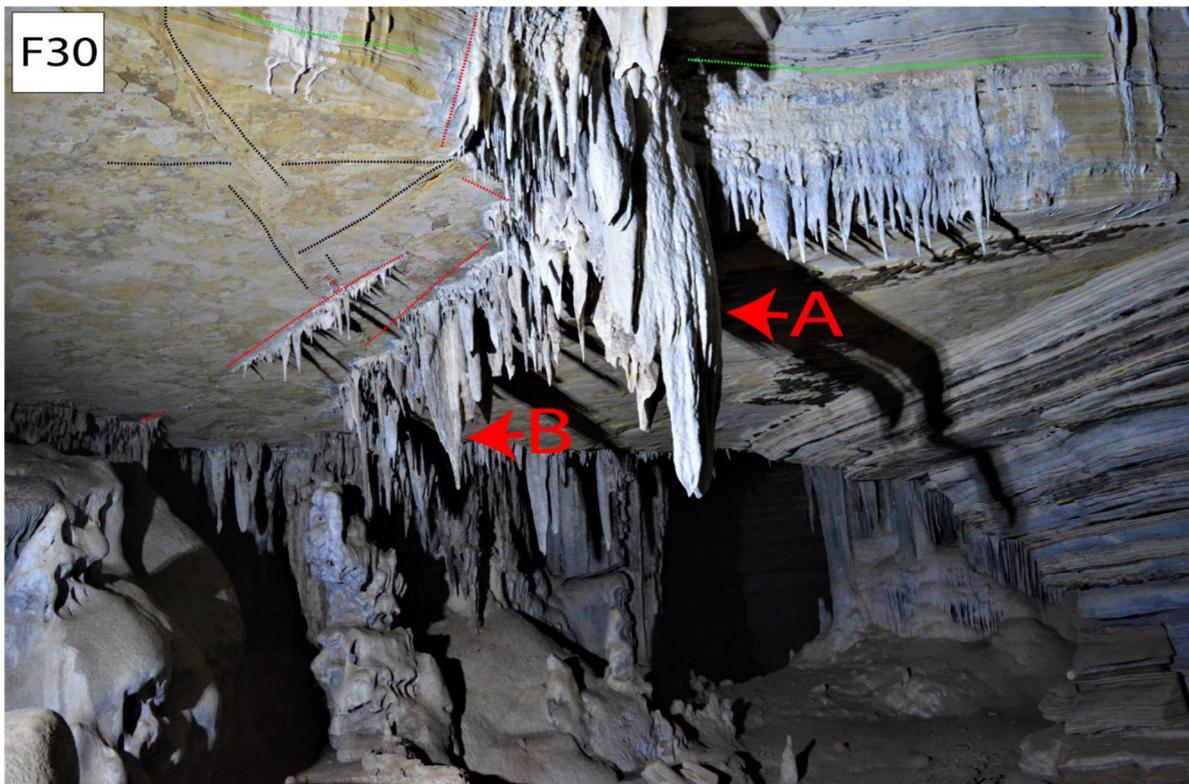
Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites e espeleotemas coalescentes alinhadas no centro do conduto, o conjunto possui tamanhos diferentes.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico alargado formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento finos apresentando por vezes crostas de carbonato de cálcio indicando possíveis variações de nível de inundação/ou preenchimento sedimentar do conduto.

Os espeleotemas coalescentes formam uma parede central evidenciando o eixo da dobra.



- Inclinação em graus
- limite da área de colapso
- Espeleotemas alinhados em estrutura
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema
- Fraturas sem espeleotemas

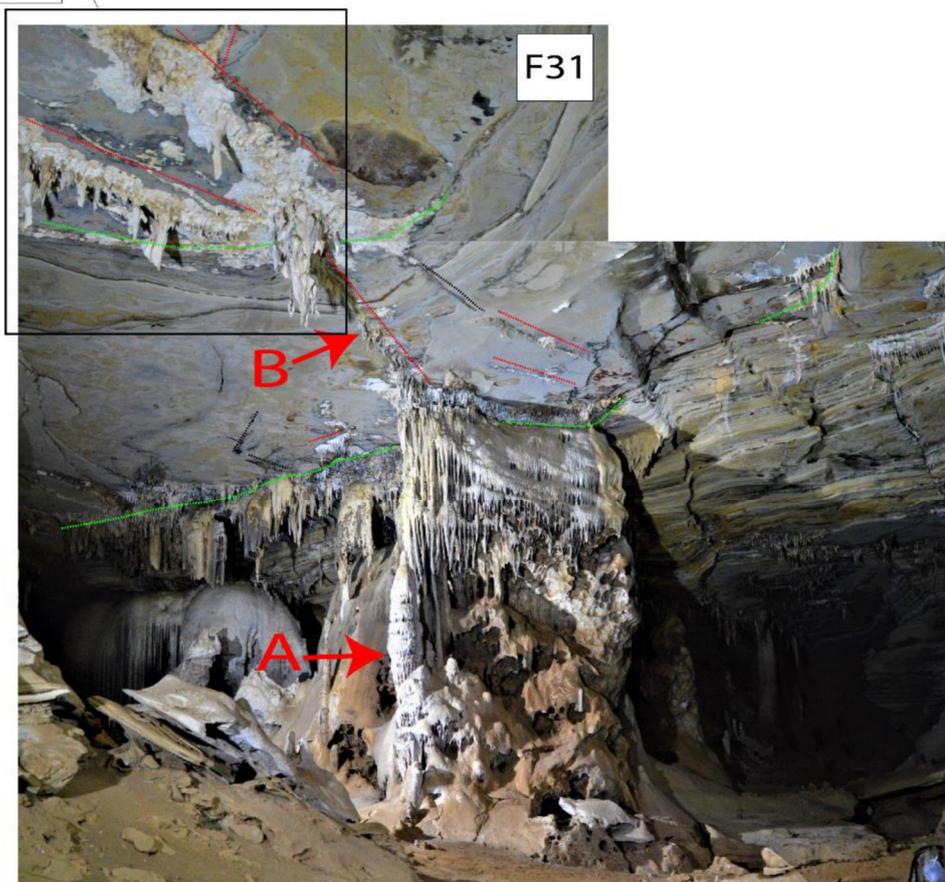
Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites alinhados em direções diferentes com tamanhos variados formando um a estalacite maior na área de encontro das estruturas do teto.

Tipo de teto (rugoso):

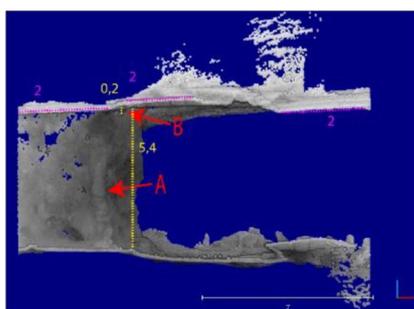
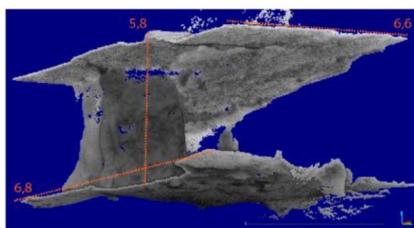
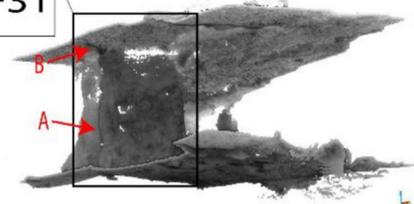
Tipo de conduto: Salão formado por abatimento do teto.

Descrição geral: Salão formado na intercessão de dois condutos diferentes alinhados perpendicularmente.

F32*



F31



- Inclinação em graus
- limite da área de colapso
- Fraturas sem espeleotemas
- Espeleotemas alinhados em estrutura
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

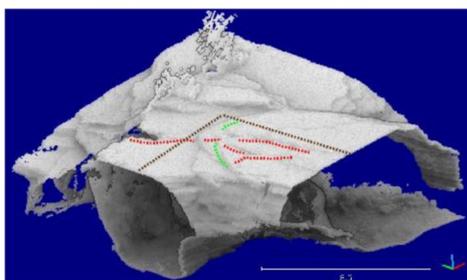
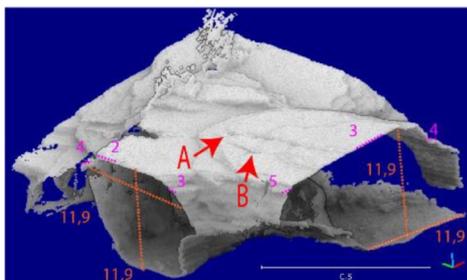
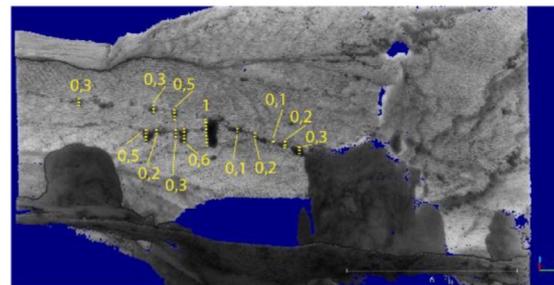
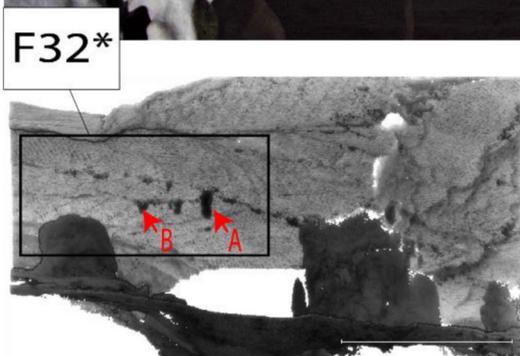
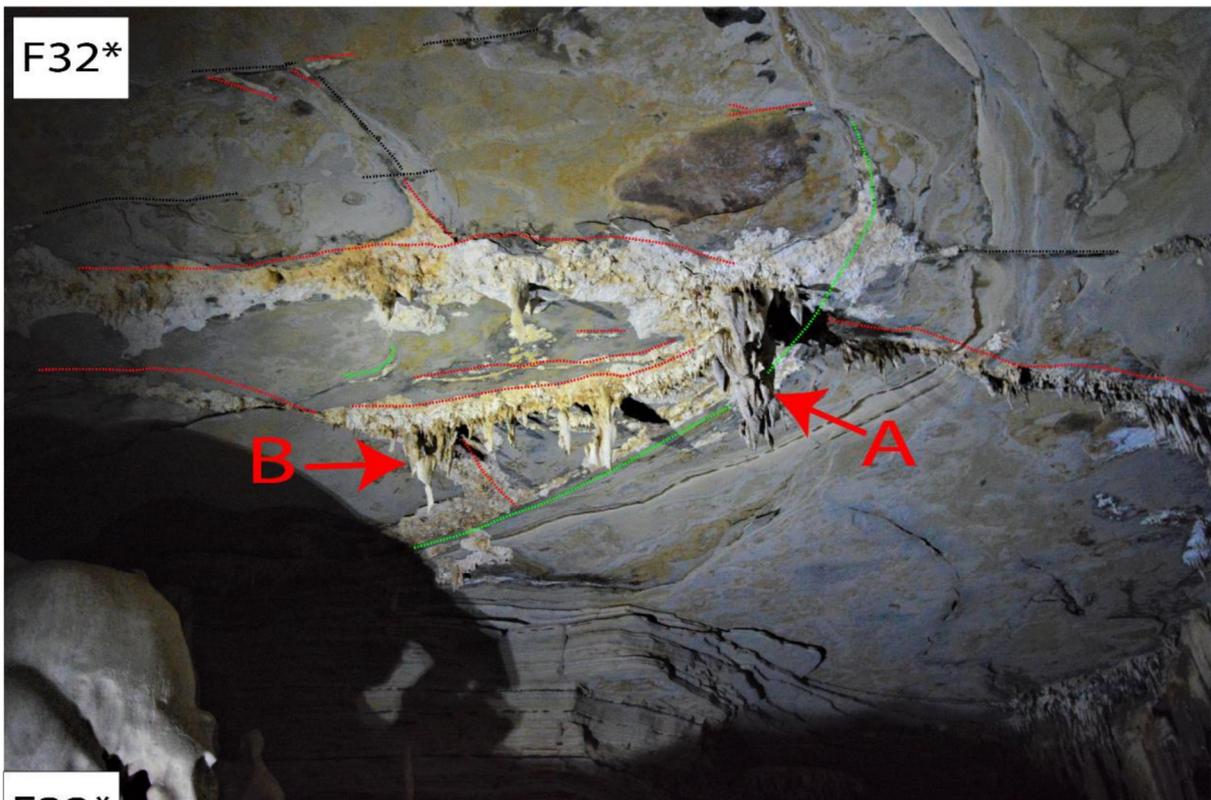
* A F32 será abordada no anexo em sequência.

Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites alinhadas (F32) associadas a grande coluna coalescente.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por abatimento do teto.

Descrição geral: Salão formado na intercessão de dois condutos diferentes, alinhados perpendicularmente



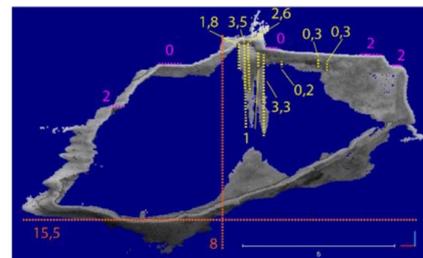
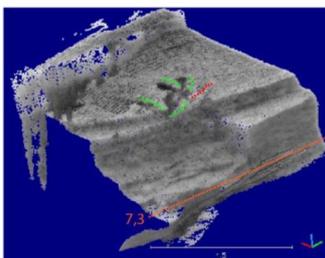
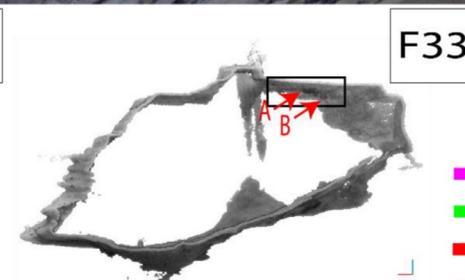
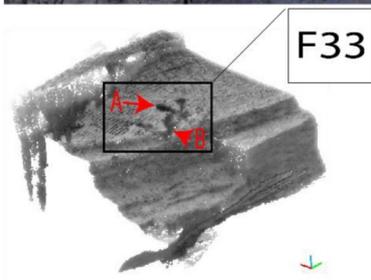
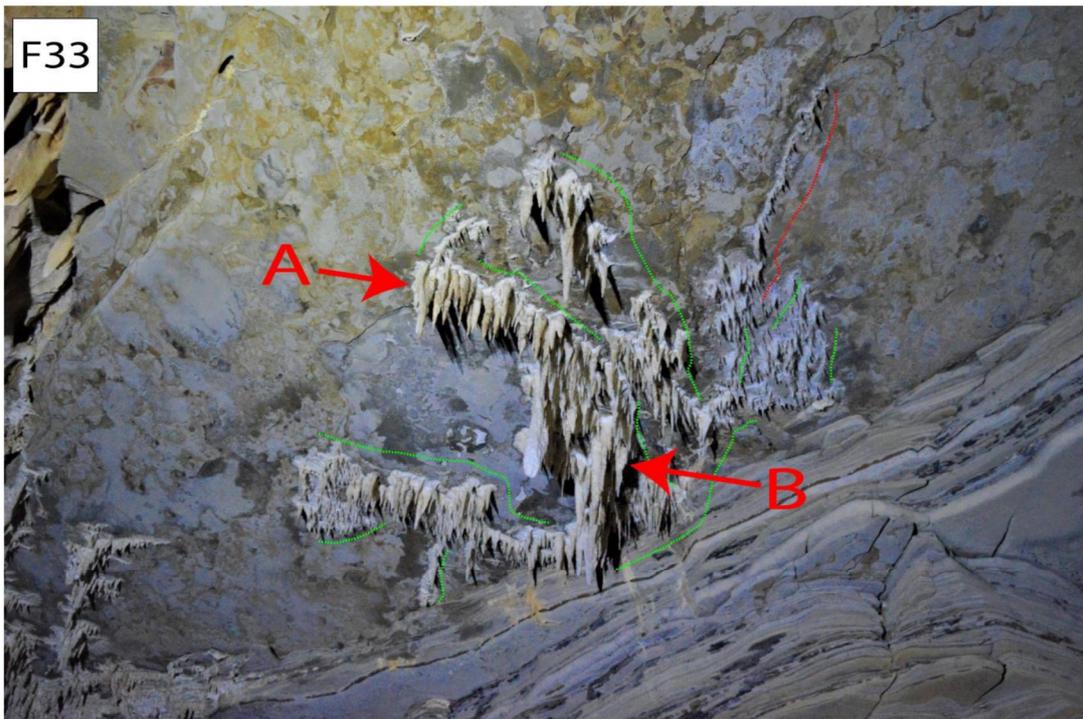
- Inclinação em graus
- limite da área de colapso
- Espeleotemas alinhados em estrutura
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema
- Fraturas sem espeleotemas
- Direção dos condutos

Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites alinhadas com pouca variação de tamanho, forma um espeleotema maior no lugar onde os conjuntos alinhados de espeleotemas convergem.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por abatimento do teto.

Descrição geral: Salão formado na intercessão de dois condutos diferentes, alinhados perpendicularmente



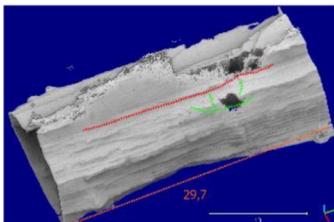
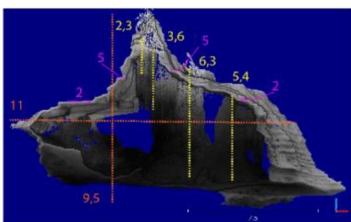
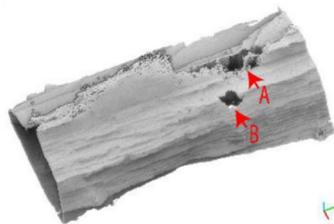
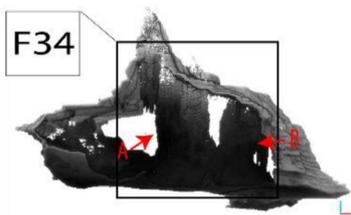
- Inclinação em graus
- Espeleotemas radiais
- Espeleotemas alinhados em estrutura
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites alinhadas no centro do conduto, o conjunto possui tamanhos diferentes. colina a direita e esquerda do centro do conduto. coluna coalescente a direita e no centro do conduto.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento granuloso proveniente de "Jangadas" depositadas a partir da variação do nível freático, existe um lago interno nesta caverna.



- Inclinação em graus
- Espeleotemas alinhados por gravidade
- Espeleotemas alinhados em estrutura
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

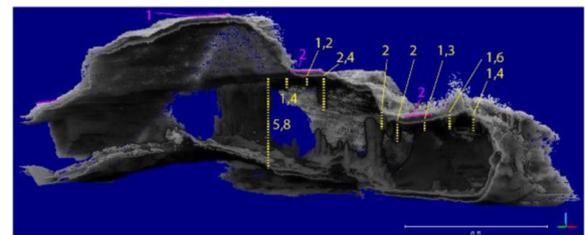
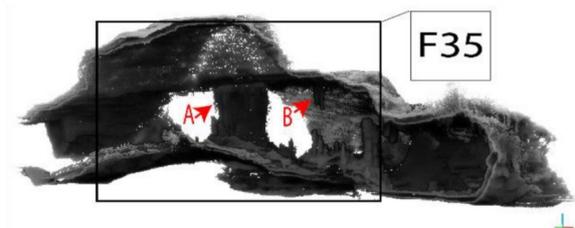
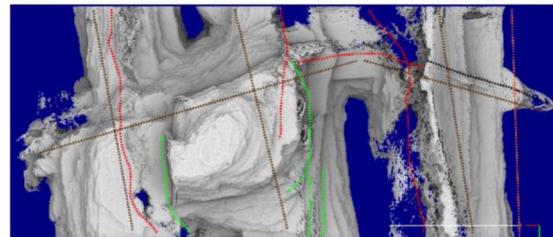
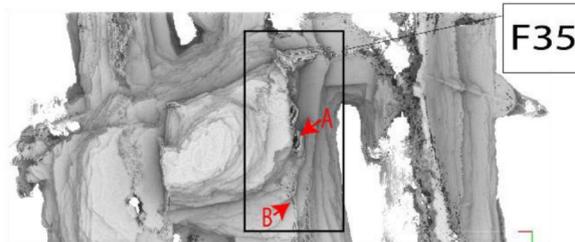
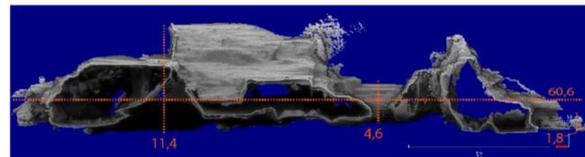
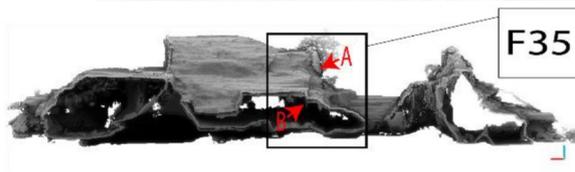
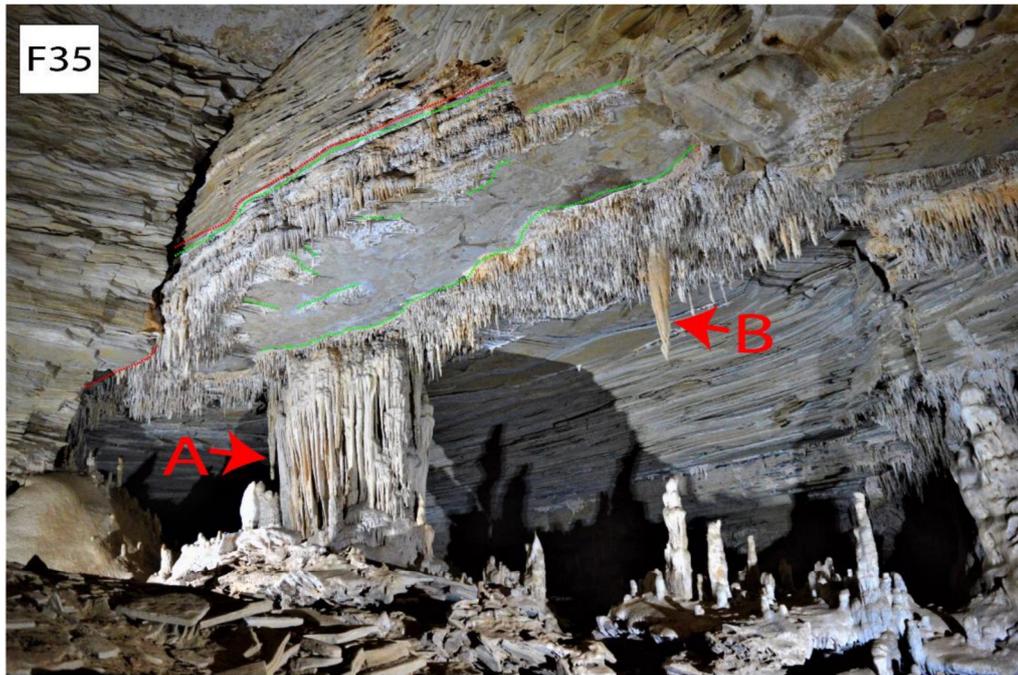
Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites e espeleotemas coalescentes alinhadas no centro do conduto, o conjunto possui tamanhos diferentes. Há espeleotemas coalescentes na lateral do conduto. Também existem pequenos conjuntos de espeleotemas alinhados por gravidade, indo da lateral ao centro do conduto.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico alargado formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento finos apresentando por vezes crostas de carbonato de cálcio indicando possíveis variações de nível de inundação/ou preenchimento sedimentar do conduto.

Os espeleotemas coalescentes formam uma parede central evidenciando o eixo da dobra.



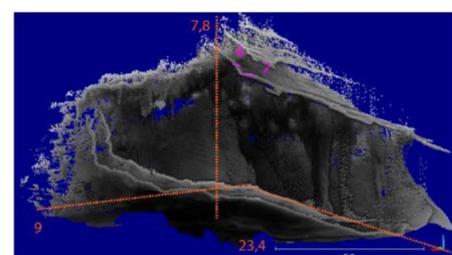
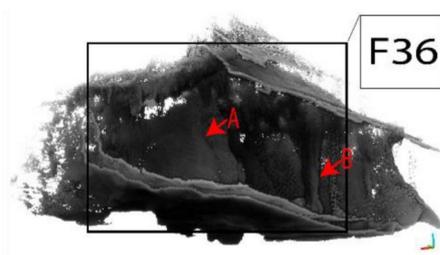
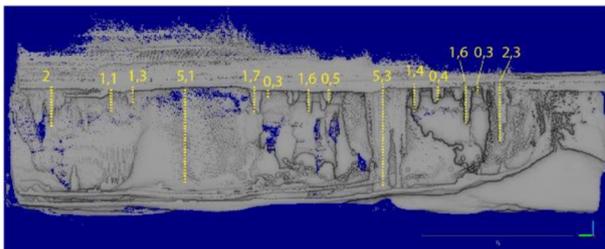
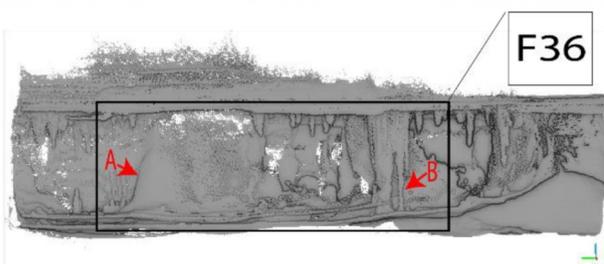
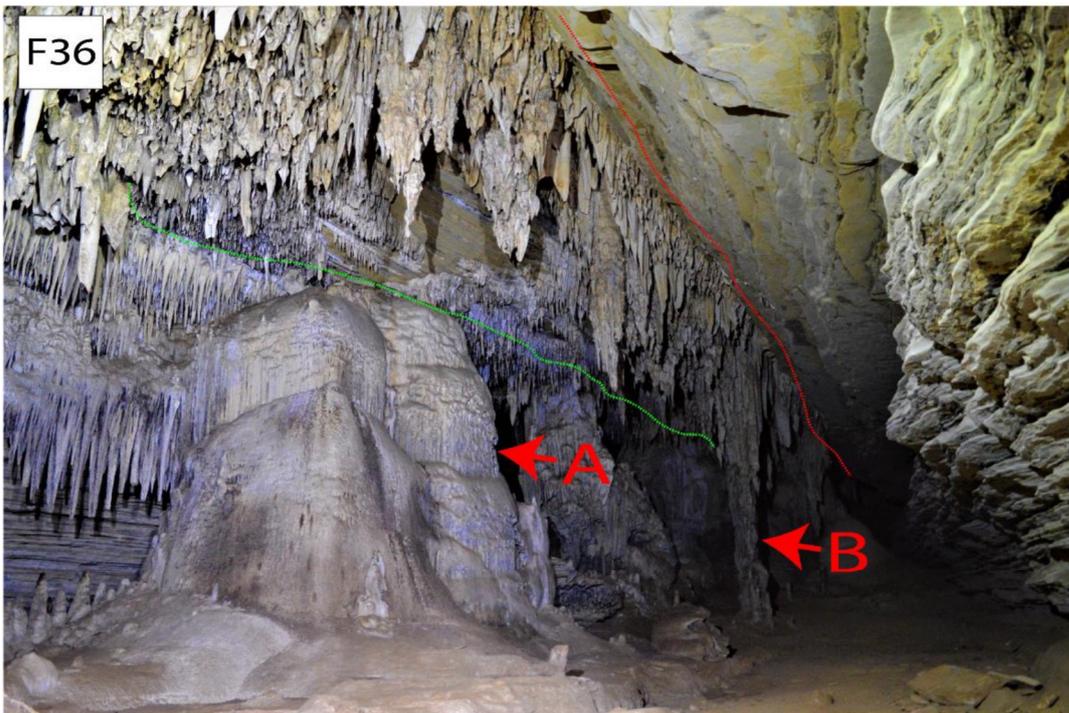
- Inclinação em graus
- Espeleotemas alinhados por gravidade
- Espeleotemas alinhados em estrutura
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema
- Direção dos condutos

Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites e colunas coalescentes alinhadas com muita variação de tamanho. o alinhamento dar-se no limite dos colápsos de teto.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Salão formado por abatimento do teto.

Descrição geral: Salão formado na intercessão de dois condutos diferentes, alinhados perpendicularmente



- Inclinação em graus
- Espeleotemas alinhados em flanco de dobra
- Espeleotemas alinhados em estrutura
- Altura e Largura máxima metros
- Comprimento do espeleotema

Tipo de espeleotema: Conjunto de estalactites e espeleotemas coescentes alinhadas no centro do conduto, o conjunto possui tamanhos diferentes. Há espeleotemas coescentes na lateral do conduto. Também existem pequenos conjuntos de espeleotemas alinhados por gravidade, indo da lateral ao centro do conduto.

Tipo de teto (rugoso):

Tipo de conduto: Tubo elíptico alargado formado em eixo de dobra

Descrição geral: conduto preenchido por sedimento fino apresentando por vezes crostas de carbonato de cálcio indicando possíveis variações de nível de inundação/ou preenchimento sedimentar do conduto.

Os espeleotemas coescentes formam uma parede central evidenciando o eixo da dobra.