



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Nair Fernanda Burigo Mochiutti

**Cavidades naturais subterrâneas em granito:** estudo de caso do Sistema de Cavernas da  
Água Corrente - Ilha de Santa Catarina, SC - Brasil

Florianópolis  
2020

Nair Fernanda Burigo Mochiutti

**Cavidades naturais subterrâneas em granito:** estudo de caso do Sistema de Cavernas da  
Água Corrente - Ilha de Santa Catarina, SC - Brasil

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do título de Doutora em Geografia.  
Orientador: Prof. Edison Ramos Tomazzoli, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mochiutti, Nair Fernanda Burigo

Cavidades naturais subterrâneas em granito : estudo de  
caso do Sistema de Cavernas da Água Corrente - Ilha de  
Santa Catarina, SC - Brasil / Nair Fernanda Burigo  
Mochiutti ; orientador, Edison Ramos Tomazzoli, 2020.

284 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa  
de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Geografia. 2. Cavernas em matacões graníticos. 3.  
Espeleotemas. 4. Conservação do patrimônio espeleológico. 5.  
Ilha de Santa Catarina. I. Tomazzoli, Edison Ramos. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós  
Graduação em Geografia. III. Título.

Nair Fernanda Burigo Mochiutti

**Cavidades naturais subterrâneas em granito:** estudo de caso do Sistema de Cavernas da  
Água Corrente - Ilha de Santa Catarina, SC - Brasil

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Norberto Olmiro Horn Filho, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Renato Rodriguez Cabral Ramos, Dr.  
Museu Nacional – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi  
julgado adequado para obtenção do título de doutora em Geografia.

---

Prof. Clécio Azevedo da Silva, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geografia

---

Prof. Edison Ramos Tomazzoli, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 2020



Dedico ao meu irmão Fábio Guilherme Mochiutti (*In Memoriam*). O Guigo se foi no dia em que defenderia seu projeto de TCC. Sinto falta do que vivemos e do que não pudemos viver.

## AGRADECIMENTOS

Esta tese foi desenvolvida a muitas mãos, e a todas elas eu quero agradecer:

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), instituição pública, gratuita e de qualidade, onde tive a oportunidade de cursar o mestrado e o doutorado, tendo todo o apoio e infraestrutura necessários para minha formação. Um espaço vibrante que fez de mim uma pessoa e uma profissional melhor.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo que me permitiu trabalhar como pesquisadora ao longo desses quatro anos. Por proporcionar, por meio do Portal de Periódicos, o acesso gratuito a publicações e ao banco de estruturas cristalinas, o que foi essencial para a construção da base teórica e interpretação de dados da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFSC, no nome de seus docentes, coordenadores e secretárias, por toda ajuda e suporte nesta etapa da minha vida acadêmica. Agradeço em especial ao apoio financeiro concedido para participação em eventos científicos.

Ao professor Edison Tomazzoli, por ter me apresentado as cavernas da Ilha de Santa Catarina ainda em 2011, pela parceria nos trabalhos que foram desenvolvidos sobre essas cavidades, em especial esta tese, pela ajuda no campo geológico, pelos dados compartilhados, pelas conversas e apoio.

Institucionalmente gostaria ainda de estender meus agradecimentos aos professores que participaram da minha banca de qualificação, Norberto Horn e Jairo Valdati, por contribuírem no amadurecimento e definição de caminhos para a pesquisa; ao professor Marcelo Accioly, pela oportunidade dos estágios em docência; ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC, no nome do técnico Américo, que me ajudou na obtenção de imagens de amostras de espeleotemas; ao Laboratório de Difração de Raio X, do Departamento de Física da UFSC, no nome do professor Carlos Maduro, que me auxiliou na preparação e análise de amostras de espeleotemas; à Universidade Estadual de Ponta Grossa, no nome do professor Gilson Burigo, que me permitiu usar as dependências do Laboratório de Geologia para trabalhar e analisar lâminas de espeleotemas e rochas.

Ao Gilson, meu companheiro, pela ajuda incondicional em cada etapa do doutorado. Agradeço por dedicar seu tempo para tirar minhas dúvidas, ir pra campo comigo, revisar meus textos, pesquisar e compartilhar publicações, por ouvir, por falar, por cuidar de mim, pela Islândia, pela Mantiqueira, pela amizade, pelo amor.

À minha família, de sangue e herdada, pelo apoio de sempre, por investirem em mim, por incentivarem minhas escolhas acadêmicas e profissionais, pela compreensão, pelo amor e pelas orações.

Ao Rodrigo Dalmolin, o amigo que as cavernas me deram. Um espeleólogo legítimo, responsável pela descoberta, exploração e registro de grande parte das cavidades subterrâneas da Ilha. Parceiro nos trabalhos de campo em todas as cavernas visitadas antes e durante a pesquisa e na exploração e mapeamento do Sistema de Cavernas da Água Corrente. Pela ajuda com dúvidas, pela checagem de dados em campo, pelas fotos compartilhadas, pela hospedagem na Ilha. Obrigada por lutar pela conservação do patrimônio espeleológico ilhéu!

Ao Henrique Pontes e à Laís Massuqueto, amigos e membros do Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas, pela ajuda com o mapeamento espeleológico do Sistema de Cavernas da Água Corrente e registros fotográficos. Ao Henrique, pelas dicas sobre o uso de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva na análise de espeleotemas, por me ajudar na avaliação de lâminas desse material e também pelas orientações para a confecção do mapa espeleológico.

Gostaria de agradecer também ao Hélio Carvalho, amigo espeleólogo e membro do Espeleo Grupo Teju Jagua, que me ajudou em vários trabalhos de campo, um grande incentivador da minha pesquisa; ao Rodrigo Aguilar Guimarães, pela ajuda na organização dos mapas; à Elenice Caetano, por me auxiliar com os difratogramas; ao meu irmão, Felipe, pela ajuda com as traduções de *abstracts* de trabalhos e da tese; à Roberta Alencar, pelo convite para participar do livro sobre a geodiversidade de Florianópolis, inserindo nele um pouco sobre as cavernas da Ilha. Pela amizade, apoio e interesse no meu trabalho; ao Julio França, grande amigo que colaborou com mapas e ideias para a qualificação; ao Ericson, do Grupo Pierre Martin de Espeleologia, por me ajudar com dúvidas e contatos; aos biólogos Caroline Oswald, André Ambrósio e Rafaela Falaschi, pela identificação de indivíduos da fauna encontrada nas cavernas; ao Ferry Siemensma, pela ajuda com a identificação das amebas tecadas; à Larissa e suas filhas (e filho), de duas e de quatro patas, pelo acolhimento em Floripa; ao Alex, do Teju Jagua, pela ajuda em campo e no mapeamento espeleológico; à Marinês Silva, pela inspiração, ao desenvolver sua tese sobre as cavernas marinhas da Ilha de Santa Catarina; ao Marcel Hideyuki, pelas conversas, compartilhamento de textos e imagens e ajuda na preparação de uma amostra de espeleotema; a outros amigos, familiares e colegas, aqui não nominados, que com sua presença, apoio e carinho me ajudaram ao longo desse ciclo de doutoramento.

Petta reddast  
(expressão popular islandesa)

## RESUMO

A Ilha de Santa Catarina, conhecida por suas praias, dunas e mirantes naturais, detém também um expressivo patrimônio espeleológico. São 84 cavidades naturais subterrâneas registradas, sendo 53 delas associadas a aglomerações de matacões graníticos, principalmente nas encostas de morros que compõem os maciços rochosos sul e centro-norte, e 31 cavernas marinhas, também em contextos ígneos, associadas aos costões e praias. Ambos os tipos são pouco explorados e estudados no Brasil. O objetivo desta pesquisa é obter um panorama sobre as cavidades subterrâneas em matacões graníticos nessa área, com enfoque em seus aspectos geoespeleológicos, tendo como base uma caverna-tipo e a correlação dos dados levantados nesta cavidade com outras equivalentes a ela. Adicionalmente, pretende-se identificar os serviços geossistêmicos providos por esse conjunto de cavernas à sociedade e levantar estratégias de geoconservação para as mesmas. O Sistema de Cavernas da Água Corrente (SAC) foi selecionada como a caverna-tipo, destacando-se no cenário espeleológico ilhéu e nacional por suas dimensões, com 1026 m de extensão, 783 m deles mapeados. A pesquisa contou com etapas de campo para o mapeamento espeleológico do SAC, coleta de amostras de espeleotemas e outros materiais geológicos, registros fotográficos, levantamento dos elementos geoespeleológicos e visita a outras cavidades para o estabelecimento de correlações com a caverna-tipo. As amostras coletadas foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de energia dispersiva, difração de raios X, confecção de lâminas delgadas e microscopia ótica. A organização e análise de dados de campo e de laboratório, confecção de difratogramas e de mapas e redação de textos completaram os procedimentos metodológicos adotados. O SAC espelha as características morfológicas, geoespeleológicas, hidrológicas, espeleogenéticas e bioespeleológicas das demais cavernas visitadas. É formada por matacões provenientes do Granito Ilha, essencialmente arredondados, com diâmetros centimétricos a decamétricos. A aglomeração desses núcleos rochosos e consequente formação do vazio subterrâneo são produtos de movimentos de massa episódicos e processos erosivos contínuos que atuaram ao longo do Quaternário. Matacões *in situ* são menos comuns. A cavidade se desenvolve em diferentes níveis, eventualmente sobrepostos, conectados por passagens inclinadas e escarpadas. Suas galerias são labirínticas com contornos e dimensões variáveis, assim como os salões aos quais elas se ligam, comumente delimitados por matacões de grandes dimensões. A existência de muitas aberturas de teto e entradas é comum. Estruturas ígneas e tectônicas, materiais de alteração, erosão e deposição e pequenos cursos d'água são alguns dos elementos que caracterizam a geoespeleologia e hidrologia do SAC. Os espeleotemas são as feições que mais de destacam e um dos principais fatores de convergência entre as cavernas estudadas, sendo principalmente cilíndricos e coraloides, compostos por opala. Espeleotemas planares são mais restritos e compostos por óxido de manganês e alofano. No conjunto, evidenciam a atuação de processos inorgânicos influenciados e mediados por microrganismos. Os serviços geossistêmicos de provisão de habitat e de conhecimento são os principais benefícios prestados por essas cavernas à sociedade e ajudam a justificar iniciativas atuais e futuras de geoconservação das mesmas, principalmente por mecanismos legais, como a criação e ampliação de áreas protegidas e o cumprimento da lei de licenciamento ambiental.

**Palavras-chave:** Cavernas em matacões graníticos. Espeleotemas. Ilha de Santa Catarina.

## ABSTRACT

The Santa Catarina Island, known by its beaches, dunes, and natural viewpoints, also own an expressive speleological heritage. There are 84 recorded natural underground caves from which 53 are associated with agglomeration of granite boulders, mainly on the hillsides that makes the southern and central-north rocky masses, and 31 sea caves, in igneous context as well, associated with costs and beaches. Both types are little explored and studied in Brazil. The purpose of this research is to obtain an overview about the underground caves on granite boulders in this area, focusing on its geospeleological aspects, having as base a cave-type, and the correlation of data collected from this caves with others equivalent to it. Additionally, it is intended to identify the geosystemic services provided by this set of caves to society and raise strategies of geoconservation for them. The Agua Corrente Cave System (SAC) was selected as cave-type, standing out in the islet and national speleological scenario for its dimensions, with 1026 m in length, 783 m of which are mapped. The research included phase in the field for speleological mapping of the SAC, collection of samples of speleothems and other geological materials, photographic records, survey of geospeleological elements and visit to other caves to establish correlations with the cave-type. The collected samples were analyzed by scanning electron microscopy, dispersive energy spectroscopy, X-ray diffraction, making of thin slides and optical microscopy. The organization and analysis of field and laboratory data, making diffractograms and maps, and writing texts completed the adopted methodological procedures. The SAC mirrors the morphological, geospeleological, hydrological, speleogenetic and bio-speleological characteristics from the other visited caves. It is formed by boulders from Granito Ilha, essentially rounded, with centimetric to decametric diameters. The agglomeration of these rocky cores and the consequent formation of the underground void are products of episodic mass movements and continuous erosive processes that operated throughout the Quaternary. In situ boulders are less common. The SAC develops at different levels, eventually overlapping, connected by inclined and steep passages. Its galleries are labyrinthine with contours and variable dimensions, as well as the rooms to which they connect, commonly delimited by large boulders. The existence of many ceiling openings and entrances is common. Igneous and tectonic structures, weathering, erosion and deposition materials and small watercourses are some of the elements that characterize the geospeleology and hydrology of the SAC. The speleothems are the features that stand out the most and one of the main factors of convergence between the studied caves, being mainly cylindrical and coraloids, composed of opal. Planar speleothems are more uncommon and composed of manganese oxide and allophane. Altogether, they show the performance of inorganic processes influenced and mediated by microorganisms. Geosystemic habitat provision and knowledge services are the main benefits provided by these caves to society and help to justify current and future geoconservation initiatives, mainly through legal mechanisms, such as the creation and expansion of protected areas and compliance with environmental licensing law.

**Keywords:** Granite boulders caves. Speleothems. Santa Catarina Island.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 – Localização da Ilha de Santa Catarina e do Sistema de Cavernas da Água Corrente, caverna-tipo da pesquisa.....                                                                         | 37 |
| Figura 2.2 – Geologia da Ilha de Santa Catarina com a localização das cavidades subterrâneas em matacões e marinhas e indicação do contexto do Sistema de Cavernas da Água Corrente .....           | 39 |
| Figura 5.1 – Contexto geológico do Sistema de Cavernas da Água Corrente.....                                                                                                                        | 74 |
| Figura 5.2 - Exposição do maciço rochoso e de matacões do Granito Ilha em antiga área de extração da rocha a montante do SAC.....                                                                   | 74 |
| Figura 5.3 – Exposições do maciço rochoso do Granito Ilha (bastante alterado) nos fundos do loteamento Jardim Recanto da Ilha, área que foi modificada por obras do empreendimento residencial..... | 75 |
| Figura 5.4 – Modelos digitais de elevação do contexto do Sistema de Cavernas da Água Corrente .....                                                                                                 | 76 |
| Figura 5.5 – Imagens de satélite em perspectiva 3D da área onde está situado o SAC. ....                                                                                                            | 77 |
| Figura 5.6 – Modelos tridimensionais do SAC extraídos do aplicativo <i>TopoDroid</i> .....                                                                                                          | 80 |
| Figura 5.7 – Galeria ampla, com largura e altura suficientes para deslocamento em pé de mais de uma pessoa ao mesmo tempo.....                                                                      | 82 |
| Figura 5.8 – Galeria com teto baixo, onde é necessário inclinar o corpo ou rastejar.....                                                                                                            | 82 |
| Figura 5.9 – Galeria estreita, mas com altura suficiente para andar em pé.....                                                                                                                      | 83 |
| Figura 5.10 – Galeria com teto baixo e estreita, conhecida como “quebra-corpo”, onde é necessário rastejamento e manobras com o corpo para o deslocamento.....                                      | 83 |
| Figura 5.11 – Setor do Salão Maior próximo à entrada (E) .....                                                                                                                                      | 85 |
| Figura 5.12 – Salão de menor dimensão formado pela junção de dois matacões e com piso limpo, levemente inclinado para esquerda .....                                                                | 85 |
| Figura 5.13 – Abertura de teto, característica comum do SAC em função da morfologia e arranjo dos matacões que compõem o teto ou da ausência destes.....                                            | 86 |
| Figura 5.14 – Passagem escarpada de uma galeria superior para o Salão Maior.....                                                                                                                    | 86 |
| Figura 5.15 – Blocos poliédricos e lascas derivados de atividade de cantaria e ponteira de ferro utilizada nas ações de corte e desbaste da rocha.....                                              | 89 |
| Figura 5.16 – Amostra do Granito Ilha coletada no SAC (SAC 7) para análise petrográfica..                                                                                                           | 89 |

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.17 – Lâmina delgada da amostra SAC 7 mostrando seus minerais primários (Qz – quartzo; Kfs – feldspato potássico; Pl – plagioclásio; Bt – biotita) .....                                                        | 90  |
| Figura 5.18 – Lâmina delgada da amostra SAC 7 mostrando diferentes gerações do quartzo, com e sem recuperação cristalina .....                                                                                          | 91  |
| Figura 5.19 – Matakão de granito propilitizado .....                                                                                                                                                                    | 92  |
| Figura 5.20 – Exposição de pequenos matakões, blocos e seixos de diabásio no SAC com formato tabular .....                                                                                                              | 93  |
| Figura 5.21 – Matakão de diabásio com cerca de 30 cm de largura em processo de fragmentação em placas tabulares .....                                                                                                   | 93  |
| Figura 5.22 – Amostra de diabásio coletada no SAC (SAC 9) para análise petrográfica .....                                                                                                                               | 94  |
| Figura 5.23 – Lâmina delgada da amostra SAC 9 (nicóis cruzados) mostrando seus minerais primários (Pl – feldspato plagioclásio; Px – piroxênios; Opq – minerais opacos).....                                            | 94  |
| Figura 5.24 – Enclave microgranular de composição provavelmente básica e formato elipsoidal.....                                                                                                                        | 96  |
| Figura 5.25 – Enclave microgranular em alto relevo em relação ao granito.....                                                                                                                                           | 97  |
| Figura 5.26 – Enclave microgranular leucocrático (composição ácida) com formato elipsoidal e cerca de 60 cm de diâmetro (mancha em evidência acima da cabeça do espeleólogo).....                                       | 97  |
| Figura 5.27 – Enclaves microgranulares (há ao menos duas estruturas, uma em cada extremidade) com borda irregular e menor quantidade de minerais máficos, evidenciando uma maior assimilação pelo magma granítico ..... | 98  |
| Figura 5.28 – Fratura com segmentos nas posições oblíqua e vertical dividindo um matakão em duas partes .....                                                                                                           | 100 |
| Figura 5.29 – Raízes crescendo ao longo de fraturas, com colaboração no processo de ampliação das aberturas, fragmentação dos matakões e formação de descontinuidades secundárias.....                                  | 101 |
| Figura 5.30 – Dois matakões resultantes da divisão de uma massa maior pela presença e evolução de uma descontinuidade na rocha .....                                                                                    | 102 |
| Figura 5.31 – Matakão fragmentado em dois pontos provavelmente em função da pressão exercida pelas massas maiores ao redor .....                                                                                        | 102 |
| Figura 5.32 – Amostra de um veio de aplito (SAC 15) com os minerais já bastante alterados e possíveis precipitações de opala (manchas esbranquiçadas).....                                                              | 103 |



|                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.33 – Veio (ou bolsão) pegmatítico com os mesmos minerais primários do granito, porém com dimensões maiores (Qz – quartzo; Bt – biotita; Fsp <sub>1</sub> – feldspato potássico; Fsp <sub>2</sub> – feldspato plagioclásio [?]) ..... | 104 |
| Figura 5.34 – Veio aplítico (local de coleta da amostra SAC 15) antes contínuo e agora face a face em dois matacões opostos, uma evidência da abertura da galeria a partir de um fraturamento.....                                            | 104 |
| Figura 5.35 – Veio (ou bolsão) pegmatítico antes contínuo dividido em dois matacões distintos, mas ainda encostados um no outro .....                                                                                                         | 105 |
| Figura 5.36 – Matacões parcialmente expostos formando a parede de uma galeria do SAC                                                                                                                                                          | 107 |
| Figura 5.37 – Grande fragmento de contornos curvilíneos, indicando a atuação de descamação esferoidal, destacado do matacão original à sua direita .....                                                                                      | 108 |
| Figura 5.38 – Depósito clástico gravitacional no piso do SAC formado por matacões, blocos e seixos de granito (G) e diabásio (D).....                                                                                                         | 108 |
| Figura 5.39 – Amostra de <i>duricrust</i> ferruginoso coletada no SAC (SAC 10), caracterizada pela coloração avermelhada, alta densidade e estrutura estratificada .....                                                                      | 109 |
| Figura 5.40 – Lâmina delgada da amostra SAC 10 mostrando grãos de quartzo (Qz), minerais opacos (Opq) e uma faixa com maior concentração de hidróxido de ferro.....                                                                           | 110 |
| Figura 5.41 – Conglomerado polimítico cimentado por óxidos e hidróxidos de ferro (G – granito; D – diabásio; Df – <i>duricrust</i> ferruginoso; M - matriz) .....                                                                             | 111 |
| Figura 5.42 – Amostra do cimento ferruginoso que constitui a matriz do conglomerado (SAC 13).....                                                                                                                                             | 112 |
| Figura 5.43 – Descontinuidade da camada conglomerática mais expressiva do SAC, erodida por ação fluvial .....                                                                                                                                 | 112 |
| Figura 5.44 – Espeleotemas cilíndricos e coraloídes posicionados sobre conglomerado .....                                                                                                                                                     | 113 |
| Figura 5.45 – Matacão localizado em uma das entradas secundárias do SAC, já na interface com a parte externa, com caneluras na posição em que foram formadas (na vertical) .....                                                              | 114 |
| Figura 5.46 – Matacão tombado em um dos limites da cavidade com caneluras profundas distribuídas em toda sua circunferência.....                                                                                                              | 114 |
| Figura 5.47 – Caneluras com relevo suave dispostas na horizontal em matacão que compõe o teto da caverna .....                                                                                                                                | 115 |
| Figura 5.48 – Matacão junto a uma das drenagens que atravessam o SAC com superfície polida por ação das águas fluviais .....                                                                                                                  | 115 |
| Figura 5.49 – Formas alveolares em um matacão no teto do SAC .....                                                                                                                                                                            | 116 |

|                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.50 – Ponto onde o curso d'água A adentra ao SAC.....                                                                                                                                                                              | 117 |
| Figura 5.51 – Ponto um pouco a jusante de onde o curso d'água A deixa o SAC, infiltrando-se em material da unidade Depósitos Colúvio-aluvionares .....                                                                                     | 118 |
| Figura 5.52 – Ponto onde os cursos d'água A e B ressurgem em superfície, já na área externa ao SAC (lateral direita de montante para jusante).....                                                                                         | 119 |
| Figura 5.53 – Marcas no piso e paredes que delimitam o curso d'água A, definidas por variação de coloração e fixação de carga sedimentar (incluindo matéria orgânica), mostrando as variações no nível e intensidade do fluxo de água..... | 121 |
| Figura 5.54 – Ação de uma drenagem intermitente (ativada em períodos chuvosos com precipitações mais fortes) na remoção do manto de intemperismo que envolve matacões em um setor marginal do SAC .....                                    | 121 |
| Figura 5.55 – Mata secundária sob a qual está localizado o SAC.....                                                                                                                                                                        | 127 |
| Figura 5.56 – Entrada inclinada servindo como caminho da matéria orgânica produzida no meio epígeo para o hipógeo.....                                                                                                                     | 127 |
| Figura 5.57 – Exemplos de fungos que se desenvolvem sobre a matéria orgânica residual disposta no interior do SAC e que atuam na sua decomposição .....                                                                                    | 128 |
| Figura 5.58 – Superfície úmida colonizada por fungos e provavelmente bactérias (manchas esbranquiçadas e amareladas).....                                                                                                                  | 128 |
| Figura 5.59 – Líquens (manchas esverdeadas na parte inferior da imagem) desenvolvidos sobre matacão disposto na zona fótica da cavidade .....                                                                                              | 129 |
| Figura 5.60 – Raízes de árvores adentrando à caverna por aberturas no teto.....                                                                                                                                                            | 129 |
| Figura 5.61 – Matacão envolvido pelas raízes de uma figueira em uma das entradas do SAC .....                                                                                                                                              | 130 |
| Figura 5.62 – Raízes posicionadas na descontinuidade entre o matacão e lasca de sua decomposição esferoidal, colaborando no intemperismo e no transporte de matéria orgânica .....                                                         | 130 |
| Figura 5.63 – Invertebrados avistados no SAC .....                                                                                                                                                                                         | 133 |
| Figura 5.64 – Invertebrados avistados no SAC .....                                                                                                                                                                                         | 134 |
| Figura 5.65 – Anuros avistados no SAC .....                                                                                                                                                                                                | 135 |
| Figura 5.66 – Presença do diabásio (D) em outras cavernas em matacões graníticos da ISC                                                                                                                                                    | 138 |
| Figura 5.67 – Estruturas tectônicas e ígneas observadas em outras cavernas em matacões graníticos da ISC .....                                                                                                                             | 139 |

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.68 – Galeria da Gruta do Saco Grande delimitada por um único matacão (ou maciço rochoso ?) que, aparentemente, está <i>in situ</i> .....                                                   | 141 |
| Figura 5.69 – Material de alteração envolvendo matacão (provavelmente <i>in situ</i> ) em uma galeria mais profunda da Gruta do Saco Grande .....                                                   | 141 |
| Figura 5.70 – Salão de entrada da Gruta das Feiticeiras, delimitado por matacões de grandes dimensões .....                                                                                         | 142 |
| Figura 5.71 – Matacões com caneluras dispostas na posição horizontal (ver setas) evidenciando o movimento e rotação dos mesmos – Gruta do Oiteiro .....                                             | 142 |
| Figura 5.72 – Superfície estriada pelo atrito do deslocamento de um matacão em relação a outro ou de um plano de falha em teto inclinado da Gruta do Oiteiro .....                                  | 143 |
| Figura 5.73 – Formas alveolares resultantes da alteração química do granito na Gruta da Trilha do Saquinho I.....                                                                                   | 144 |
| Figura 5.74 – Evolução das formas alveolares da Figura 5.73 na base de um matacão.....                                                                                                              | 145 |
| Figura 5.75 – Formas alveolares em outras cavernas em matacões graníticos da ISC .....                                                                                                              | 145 |
| Figura 5.76 – Conglomerado sustentado pelos clastos com cimento ferruginoso na Gruta do Saco Grande.....                                                                                            | 146 |
| Figura 6.1 – Espeleotemas cilíndricos de piso individualizados – SAC .....                                                                                                                          | 151 |
| Figura 6.2 – Conjunto de espeleotemas cilíndricos, incluindo morfologias claviformes, com baixa densidade de feições – SAC.....                                                                     | 151 |
| Figura 6.3 – Conjunto de espeleotemas predominantemente cônicos com alta densidade de feições – SAC .....                                                                                           | 152 |
| Figura 6.4 – Fotomicrografia de espeleotema cilíndrico de piso individualizado (corte longitudinal - amostra SAC 4) desenvolvido sobre grãos de quartzo (nicóis paralelos).....                     | 152 |
| Figura 6.5 – Espeleotema de piso com ramificações cilíndricas derivando de uma base comum – SAC (diâmetro da moeda de 22 mm) .....                                                                  | 153 |
| Figura 6.6 – Espeleotemas cilíndricos de piso agrupados – Gruta da Feiticeira.....                                                                                                                  | 153 |
| Figura 6.7 – Detalhe do conjunto da Figura 6.6 mostrando espeleotemas na face horizontal e inclinada do matacão granítico .....                                                                     | 154 |
| Figura 6.8 – Em evidência, na porção do substrato logo abaixo do núcleo principal de espeleotemas (à esquerda da escala), a crosta que serve como base comum para as feições. 154                   |     |
| Figura 6.9 – Espeleotemas cilíndricos agrupados distribuídos sobre pavimento horizontal e inclinado, unidos por uma base provavelmente da mesma composição das feições – Caverna Central Park ..... | 155 |

|                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.10 – Espeleotemas cilíndricos de teto agrupados e coraloides associados .....                                                                                                                                                                   | 156 |
| Figura 6.11 – Espeleotemas cilíndricos de teto agrupados com até 1,5 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro – Gruta do Oiteiro .....                                                                                                                       | 157 |
| Figura 6.12 – Espeleotemas cilíndricos de teto agrupados.....                                                                                                                                                                                            | 157 |
| Figura 6.13 – Os maiores espeleotemas observados dentre as cavidades estudadas.....                                                                                                                                                                      | 158 |
| Figura 6.14 – Detalhe do conjunto da Figura 6.12. A acreção sucessiva de material recobriu e uniu feições antes individualizadas, formando um núcleo de espeleotemas mais desenvolvidos, principalmente em largura .....                                 | 158 |
| Figura 6.15 – Detalhe do conjunto de espeleotemas da Figura 6.11 mostrando um núcleo de feições maiores e muito próximas que vão ficando menores, mais espaçadas e com aspecto nodular na direção da borda do conjunto (porção superior da imagem) ..... | 159 |
| Figura 6.16 – Gotejamento em espeleotemas do conjunto da Figura 6.12, recobertos por microrganismos (porções de cor branca).....                                                                                                                         | 159 |
| Figura 6.17 – Conjunto de espeleotemas cilíndricos de teto, incluindo indivíduos com crescimento não vertical, inclinados em relação ao substrato .....                                                                                                  | 160 |
| Figura 6.18 – Possíveis anemólitos .....                                                                                                                                                                                                                 | 160 |
| Figura 6.19 – Espeleotemas em forma de grama, feições de teto próximas entre si, mas individualizadas, e com aspecto acicular predominante – SAC .....                                                                                                   | 161 |
| Figura 6.20 – Outro conjunto de espeleotemas em forma de grama no SAC, onde foram realizadas coletas para análises de MEV, EDS, DRX e microscopia ótica.....                                                                                             | 161 |
| Figura 6.21 – Espeleotema coletado do conjunto da Figura 6.20 (amostra SAC 5A).....                                                                                                                                                                      | 162 |
| Figura 6.22 – Coraloides arborescentes e nodulares recobrimdo todas as faces expostas de um bloco no piso da caverna - SAC .....                                                                                                                         | 163 |
| Figura 6.23 – Coraloides arborescentes no teto – Gruta do Saco Grande .....                                                                                                                                                                              | 164 |
| Figura 6.24 – Coraloides arborescentes na parede – Gruta do Oiteiro.....                                                                                                                                                                                 | 164 |
| Figura 6.25 – Coraloides arborescentes no teto – Gruta da Trilha do Saquinho I.....                                                                                                                                                                      | 165 |
| Figura 6.26 – Coraloides nodulares agrupados na parede – Gruta da Trilha do Saquinho I..                                                                                                                                                                 | 165 |
| Figura 6.27 – Coraloides nodulares individualizados em parede – SAC .....                                                                                                                                                                                | 166 |
| Figura 6.28 – Coraloides nodulares agrupados em parede e opiliões – Gruta das Feiticeiras                                                                                                                                                                | 166 |
| Figura 6.29 – Espeleotema planar do tipo <i>flowstone</i> em parede – SAC .....                                                                                                                                                                          | 168 |
| Figura 6.30 – Aproximação no espeleotema da Figura 6.29 .....                                                                                                                                                                                            | 168 |
| Figura 6.31 – O <i>flowstone</i> em detalhe (amostra SAC 14).....                                                                                                                                                                                        | 169 |
| Figura 6.32 – Setor com morfologia diferenciada em <i>flowstone</i> de parede – SAC .....                                                                                                                                                                | 169 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.33 – Ocorrência de <i>flowstone</i> no leito (1) e nas margens (2) de um pequeno curso d'água que corta o SAC.....                                                                                                                                                       | 170 |
| Figura 6.34 – <i>Flowstone</i> associado à circulação concentrada da água (em filete).....                                                                                                                                                                                        | 171 |
| Figura 6.35 – <i>Flowstone</i> associado à circulação concentrada da água (a seta indica o sentido do fluxo) em pontos próximos, gerando feições lineares paralelas em parede na Gruta do Saco Grande (local de coleta da amostra GSG 2, submetida às análises de MEV e DRX)..... | 172 |
| Figura 6.36 – Imagem de MEV da ponta da amostra SAC 5A, apresentando uma superfície irregular, de aspecto rugoso-granula. ....                                                                                                                                                    | 173 |
| Figura 6.37 – Corte longitudinal da amostra SAC 4 .....                                                                                                                                                                                                                           | 174 |
| Figura 6.38 – Imagem de MEV de corte transversal na amostra SAC 5A.....                                                                                                                                                                                                           | 175 |
| Figura 6.39 – Imagem de MEV de corte transversal na amostra SAC 4.....                                                                                                                                                                                                            | 175 |
| Figura 6.40 – Imagem de MEV de corte transversal na amostra SAC 5A.....                                                                                                                                                                                                           | 176 |
| Figura 6.41 – Imagem de MEV da superfície externa de coraloide arborescente (amostra GSG 1A).....                                                                                                                                                                                 | 176 |
| Figura 6.42 – Imagem de MEV de superfícies de quebra de coraloide arborescente (amostra GSG 1A).....                                                                                                                                                                              | 177 |
| Figura 6.43 – Imagem de MEV de corte transversal de coraloide nodular (amostra SAC 12) .....                                                                                                                                                                                      | 177 |
| Figura 6.44 – Imagem de MEV do perfil da crosta que constitui o <i>flowstone</i> (amostra SAC 14) .....                                                                                                                                                                           | 178 |
| Figura 6.45 – Amostra GSG 2, <i>flowstone</i> de morfologia linear dentada formado em área com escoamento lento e concentrado de água (em filete).....                                                                                                                            | 179 |
| Figura 6.46 – Imagem da superfície interna da amostra GSG 2 obtida por MEV, mostrando aspecto poroso e rachaduras que lembram gretas de contração, formadas provavelmente no processo de secagem do material em estufa .....                                                      | 179 |
| Figura 6.47 – Cortes longitudinais nos espeleotemas cilíndricos.....                                                                                                                                                                                                              | 181 |
| Figura 6.48 – Lâmina da amostra SAC 4 (nicóis paralelos), dividida em setores a partir de suas características estruturais .....                                                                                                                                                  | 182 |
| Figura 6.49 – Mosaico das lâminas da amostra SAC 5A (obtido em lupa estereoscópica) ...                                                                                                                                                                                           | 183 |
| Figura 6.50 – Lâmina de um fragmento da amostra SAC 6 (nicóis paralelos) .....                                                                                                                                                                                                    | 184 |
| Figura 6.51 – Aspectos da morfologia do coraloide nodular (amostra SAC 12) .....                                                                                                                                                                                                  | 184 |
| Figura 6.52 – Setor com estrutura estratificada no <i>flowstone</i> (amostra SAC 14) .....                                                                                                                                                                                        | 185 |

|                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.53 – Setor apical e parte do setor intermediário da amostra SAC 4 ao microscópio ótico (nicóis cruzados).....                                                        | 186 |
| Figura 6.54 – Setor apical da amostra SAC 5A ao microscópio ótico (nicóis paralelos) .....                                                                                    | 186 |
| Figura 6.55 – Grão de quartzo na matriz amorfa do espeleotema cilíndrico de teto (amostra SAC 5A) .....                                                                       | 187 |
| Figura 6.56 – Grão de feldspato na matriz amorfa do espeleotema cilíndrico de piso (amostra SAC 4).....                                                                       | 188 |
| Figura 6.57 – Grão de biotita na matriz amorfa do espeleotema cilíndrico de piso (amostra SAC 4).....                                                                         | 189 |
| Figura 6.58 – Grãos de magnetita (mineral acessório do Granito Ilha) na matriz amorfa do espeleotema cilíndrico de piso (amostra SAC 4) a nicóis paralelos.....               | 190 |
| Figura 6.59 – Difrátogramas dos espeleotemas cilíndricos .....                                                                                                                | 192 |
| Figura 6.60 – Difrátogramas dos espeleotemas coraloídes arborescentes .....                                                                                                   | 193 |
| Figura 6.61– Difrátograma do espeleotema coraloíde nodular – SAC 12.....                                                                                                      | 194 |
| Figura 6.62 – Difrátogramas da amostra SAC 14 e de materiais compostos por birnessita, para comparação .....                                                                  | 196 |
| Figura 6.63 – Aspecto laminar/foliado de um setor do <i>flowstone</i> (amostra SAC 14), característica da birnessita .....                                                    | 197 |
| Figura 6.64 – Difrátogramas da amostra GSG 2 e de materiais compostos por alofano, para comparação .....                                                                      | 199 |
| Figura 6.65 – Diferentes tipos de bactérias em corte transversal na amostra SAC 12.....                                                                                       | 201 |
| Figura 6.66 – Bactérias do tipo estafilococos na amostra SAC 12.....                                                                                                          | 202 |
| Figura 6.67 – Diplobacilos (e seus moldes) na amostra SAC 4 .....                                                                                                             | 202 |
| Figura 6.68 – Levedura com cicatrizes de brotamento na amostra SAC 12 .....                                                                                                   | 204 |
| Figura 6.69 – Fungos filamentosos recobrimdo a amostra GSG 1A.....                                                                                                            | 204 |
| Figura 6.70 – Tecas de amebas da espécie <i>Assulina muscorum</i> (?) na amostra GSG 1B .....                                                                                 | 206 |
| Figura 6.71 – Detalhe das escamas de sílica que dão corpo à teca da Figura 6.70b .....                                                                                        | 207 |
| Figura 6.72 – Tecas de amebas da ordem Arcellinida.....                                                                                                                       | 208 |
| Figura 6.73 – Fios de seda confeccionados por aranhas em um conjunto de espeleotemas coraloídes arborescentes – SAC .....                                                     | 209 |
| Figura 6.74 – Teia de aranha confeccionada em um conjunto de espeleotemas coraloídes arborescentes envolvendo também fragmentos vegetais e partes de insetos (setas) – SAC .. | 210 |

|                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 6.75 – Fios de seda de teia de aranha na amostra GSG 1A e elemento biológico não identificado .....                                                                                                 | 210 |
| Figura 6.76 – Fragmentos de fios de seda de teias de aranha (elementos filamentosos/aciculares de coloração escura) em lâminas delgadas (nicóis paralelos).....                                            | 211 |
| Figura 6.77 – Ácaros avistados em conjunto de espeleotemas coraloides arborescentes – SAC .....                                                                                                            | 212 |
| Figura 6.78 – Fragmento vegetal recoberto por bacilos na amostra GSG 1.....                                                                                                                                | 213 |
| Figura 6.79 – Elementos biológicos não identificados observados nas amostras de espeleotemas.....                                                                                                          | 214 |
| Figura 6.80 – Matacões parcialmente envolvidos/recobertos por solo e serapilheira.....                                                                                                                     | 219 |
| Figura 6.81 – Área externa do SAC .....                                                                                                                                                                    | 220 |
| Figura 6.82 – Contraste entre o quartzo (Qz), em relevo e desprovido de sinais de alteração, e o feldspato potássico (Kfs), já alterado para caulinita – Gruta do Riacho Subterrâneo .....                 | 221 |
| Figura 6.83 – Precipitado de opala na forma de microesferas aglutinadas revestindo o granito no SAC .....                                                                                                  | 223 |
| Figura 6.84 – Microesferas de opala revestindo o granito na Gruta do Saco Grande (amostra GSG 1B).....                                                                                                     | 223 |
| Figura 6.85 – Precipitado de opala revestindo o granito na Gruta das Feiticeira.....                                                                                                                       | 224 |
| Figura 6.86 – Teto da Gruta das Feiticeiras colonizado por fungos e possivelmente líquens (porção esbranquiçada).....                                                                                      | 224 |
| Figura 6.87 – Aspecto textural interno do espeleotema cilíndrico de teto (amostra SAC 5A) .....                                                                                                            | 226 |
| Figura 6.88 – “Braços” secundários de <i>flowstones</i> de óxido de manganês associados a ramificações do caminho principal de fluxo da água em função da morfologia e descontinuidades dos matacões ..... | 228 |
| Figura 6.89 – Microrganismos observados por MEV na parte interna da amostra do <i>flowstone</i> (SAC 14).....                                                                                              | 230 |
| Figura 7.1 – Indivíduos de <i>Ischnocnema manezinho</i> avistados sobre substrato rochoso em duas cavidades em matacões graníticos da ISC .....                                                            | 240 |
| Figura 7.2 – Larva de Trichoptera dentro de seu saco de seda.....                                                                                                                                          | 241 |
| Figura 7.3 – Mapa das áreas prioritárias para a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro no estado de Santa Catarina.....                                                                        | 253 |

|                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 7.4 – Correlação entre as cavidades subterrâneas e áreas protegidas (Unidades de Conservação e Áreas de Preservação Permanente) na Ilha de Santa Catarina.....                                                                               | 257 |
| Figura 7.5 – Polígono referente à proposta do Refúgio da Vida Silvestre Municipal Meiembipe em Florianópolis envolvendo essencialmente Áreas de Preservação Permanente relacionadas a encostas e topos de morro no centro norte e norte da ISC..... | 258 |
| Figura 7.6 – Trechos do livro “Um pedacinho de terra e muitas histórias para contar: a geodiversidade de Florianópolis” onde as cavernas da ISC são abordadas .....                                                                                 | 259 |



## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 3.1 – Identificação dos materiais coletados e procedimentos realizados .....                                                                                          | 52  |
| Quadro 4.1 – Classificação granulométrica de sedimentos clásticos proposta por Wentworth (1922) .....                                                                        | 62  |
| Quadro 5.1 – Relação das cavidades subterrâneas em matacões graníticos visitadas na ISC, ordenadas a partir do maior detalhamento da visita e consideração na pesquisa ..... | 136 |
| Quadro 7.1 – Sistema de valoração da geodiversidade proposto por Gray (2004) .....                                                                                           | 233 |
| Quadro 7.2 – Serviços geossistêmicos (providos pela geodiversidade) propostos por Gray, com indicação dos valores da geodiversidade aos quais se equivalem .....             | 235 |
| Quadro 7.3 – Serviços geossistêmicos identificados no SAC e em outras cavernas em matacões graníticos da ISC.....                                                            | 236 |
| Quadro 7.4 – Cavernas da ISC em áreas protegidas - Unidades de Conservação e/ou Áreas de Preservação Permanente (G – Gruta; Gt – Grota; F – Furna; T – Toca).....            | 255 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 6.1 – Fases minerais identificadas nos espeleotemas analisados com seus respectivos arquivos de informações cristalográficas (código do acervo do <i>Inorganic Crystal Structure Database</i> - ICSD), ângulos de difração ( $2\theta$ ) e distâncias interplanares ( $d$ [Å])..... | 194 |
| Tabela 6.2 – Elementos químicos (em % peso*) detectados por EDS nas amostras de espeleotemas cilíndricos de piso e de teto (*erro $\pm 1$ Sigma; **detecção na camada/raia L)                                                                                                              | 216 |
| Tabela 6.3 – Elementos químicos (em % peso*) detectados por EDS nas amostras de espeleotemas coraloídes arborescente e nodular (*erro $\pm 1$ Sigma).....                                                                                                                                  | 217 |
| Tabela 6.4 – Elementos químicos (em % peso*) detectados por EDS nas amostras de espeleotemas planares do tipo <i>flowstone</i> (*erro $\pm 1$ Sigma) .....                                                                                                                                 | 218 |

## SUMÁRIO

|              |                                                                                       |           |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                               | <b>27</b> |
| 1.1          | A AUTORA E A ESCOLHA DO TEMA.....                                                     | 28        |
| 1.2          | APRESENTAÇÃO DO TEMA .....                                                            | 30        |
| 1.3          | JUSTIFICATIVAS.....                                                                   | 31        |
| 1.4          | ESTRUTURA DA TESE .....                                                               | 33        |
| 1.5          | OBJETIVOS.....                                                                        | 34        |
| <b>1.5.1</b> | <b>Objetivo geral .....</b>                                                           | <b>34</b> |
| <b>1.5.2</b> | <b>Objetivos específicos.....</b>                                                     | <b>34</b> |
| <b>2</b>     | <b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>                                                            | <b>36</b> |
| 2.1          | LOCALIZAÇÃO.....                                                                      | 36        |
| 2.2          | CLIMA .....                                                                           | 36        |
| 2.3          | GEOLOGIA .....                                                                        | 38        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Complexo Águas Mornas.....</b>                                                     | <b>40</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Granito São Pedro de Alcântara .....</b>                                           | <b>40</b> |
| <b>2.3.3</b> | <b>Granito Ilha.....</b>                                                              | <b>41</b> |
| <b>2.3.4</b> | <b>Suíte Plutono-Vulcânica Cambirela .....</b>                                        | <b>42</b> |
| <b>2.3.5</b> | <b>Enxame de Diques Florianópolis .....</b>                                           | <b>43</b> |
| <b>2.3.6</b> | <b>Depósitos coluviais.....</b>                                                       | <b>43</b> |
| 2.4          | GEOMORFOLOGIA .....                                                                   | 44        |
| 2.5          | HIDROGRAFIA .....                                                                     | 45        |
| 2.6          | VEGETAÇÃO.....                                                                        | 46        |
| 2.7          | CAVERNA-TIPO: SISTEMA DE CAVERNAS DA ÁGUA CORRENTE.....                               | 46        |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                                       | <b>48</b> |
| 3.1          | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                                            | 48        |
| 3.2          | TRABALHOS DE CAMPO .....                                                              | 48        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Mapeamento espeleológico .....</b>                                                 | <b>49</b> |
| <b>3.2.2</b> | <b>Coleta de amostras .....</b>                                                       | <b>50</b> |
| 3.3          | ANÁLISES LABORATORIAIS .....                                                          | 51        |
| <b>3.3.1</b> | <b>Avaliação e caracterização macroscópica .....</b>                                  | <b>51</b> |
| <b>3.3.2</b> | <b>Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva....</b> | <b>52</b> |
| <b>3.3.3</b> | <b>Microscopia ótica.....</b>                                                         | <b>53</b> |

|                |                                                                                   |            |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3.3.4</b>   | <b>Difratometria de raios X.....</b>                                              | <b>54</b>  |
| <b>3.4</b>     | <b>TRABALHOS EM GABINETE .....</b>                                                | <b>54</b>  |
| <b>3.4.1</b>   | <b>Confecção de mapas temáticos.....</b>                                          | <b>55</b>  |
| <b>3.4.2</b>   | <b>Confecção do mapa espeleológico .....</b>                                      | <b>56</b>  |
| <b>4</b>       | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                                 | <b>57</b>  |
| <b>4.1</b>     | <b>CAVERNAS EM GRANITO .....</b>                                                  | <b>58</b>  |
| <b>4.1.1</b>   | <b>Classificação de cavernas em granito .....</b>                                 | <b>59</b>  |
| <i>4.1.1.1</i> | <i>Sobre o uso da nomenclatura cavernas em matacões.....</i>                      | <i>61</i>  |
| <b>4.1.2</b>   | <b>Feições de destaque: espeleotemas .....</b>                                    | <b>62</b>  |
| <b>4.2</b>     | <b>UM PANORAMA DOS ESTUDOS SOBRE CAVERNAS EM GRANITO NO BRASIL.....</b>           | <b>67</b>  |
| <b>4.2.1</b>   | <b>Trabalhos com abordagens geoespeleológica, exploratória e estatística.....</b> | <b>67</b>  |
| <b>4.2.2</b>   | <b>Trabalhos com abordagem bioespeleológica .....</b>                             | <b>70</b>  |
| <b>4.2.3</b>   | <b>Obras clássicas.....</b>                                                       | <b>71</b>  |
| <b>4.3</b>     | <b>PANORAMA SOBRE OS ESTUDOS LOCAIS.....</b>                                      | <b>71</b>  |
| <b>5</b>       | <b>SISTEMA DE CAVERNAS DA ÁGUA CORRENTE .....</b>                                 | <b>73</b>  |
| <b>5.1</b>     | <b>CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO LOCAL.....</b>                             | <b>73</b>  |
| <b>5.2</b>     | <b>MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO.....</b>                                              | <b>78</b>  |
| <b>5.2.1</b>   | <b>Estatísticas do SAC .....</b>                                                  | <b>78</b>  |
| <b>5.2.2</b>   | <b>Características morfológicas e topográficas .....</b>                          | <b>81</b>  |
| <b>5.3</b>     | <b>GEOESPELEOLOGIA .....</b>                                                      | <b>87</b>  |
| <b>5.3.1</b>   | <b>Litologias .....</b>                                                           | <b>87</b>  |
| <i>5.3.1.1</i> | <i>Granito Ilha.....</i>                                                          | <i>87</i>  |
| <i>5.3.1.2</i> | <i>Diabásio .....</i>                                                             | <i>92</i>  |
| <b>5.3.2</b>   | <b>Estruturas ígneas e tectônicas .....</b>                                       | <b>95</b>  |
| <i>5.3.2.1</i> | <i>Enclaves.....</i>                                                              | <i>95</i>  |
| <i>5.3.2.2</i> | <i>Fraturas.....</i>                                                              | <i>98</i>  |
| <i>5.3.2.3</i> | <i>Veios aplíticos e pegmatíticos .....</i>                                       | <i>103</i> |
| <b>5.3.3</b>   | <b>Materiais e formas de alteração, erosão e deposição .....</b>                  | <b>105</b> |
| <i>5.3.3.1</i> | <i>Matacões, blocos e seixos .....</i>                                            | <i>106</i> |
| <i>5.3.3.2</i> | <i>Duricrust ferruginoso.....</i>                                                 | <i>109</i> |
| <i>5.3.3.3</i> | <i>Depósitos clásticos consolidados.....</i>                                      | <i>110</i> |
| <i>5.3.3.4</i> | <i>Caneluras .....</i>                                                            | <i>113</i> |

|         |                                                                                                                |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.3.5 | <i>Superfícies polidas</i> .....                                                                               | 113 |
| 5.3.3.6 | <i>Formas alveolares</i> .....                                                                                 | 116 |
| 5.4     | HIDROLOGIA.....                                                                                                | 117 |
| 5.5     | ESPELEOGÊNESE.....                                                                                             | 122 |
| 5.5.1   | <b>Fase 1 - formação dos matacões</b> .....                                                                    | 122 |
| 5.5.2   | <b>Fase 2 – erosão do saprolito e exumação de matacões <i>in situ</i></b> .....                                | 123 |
| 5.5.3   | <b>Fase 3 – movimentação dos matacões</b> .....                                                                | 124 |
| 5.5.4   | <b>Fase 4 – erosão secundária e acomodação dos matacões</b> .....                                              | 124 |
| 5.5.5   | <b>Uma classificação para o SAC</b> .....                                                                      | 125 |
| 5.6     | BIOESPELEOLOGIA.....                                                                                           | 125 |
| 5.7     | CORRELAÇÕES DO SAC COM OUTRAS CAVIDADES SUBTERRÂNEAS EM<br>MATAÇÕES GRANÍTICOS NA ILHA DE SANTA CATARINA ..... | 135 |
| 5.7.1   | <b>Aspectos geoespeleológicos</b> .....                                                                        | 137 |
| 5.7.2   | <b>Aspectos morfológicos</b> .....                                                                             | 146 |
| 5.7.3   | <b>Aspectos hidrológicos</b> .....                                                                             | 147 |
| 5.7.4   | <b>Aspectos bioespeleológicos</b> .....                                                                        | 147 |
| 6       | <b>ESPELEOTEMAS: FEIÇÕES DE DESTAQUE DAS CAVERNAS<br/>ESTUDADAS</b> .....                                      | 149 |
| 6.1     | CARACTERIZAÇÃO MACROSCÓPICA .....                                                                              | 149 |
| 6.1.1   | <b>Espeleotemas cilíndricos</b> .....                                                                          | 150 |
| 6.1.1.1 | <i>Espeleotemas cilíndricos de piso</i> .....                                                                  | 150 |
| 6.1.1.2 | <i>Espeleotemas cilíndricos de teto</i> .....                                                                  | 155 |
| 6.1.2   | <b>Coraloides</b> .....                                                                                        | 162 |
| 6.1.2.1 | <i>Arborescentes</i> .....                                                                                     | 162 |
| 6.1.2.2 | <i>Nodulares</i> .....                                                                                         | 163 |
| 6.1.3   | <b>Espeleotemas planares</b> .....                                                                             | 167 |
| 6.2     | CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA.....                                                                               | 172 |
| 6.2.1   | <b>Textura</b> .....                                                                                           | 172 |
| 6.2.2   | <b>Estrutura</b> .....                                                                                         | 180 |
| 6.2.3   | <b>Caracterização mineralógica</b> .....                                                                       | 185 |
| 6.2.3.1 | <i>Espeleotemas cilíndricos e coraloides</i> .....                                                             | 185 |
| 6.2.3.2 | <i>Espeleotemas planares</i> .....                                                                             | 195 |
| 6.2.4   | <b>Conteúdo biológico</b> .....                                                                                | 200 |

|         |                                                                                                       |     |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.4.1 | <i>Bactérias</i> .....                                                                                | 200 |
| 6.2.4.2 | <i>Fungos</i> .....                                                                                   | 203 |
| 6.2.4.3 | <i>Amebas tecadas</i> .....                                                                           | 203 |
| 6.2.4.4 | <i>Fios de seda de teias de aranha</i> .....                                                          | 209 |
| 6.2.4.5 | <i>Outros elementos biológicos</i> .....                                                              | 212 |
| 6.3     | COMPOSIÇÃO QUÍMICA .....                                                                              | 215 |
| 6.4     | GÊNESE E DESENVOLVIMENTO DOS ESPELEOTEMAS .....                                                       | 218 |
| 6.4.1   | <b>Espeleotemas cilíndricos e coraloides</b> .....                                                    | 219 |
| 6.4.2   | <b>Flowstones</b> .....                                                                               | 227 |
| 7       | <b>VALORAÇÃO E GEOCONSERVAÇÃO DAS CAVERNAS EM MATAÇÕES GRANÍTICOS DA ILHA DE SANTA CATARINA</b> ..... | 232 |
| 7.1     | VALORAÇÃO DAS CAVERNAS .....                                                                          | 232 |
| 7.1.1   | <b>Serviços de regulação</b> .....                                                                    | 237 |
| 7.1.1.1 | <i>Participação em etapas do ciclo das rochas</i> .....                                               | 237 |
| 7.1.1.2 | <i>Participação em etapas do ciclo hidrológico e regulação da qualidade da água</i> ...               | 238 |
| 7.1.2   | <b>Serviços de suporte</b> .....                                                                      | 238 |
| 7.1.2.1 | <i>Habitat para macro e microbiota</i> .....                                                          | 238 |
| 7.1.2.2 | <i>Ambiente para a formação de depósitos clásticos, espeleotemas e formas de alteração</i> .....      | 241 |
| 7.1.3   | <b>Serviços de provisão</b> .....                                                                     | 242 |
| 7.1.3.1 | <i>Fornecimento de água potável</i> .....                                                             | 242 |
| 7.1.3.2 | <i>Potencial microbiológico</i> .....                                                                 | 243 |
| 7.1.4   | <b>Serviços culturais</b> .....                                                                       | 244 |
| 7.1.4.1 | <i>Potencial geoturístico</i> .....                                                                   | 244 |
| 7.1.4.2 | <i>Atuação de espeleólogos</i> .....                                                                  | 245 |
| 7.1.4.3 | <i>Atividade de cantaria</i> .....                                                                    | 246 |
| 7.1.5   | <b>Serviços de conhecimento</b> .....                                                                 | 246 |
| 7.1.5.1 | <i>Ampliação dos conhecimentos sobre a geodiversidade local</i> .....                                 | 246 |
| 7.1.5.2 | <i>Pesquisas e publicações</i> .....                                                                  | 247 |
| 7.1.5.3 | <i>Formação de geocientistas</i> .....                                                                | 248 |
| 7.2     | AMEAÇAS .....                                                                                         | 249 |
| 7.3     | ESTRATÉGIAS DE GEOCONSERVAÇÃO.....                                                                    | 252 |
| 8       | <b>CONCLUSÕES</b> .....                                                                               | 260 |

|                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                                 | <b>265</b> |
| <b>ANEXO A – Mapa de distribuição das cavidades naturais subterrâneas da Ilha de Santa Catarina.....</b> | <b>283</b> |
| <b>ANEXO B – Mapa espeleológico do Sistema de Cavernas da Água Corrente.</b>                             | <b>284</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

As cavernas são ambientes usualmente tidos como misteriosos, relacionados muitas vezes a histórias fantasiosas que fazem parte do imaginário popular das regiões onde as mesmas estão presentes. Mais do que isso, são testemunhas da história da Terra e do homem, pois guardam registros geológicos, paleoambientais, paleontológicos e arqueológicos que nos contam sobre a evolução do Planeta e dos primeiros hominídeos a habitá-lo.

É comum que sejam conhecidas e admiradas por suas dimensões e por sua ornamentação. Lobo e Boggiani (2013) disseram que, em geral, são esses atributos cênicos e paisagísticos os primeiros a serem utilizados para justificar a importância e necessidade de sua preservação. Os autores reforçam o fato de que as cavernas apresentam um rico conjunto de elementos geológicos, biológicos, paleontológicos e climáticos, por vezes singulares, os quais justificam enquadrá-las com patrimônio natural. Podem ainda ser consideradas enquanto patrimônio cultural, haja vista as relações de cunho folclórico, religioso e histórico que podem existir entre tais ambientes e uma determinada população.

Segundo o Decreto N° 6.640/2008, em seu artigo 1º, parágrafo único, uma cavidade natural subterrânea é:

Todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, fuma ou buraco, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem, desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante (BRASIL, 2008).

O mesmo artigo versa ainda sobre a proteção destes espaços subterrâneos, salientando que tal ação deve “permitir estudos e pesquisas de ordem técnico-científica, bem como atividades de cunho espeleológico, étnico-cultural, turístico, recreativo e educativo”. A premissa relacionada à proteção e à necessidade de se gerar conhecimento sobre estes elementos da geodiversidade brasileira já havia sido preconizada na Constituição Federal de 1988, a qual considera, em seu artigo 20, as cavidades subterrâneas como bens da União, passíveis de restrições e da necessidade de uma série de estudos para seu uso e/ou destruição (BRASIL, 1988).

Nesse sentido, a presente tese de doutorado pretende contribuir cientificamente para o conhecimento de cavidades subterrâneas em litologia granítica, ainda pouco exploradas e



estudadas no território brasileiro, especificamente as desenvolvidas em matacões, tendo como área de estudo a Ilha de Santa Catarina (ISC) e como caverna-tipo o Sistema de Cavernas da Água Corrente.

## 1.1 A AUTORA E A ESCOLHA DO TEMA

Abro aqui um parêntesis na redação desta tese. Neste tópico, deixando as normas de lado, falarei em primeira pessoa, com objetivo de fazer ao leitor uma síntese da minha trajetória acadêmica e profissional e mostrar onde, como e por que esta pesquisa foi concebida.

Sempre tive uma forte ligação com a natureza. Cresci no interior do Paraná, num sítio com vista para a Serra da Esperança, e minha infância e juventude foram repletas de experiências em ambientes com florestas, rios, cachoeiras, montanhas e mesmo algumas cavernas. De alguma forma essa ligação orientou minha escolha acadêmica e profissional. Quando li em um Guia do Estudante sobre o curso de Geografia e sobre a atuação de um Geógrafo, logo me identifiquei com a profissão.

Iniciei o curso de Bacharelado em Geografia em 2006 na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) e já no segundo ano me envolvi com atividades de estágio e iniciação científica. Minha pesquisa, que culminou no meu Trabalho de Conclusão de Curso, envolvia os temas geodiversidade, geoconservação e patrimônio geológico, uma abordagem dentro das geociências que estava emergindo no país.

Durante a graduação conheci o Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE), entidade criada em 1985 por jovens universitários e pessoas externas à universidade que se dedicavam à exploração, cadastramento e pesquisa em cavernas, principalmente na região paranaense dos Campos Gerais. Tal grupo havia passado um longo período desativado e estava retomando suas atividades. Passei a integrar o GUPE em 2010, após me formar, e desde então permaneço como membro do grupo. A espeleologia se tornou uma área de interesse para mim, mas ainda em um segundo plano de atuação.

Entre 2011 e 2013 cursei o mestrado em Geografia na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), período em que residi em Florianópolis. Minha pesquisa consistiu em um aprofundamento das temáticas trabalhadas na graduação, uma contribuição metodológica para entender a incorporação do patrimônio geológico no desenvolvimento territorial, especificamente no município de Tibagi (PR).

Nesta época, durante a divulgação do 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia para os meus colegas de turma, evento que seria realizado em Ponta Grossa e organizado pelo GUPE, o professor Edison Tomazzoli me falou sobre algumas cavernas que ele conhecia na Ilha de Santa Catarina (doravante denominada de ISC), porção insular do município de Florianópolis, as quais ele tinha o desejo de estudar. Foi uma surpresa saber sobre a ocorrência de cavernas na ISC, informação que continua surpreendendo as pessoas. A pesquisa desenvolvida resultou no artigo “Espeleologia na Ilha de Santa Catarina: um estudo preliminar das cavernas da ilha” (TOMAZZOLI *et al.*, 2012), trabalho que abriu as portas para uma série de acontecimentos que promoveram e ampliaram os conhecimentos sobre cavidades naturais subterrâneas em Florianópolis.

Um desses desdobramentos foi a criação, em 2012, do Espeleo Grupo Teju Jagua, formado por pessoas que participaram da concepção do artigo acima citado (como eu) e por espeleólogos que já atuavam na prospecção e exploração de cavernas na ISC (os quais se conheceram por conta da divulgação do trabalho). Além das atividades de exploração e cadastramento de cavidades no Cadastro Nacional de Cavernas (CNC), uma importante ação do Teju Jagua foi uma denúncia de irregularidades envolvendo a implantação de um empreendimento imobiliário em uma área com grande concentração de cavidades naturais subterrâneas no bairro Saco Grande. Esta denúncia levou ao embargo total e depois parcial da obra, que precisou se adequar às normas vigentes relacionadas à proteção de cavernas, culminando na elaboração do primeiro estudo espeleológico para fins de licenciamento ambiental no município de Florianópolis.

Posteriormente, no período entre 2014 e 2018, a então doutoranda em Geografia da UFSC e na época também membro do Teju Jagua, Marinês da Silva, desenvolveu o primeiro trabalho sistemático sobre cavernas da ISC. Sua pesquisa abordou a gênese e evolução de cavernas marinhas localizadas no maciço costeiro do Pântano do Sul e, além do pioneirismo no tema em nível nacional, também rompeu com uma grande dificuldade que se tinha até então, que era o acesso às cavernas marinhas nos costões e a realização da topografia espeleológica.

As cavernas marinhas compõem, juntamente com as cavernas em matacões graníticos, o patrimônio espeleológico da ISC. Ambos os tipos são pouco explorados e estudados no Brasil, por motivos que abordarei adiante no texto. Essa lacuna, relacionada principalmente às cavernas em matacões graníticos, mostrou-se uma oportunidade de realização de um projeto de pesquisa de doutorado da minha parte. Ao mesmo tempo,

permitiria unir a espeleologia, há tanto tempo presente na minha vida, com as temáticas que eu vinha trabalhando até então.

Em 2016 ingressei no doutorado em Geografia na UFSC sob a orientação do professor Edison Tomazzoli com a proposta de trabalhar com as cavernas em matacões graníticos da ISC. A proposta passou pelos ajustes naturais do processo de amadurecimento e desenvolvimento da pesquisa e hoje se materializa nesta tese de doutorado. Fecho o parêntesis.

## 1.2 APRESENTAÇÃO DO TEMA

O Brasil é um país com grande ocorrência de cavidades subterrâneas, seja pela diversidade de litologias combinada a elementos tectônico-estruturais, climáticos e hidrológicos, seja pelas suas dimensões territoriais. O Cadastro Nacional de Cavernas (CNC), vinculado à Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), possui 7925 cavernas registradas atualmente (SBE, 2020). Já o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), administrado pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), tinha cadastradas até janeiro do presente ano 20.166 cavidades (ICMBIO, 2020).

Mais da metade do total registrado no CNC são de cavernas carbonáticas, rochas onde o mineral predominante apresenta o radical carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), altamente solúveis (exs.: calcário, dolomito, mármore). De acordo com Piló e Auler (2011), no mundo, em torno de 90% das cavernas conhecidas estão associadas às rochas carbonáticas. Além destas, litologias como arenitos e quartzitos também são susceptíveis ao cavernamento. Os autores mencionaram ainda que há, em menor escala, ocorrências de cavernas também em granito, gnaiss e outras rochas metamórficas como micaxistos e filitos, além de coberturas de solos.

Do total registrado no CNC, 262 cavidades são de contextos litológicos ígneos (envolvendo principalmente granitos e basaltos), correspondendo a 3,4% do total (SBE, 2020). Estudos geológicos e geomorfológicos de regiões onde ocorrem rochas ígneas, tais como granitos, não costumam fazer menção à existência de formas subterrâneas, seja pelas dimensões pouco expressivas ou porque as cavidades geralmente são consideradas apenas um acidente geológico ou geomorfológico (HARDT, 2002), fato este apontado em Piló e Auler (2011), quando colocaram que grande parte das cavernas em granito encontradas no Brasil corresponde a “cavernas de pequeno porte” (p.13).

Mesmo sem possuir a mesma projeção das cavernas carbonáticas, as cavernas em granito são igualmente relevantes, e em alguns casos podem sim atingir dimensões destacadas, a exemplo da Gruta do Riacho Subterrâneo, localizada no município de Itu, que tem sido considerada a primeira no *ranking* brasileiro, da América do Sul e do Hemisfério Sul para esta litologia, estando entre as seis maiores do mundo com seus cerca de 1900 metros de extensão (medida de ponta de trena) (IGUAL, 2011).

No entanto, a importância das cavidades em granito vai muito além de suas dimensões. Despain e Stock (2005) afirmaram que através de observações, medições e interpretações da morfologia das cavernas em granito podemos desvendar a história do seu desenvolvimento e, a partir da integração das informações provenientes da história geomorfológica regional, compreender a evolução da topografia montanhosa e a evolução da paisagem como um todo. Some-se a isso a riqueza de elementos da geodiversidade e da biodiversidade presentes nesses ambientes.

O município de Florianópolis, no estado de Santa Catarina, possui 84 cavidades naturais subterrâneas registradas no CNC (ANEXO A; SBE, 2020). Deste total, 53 são associadas a aglomerações de matacões graníticos, as quais ocorrem nas encostas e bases dos morros e fundos de vales, concentrando-se principalmente no setor centro-norte da ISC. As demais são classificadas como cavernas marinhas, presentes nos costões ou na interface dos maciços rochosos com as praias, desenvolvendo-se principalmente em diques de diabásio, ignimbritos e riolitos e estão concentradas no setor sul da ISC (SILVA, 2018).

Estes registros restringem-se, até o momento, à ISC, porção insular do município de Florianópolis, o qual ocupa atualmente a 17ª posição no *ranking* dos municípios com maior número de registros no CNC (SBE, 2020). Tal fato é bastante significativo, uma vez que todas as cavernas localizadas na ISC são de contextos litológicos ígneos, o que a coloca como uma das principais áreas no país com ocorrências conhecidas nesse tipo de rocha.

### 1.3 JUSTIFICATIVAS

A realização desta pesquisa suscita uma provocação dentro da comunidade espeleológica brasileira. Cavernas em granito não recebem a atenção exploratória e científica compatível com a relevância de seus atributos, fato que se reflete na baixa quantidade de publicações, principalmente aprofundadas, de base, envolvendo esse tipo de cavidade natural subterrânea no país.

Desta forma, ao mesmo tempo em que tal pesquisa pretende dar um primeiro passo no sentido de atender essa lacuna no conhecimento espeleológico nacional, contempla também uma pormenorização da espeleologia regional, especificamente da ISC, no município de Florianópolis. Recentemente este setor do estado de Santa Catarina foi incluído como Área Prioritária para a Conservação do Patrimônio Espeleológico pelo CECAV (ICMBIO, 2018), sendo uma das ações prioritárias previstas a ampliação do conhecimento por meio de pesquisas científicas.

As cavernas em matacões graníticos da ISC apresentam um desenvolvimento linear complexo, com condutos labirínticos e com sobreposição de níveis. A organização dos matacões permite na maioria das vezes que haja várias entradas e claraboias, mas em níveis mais profundos ocorrem zonas afóticas, sem aberturas ou comunicação com o ambiente exterior. Possuem dimensões consideráveis para a litologia, muitas com centenas de metros, como é o caso do Sistema de Cavernas da Água Corrente (SBE SC-17), que possui 1026 m de extensão (medida de ponta de trena). Tal dimensão a coloca como uma das maiores cavernas em granito do Brasil.

Alguns elementos da geodiversidade observados nessas cavernas guardam semelhanças com os de cavidades em outras litologias, a exemplo dos espeleotemas, principal feição de convergência entre ambientes subterrâneos. Objeto de investigação em cavernas em granito da Espanha e Portugal, por exemplo, há décadas (como será visto no item 4.1.2), essas ocorrências praticamente não possuem estudos no Brasil.

A biodiversidade das cavernas mostra a relevância ecossistêmica destes ambientes. É composta por pequenos vertebrados, como anuros e morcegos, uma grande quantidade de invertebrados, alguns deles com adaptações ao ambiente subterrâneo, e um rico universo microbiológico ainda pouco conhecido. Algumas espécies são, inclusive, enquadradas como ameaçadas de extinção.

Infelizmente, muitas destas cavidades em matacões graníticos se encontram ameaçadas. Uma das principais ameaças se dá pelo crescimento e expansão urbana, que avança cada vez mais em direção às áreas próximas aos morros, desrespeitando o limite estabelecido pelo CONAMA na Resolução N° 347/2004 de um raio preventivo de proteção para qualquer caverna em 250 metros (MMA, 2004). O reconhecimento destas cavidades, tanto por leigos como por profissionais habilitados a realizar estudos ambientais, não é tão simples, seja por sua expressão na paisagem, que foge dos padrões mais conhecidos para

cavernas, ou mesmo pela carência de pesquisas e publicações sobre estes ambientes em litologia granítica.

Outra ameaça é a visitação turística não regulamentada, que encontrou nas cavernas da ISC um novo filão para grupos de trilhas e aventura. Esta atividade, praticada sem a adoção de equipamentos básicos de segurança e sem controle ou normativas, coloca em risco a vida dos visitantes e, principalmente, a qualidade ambiental dos ambientes cavernícolas.

Manifestar de forma explícita a existência dessas cavidades em uma região onde até poucos anos atrás não se reconheciam essas ocorrências, descrevendo suas características, recursos e valores associados, é fundamental para embasar futuras ações relacionadas à gestão deste patrimônio natural. Pode ainda estimular pesquisas espeleológicas em contextos litológicos similares em outras regiões do país.

#### 1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese está organizada em oito capítulos, sendo o último dedicado às conclusões do trabalho. Neste primeiro capítulo é apresentado o tema da pesquisa, as justificativas que embasaram a opção pelo objeto e área de estudo e os objetivos traçados para condução do trabalho. No segundo capítulo é feita uma caracterização da área de estudo, focando em suas características naturais mais afetas às cavidades em matacões graníticos. A caverna-tipo é apresentada brevemente, já que será alvo de uma descrição detalhada em capítulo próprio, já dentro dos resultados e discussões da pesquisa. No capítulo 3 são descritos os materiais e métodos que foram empregados no desenvolvimento do trabalho. O capítulo 4 constitui a fundamentação teórica da tese, onde são apresentados e debatidos os referenciais bibliográficos que dão sustentação à investigação do tema.

Os capítulos 5, 6 e 7 correspondem aos resultados e discussões da tese, embora não tenha sido adotada aqui essa denominação e divisão. Foram organizados a partir dos eixos de análise do tema geral da pesquisa: a caverna-tipo ou modelo; as feições tipicamente cavernícolas que se destacam nesta caverna e que marcam sua convergência com as demais ocorrências do tipo na ISC e com cavernas de modo geral; os valores ambientais que traduzem a relevância desse conjunto de cavidades. Os resultados foram apresentados e discutidos simultaneamente, no intuito de facilitar a leitura e entendimento do texto.

O capítulo 5 é dedicado ao Sistema de Cavernas da Água Corrente, com a apresentação do mapeamento espeleológico parcial da cavidade, da descrição e interpretação

de dados do levantamento geoespeleológico, da análise espeleogenética, além de informações gerais sobre a bioespeleologia da caverna. Outro ponto importante é a correlação desse conjunto de dados com informações pontuais de outras cavernas em matacões graníticos da ISC, na intenção de se obter um panorama integrado para esta área.

O capítulo 6 traz uma caracterização geral dos espeleotemas, observados em todas as cavernas visitadas, a partir de uma pormenorização macroscópica e microscópica de amostras coletadas essencialmente na caverna-tipo. São descritos e discutidos aspectos morfológicos, texturais, estruturais, composicionais e genéticos dessas feições.

O capítulo 7 é sustentado pelos dados, resultados e discussões apresentados nos capítulos anteriores, a partir dos quais foram reconhecidos os serviços geossistêmicos prestados pelo Sistema de Cavernas da Água Corrente e demais cavidades para a biodiversidade e a sociedade. Foram também levantadas as principais ameaças às quais esse conjunto de cavernas está exposto e quais ações de geoconservação já foram executadas ou podem ser tomadas para garantir sua proteção e manutenção dos serviços identificados.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é:

- Caracterizar os aspectos geoespeleológicos do Sistema de Cavernas da Água Corrente estabelecendo correlações com outras cavidades subterrâneas em matacões graníticos da Ilha de Santa Catarina, obtendo um panorama sobre as ocorrências deste tipo nesta área.

### 1.5.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que dão suporte à proposição geral da pesquisa são:

- Discutir a gênese e evolução do Sistema de Cavernas da Água Corrente;
- Caracterizar os espeleotemas presentes no Sistema de Cavernas da Água Corrente quanto aos seus aspectos morfológicos, composicionais e genéticos;
- Identificar e discutir os serviços geossistêmicos relacionados às cavernas em matacões graníticos da Ilha de Santa Catarina;

- Gerar subsídios técnico-científicos para embasar ações de geoconservação das cavernas em matacões graníticos da Ilha de Santa Catarina;
- Contribuir para o conhecimento sobre cavernas em granito em território brasileiro, estimulando pesquisas em outras regiões do país.



## 2 ÁREA DE ESTUDO

As cavernas desenvolvidas em matacões graníticos ocorrem em toda a ISC, com uma concentração mais significativa em seu setor centro-norte, onde está localizado o Sistema de Cavernas da Água Corrente, selecionada como a caverna-tipo nesta pesquisa. Como um dos objetivos do trabalho é buscar conexões e similaridades desta cavidade com as demais ocorrências do tipo na ISC, a descrição da área de estudo se estende a toda a ISC, contextualizando assim todo o universo espeleológico abordado.

### 2.1 LOCALIZAÇÃO

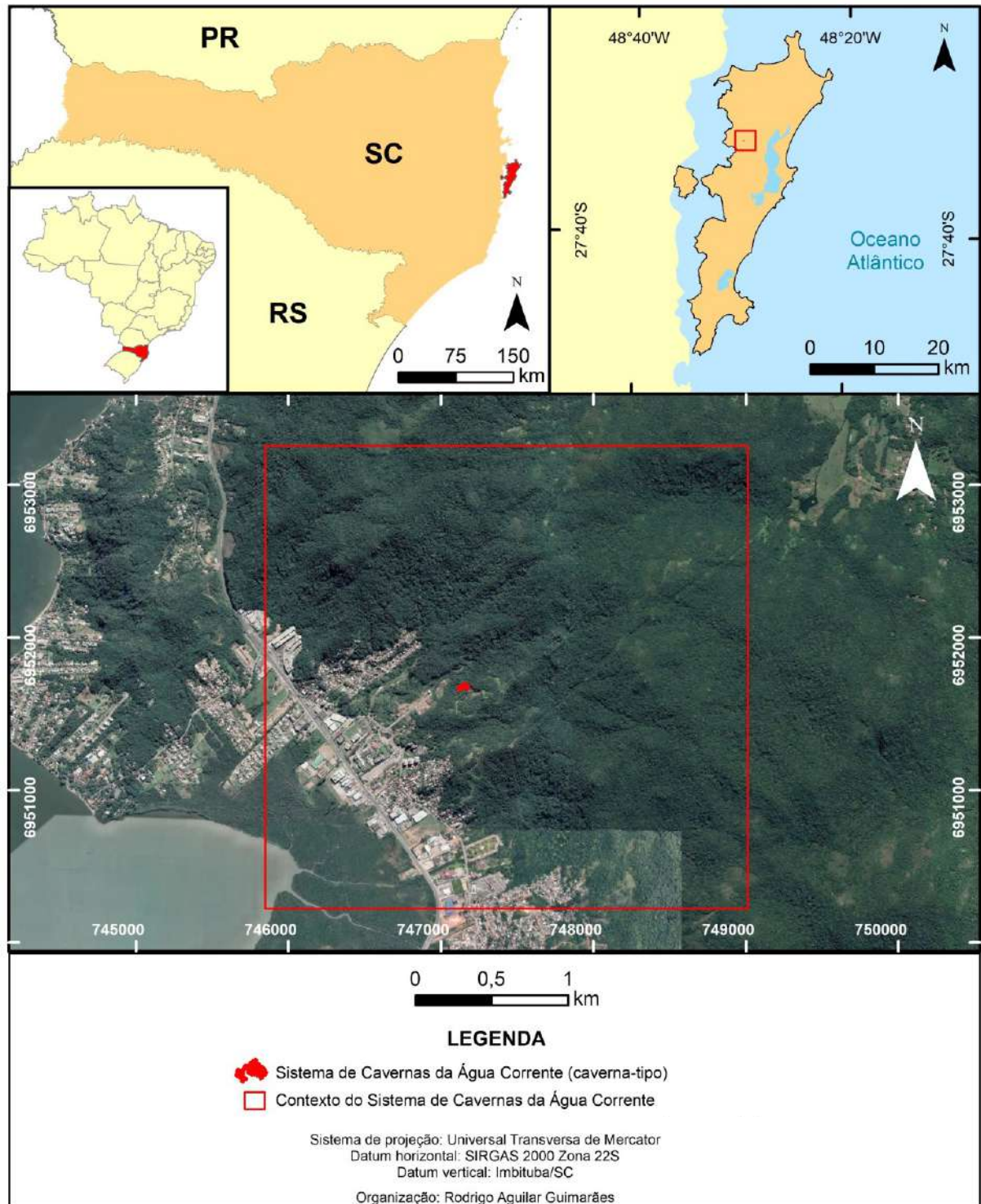
A ISC está localizada na porção central do litoral do estado de Santa Catarina, Região Sul do Brasil. Com uma área de aproximadamente 425 km<sup>2</sup>, todo seu território integra os domínios administrativos do município de Florianópolis (Figura 2.1). É banhada pelo Oceano Atlântico e separada da porção continental por um canal de aproximadamente 500 m de extensão, de onde derivam as baías Norte e Sul (CARUSO, 1983).

### 2.2 CLIMA

O clima em que se insere a ISC reflete a sua localização geográfica em latitude subtropical com influência da maritimidade. Apresenta moderadas amplitudes térmicas diárias e anuais, verões quentes e invernos amenos. Segundo a classificação de Köppen-Geiser, é caracterizada pelo tipo climático Cfa – Mesotérmico Úmido, com chuvas distribuídas de forma uniforme ao longo do ano e verões quentes (CARUSO, 1983).

As massas de ar que atuam na ISC são a Massa Tropical Atlântica e a Massa Polar Atlântica, sendo a primeira dominante. Resultado do encontro desses dois sistemas, a Frente Polar Atlântica é a responsável pelo ritmo das chuvas (FREYESLEBEN, 1979 *apud* CARUSO, 1983). De acordo com a normal climatológica de 1961-1990 (INMET), a precipitação média anual é de cerca de 1400 mm, sendo janeiro e fevereiro os meses mais chuvosos e junho e julho os meses menos chuvosos. A umidade relativa média anual é de 82%.

Figura 2.1 – Localização da Ilha de Santa Catarina e do Sistema de Cavernas da Água Corrente, caverna-tipo da pesquisa.



Fonte: a autora

## 2.3 GEOLOGIA

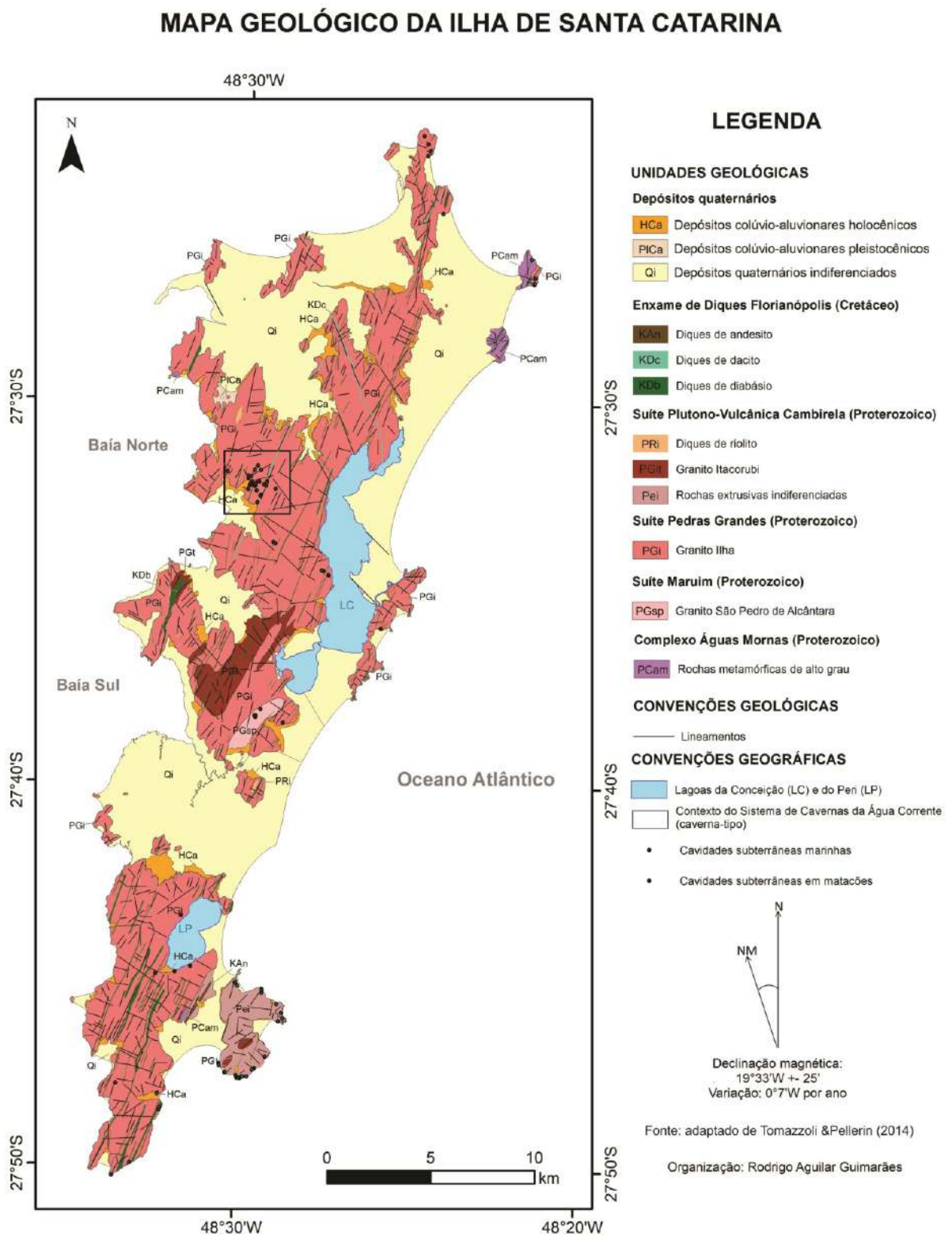
Em síntese, a geologia da ISC é composta por rochas relacionadas ao Ciclo Orogênico Brasileiro (limite Neoproterozoico/Paleozoico), diques cretáceos correlatos ao Grupo Serra Geral da Bacia do Paraná (Província Magmática Paraná-Etendeka) e depósitos continentais e transicionais quaternários (Figura 2.2).

Sustentando os maciços que dão corpo às terras altas da ISC, das rochas mais antigas para as mais recentes, estão presentes: ortognaisses e migmatitos do Complexo Águas Mornas; Granito São Pedro de Alcântara, pertencente à Suíte Maruim; Granito Ilha, que integra a Suíte Intrusiva Pedras Grandes; e tufos, ignimbritos, riolitos e o Granito Itacorubi, da Suíte Plutono-Vulcânica Cambirela (ZANINI *et al.*, 1997; TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015). De acordo com Santos *et al.* (2019), dados geológicos, reológicos e geocronológicos apontariam que os líquidos magmáticos que originaram tanto o Granito Ilha como as rochas extrusivas da Suíte Cambirela seriam provenientes da mesma câmara magmática, situada em níveis crustais rasos. Todo esse conjunto de rochas é cortado pelo Enxame de Diques Florianópolis, que compreende um conjunto variado de litotipos, de rochas básicas a ácidas (MARQUES, 2001; TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015), posicionado no início do Cretáceo e que teria atuado como alimentador dos derrames de lavas principalmente basálticas enriquecidas em Ti da unidade Urubici/Khumib da Província Magmática Paraná-Etendeka (FLORISBAL *et al.*, 2018).

Os depósitos quaternários ocupam a planície costeira e sua interface com o embasamento, contornando e interligando as porções altas da ISC ou mesmo recobrendo porções das encostas dos maciços rochosos (HORN FILHO, 2006). São agrupados conforme suas idades e origens deposicionais em: a) sistema deposicional continental, composto por depósitos coluvial, aluvial e de leque aluvial; b) sistema deposicional transicional ou litorâneo, composto por depósitos eólicos pleistocênicos, além de depósitos marinhos praias, eólicos, lagunares, flúvio-lagunares, lagunar praial, paludial e de baía de idade holocênica (LIVI, 2009; GERCO, 2010).

Na sequência são expostas informações adicionais das unidades geológicas acima referidas, de modo a embasar a caracterização do contexto litológico (dominantemente vinculado ao Granito Ilha) ao qual as cavernas em matacões estão diretamente associadas. Dentre os depósitos quaternários apenas o depósito coluvial será abordado, pois marca o limite de ocorrência dessas cavidades subterrâneas.

Figura 2.2 – Geologia da Ilha de Santa Catarina com a localização das cavidades subterrâneas em matacões e marinhas e indicação do contexto do Sistema de Cavernas da Água Corrente.



Fonte: adaptado de Tomazzoli e Pellerin (2014)

### 2.3.1 Complexo Águas Mornas

O Complexo Águas Mornas compreende as rochas mais antigas da ISC, as quais tem como principal área de ocorrência o Morro dos Ingleses e o Morro das Aranhas, na porção nordeste da ilha. De forma mais restrita aparecem também na Ponta do Sambaqui, a noroeste, e na localidade da Costa de Dentro, ao sul (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

É constituído por ortognaisses e migmatitos muito afetados por intrusões graníticas, sendo observada uma grande quantidade de enclaves microgranulares de composição variada (tonalitos, dioritos e anfibolitos) (CORRÊA, 2016). Em Tomazzoli e Pellerin (2015, p. 229) esses litotipos são descritos como:

(...) extremamente heterogêneos, representados, principalmente por corpos máficos parcial ou totalmente anfibolitizados, com dimensões e formatos variados e envoltos por granito-gnaiss milonítico leucocrático médio a grosso, localmente porfirítico, cujo maior ou menor índice colorimétrico reflete o grau de assimilação dessas rochas máficas. Ambos litotipos apresentam-se envoltos por remobilizados graníticos, equigranulares finos a médios, de cor rosada, que constituem uma rede de veios e bandas de espessura variada.

Segundo os autores, as rochas anfibolitizadas constituem resquícios de uma sequência mais antiga que foi deformada e metamorfisada, posteriormente hospedando intrusões graníticas. De acordo com Silva *et al.* (2000), datações por U-Pb SHRIMP apontaram idades de  $2.175 \pm 13$  Ma para o protólito e  $592 \pm 5$  para o metamorfismo e deformação.

### 2.3.2 Granito São Pedro de Alcântara

Esta unidade, intrusiva no Complexo Águas Mornas, está mapeada como uma porção alongada ao sul do Maciço da Costeira, no bairro Rio Tavares. É constituída por granitoides calcioalcalinos, predominantemente monzogranitos, além de sienogranitos e quartzo-monzogranitos de cor cinza, geralmente porfiríticos com fenocristais de feldspato potássico. Enclaves são frequentes e de composições variadas, andesíticas, tonalíticas e granodioríticas (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2014; 2015). Quanto à idade desses granitoides, Corrêa (2016) apontou que o magmatismo que os originou teria acontecido no intervalo entre 594 e 584 Ma (método LA-ICP-MS em zircões), com ocorrência de vários pulsos.

Segundo Corrêa (2016) os monzogranitos apresentam textura inequigranular seriada grossa com presença de megacristais de plagioclásio e feldspato alcalino, já os máficos se encontram agrupados e possuem tamanho entre 6 e 10 mm. A coloração é acinzentada e há presença de foliação magmática. Os minerais principais são quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, biotita e hornblenda.

### 2.3.3 Granito Ilha

O Granito Ilha foi assim nomeado por Zanini *et al.* (1997), consagrando a denominação informal que já era utilizada para se referir aos granitoides da chamada Suíte Intrusiva Pedras Grandes aflorantes na ISC e em porções continentais nos municípios de Florianópolis, Paulo Lopes e São José (CORRÊA, 2016). Os granitoides desta suíte são alcalinos e de natureza pós-tectônica, com pouca ou nenhuma deformação dúctil (BASEI, 1985; TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015). Corrêa (2016) datou a Suíte Pedras Grandes na ISC a partir de três amostras do Granito Ilha (método LA-ICP-MS em zircões) e constatou que a mesma teria se posicionado ao longo de aproximadamente 15 milhões de anos no intervalo de 600 – 585 Ma.

Unidade geológica mais expressiva na ISC, o Granito Ilha tem suas exposições tanto pelo maciço rochoso propriamente dito, como nos costões e cortes de rodovia, como também na forma de matacões residuais ou movimentados. É intrusivo em rochas do Complexo Águas Mornas e no Granito São Pedro de Alcântara, fato comprovado pela ocorrência de xenólitos de rochas dessas unidades em seu interior. Ao mesmo tempo, é cortado por diques de riolito e extensões graníticas da Suíte Plutono-Vulcânica Cambirela e por diques básicos a ácidos do Enxame de Diques Florianópolis (ZANINI *et al.*, 1997; FLORISBAL *et al.*, 2018).

Apresenta-se como monzogranitos e sienogranitos isótopos, embora também seja comum a ocorrência de estruturas de fluxo magmático. De coloração rosada, ocasionalmente acinzentada, a textura é equigranular média a grossa, com megacristais ocasionais de feldspato alcalino e plagioclásio. A mineralogia principal da rocha é formada por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e biotita. Como minerais acessórios aparecem zircão, allanita, apatita e óxidos de Fe-Ti (magnetita/ilmenita) e como secundários, epidoto, sericita/muscovita, clorita, titanita, carbonatos e fluorita (ZANINI *et al.*, 1997; TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015; CORRÊA, 2016). Adicionalmente, bolsões pegmatíticos de tamanhos variados e diques de aplito são estruturas comuns no Granito Ilha, ocorrendo ocasionalmente

enclaves microgranulares e feições cataclásticas (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015; CORRÊA, 2016).

#### 2.3.4 Suíte Plutono-Vulcânica Cambirela

A Suíte Plutono-Vulcânica Cambirela compreende o Granito Itacorubi associado diretamente a riolitos, tufos e ignimbritos. Na ISC o Granito Itacorubi tem suas melhores exposições na região central, já as rochas vulcânicas ocorrem na porção sul, nas praias da Armação, Matadeiro e maciço do Pântano do Sul (CORRÊA, 2016; TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015). Segundo Corrêa (2016) esse conjunto de rochas tem idades entre  $574 \pm 1,8$  Ma e  $594 \pm 2,8$  Ma (método LA-ICP-MS em zircões), sendo as mais antigas as fácies do Granito Itacorubi e as mais jovens os riolitos.

Segundo Tomazzoli e Pellerin (2015) o Granito Itacorubi se manifesta como sieno ou monzogranitos de coloração cinza claro ou rosada com textura variando entre equigranular fina a média e porfírica, com fenocristais de feldspato potássico ou plagioclásio. Uma das características que mostram sua relação temporal com as demais rochas da unidade é a ocorrência de xenólitos do riolito, que, por sua vez, possui xenólitos do Granito Itacorubi. A mineralogia principal é caracterizada por quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e biotita, os minerais acessórios são principalmente allanita, apatita, opacos e zircão, e de forma secundária aparecem epidoto, clorita, fluorita e sericita. O índice de cor da rocha é baixo, ficando entre 3 e 5, e fraturas são comuns (CORRÊA, 2016).

Os tufos e ignimbritos são as rochas com maior expressão nessa suíte. Encontram-se bastante litificadas e são constituídos por cinza fina, cinza grossa e *lapili* de quartzo e feldspatos. A matriz é escura e hemivítrea (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015; TOMAZZOLI *et al.*, 2018).

Riolitos ocorrem como derrames e como diques. No primeiro caso possuem textura porfírica e estão intercalados às rochas piroclásticas. Os diques possuem dimensões variadas, com no máximo alguns poucos metros de espessura, cortam os demais litotipos dessa suíte e também o Granito Ilha. Também tem textura porfírica, com fenocristais de feldspato potássico e quartzo facetado em uma matriz afanítica de cor avermelhada ou cinza claro (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

### 2.3.5 Enxame de Diques Florianópolis

As rochas plutônicas e vulcânicas da ISC são seccionadas por um conjunto expressivo de diques cretáceos de composição básica a ácida, os quais fazem parte do Enxame de Diques Florianópolis (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015; FLORISBAL *et al.*, 2018). As cerca de 400 ocorrências mapeadas possuem espessuras que variam de centímetros até centenas de metros, estendendo-se descontinuamente por vários quilômetros numa direção preferencial N10°-20°E (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

Embora haja uma grande diversidade de litotipos, os diabásios ou basaltos do tipo alto titânio (ATi) são os mais frequentes. Podem apresentar textura porfirítica (rara), afanítica ou equigranular fina a média e seus minerais essenciais são plagioclásio, augita, pigeonita e óxidos de Fe-Ti (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

As ocorrências de composição ácida são menos abundantes e são representadas principalmente por diques de dacito, que no norte da ISC apresentam grandes dimensões com orientação NNE a NNW. Topograficamente esses diques se expressam como setores de relevo positivo (TOMAZZOLI, 2010; TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

Os dacitos exibem cor cinza, textura porfirítica, com fenocristais tabulares de plagioclásio e, de forma mais escassa, pigeonita/augita. A matriz é fina, afanítica, hemivítrea ou, granofírica. Os minerais essenciais são plagioclásio, augita, pigeonita, óxidos de Fe-Ti e quartzo e os secundários são clorita, epidoto, sericita e carbonato, a apatita aparecendo como acessória (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

Os contatos dos diques com as rochas encaixantes geralmente são retos, em cunha ou paralelos, mas localmente ocorrem contatos difusos com assimilação parcial das rochas hospedeiras, podendo ocorrer xenólitos graníticos próximos às bordas (CORRÊA, 2016; TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

### 2.3.6 Depósitos coluviais

Os depósitos coluviais presentes na ISC fazem parte do sistema deposicional continental, com idades no Quaternário indiferenciado (últimos 2,6 Ma AP) (HORN FILHO *et al.*, 2014). Em Tomazzoli e Pellerin (2014) estes depósitos são denominados de colúvio-aluvionares e são diferenciados em pleistocênicos e holocênicos. Os de idade pleistocênica, embora semelhantes aos depósitos mais recentes, são mais restritos, ocorrem em cotas mais



altas junto a encostas do embasamento e apresentam um grau maior de pedogenização. Os de idade holocênica são caracterizados por sedimentos mal selecionados, englobando desde matacões a material pelítico-arenoso. Formam rampas ou leques no sopé de encostas do embasamento.

O material que compõe estes depósitos é transportado principalmente por ação da gravidade, sem se distanciar muito da área fonte, e a gênese está associada ao retrabalhamento dos elúvios através de movimentos de massa da rocha alterada na forma de fragmentos de dimensão variada (HORN FILHO *et al.*, 2014; TOMAZZOLI *et al.*, 2018).

## 2.4 GEOMORFOLOGIA

O relevo da ISC é caracterizado por dois grandes compartimentos, segundo Herrmann e Rosa (1991). As terras altas, representadas pelos morros ou maciços, fazem parte da unidade geomorfológica Serras do Leste Catarinense, compreendida no domínio morfológico Embasamentos em Estilos Complexos. Já as terras baixas fazem parte da unidade Planícies Costeiras, enquadrada no domínio Acumulações Recentes.

Os maciços rochosos ocupam aproximadamente a metade da área da ISC, dividindo-se em dois setores, um ao sul e outro no centro-norte, que em conjunto formam um grande maciço costeiro que se alonga numa dorsal central paralela à costa continental. De acordo com Almeida (2004) o maciço do setor sul tem 15 km de comprimento e sua largura vai de 5 km onde se inicia a 1,5 km no extremo sul da ISC, alargando-se um pouco na porção central. Sua continuidade em direção ao norte é interrompida por uma extensa planície. O ponto culminante deste setor é o Morro do Ribeirão, com 532 m, sendo também o ponto mais alto da ISC. O maciço do setor centro-norte se inicia ao norte da referida planície, tem uma extensão de 31 km e é composto por um conjunto de morros de altitudes variadas, sendo o mais alto o Morro da Lagoa, com 493 m (ALMEIDA, 2004). Este maciço, principalmente na porção central, tem como característica a intensa ocupação urbana das encostas.

De acordo com Herrmann e Rosa (1991), estruturas tectônicas condicionaram a intensa dissecação do relevo, gerando interflúvios convexos e estreitos, vales profundos e vertentes de alta declividade. Essas características associadas ao escoamento superficial da água favorecem a ocorrência de movimentos de massa ocasionais e também o transporte do material de menor granulometria e a concentração de matacões graníticos ao longo das

vertentes e nos fundos dos vales, acumulações estas que são a expressão no relevo de depósitos coluviais.

Os depósitos coluviais desenvolvem-se na forma de rampas coluviais e tálus, sendo as rampas resultado dos sedimentos melhor selecionados, transportados e depositados em ambiente de menor energia enquanto que o tálus é consequência de fragmentos rochosos mal selecionados, predominantemente blocos e matacões, transportados em ambientes de alta energia (FERNANDES e AMARAL, 2000). Depósitos na forma de tálus são comuns em encostas de morros de granito ou gnaisse, uma vez que matacões são a expressão superficial mais comum e característica das frentes de alteração em terrenos dessas litologias (AULER e PILO, 2011; ROMANÍ e TWIDALE, 1998).

## 2.5 HIDROGRAFIA

A hidrografia da ISC é caracterizada por rios e córregos de pequenas extensões, lagoas e lagunas, os quais integram seis bacias hidrográficas principais: Ratones, Saco Grande, Lagoa da Conceição, Itacorubi, Rio Tavares e Lagoa do Peri. Em função da forma alongada da ISC e das características de relevo, os cursos d'água que nascem nos morros associados aos maciços sul e centro-norte drenam em quatro vertentes principais, a leste, oeste, norte e sul. Grande parte dos rios e pequenos córregos da vertente leste não atingem diretamente o mar, sendo captados principalmente pela Lagoa da Conceição e Lagoa do Peri, os da vertente oeste correm em direção às baías Norte e Sul, já as drenagens associadas às vertentes sul e norte desembocam diretamente no Oceano Atlântico (mar aberto) (PMF, 2009; BASTOS, 2004).

Os principais rios que drenam pela ISC são o rio Vermelho, rio dos Ingleses, rio Tavares, rio Itacorubi, rio do Saco Grande e rio Ratones. O trajeto relativamente curto que essas e outras drenagens percorrem em direção ao mar faz com que sejam caracterizados por uma fraca capacidade de vazão, com ausência de cursos d'água vigorosos (GUEDES JR., 2005). Em relação aos corpos lagunares, a Lagoa da Conceição (na verdade se trata de uma laguna) e a Lagoa do Peri são as que mais se destacam (PMF, 2009).

## 2.6 VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal da ISC é reflexo do clima em vigor, essencialmente quente e úmido. Inserida no Bioma Mata Atlântica, é caracterizada por três fisionomias principais: a vegetação litorânea, que compreende as formações fitogeográficas associadas às áreas de restinga, dunas e manguezais; a floresta ombrófila densa, que recobria originalmente porções da planície litorânea e as encostas dos morros, hoje limitada a alguns remanescentes isolados no meio da vegetação secundária ou em setores mais preservados em áreas legalmente protegidas; e a floresta secundária, que ocupa as áreas outrora desmatadas e degradadas por diferentes atividades econômicas que se sucederam ao longo do processo de ocupação da ISC (CARUSO, 1983; VEADO, 2004).

Segundo Caruso (1983), da vegetação florestal atual da ISC se destacam as formações secundárias em vários estágios de sucessão ecológica, uma vez que a floresta ombrófila densa original praticamente deixou de existir. Segundo a autora, essa vegetação se estabelece por meio de uma sucessão que se inicia com ervas rasteiras seguidas de pequenos arbustos, na sequência se estabelecem arbustos e árvores e posteriormente árvores maiores com lianas e epífitas (o capoeirão). O estágio final é a mata secundária, que fisionomicamente se assemelha muito às florestas primárias, mas com diferenças em relação às espécies presentes.

## 2.7 CAVERNA-TIPO: SISTEMA DE CAVERNAS DA ÁGUA CORRENTE

A cavidade subterrânea em matacões graníticos denominada Sistema de Cavernas da Água Corrente está localizada nas encostas do Morro da Virgínia, no bairro Saco Grande, setor centro-norte da ISC (Figura 2.1). Localizado às margens das rodovias SC-401 e Virgílio Várzea, o bairro Saco Grande recebe essa denominação pela configuração geográfica que apresenta na interface com o mar, na forma de um saco, uma área protegida voltada para a Baía Norte, limitada ao norte pela Ponta do Siqueira e ao sul pela Ponta do Goulart, já no bairro João Paulo.

A escolha por esta área se deu pelos seguintes motivos: grande concentração de cavidades em matacões graníticos, relativamente próximas umas das outras; facilidade de acesso; segurança da equipe de campo; área pressionada pela expansão imobiliária, foco do

primeiro estudo espeleológico realizado em Florianópolis para fins de licenciamento ambiental, no caso, de um empreendimento residencial (SATO *et al.*, 2018).

A opção pelo Sistema de Cavernas da Água Corrente está também ligada a este exemplo se configurar como uma cavidade representativa das ocorrências em matacões graníticos na ISC, constituindo a maior caverna em granito registrada até o momento na Região Sul do Brasil, com 1026 m de extensão (medida de ponta de trena). Uma de suas entradas principais se localiza nas coordenadas UTM 747169,99 E e 6951659,70 S, ponto que está a 61 m acima do nível do mar.

Esta caverna foi descoberta, explorada e teve suas medidas levantadas em 2012 pelos espeleólogos Hélio Carvalho Filho e Rodrigo Dalmolin, e nesse mesmo ano foi registrada no CNC. Recebeu este nome por duas características principais. A primeira tem a ver com a expressão “Sistema de Cavernas”, pois na época em que foi descoberta se acreditava que poderia estar conectada por meio de passagens estreitas, inacessíveis ao homem, com outras cavidades que lhe circundam. A segunda característica tem a ver com a expressão “Água Corrente”, uma referência aos dois cursos d’água perenes que correm por suas galerias, sumindo e ressurgindo várias vezes, mas sempre lembrando de suas presenças por meios do som da água. De modo a facilitar a referência ao Sistema de Cavernas da Água Corrente ao longo do texto, deste ponto em diante será utilizada a sigla SAC.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os procedimentos metodológicos adotados para a execução da pesquisa, os quais foram agrupados em quatro itens principais: revisão bibliográfica, trabalhos de campo, análises laboratoriais e trabalhos de gabinete.

#### 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica compreendeu a investigação, leitura e avaliação de livros, artigos científicos, trabalhos publicados em anais de eventos, dissertações e teses de abrangência nacional e internacional que tratam das cavernas graníticas em diferentes abordagens: contexto geográfico, geológico e geomorfológico, espeleogênese, aspectos morfológicos, geoespeleológicos e bioespeleológicos, classificações, feições (principalmente espeleotemas) e estruturas associadas, possibilidades de investigação e métodos de análise. Estas leituras possibilitaram uma compreensão mais aprofundada deste tipo de cavidade natural subterrânea, principalmente a partir das contribuições internacionais.

A busca por trabalhos antecedentes no Brasil incluiu pesquisa em todas as edições da revista Espeleo-Tema disponíveis em formato digital (desde 1970) e nos Anais do Congresso Brasileiro de Espeleologia (desde 1975), além de consultas a grupos de espeleologia e pesquisadores que atuam em áreas com terrenos graníticos e/ou que já tivessem alguma publicação relacionada a cavidades em granito.

A revisão bibliográfica também se estendeu para trabalhos voltados aos aspectos naturais da Ilha de Santa Catarina, estruturas, formas e paisagens associadas a terrenos graníticos, legislação ligada ao patrimônio espeleológico brasileiro e serviços geossistêmicos da geodiversidade.

#### 3.2 TRABALHOS DE CAMPO

De acordo com a Instrução Normativa ICMBio N°3/2014, as atividades de campo e seus desdobramentos em cavidades naturais subterrâneas localizadas em território brasileiro com finalidade científica demanda autorização prévia do Instituto Chico Mendes de Biodiversidade através de solicitação pelo Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade (SISBIO). Atendendo o disposto na legislação, todas as atividades de campo e

coletas de material relacionadas a esta pesquisa foram amparadas pela autorização n° 55851-1, obtida no dia 26 de outubro de 2016. Esta autorização foi renovada anualmente mediante apresentação de relatórios, estendendo-se até fevereiro de 2020.

Nos trabalhos de foram realizadas diferentes atividades, tal como o mapeamento espeleológico do SAC, coleta de amostras, registros fotográficos, levantamento e descrição de materiais, feições e processos e checagem de dados cartográficos, a seguir detalhadas.

Outras cavernas em matacões graníticos da ISC foram visitadas ao longo da pesquisa, inicialmente para uma pré-avaliação visando à delimitação do objeto e área de estudo e, posteriormente, para observação de características geoespeleológicas e bioespeleológicas e registros fotográficos para comparação com a caverna-tipo. A relação dessas cavernas e o grau de incorporação das mesmas nesta pesquisa serão apresentados no capítulo 5, especificamente no item 5.7.

### **3.2.1 Mapeamento espeleológico**

O mapeamento espeleológico, também chamado de topografia espeleológica, foi empregado na cartografia do SAC. O objetivo foi gerar a planta baixa da cavidade, plantas baixas derivadas com discriminação de níveis sobrepostos, o perfil longitudinal e perfis transversais. Neste processo foram obtidas informações relacionadas à dimensão e morfologia da cavidade (desenvolvimento linear, projeção horizontal, desnível, área, volume, distribuição dos condutos e eixo principal de desenvolvimento). Adicionalmente, foram levantados e representados aspectos relacionados à disposição dos matacões, entradas, aberturas de teto, circulação de água e distribuição de materiais e feições.

O detalhamento do mapeamento espeleológico foi realizado com base nas orientações da *Union Internationale de Spéléologie* (UIS) (HÄUSELMANN, 2011), referência utilizada nos trabalhos do Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE), instituição paranaense que deu apoio nessa etapa.

Quanto aos equipamentos, foram utilizados um *smartphone* com o aplicativo *TopoDroid* (*Cave mapping*) para armazenamento e tratamento preliminar dos dados *in loco* e uma trena Disto<sup>TM</sup> D810 *touch* da Leica com bússola e clinômetro acoplados para aquisição dos dados de distância entre bases, medidas laterais, altura e profundidade, inclinação e azimute. Os dados arquivados no aplicativo foram transferidos para um programa de desenho vetorial bidimensional para *design* gráfico para refinamento e elaboração do mapa.

A topografia do SAC foi amarrada com bases externas de coordenadas conhecidas, de modo a possibilitar o georreferenciamento da planta baixa da cavidade e a integração destas informações em ambiente SIG. Teve origem em uma base posicionada em uma das entradas da cavidade e seguiu para uma base de destino no interior da caverna, sempre seguindo o eixo principal de desenvolvimento da mesma (conduto principal). Foram utilizadas preferencialmente bases fixas, associadas a elementos da própria caverna (paredes, blocos, raízes, troncos, etc.).

Em cada base foram tomadas as medidas instrumentais devidas, como lateral direita, lateral esquerda, altura e profundidade. De uma base para outra foram tomadas medidas da distância entre elas, inclinação e azimute. Ao lançar os dados no aplicativo *TopoDroid* o arcabouço da caverna foi sendo gerado e em cima dele foram desenhados os contornos dos condutos, matacões, blocos, aberturas de teto, desníveis, feições e outros elementos relevantes para o detalhamento da caverna.

Devido à complexidade morfológica da cavidade foi necessário variar o método de tomada das bases, lançando mão de poligonais abertas (ponto inicial e final não coincidentes), fechadas (ponto inicial e final coincidentes), radiais (várias medidas a partir de uma mesma base) e triangulação.

### 3.2.2 Coleta de amostras

A coleta de amostras foi realizada essencialmente no SAC, caverna-tipo da pesquisa. Foram obtidas amostras sãs do Granito Ilha, principal litotipo da caverna, do diabásio, de *duricrust* ferruginoso, de crostas de alteração envolvendo matacões, da matriz de conglomerados, de veio aplítico e de espeleotemas. Este conjunto de materiais tem um tratamento mais detalhado no item 3.3.

A coleta de espeleotemas foi controlada, com intuito de gerar o mínimo impacto possível. As amostras foram selecionadas com base na representatividade das diferentes morfologias encontradas na caverna e demanda de material para as análises previstas. Neste caso em especial, foram coletadas amostras de espeleotemas também de uma caverna próxima ao SAC, a Gruta do Saco Grande, uma vez que nela foram identificados espeleotemas com morfologias diferenciadas em relação à primeira e era importante checar similaridades e diferenças em termos de formação e composição.

Para designação dos espeleotemas foi adotada a classificação proposta em Romaní *et al.* (2014), que trata especificamente dessas feições em cavernas desenvolvidas em rochas magmáticas. Adicionalmente, utilizou-se a denominação “coraloides” para espeleotemas com morfologia muito ramificada (arborescente) e nodular, para os quais não se encontrou equivalência no referido trabalho.

De forma não programada foram coletadas amostras de material biológico, uma larva, seu invólucro e asas desarticuladas, a qual chamou a atenção pela relação de dependência com o substrato rochoso associado à água corrente. Havia expectativa de que pudesse se tratar de uma espécie que é estudada pela bióloga Dra. Rafaela Falaschi (FALASCHI *et al.*, 2019), ligada à UEPG, pelo que foi coletada para uma identificação mais precisa.

### 3.3 ANÁLISES LABORATORIAIS

As amostras coletadas foram submetidas a diferentes técnicas analíticas em laboratório, as quais, juntamente com a identificação dessas amostras, foram sintetizadas no Quadro 3.1. O material biológico não consta nessa relação, já que não era foco de análise da pesquisa. O mesmo foi encaminhado ao Laboratório de Biologia Evolutiva da UEPG, onde foi fotografado ao microscópio e identificado com a ajuda de pesquisadores da UFBA. As amostras, entregues e preservadas em álcool 80%, serão depositadas no Museu de Zoologia da Universidade de São Paulo.

#### 3.3.1 Avaliação e caracterização macroscópica

Nesta etapa os materiais coletados foram observados e descritos a olho nu e com auxílio de uma lupa estereoscópica binocular Olympus com aumento máximo de 40x. Os procedimentos foram realizados nas dependências do Laboratório de Microscopia Ótica do Departamento de Geologia da UFSC. Neste momento também foi realizado o registro fotográfico de todas as amostras.

Em relação aos espeleotemas, foram descritas características como tamanho, morfologia, textura, coloração, estrutura e presença de material biológico associado. Algumas amostras foram quebradas e desgastadas para obtenção de perfis internos transversais e longitudinais, o que foi feito com o uso de uma placa de vidro e abrasivo em pó de



carborundum (carbeto de silício) granulação 1200. Foi realizado também um teste com ácido clorídrico (HCl) para verificar a eventual presença de material carbonático.

Quadro 3.1 – Identificação dos materiais coletados e procedimentos realizados.

| Código  | Material                                      | Procedência    | Procedimento |
|---------|-----------------------------------------------|----------------|--------------|
| SAC 1A  | Crosta de alteração                           | Matacão piso   | 1, 2 e 3     |
| SAC 1B  | Crosta de alteração                           | Matacão piso   | 1 e 3        |
| SAC 2   | Crosta de alteração                           | Matacão piso   | 1, 2 e 3     |
| SAC 3   | Crosta de alteração                           | Matacão piso   | 1 e 3        |
| SAC 4   | Espeleotemas cilíndricos de piso              | Matacão piso   | 1, 2, 3 e 4  |
| SAC 5A  | Espeleotemas cilíndricos de teto              | Matacão teto   | 1, 2, 3 e 4  |
| SAC 5 B | Crosta de alteração                           | Matacão piso   | 1            |
| SAC 6   | Espeleotemas coraloídes arborescentes         | Matacão teto   | 1, 3 e 4     |
| SAC 7   | Granito Ilha                                  | Piso           | 1 e 3        |
| SAC 8   | <i>Duricrust</i> ferruginoso                  | Piso           | 1            |
| SAC 9   | Diabásio                                      | Piso           | 1 e 3        |
| SAC 10  | <i>Duricrust</i> ferruginoso                  | Piso           | 1 e 3        |
| SAC 11  | <i>Duricrust</i> ferruginoso (?)              | Piso           | 1            |
| SAC 12  | Espeleotema coraloide nodular                 | Parede         | 1, 2 e 4     |
| SAC 13  | Matriz depósito clástico consolidado (rudito) | Piso           | 1            |
| SAC 14  | Espeleotema planar do tipo <i>flowstone</i>   | Matacão parede | 1, 2 e 4     |
| SAC 15  | Veio apolítico                                | Matacão parede | 1            |
| GSG 1A  | Espeleotemas coraloídes arborescentes         | Matacão teto   | 1, 2, 3 e 4  |
| GSG 1B  | Crosta de alteração – base da amostra GSG 1A  | Matacão teto   | 1 e 2        |
| GSG 2   | Espeleotema linear serrilhado                 | Matacão parede | 1, 2 e 4     |

SAC – Sistema de Cavernas da Água Corrente; GSG – Gruta do Saco Grande; 1 – Avaliação e caracterização macroscópica; 2 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Espectroscopia de energia dispersiva (EDS); 3 – Microscopia ótica a partir da confecção de lâminas delgadas; 4 – Difractometria de raios X (DRX).

Fonte: a autora

### 3.3.2 Microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e de espectroscopia de energia dispersiva (EDS) são apontadas como as principais técnicas para avaliação e caracterização de espeleotemas oriundos de cavernas em granito (SANJURJO *et al.*, 2007), pois permitem estabelecer em detalhe aspectos morfológicos, estruturais, texturais e composicionais dessas feições muitas vezes diminutas. Possibilitam ainda a constatação da presença de material biológico microscópico e consequente identificação taxonômica destes elementos.

Os procedimentos foram realizados no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC utilizando um microscópio de varredura convencional com

filamento de tungstênio, modelo JEOL JSM-6390LV, o qual tem acoplado o sistema de EDS. A preparação das amostras exigiu a redução das mesmas a frações milimétricas, privilegiando perfis transversais, longitudinais e setores variados (ponta, porção média e base) no caso dos espeleotemas, sendo coladas em *pin stubs* (suportes metálicos com pinos de encaixe) com uso de uma fita dupla face de carbono. Posteriormente elas passaram por secagem em estufa, recobrimento (a vácuo) por uma película micrométrica de ouro e armazenamento em ambiente a vácuo até as sessões de MEV e EDS.

No equipamento foi efetuada a tomada de imagens de alta resolução e ampliação das amostras selecionadas, o aumento tendo oscilado entre 23x e 10.000x e a tensão elétrica utilizada foi de 5 kV (em apenas uma imagem) e 10 kV. Na EDS foram feitas análises composicionais semiquantitativas a partir de pontos ou polígonos nas amostras, sendo a verificação pontual a mais utilizada.

Duas das amostras de espeleotemas (SAC 12 e SAC 14) foram analisadas no Complexo de Laboratórios Multiusuários da UEPG (C-LABMU). O equipamento utilizado foi um Mira 3 da Tescan com sistemas de EBSD e de microanálise EDS integrados. Os procedimentos relacionados à preparação das amostras e obtenção dos dados no microscópio foram semelhantes aos adotados no LCME da UFSC.

### 3.3.3 Microscopia ótica

Para esta etapa foram confeccionadas lâminas delgadas no Laboratório de Laminação do Departamento de Geologia da UFSC (LabLam). Para as amostras de rochas e *duricrust* ferruginoso foram adotados os procedimentos padrão do LabLam, executados pelo técnico responsável. Os espeleotemas e crostas de alteração, por se tratarem de material friável e poroso, necessitaram ser estabilizados por meio de impregnação com resina antes de serem colados nas lâminas de vidro. As lâminas delgadas foram analisadas nas dependências do Laboratório de Microscopia Ótica utilizando um microscópio petrográfico estereoscópico Olympus com sistema de videocaptura de imagens composto por microcâmera digital acoplada a computador. Adicionalmente também foram feitas capturas de imagens das lâminas em lupa estereoscópica binocular Olympus (aumento máximo de 40x) utilizando uma câmera LOD (Lente Ocular Digital), própria para este tipo de equipamento ótico.

### 3.3.4 Difractometria de raios X

A difratometria de raios X (DRX) se restringiu aos espeleotemas e foi realizada no Laboratório Multiusuário de Difração de Raios X da UFSC utilizando equipamento da *PanAlytical* modelo *Xpert* MPD equipado com detector linear *Xcelerator*. As amostras foram gentilmente moídas e depositadas em um porta-amostras de Silício *zero-background*. Foi usada a radiação K-alfa do Cu (1,5418 Å) em modo  $\theta$ - $\theta$  em intervalos angulares ( $2\theta$ ) desde 12° até 120°, com passos de 0,033° e tempos de contagem de aproximadamente 20 s por passo. Todas as medidas foram feitas em condições ambiente.

Duas amostras (SAC 12 e SAC 14) foram analisadas no C-LABMU da UEPG utilizando um difratômetro de raios X modelo Ultima IV - Rigaku. Foi realizada uma análise contínua com radiação K-alfa do Cu, modo  $\theta$ - $\theta$  em intervalos angulares ( $2\theta$ ) desde 3° até 120° com passos de 0,02°, velocidade de varredura de 2°/min, DHL 10, DS 1, SS 1 e RS 0,15.

A partir dos dados medidos desconhecidos em formato XY foram gerados os difratogramas no programa *Origin Evaluation* 2018 (versão gratuita de teste/demonstração), os quais foram comparados com dados de referência obtidos junto à Base de Estruturas Cristalinas (acesso gratuito pelo Portal de Periódicos da CAPES), principalmente o *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD), para identificação das fases cristalinas. Dados e difratogramas disponibilizados na bibliografia relacionada ao estudo de espeleotemas de composição silicosa em cavernas em granito, arenito e quartzito também foram utilizados na interpretação e discussão dos resultados.

## 3.4 TRABALHOS EM GABINETE

Os trabalhos em gabinete envolveram a organização dos dados levantados em campo e obtidos em análises laboratoriais, a interpretação desses dados, a confecção de mapas temáticos relacionados à caracterização da área e objeto de estudo e do mapa espeleológico do SAC e a redação do texto da tese. As principais atividades dentre as citadas serão descritas a seguir.

### 3.4.1 Confeccção de mapas temáticos

Os mapas temáticos elaborados para a localização e caracterização física da área de estudo (ISC e contexto imediato onde se insere o SAC), espacialização da caverna-tipo e das demais cavernas da ISC e correlação/cruzamento de informações relacionadas a essas ocorrências foram confeccionados utilizando os programas QGIS 3.4 e ArcGIS (versão *Free Trial*). As bases de dados utilizadas foram as seguintes:

- a) Localização: os dados relativos aos limites territoriais (Brasil, Santa Catarina, Florianópolis) foram obtidos na página do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística na *internet* no item geociências – *downloads* – organização do território – malhas territoriais – malhas municipais 2018. Informações específicas sobre a Ilha de Santa Catarina, a exemplo dos limites das massas de água, foram obtidos na página da Prefeitura Municipal de Florianópolis na *internet*, no item geoprocessamento – arquivos para *download*;
- b) Cavernas da ISC: as coordenadas com a localização das cavidades subterrâneas da ISC em formato KML e informações a elas associadas (designação, classificação, geologia) foram obtidas no Cadastro Nacional de Cavernas da Sociedade Brasileira de Espeleologia;
- c) Geologia: compilação de dados do Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina de Tomazzoli e Pellerin (2014);
- d) Relevo: o modelo digital de elevação (MDE) do contexto mais amplo onde se insere o SAC foi elaborado a partir de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) da NASA (Agência Espacial Americana) com resolução espacial de 30 m. Já o MDE do contexto mais imediato relacionado ao SAC, com enfoque na encosta onde a caverna se desenvolveu e vales adjacentes, foi confeccionado com base no modelo digital de terreno com resolução espacial de 1m disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável do Governo de Santa Catarina, proveniente do Levantamento Aerofotogramétrico do ano de 2010;
- e) Unidades de Conservação (UCs) e Áreas de Preservação Permanente (APPs): os limites em formato *Shapefile* das UCs e APPs do município de Florianópolis foram obtidos junto à Diretoria de Cadastro, Geoprocessamento e Pesquisa do Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF).

### 3.4.2 Confeção do mapa espeleológico

Os dados levantados em campo e armazenados no programa *TopoDroid* foram exportados em formato DXF para um programa de *design* gráfico para refinamento dos mesmos e elaboração do *layout* final do mapa. Além da planta baixa do SAC o *TopoDroid* gerou um perfil longitudinal e produtos tridimensionais da cavidade (em associação ao aplicativo Cave 3D) que permitiram visualizar e compreender melhor sua distribuição no terreno e seus aspectos morfológicos.

Os dados de desnível e volume do SAC foram gerados automaticamente pelo *TopoDroid*, enquanto os dados de desenvolvimento linear (DL) e projeção horizontal (PH) precisaram ser ajustados para evitar que a extensão da caverna fosse superestimada. O DL foi medido a partir das visadas que melhor representaram o caminhar realizado no mapeamento espeleológico, ou seja, aquelas que refletem o eixo principal de desenvolvimento da cavidade. Nesse procedimento foram desconsideradas visadas repetidas sobre um mesmo espaço (ex.: irradiação, triangulação). Somados os valores de cada visada selecionada se obteve o valor de DL total do SAC. Com base nessas mesmas visadas foi calculada a PH, utilizando para isso a fórmula  $PH = DL \times \cos \hat{A}_i$  (projeção horizontal é igual ao desenvolvimento linear da visada multiplicado pelo cosseno do ângulo de inclinação da mesma). Somados os valores resultantes de cada visada foi obtida a PH total do SAC.

## 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Rochas ígneas e metamórficas ocupam 95% do volume da crosta continental, mas suas exposições em superfície acabam sendo reduzidas por conta das camadas de rochas sedimentares, solos e depósitos recentes que as recobrem (ANDRADE *et al.*, 2009). Das rochas ígneas mais abundantes na crosta, considerando também a crosta oceânica, destacam-se o granito e o basalto (SZABÓ *et al.*, 2009).

O granito é uma rocha ígnea plutônica composta essencialmente por quartzo e feldspatos, em menor proporção minerais máficos, principalmente biotita. Os percentuais de minerais félsicos na composição destas rochas constituem o critério mais comum para a classificação das mesmas. De acordo com o diagrama Q-A-P de Streckeisen (1976), um granito típico (*strictu sensu*) possui entre 20% e 60% de quartzo, 10% a 65% de feldspato plagioclásio e 35% a 90% de feldspato alcalino (principalmente potássico).

Segundo Romaní e Twidale (1998), os granitos estão presentes em praticamente todas as regiões do mundo, ocupando extensas áreas em zonas de escudo, que formam os antigos núcleos de cada continente e também os orógenos. Também podem ser intrusivos em sequências sedimentares das plataformas continentais, resultando em corpos de dimensões variáveis, desde pequenos até alguns mais notáveis. Os autores salientaram, no entanto, que devido ao recobrimento superficial por outros materiais, 15% do granito da crosta continental está exposto, o que significa 4,5% de toda superfície terrestre.

As diversas formas de relevo presentes em nosso Planeta, fruto da ação do clima e da tectônica, podem se desenvolver em qualquer tipo de rocha. Para Romaní e Twidale (1998), nenhuma forma da paisagem é exclusiva de terrenos graníticos, mas um número muito grande de micro e macroformas se desenvolvem sobre este tipo de rocha, mais que sobre qualquer outra, tornando-se características deste tipo de terreno, como planícies (superfícies de aplainamento) com *inselbergs*, *bornhardts*, *koppies*, *nubbins*<sup>1</sup> e matacões residuais, além de formas menores como caneluras (ROMANÍ e TWIDALE, 1998). Tais formas são foco de interesse e estudo de geólogos, geógrafos e geomorfólogos ao redor do mundo, resultando em vasta produção bibliográfica (EHLEN, 1990).

---

<sup>1</sup> A maior parte dos termos utilizados para designar as macroformas típicas de terrenos graníticos não tem equivalentes no português com uso consagrado.

#### 4.1 CAVERNAS EM GRANITO

Uma das formas que ocorrem em terrenos graníticos, mas que não se enquadram no rol das mais comuns ou características para esta litologia, são as cavernas. O fato de serem consideradas pouco comuns, no entanto, deve-se mais à ausência (ou pouca) de prospecção e exploração espeleológica nesse domínio litológico do que pela baixa ocorrência das mesmas. Finlayson (2011, p.16) disse que “muitos espeleólogos não consideram paisagens graníticas como sítios onde procurar por cavernas”. Romaní e Rodriguez (2007), por sua vez, colocaram que descrições de paisagens graníticas normalmente ignoram a existência de um cenário subterrâneo, e que essa negligência talvez tenha como motivo o tamanho das cavidades, que são muito menores do que as desenvolvidas em rochas solúveis.

Em uma busca no trabalho de Ehlen (1990), que fez uma compilação de cerca de 150 resumos sobre formas e paisagens relacionadas a terrenos graníticos produzidos nos últimos dois séculos, para as palavras “caves” e “cuevas” não foram encontrados resultados. Havia apenas dois trabalhos onde consta o termo “cavernous”, em referência aos tafoni, que são ocos de dimensões modestas que se desenvolvem comumente em porções basais e laterais de matacões graníticos (ROMANÍ e TWIDALE, 1998). Tafoni são entendidos como cavidades de ambiente exógeno e estudados como feições típicas de um relevo cárstico em rochas não carbonáticas (RODRÍGUEZ, 2011).

Uma das consequências do que foi discutido acima se reflete na pouca quantidade de trabalhos relacionados às cavernas desenvolvidas em granitos, principalmente se comparada à vasta produção sobre cavidades carbonáticas e mesmo sobre algumas não carbonáticas, como arenitos e quartzitos. No entanto, segundo Romaní e Rodríguez (2011), cavidades graníticas são um dos casos de cavernas em rochas não solúveis que nos últimos anos vêm sendo descritas com frequência cada vez maior, em vários lugares do mundo, a exemplo do Brasil (HARDT, 2002; GPME, 2011), Argentina (ALVAREZ e ROMANÍ, 2008), Estados Unidos (DESPAIN e STOCK, 2005), Austrália (TWIDALE e BOURNE, 2008), Sri Lanka (OSBORNE *et al.*, 2013); Alemanha (STRIEBEL, 2008), Espanha (RODRÍGUEZ, 2011; RODRÍGUEZ, 2017), Grécia (LAZARIDIS e KYRIAKI, 2008), Nigéria (SZENTES, 2009) e Suazilândia (SCHEUERER *et al.*, 2013).

#### 4.1.1 Classificação de cavernas em granito

Em Sjöberg (1986) encontramos uma síntese das principais classificações de cavernas em granito que foram elaboradas entre às décadas de 1920 e 1980, as quais, na visão do autor, apresentam limitações ao considerar apenas a morfologia das cavernas e/ou seus processos de formação, estando baseadas em exemplos regionais, o que as tornam úteis para áreas muito específicas.

O autor constrói então uma nova proposta de classificação para sistemas de cavernas em granitos, baseada na estrutura das cavidades. São duas categorias principais, as cavernas em rocha sólida (*caves in solid rocks*) e as cavernas em matacões (*caves in boulders*), sendo o primeiro grupo dividido em cavernas em fraturas e outros tipos de cavernas em rocha sólida (ex.: tafoni).

As cavernas em fraturas derivam de estruturas tanto verticais como horizontais na rocha (rede de diáclases), podendo ter a participação complementar de processos marinhos, climáticos, glaciais e fluviais em seu desenvolvimento. No caso dos outros tipos de cavernas em rocha sólida, esses processos erosivos são protagonistas no cavernamento. As cavernas em matacões são espaços subterrâneos distribuídos em diferentes níveis e na forma de labirintos entre matacões acumulados em bases de encostas, ao longo de áreas costeiras ou nos setores terminais de morenas, material que advém principalmente de processos (neo) tectônicos, glaciais, abrasivos e climáticos (SJÖBERG, 1986).

O autor considera que os processos envolvidos na formação das cavidades (tectônica/neotectônica, abrasão marinha, processos glaciais, fluviais, intempéricos e, em menor grau, erosivos e eólicos) e os aspectos morfológicos das mesmas, podem ser utilizados para possíveis subdivisões dos três grupos principais acima citados.

Outra classificação de cavernas em granito que constitui uma referência é a elaborada por Finlayson (1986), que embora seja parecida com a de Sjöberg, apresenta diferenças em relação às descrições das cavidades. São duas categorias principais: as cavernas em matacões e as cavernas em fraturas.

As cavernas em matacões, como indicado por Finlayson (1986), em geral possuem as maiores dimensões para esta litologia, constituindo os espaços entre matacões graníticos que podem ocorrer *in situ* (matacões em pilha - núcleos residuais individualizados do maciço principal por fraturas) ou associadas a depósitos de tálus (matacões em canal - entre os espaços de matacões depositados por ação gravitacional no fundo de um vale ou drenagem).



As cavernas em fraturas podem ser abertas, consistindo em espaços de fraturas na rocha tendo como teto matacões caídos, ou fechadas, quando o teto é a rocha *in situ*.

Enquadramentos de cavidades graníticas baseados em suas características estruturais aparecem também nos trabalhos de Romaní e Twidale (1998), Romaní e Rodríguez (2007) e Rodríguez (2011). Além das cavidades desenvolvidas em fraturas e em matacões, os autores também incluem os tafoni e gnammas (bacias de dissolução), micro a mesoformas relacionadas ao sistema de descontinuidades da rocha e ao intemperismo diferencial, e que são bastante estudadas nos trabalhos desenvolvidos por pesquisadores espanhóis. Rodríguez (2011, p. 46) descreve esses três tipos de cavidades da seguinte forma:

- a) cavidades fissurais: associadas a descontinuidades físicas (fraturas, planos de acamamento) por onde a água circula, desagregando os minerais e as alargando;
- b) cavidades em matacões: são cavidades ligadas a matacões residuais que se formam à medida que o regolito vai sendo removido pela erosão. Nos vazios entre os matacões é que se desenvolvem estas cavidades. O arraste do material alterado deixa vazios tubulares delimitados por núcleos residuais incluídos inicialmente na massa regolítica. Estes matacões, inicialmente *in situ*, podem ser movidos por gravidade ou por sismos para áreas mais baixas ao longo das vertentes, originando acumulações que podem dar corpo a novas cavidades;
- c) tafoni e gnammas: são cavidades subaéreas de dimensões centimétricas a métricas que se desenvolvem nos matacões a favor de sistemas de descontinuidades, onde o processo de alteração e desagregação granular é mais efetivo.

Em trabalho recente, Rodríguez (2017) realizou uma revisão e discussão sobre tipos de cavidades desenvolvidas em rochas magmáticas (plutônicas e vulcânicas), resumizando sete categorias, as quais privilegiam aspectos estruturais conjugados a características morfológicas e processos modeladores. São elas: cavernas estruturais, cavernas tipo abrigo, cavernas associadas a estruturas de planos de foliação, cavernas tafone, cavernas formadas por acumulações de matacões, cavernas vulcânicas e cavernas de erosão marinha. Com exceção das cavernas vulcânicas, todos os outros tipos podem estar relacionados a rochas graníticas.

O autor subdivide as cavernas formadas por acumulações de matacões em três tipos, levando em consideração a posição desses fragmentos rochosos no relevo e o arranjo dos mesmos:

- a) cavernas associadas a rios de matacões: acumulações de matacões produzidas sobre uma drenagem ativa ou paleodrenagem no fundo e ao longo de um vale, caracterizadas por uma

extensão linear (seguindo o próprio vale) e pela interação entre o caos de matacões com o curso d'água (quando de uma drenagem ativa);

b) cavernas associadas a mares (ou campos) de matacões: acumulações de matacões de grandes extensões (ou relativamente concentrados) em uma vertente, planície ou pé de uma escarpa, sem vínculo com um curso d'água, apresentando em geral fragmentos angulosos;

c) cavernas formadas por acumulações de matacões com pouco movimento: resultado de movimentos incipientes, com pouco deslocamento dos núcleos residuais (*in situ*). É comum que os matacões revelem em seus contornos as disjunções entre eles.

Nos dois primeiros casos as acumulações de matacões estão *ex situ*, resultado da ação fluvial e/ou de grandes movimentos de massa ao longo das vertentes, como quedas de fragmentos rochosos isolados ou deslizamentos, ou seja, há uma perda parcial ou total da relação existente entre os matacões e sua estrutura original. Os traços morfológicos das cavidades não têm relação direta com o movimento de propagação dos matacões, mas da configuração e posicionamento resultantes após o movimento (RODRÍGUEZ, 2017).

#### 4.1.1.1 Sobre o uso da nomenclatura cavernas em matacões

O conjunto de trabalhos relacionados no item 4.1.1 não especifica ou justifica o uso do termo matacão (nos trabalhos originais são utilizados os termos *bloque*, no espanhol, e *boulder*, no inglês, ambos traduzidos como matacão para o português) dentro de uma abordagem granulométrica (com menção a uma escala de referência). Informações sobre as dimensões e forma dos fragmentos rochosos são pouco exploradas. Este tipo de detalhamento também não aparece em outras publicações envolvendo alguns desses autores ao descreverem cavidades do tipo (FINLAYSON, 1982; FINLAYSON e WEBB, 1988; RODRÍGUEZ, 2003; RODRÍGUEZ *et al.*, 2006).

No entanto, Romaní e Twidale (1998), ao tratarem dos matacões (*bloques*) como um dos elementos mais comuns em terrenos graníticos, falaram de massas com dimensões acima de 25 cm de diâmetro. Ao citarem exemplos na Austrália, descreveram fragmentos de até 33 m de diâmetro. Os autores salientaram, porém, que no geral, o diâmetro modal é de 1 a 2 m. Quanto à forma, colocaram que são principalmente esféricos a elipsoidais, mas que também são observadas massas angulosas, apenas com cantos arredondados. Tal informação sugere que o enquadramento granulométrico utilizado por esses autores, muito provavelmente

extensivo aos demais trabalhos outrora citados, é compatível com o de Wentworth (1922) (Quadro 4.1).

No intuito de trabalhar em consonância com as nomenclaturas empregadas nas principais classificações de cavernas em granito aqui apresentadas, assumiu-se nesta tese a designação “caverna/cavidade em matacões” para as ocorrências estudadas, tendo como base a escala granulométrica de Wentworth (1922), que é uma das mais difundidas e utilizadas no Brasil (SUGUIO, 2003). Tal escala também serviu como referência para a descrição de outros materiais clásticos encontrados nessas cavernas. Como as dimensões dos matacões são variáveis, utilizou-se ao longo do trabalho o adjetivo “pequenos” para massas com diâmetros centimétricos e “grandes” para massas com diâmetros decamétricos.

Quadro 4.1 – Classificação granulométrica de sedimentos clásticos proposta por Wentworth (1922).

| <b>Diâmetro (mm)</b> | <b>Fragmento</b>   |
|----------------------|--------------------|
| > 256                | Matacão            |
| 64 – 256             | Bloco              |
| 4 – 64               | Seixo              |
| 2 – 4                | Grânulo            |
| 1 – 2                | Areia muito grossa |
| 0,5 – 1              | Areia grossa       |
| 0,25 – 0,5           | Areia média        |
| 0,12 – 0,25          | Areia fina         |
| 0,062 – 0,12         | Areia muito fina   |
| 0,004 – 0,062        | Silte              |
| < 0,004              | Argila             |

Fonte: adaptado de Wentworth (1922)

#### 4.1.2 Feições de destaque: espeleotemas

Dentre as feições típicas ou exclusivas de cavernas e que costumam chamar mais a atenção de quem as visitam estão os espeleotemas, denominação abrangente empregada para os depósitos minerais secundários que ornamentam o ambiente subterrâneo. Estes depósitos têm sua origem a partir da dissolução química de minerais que compõem as rochas, seguida da precipitação de diferentes substâncias produtos dessa dissolução (minerais ou não) no espaço vazio subterrâneo que constitui a caverna (WRAY, 1997). Esses depósitos assumem formas diversas em função de sua localização (teto, chão ou parede) e regime do fluxo de

água de infiltração, sendo as estalactites e estalagmites as mais conhecidas (KARMANN, 2009).

Esses depósitos são muito comuns em cavernas carbonáticas em função da alta solubilidade das rochas, sendo os processos de dissolução química e precipitação preponderantes para a formação dos mesmos. No entanto, têm sido identificados e estudados com cada vez mais frequência em cavernas em litologias não carbonáticas (consideradas não solúveis ou de baixa solubilidade), como arenitos (LUNDBERG *et al.*, 2010), quartzitos (SOUZA e SALGADO, 2015) rochas ferruginosas (TIMO *et al.*, 2015), tubos de lava basáltica (DAZA *et al.*, 2016), só para citar alguns exemplos.

Somam-se ao conjunto acima as cavernas em granito, onde espeleotemas também foram descritos (ROMANÍ e VILAPLANA, 1984; FINLAYSON e WEBB, 1985; CAMPBELL, 1997; ROMANÍ e TWIDALE, 1998; VERDÍA *et al.*, 2000; ROMANÍ *et al.*, 2003; SANJURJO *et al.*, 2007; ROMANÍ *et al.*, 2010a; SALLSTEDT *et al.*, 2014).

Segundo Romaní e Rodríguez (2007; 2011), após a formação da cavidade granítica, a ação da água meteórica desencadeia o processo de dissolução e precipitação dos minerais da rocha, formando espeleotemas. Para Romaní e Vilaplana (1984) a dissolução e precipitação de minerais enquanto um processo atuante em rochas graníticas já é amplamente aceito na maioria dos trabalhos relacionados à geomorfologia em terrenos nessa litologia.

Diferente dos espeleotemas de cavernas carbonáticas, que têm sua gênese ligada essencialmente ao processo de dissolução química a partir da água, em litologias como as citadas anteriormente, além da ação da água, há notável intervenção biológica na dissolução e precipitação de minerais e outras substâncias (ROMANÍ *et al.*, 2003; AUBRECHT *et al.*, 2008; SALLSTEDT *et al.*, 2014; DAZA *et al.*, 2016).

No granito os microrganismos que colonizam o substrato rochoso colaboram na alteração do pH da água de percolação, tornando-o tanto mais básico como mais ácido, potencializando o ataque químico a alguns minerais, a exemplo do quartzo, que se torna mais solúvel na presença de um pH mais alcalino (SANJURJO *et al.*, 2007; ROMANÍ *et al.*, 2010b). Outra frente de atuação biológica se dá na formação da estrutura do espeleotema, onde os microrganismos atuam criando zonas de deposição ou armadilhas para diferentes substâncias em solução na água (SANJURJO *et al.*, 2007). A presença destes agentes biológicos na estrutura dos espeleotemas é atestada em análises de MEV revelando a presença de colônias de bactérias, fungos, ácaros, diatomáceas e também de fragmentos vegetais (ROMANÍ *et al.*, 2010a; GALINDO, 2013).

Na apresentação de dados preliminares sobre espeleotemas em cavidades graníticas, Romaní e Vilaplana (1984) os descreveram como produtos equivalentes aos das cavernas carbonáticas, com diferenças na composição química (principalmente silicosos) e dimensões (milimétricos a centimétricos), mas muito semelhantes na forma (cilíndricos, cônicos ou planares) e estrutura de crescimento (em camadas rítmicas concêntricas). No trabalho são descritos três tipos de depósitos quanto à gênese: depósitos de gotejamento no teto (estalactites e crostas estalactíticas), depósitos de gotejamento no substrato (estalagmites e crostas estalagmíticas) e espeleotemas erráticos (não envolvendo gotejamento).

Com o avanço no reconhecimento e estudo destas feições, os tipos de depósitos e a caracterização dos mesmos foram ampliados. Em Romaní e Twidale (1998), Sanjurjo *et al.* (2007), Romaní *et al.* (2010a) e Romaní *et al.* (2014) encontram-se descrições detalhadas de diferentes morfologias comuns de espeleotemas em cavernas graníticas, que estão agrupadas em duas categorias principais: os espeleotemas cilíndricos e os espeleotemas em crostas ou planares.

Os tipos de espeleotemas afetos a cada uma das categorias serão descritos com base em Romaní *et al.* (2014), onde algumas definições e descrições foram atualizadas em relação aos demais trabalhos citados, levando em consideração tanto aspectos morfológicos como genéticos. Segundo tais autores, os espeleotemas cilíndricos estão associados à circulação da água pela superfície da rocha ou através dela, neste caso, via descontinuidades e interstícios, por processos como gotejamento e capilaridade. Possuem fisionomias semelhantes aos espeleotemas carbonáticos, pelo que recebem em algumas situações denominações equivalentes:

- a) espeleotemas individuais: são feições isoladas que se desenvolvem a partir do movimento lento da água, de forma que eles podem se acumular independente da gravidade, no teto, parede ou piso da cavidade. Crescem por deposição associada a movimentos capilares da água através de uma massa aglomerada de clastos angulosos embebidos em água. São mais espessos (maior diâmetro) e menores do que as estalactites, com tamanhos de até 10 mm;
- b) espeleotemas em forma de grama: associações múltiplas de formas cilíndricas muito finas que podem se manifestar no teto, paredes ou mesmo no piso da cavidade. Crescem por movimentos capilares da água através de uma massa aglomerada de clastos angulosos embebidos em água;

- c) estalactites: formas alongadas e individuais associadas principalmente ao teto ou beiradas das cavidades, quando o peso da gota d'água supera a tensão superficial desencadeando o gotejamento;
- d) estalagmites: são menos comuns em cavernas graníticas, formando-se no piso pela precipitação das substâncias dissolvidas ou arrastadas pela água que goteja dos pontos de crescimento das estalactites;
- e) microestromatólitos terrestres: inicialmente identificados em cavernas em arenito, não foram descritos ainda em cavernas em rochas magmáticas, mas com potencial para isso. São estruturas formadas pelo crescimento de biofilmes de cianobactérias que vivem enquanto houver umidade na caverna. Nos períodos secos esses organismos morrem e passam a constituir um substrato mineral e orgânico que servirá de base para a nova colonização de algas num novo estágio úmido da caverna. O perfil longitudinal revela o crescimento rítmico, alternado.

Os espeleotemas em crosta ou planares são descritos pelos autores como capas contínuas de acumulações de clastos angulares oriundos da meteorização do granito e transportados pela água, a qual se movimenta de forma lenta (sem ultrapassar a força de adesão sobre a superfície de rocha em que se move) em fluxo laminar ou individualizado em gotas que aderem ao teto, paredes e piso da caverna.

O principal tipo de espeleotema planar descrito por Romaní *et al.* (2014) é o *microgour*. As acumulações são lineares com desenvolvimento sinuoso, os padrões de interferência indicam a forma como a água se moveu. Dependendo da área da caverna em que eles são formados (parede, teto ou piso), terão uma aparência diferente devido às variações na velocidade da água. Os *microgours* podem ser ainda uma ornamentação superficial de outros espeleotemas, como os *flowstones*, estalactites e estalagmites, de modo similar (apesar de menos frequente) a contextos carbonáticos.

Em relação à composição dos espeleotemas em cavernas graníticas, Romaní e Rodríguez (2007) disseram que há um predomínio do mineral opala-A (sílica amorfa hidratada). Sanjurjo *et al.* (2007) e Romaní *et al.* (2003) relacionaram a origem da opala-A com a sílica proveniente da dissolução dos minerais que compõem o granito, supondo uma maior contribuição do quartzo. Na avaliação dos autores a presença do silício em maior quantidade que os demais elementos químicos essenciais em feldspatos e micas (alumínio, sódio, cálcio, magnésio e ferro) seria um primeiro indicativo para essa suposição. O fato de não observarem espeleotemas deste tipo em cavernas de litologias com pouca participação

desse mineral, como sienitos, também embasou a sugestão dos autores. Adicionalmente, mencionaram que feições equivalentes são encontradas em cavernas onde a rocha é formada principalmente por quartzo, como arenitos (WRAY, 1999; MELO *et al.*, 2015) e quartzitos (AUBRECHT *et al.*, 2008). Considerando a resistência do quartzo à alteração, a mediação biológica é colocada como um fator fundamental para a alteração do pH da água, o que favorece sua solubilização (SANJURJO *et al.*, 2007).

Além de opala-A, foram identificados espeleotemas de pigotita, estruvita, evansita-bolivarita, taranakita, goethita e outros materiais (ROMANÍ *et al.*, 2010b). Sobre a diversidade de composição destas feições, Romani e Rodríguez (2011, p. 13) salientaram que:

*Aunque nunca alcanzan ni las dimensiones ni el volumen de sus equivalentes en rocas calcáreas la variabilidad mineralógica de los espeleotemas encontrados en cavidades graníticas es muy grande. Se han descrito espeleotemas formados por bolivarita-evansita, ópalo A, pigotita, yeso, estruvita, hematites y carbonato cálcico aunque la lista de nuevos minerales no para de crecer cada día<sup>2</sup>.*

De acordo com Romaní e Rodríguez (2007), no geral, a superfície externa dos espeleotemas é irregular, coberta por uma “crosta” composta por clastos de diferentes tamanhos. Internamente mostram uma estrutura em camadas concêntricas, revelando um crescimento a partir de acumulações sucessivas e intermitentes, uma vez que dependem principalmente da circulação de água oriunda das chuvas (ROMANÍ e VILAPLANA, 1984).

As principais técnicas que têm sido utilizadas na análise dos espeleotemas, presentes nos trabalhos citados nesta seção (ROMANÍ *et al.*, 2003; SANJURJO *et al.*, 2007 e ROMANÍ *et al.*, 2010a), são: microscopia ótica de lâminas delgadas para análise petrográfica e avaliação da estrutura interna e composição; DRX, para identificação de fases amorfas e cristalinas, distinguindo assim mineraloides e minerais; MEV, para análise e interpretação do desenvolvimento, estrutura, morfologia e gênese dos espeleotemas e aspectos biológicos associados; EDS, para avaliação qualitativa e semi-quantitativa da composição química das amostras.

---

<sup>2</sup> Embora nunca alcancem nem as dimensões nem o volume de seus equivalentes em rochas calcáreas a variedade mineralógica dos espeleotemas encontrados em cavidades graníticas é muito grande. Tem-se descrito espeleotemas formados por bolivarita-evansita, opala-A, pigotita, gipso, estruvita, hematita e carbonato de cálcio embora a lista de novos minerais não para de crescer a cada dia.

## 4.2 UM PANORAMA DOS ESTUDOS SOBRE CAVERNAS EM GRANITO NO BRASIL

As cavernas desenvolvidas em rochas ígneas, especificamente em granito, ainda são minoria no quadro dos cadastros oficiais do Brasil. Embora o país possua terrenos graníticos associados a toda extensão do embasamento das coberturas fanerozoicas, essas áreas são pouco exploradas do ponto de vista espeleológico, o que acaba refletindo na escassa produção bibliográfica sobre esse tema. Neste tópico foi realizada uma descrição dos principais trabalhos disponíveis envolvendo cavernas em granito no Brasil, inclusive com consulta a grupos de espeleologia e pesquisadores individuais.

### 4.2.1 Trabalhos com abordagens geoespeleológica, exploratória e estatística

Considerando apenas as cavernas desenvolvidas em rochas não carbonáticas, estudos espeleológicos em rochas areníticas, quartzíticas e ferruginosas são mais numerosos, a exemplo dos trabalhos de Hardt (2011), Fabri *et al.* (2013) e Ruchkys *et al.* (2015), que envolvem discussões abrangentes sobre cavidades nessas litologias (gênese e evolução dos sistemas subterrâneos, classificação, relevância patrimonial, aspectos legais, serviços ecossistêmicos, conservação, etc.), diferentes dos estudos que abordam cavernas graníticas, que em sua maioria são sucintos, envolvendo descrições pouco aprofundadas de cavidades específicas.

No Brasil, Hardt (2002; 2003) trouxe uma aproximação ao tema quando tratou de cavernas em granitos e gnaisses nas serras do Mar (SP) e da Mantiqueira (MG). Nas descrições do autor, embasadas em Sjöberg (1986) e Finlayson (1986), na área estudada há tanto cavernas em fraturas como as em blocos<sup>3</sup>, as quais são condicionadas por forte controle estrutural conjugado a ação dos processos intempéricos e erosivos. Em seu trabalho de 2002 o autor considerou a possibilidade de inclusão de uma nova categoria nessas classificações, ligada aos processos de dissolução química de rochas como o gnaiss e o granito, sugestão baseada na observação de reentrâncias horizontais em uma das grutas em gnaiss originadas possivelmente pela combinação do intemperismo físico e químico.

---

<sup>3</sup> Alguns autores brasileiros, ao utilizar/citar as principais referências bibliográficas sobre classificação de cavernas em granito, adotaram a nomenclatura “cavernas em blocos” ao invés de “cavernas em matacões”. Trata-se, possivelmente, de um equívoco de tradução ou de uma opção por um termo de mais fácil compreensão, sem preocupação ou ênfase granulométrica/sedimentológica.



Zampaulo *et al.* (2005) descreveram uma gruta em rocha granítica na região serrana do município de Bertiooga (SP). Segundo os autores, a Gruta T 47 foi formada a partir de desmoronamento de blocos, sendo classificada como uma caverna do tipo blocos em pilha (FINLAYSON, 1986). A cavidade tem aproximadamente 100 m de extensão, é percorrida por um curso d'água e possui um rico registro de fauna cavernícola.

Nesse trabalho os autores chamam atenção para o grande potencial espeleológico de regiões como a Serra do Mar, principalmente pela ocorrência frequente de movimentos de massa, que geram acumulações de blocos. Ao mesmo tempo confrontam o potencial com o baixo número de estudos sobre cavidades em granito no Brasil, destacando alguns grupos de espeleologia que têm contribuído para mudar esse quadro, como o Grupo de Estudos Ambientais da Serra do Mar (GESMAR) e o Grupo Pierre Martin de Espeleologia (GPME).

Um trabalho desenvolvido por membros do GESMAR (ZAMPAULO *et al.*, 2007a) chamou atenção para um conjunto de grutas graníticas na Serra dos Cocais (Valinhos – SP). No estudo é realizada uma caracterização de duas cavidades visando à geração de dados que subsidiem ações de conservação na região, que segundo eles constitui uma importante área de nascentes e de remanescentes de Floresta Atlântica e Cerrado. As cavidades descritas foram classificadas como do tipo blocos em canal (FINLAYSON, 1986), os quais variam de 1 a 5 m de diâmetro, estando associadas a pequenos cursos d'água e com desenvolvimento linear de pouco mais de 80 m cada uma. Tal como no trabalho citado anteriormente, Zampaulo *et al.* (2007a) reforçaram a necessidade de uma ampliação de levantamentos e estudos de cavernas graníticas no Brasil.

Em estudo recente também na região de Valinhos, Ávila *et al.* (2019) (membros do Grupo da Geo de Espeleologia da USP, o GGeo) descobriram mais de duas dezenas de novas cavidades em matacões graníticos, todas próximas uma das outras, variando de poucas dezenas de metros a mais de 300 m de extensão. Os autores destacaram aspectos relacionados à espeleogênese das cavernas e a presença de espeleotemas coraloídes, além de discutirem a importância de pesquisas sobre essas ocorrências no país, no sentido de gerar mais conhecimento para subsidiar ações de proteção das mesmas.

O GPME tem sede em São Paulo, mas atua em todas as regiões brasileiras. É um dos grupos que mais realiza o cadastro e mapeamento de cavernas graníticas no Brasil, detendo inclusive os dois primeiros registros deste tipo de cavidade na Ilha de Santa Catarina (Gruta da Praia Brava – SC-10 e Gruta do Rei – SC-11). A edição do boletim informativo do grupo (Teto Baixo) publicada em maio de 2011 (GPME, 2011) trouxe uma série de artigos sobre

cavernas graníticas, com textos de pesquisadores internacionais que são referências no assunto, como os espanhóis Juan Vidal Romaní e Marcos Vaqueiro Rodríguez e o australiano Brian Finlayson.

O destaque nessa edição do boletim foi para os primeiros estudos sobre a Gruta do Riacho Subterrâneo, em Itu (SP), intitulada a maior caverna em granito do Hemisfério Sul. Igual (2011) apontou uma medida de 1850 m na ponta de trena, ressaltando que o trabalho de exploração ainda estava em andamento. Além do notável desenvolvimento linear para essa litologia, a cavidade apresenta uma grande variedade de espeleotemas, diversidade de fauna e também possíveis indícios arqueológicos (fragmentos cerâmicos). Diferente do contexto de Mata Atlântica, que caracteriza as encostas da Serra do Mar, o entorno da Gruta em Itu apresenta fitofisionomia típica de cerrado, relictos de uma vegetação que predominou na região em climas passados mais secos.

Na descrição fisiográfica da Gruta do Riacho Subterrâneo, Martins (2011) disse que a mesma está inserida no contexto da Suíte Granítica Pós-tectônica de Itu e se apresenta superficialmente na forma de matacões. O vazio subterrâneo que dá corpo à cavidade se forma em decorrência da erosão vertical do material mais fino liberado dos blocos maiores. Segundo o autor, embora pareça que o amontoamento dos matacões resulta de um escorregamento, o que de fato pode ocorrer em algumas situações, no caso da caverna em questão eles são residuais e fruto da erosão do maciço rochoso que ali existia.

Nos terrenos cristalinos do estado do Rio de Janeiro a ocorrência de cavernas graníticas também é relatada. Sabe-se que são alvo de explorações e estudos de membros do Espeleogrupo Rio de Janeiro (EspeleoRio), também ligados à Universidade Federal do Rio de Janeiro. Brito *et al.* (2019) descreveram duas cavidades em fraturas no Morro do Rangel, onde o controle tectônico apontaria a participação da erosão freática e marinha na formação das cavidades. Gonçalves *et al.* (2011) descreveram duas pequenas cavidades no município de Santa Madalena, destacando formas alveolares que, na interpretação dos autores, são formadas por dissolução, constituindo elementos cársticos em contexto não carbonático.

Há também trabalhos de caráter exploratório e estatístico que mencionaram a ocorrência de cavidades em granito, mas incluindo cavernas em outras litologias em suas discussões, ou seja, não são estudos exclusivos. Rosa e Goldberg (1997) apresentaram as principais áreas de ocorrência de cavidades subterrâneas no Rio Grande do Sul citando uma área em Viamão com cavernas e abrigos em rocha granítica, indicando também a presença de espeleotemas de exsudação de composição silicosa. Cruz *et al.* (2007) e Bento *et al.* (2017)

(autores ligados principalmente ao CECAV) trataram do panorama espeleológico no Rio Grande do Norte, tendo apontado os terrenos graníticos como de potencialidade média para a ocorrência de cavernas.

#### 4.2.2 Trabalhos com abordagem bioespeleológica

Estudos relacionados à bioespeleologia em cavernas graníticas brasileiras, também menos comuns comparados aos equivalentes em cavernas carbonáticas, têm evidenciado a importância desses ambientes como habitats de uma rica diversidade de espécies. Dentre os principais grupos que se dedicam ao estudo da fauna cavernícola no Brasil, incluindo cavidades graníticas, estão o Laboratório de Estudos Subterrâneos da UFSCar (responsável pela caracterização bioespeleológica de cavidades em matacões na ISC – SATO *et al.* 2018) e o Centro de Estudos em Biologia Subterrânea da Universidade Federal de Lavras.

Em uma avaliação preliminar da fauna de cavernas de tálus em rochas granitoides na região de Paranapiacaba, Damas *et al.* (1999) atestaram a presença predominante de aracnídeos e diplopodos, além de uma diferença na composição dos táxons entre cavernas com acesso restrito e um setor próximo à área de circulação de turistas. Bernardi *et al.* (2007) também apontaram a influência da ação antrópica na composição da fauna de uma caverna granítica em Minas Gerais. Neste caso a caverna estudada serviu como um reduto para aranhas da família Theraphosidae, que não são tão comuns em ambiente subterrâneo, mas em função do desmatamento ao redor da cavidade buscaram uma condição microclimática mais favorável e estável em seu interior, tornando-se nesse local uma espécie troglófila.

Considerada a maior caverna em granito do Brasil, a Gruta do Riacho Subterrâneo teve sua fauna terrestre estudada por Bichuette *et al.* (2017). Os autores identificaram 199 táxons, a maior riqueza biológica levantada até o momento em uma caverna em rocha ígnea no país, e constatada a preferência da fauna pelo substrato rochoso em comparação com a matéria orgânica, atestando a importância do contexto geológico e da morfologia da caverna na sustentação da biodiversidade.

Outros trabalhos que abordaram aspectos biológicos em cavernas graníticas no Brasil são os de Zampaulo *et al.* (2007b), descrevendo aspectos da ecologia populacional de espécies de opiliões (Serra do Mar – SP), Bernardi *et al.* (2012), inventariando a fauna de invertebrados (Serra da Mantiqueira – MG), Marconi e Ferreira (2015), analisando a fauna de invertebrados em 11 cavidades graníticas em uma área de conservação prioritária da Mata

Atlântica (diferentes municípios do Espírito Santo) e Rocha e Bichuette (2016), analisando a influência de variáveis abióticas na fauna de morcegos (Itu – SP). No conjunto, todos os trabalhos apontaram a incipiência dos estudos em biologia subterrânea em cavernas graníticas no Brasil e a importância destes ambientes do ponto de vista ecossistêmico, principalmente em áreas de Mata Atlântica, contexto em que as pesquisas foram desenvolvidas.

#### 4.2.3 Obras clássicas

Textos de referência geral na área da geografia, geomorfologia e geologia do Brasil, como as obras de Christofolletti (1980), Cunha e Guerra (1998), Guerra e Cunha (1994; 2003), Souza *et al.* (2005), Teixeira *et al.* (2009), Hasui *et al.* (2012) dedicaram capítulos para definição de conceitos e descrições da realidade cárstica brasileira, focando principalmente em terrenos carbonáticos. São bastante sucintas, quando não ausentes, as menções às cavernas em rochas pouco (ou não) solúveis nesses trabalhos. Mesmo livros específicos sobre espeleologia, como as obras de Lino e Allievi (1980) e Auler *et al.* (2001) não abordaram contextos geológicos não carbonáticos. Em obra recente sobre as cavernas brasileiras, Rubbioli *et al.* (2019) deram espaço para algumas grandes cavidades em rochas siliciclásticas e ferríferas e uma em micaxistos. Uma das ocorrências em rochas ferruginosas consiste em uma paleotoca, incluída por sua gênese peculiar, a partir da ação de animais da megafauna. Contextos ígneos não foram considerados.

O conjunto de trabalhos apresentados nesta seção evidencia algumas lacunas na espeleologia brasileira, tanto em termos de exploração como de produção científica, e a necessidade de obras de síntese sobre cavernas desenvolvidas em granito e mesmo em outras rochas não carbonáticas. Mostra também o potencial espeleológico das regiões serranas subtropicais e tropicais associadas à Mata Atlântica, principalmente para cavernas desenvolvidas em matacões, contexto geográfico onde se insere a ISC.

#### 4.3 PANORAMA SOBRE OS ESTUDOS LOCAIS

Em relação aos estudos envolvendo as cavernas em matacões graníticos da ISC, os trabalhos já realizados dão um panorama preliminar sobre os aspectos geoespeleológicos e bioespeleológicos de algumas ocorrências. Em Tomazzoli *et al.* (2011) e Tomazzoli *et al.* (2012) os autores apresentaram um conjunto de nove cavidades, em matacões e marinhas,

com descrições gerais principalmente de características geológicas. Naquele momento a ocorrência de espeleotemas já chamou a atenção. Os trabalhos de Mochiutti *et al.* (2013; 2015) são os primeiros desenvolvidos a partir das descobertas e explorações do Espeleo Grupo Teju Jagua, mostrando o aumento dos registros de cavernas na ISC e dando destaque para o SAC, principalmente por suas dimensões. Os autores também levantam possibilidades para a gênese das cavidades e composição dos espeleotemas.

Em um cenário mais recente Marques *et al.* (2017) avaliaram o possível enquadramento da Gruta do Saco Grande como uma caverna de relevância máxima em função da presença de uma espécie ameaçada, que é a *Ischnocnema manezinho*. Marques *et al.* (2019) continuaram com trabalhos na Gruta do Saco Grande, testando e avaliando o uso de *Laser Scanner* no mapeamento de um salão da cavidade. Em Massuqueto *et al.* (2019) os autores realizaram um levantamento de feições da geodiversidade em cavernas de diferentes litologias, relacionando estes elementos com a legislação vigente sobre a proteção e relevância de cavidades subterrâneas. Em litologia granítica a caverna selecionada para a pesquisa foi o SAC. Tal trabalho faz parte dos resultados preliminares de uma tese de doutorado desenvolvida junto ao Programa de Pós-Graduação em Geologia Ambiental da Universidade Federal do Paraná (UFPR) por membro do GUPE.

Os trabalhos de Mochiutti e Tomazzoli (2017; 2019) constituem resultados preliminares do desenvolvimento desta tese. O primeiro com uma avaliação prévia dos espeleotemas presentes no SAC, baseada em análises macroscópicas, e o último chamando a atenção para a importância e necessidade de ampliação dos estudos sobre cavernas em granito no Brasil, tendo como base as ocorrências na ISC.

Adicionalmente, há trabalhos específicos sobre as cavernas marinhas da ISC, desenvolvidas também em rochas ígneas, como diabásio (SILVA *et al.*, 2015), ignimbrito (SILVA *et al.*, 2016; SILVA *et. al.*, 2017) e riolito, relacionadas essencialmente a fraturas e descontinuidades na rocha e à ação do mar (SILVA, 2018).

## 5 SISTEMA DE CAVERNAS DA ÁGUA CORRENTE

Os levantamentos realizados no SAC mostraram ser esta de fato uma caverna de grande relevância e destaque no cenário espeleológico da ISC, corroborando os argumentos apontados para a escolha da mesma como caverna-tipo desta pesquisa. Os resultados de tais levantamentos são apresentados na sequência, juntamente com um breve perfil de outras cavidades em matacões graníticos da ISC e suas correlações (similaridades e diferenças) com o SAC.

### 5.1 CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO LOCAL

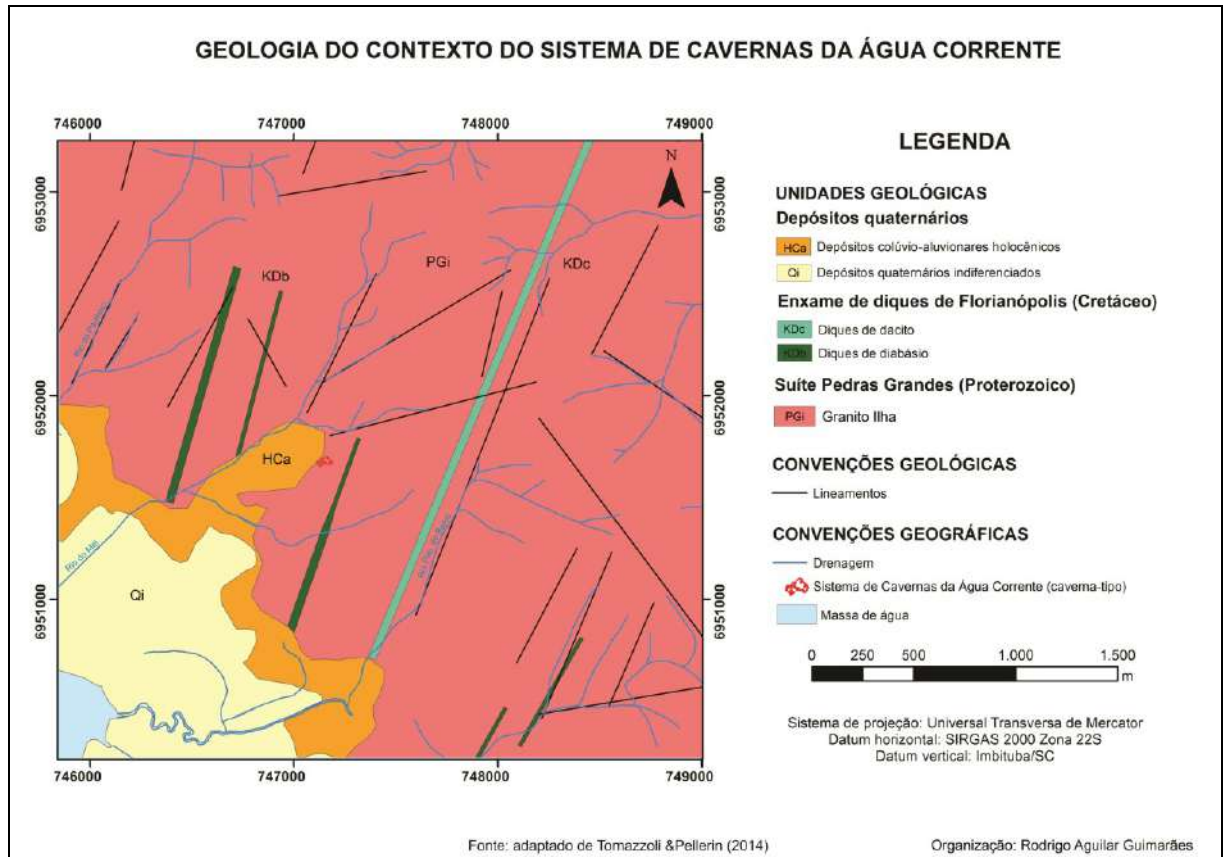
O setor da ISC onde está localizado o SAC é área de exposição do Granito Ilha, seccionado por diques básicos e ácidos ligados ao Enxame de Diques Florianópolis. Os depósitos colúvio-aluvionares aparecem nas porções mais baixas do terreno na interface planície – embasamento (Figura 5.1).

O Granito Ilha, que caracteriza o embasamento na área, aflora essencialmente na forma de matacões, os quais dão corpo às várias cavernas que ocorrem nesse setor da ISC. Há também porções do maciço rochoso que foram expostas pela atividade de extração de granito de uma antiga pedreira (atualmente desativada, constituindo uma área em recuperação ambiental) a montante do SAC (Figura 5.2) e pelas obras relacionadas a um empreendimento residencial a jusante do SAC (figuras 5.3a, b).

Foi identificada uma ocorrência de dique de diabásio no leito da estrada que dá acesso à cavidade. Os fragmentos de diabásio estão envolvidos em solo residual argiloso e avermelhado e apresentam fraturas paralelas com direção N10W, transversais à direção do dique. A conjugação do grau de intemperismo da rocha, processos pedogenéticos, evolução da vertente e cobertura vegetal impede uma estimativa da dimensão do corpo intrusivo.

Geomorfologicamente, o SAC está situado na encosta do Morro da Virgínia com face orientada para noroeste. Esta elevação integra a porção ocidental do maciço centro-norte da ISC, que tem suas vertentes voltadas para a Baía Norte e o continente. O controle estrutural no setor onde as cavidades se inserem resulta em drenagens encaixadas e interflúvios estreitos, ambos orientados na direção NE-SE. As vertentes são assimétricas, sendo as voltadas para o sul mais íngremes e curtas do que as voltadas para o norte (figuras 5.4 e 5.5).

Figura 5.1 – Contexto geológico do Sistema de Cavernas da Água Corrente.



Fonte: adaptado de Tomazzoli e Pellerin (2014)

Figura 5.2 - Exposição do maciço rochoso e de matações do Granito Ilha em antiga área de extração da rocha a montante do SAC.



Fonte: Rodrigo Dalmolin



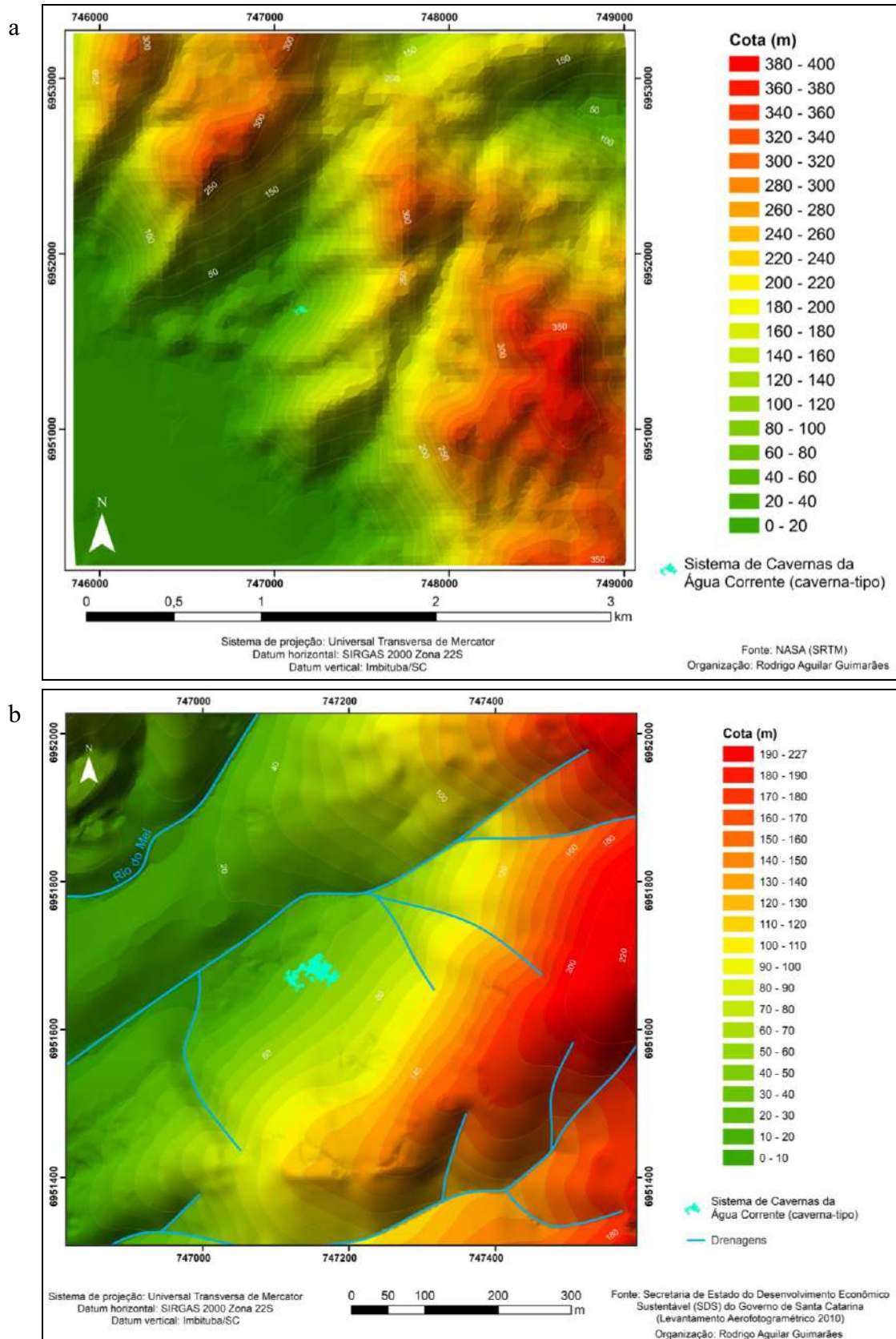
Figura 5.3 – Exposições do maciço rochoso do Granito Ilha (bastante alterado) nos fundos do loteamento Jardim Recanto da Ilha, área que foi modificada por obras do empreendimento residencial: a) exposição a jusante do SAC; b) exposição na lateral esquerda (de jusante para montante) do SAC.



Fonte: a autora

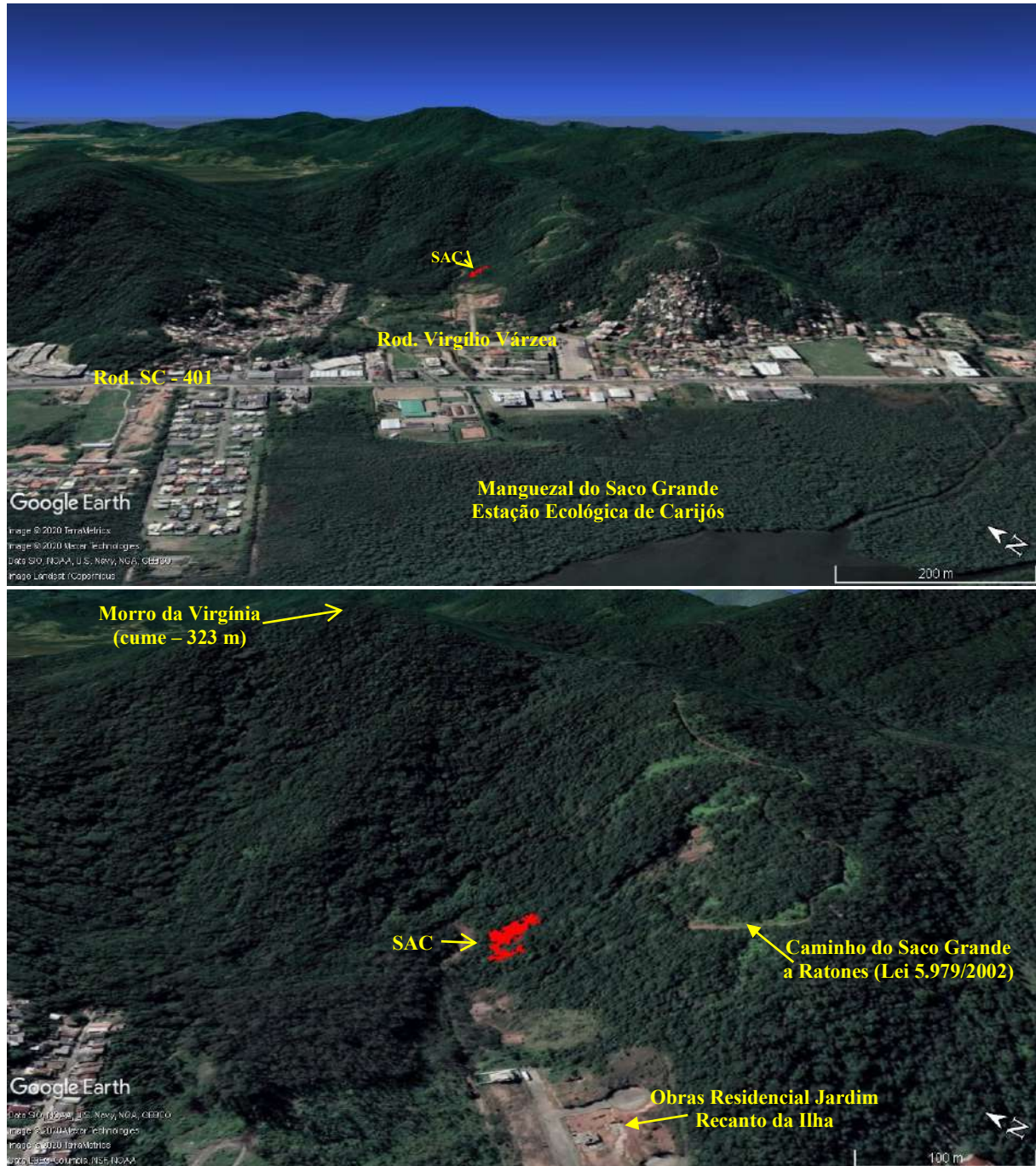


Figura 5.4 – Modelos digitais de elevação do contexto do Sistema de Cavernas da Água Corrente: a) entorno mais amplo; b) entorno imediato.



Fonte: a autora

Figura 5.5 – Imagens de satélite em perspectiva 3D da área onde está situado o SAC.



Fonte: a autora a partir do Google Earth

## 5.2 MAPEAMENTO ESPELEOLÓGICO

O mapa espeleológico do SAC é um retrato de como esta cavidade se expressa no terreno, quais são suas dimensões, suas características morfológicas, sua topografia, onde se localizam suas entradas, onde há aberturas significativas de teto (claraboias), como se distribuem dentro do espaço subterrâneo os materiais, as formas, as feições e alguns elementos biológicos (vegetação), quais são os caminhos percorridos pela rede de drenagem subterrânea.

Esta foi uma das etapas de maior dificuldade da pesquisa, pois até então, tanto a pesquisadora como a equipe de apoio de campo, composta por dois membros do GUPE, possuíam experiência de mapeamento de cavidades subterrâneas em contextos distintos ao de matacões graníticos. Some-se a isso as dimensões consideráveis e um desenvolvimento complexo do SAC. As decisões sobre o melhor método a ser utilizado, o nível de detalhamento a ser empregado, o que seria representado e como, foram sendo tomadas ao longo dos trabalhos de campo, retardando por vezes o avanço na caverna. Adicionalmente, a impossibilidade de realizar o trabalho de forma contínua (RUBBIOLI e MOURA, 2009), pelo desgaste físico e disponibilidade de agenda da equipe de apoio (residente no Paraná), dificultou a conclusão do mapeamento espeleológico do SAC.

Desta forma, será apresentado aqui um mapa espeleológico parcial do SAC, essencialmente sua planta baixa (ANEXO B). Estima-se que aproximadamente um quinto da cavidade não tenha sido mapeado, além da confecção ideal dos perfis longitudinal e transversais, que foram realizados apenas em duas de suas principais entradas. No entanto, mesmo sendo um produto parcial, permite a visualização, descrição e análise de características elencadas no início deste tópico.

### 5.2.1 Estatísticas do SAC

No mapeamento do SAC foram efetivadas **380** visadas a partir de **375** bases, contando com **947** medidas auxiliares. No cômputo final das principais medidas que descrevem a extensão da cavidade (desenvolvimento linear - DL e projeção horizontal - PH), várias destas visadas foram desconsideradas, uma vez que se tratam de repetições ou recobrimentos sobre um mesmo espaço, a exemplo de salões que foram medidos por

irradiação e/ou triangulação. Tal procedimento foi adotado para evitar superestimar as dimensões do SAC (RUBBIOLI e MOURA, 2009).

O DL foi medido a partir das visadas que melhor representaram o caminamento da equipe durante o mapeamento espeleológico, ou seja, que espelha as dificuldades da exploração, os desvios de obstáculos, a escolha de bases mais convenientes ou mesmo possíveis para o avanço das visadas, etc.. O valor de DL obtido foi de **783 m**. A PH, que representa as medidas da caverna em um plano horizontal, foi de **742 m**. Considerando essas medidas parciais de DL e PH e o quanto se avalia que ainda falta ser mapeado, é muito provável que a caverna tenha uma extensão total próxima ou mesmo maior que o valor obtido com trena, quando das primeiras explorações em 2012, que é de **1026 m**.

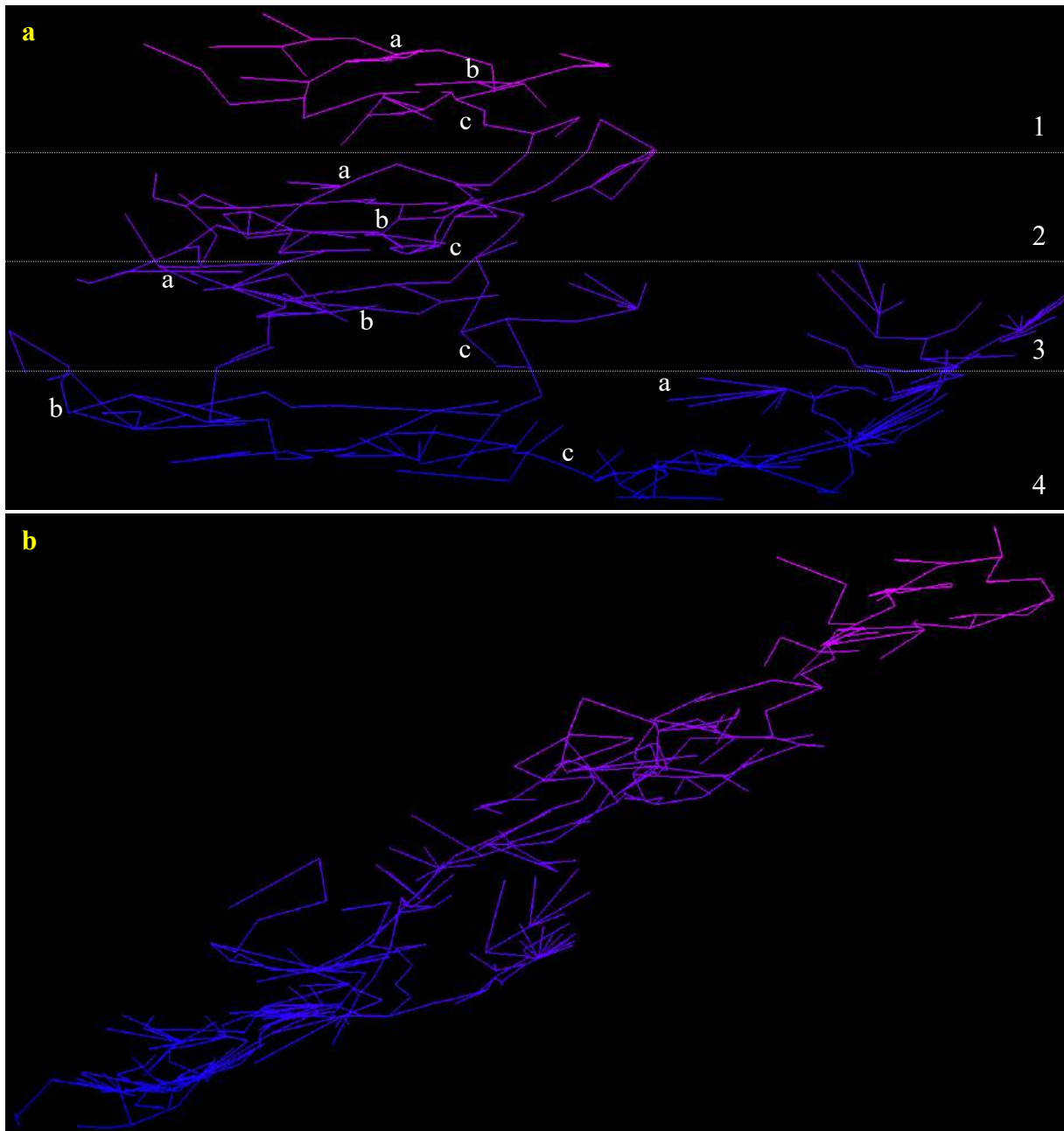
O desnível do SAC, que representa a diferença entre seu ponto mais alto e seu ponto mais baixo é de **31,1 m**. A partir de produtos tridimensionais gerados pelo aplicativo *TopoDroid* é possível definir quatros níveis (ou patamares) principais para o SAC, os quais podem ser subdivididos em até três subníveis, a julgar pelas diferenças de altitude das visadas em cada um dos níveis principais (figuras 5.6a, b).

A projeção da caverna no terreno ocupa uma área de **1931,43 m<sup>2</sup>** e seu volume é de **3696 m<sup>3</sup>** (cálculo do *TopoDroid*). Foram identificadas **31** entradas que possibilitam o acesso à cavidade, seis delas as principais, tomadas como base para o mapeamento, inclusive tendo ligação mais rápida e fácil com as trilhas e estrada de acesso. A área ocupada pelo SAC no terreno não é grande, equivalendo a cerca de 20% de um campo de futebol. No entanto, o arranjo dos matacões possibilita uma grande quantidade de ramificações de galerias e salões, distribuídos em diferentes níveis ao longo do trecho da encosta onde a caverna se localiza, o que faz com que a mesma tenha dimensões significativas mesmo numa área pequena. Cavernas desenvolvidas em rochas carbonáticas ou siliciclásticas, em geral controladas por estruturas tectônicas e/ou primárias (acamadamento, foliação metamórfica) nem sempre têm um desenvolvimento tão expressivo para uma área igual a do SAC.

Falando em números, a título de comparação, a maior caverna em matacões graníticos registrada no Brasil é a Gruta do Riacho Subterrâneo, localizada em Itu (SP). A topografia realizada pelo GPME (ainda em andamento) chegou aos números parciais de 1415 m de DL, 1249 m de PH e 38 m de desnível (SBE, 2020). Em nível mundial a maior caverna em matacões graníticos é a Bodagrottorna, localizada na Suécia, com 2633 m de extensão (GULDEN, 2019). Considerando tais referenciais, o SAC figura como a segunda mais extensa do Brasil e está entre as dez maiores do mundo para o tipo de caverna e litologia em questão.



Figura 5.6 – Modelos tridimensionais do SAC extraídos do aplicativo *TopoDroid*: a) seção WSW/ENE com a identificação dos 4 níveis principais e subníveis; b) projeção vertical da seção descrita em “a”.



Fonte: a autora

### 5.2.2 Características morfológicas e topográficas

O SAC possui um desenvolvimento complexo, reflexo da disposição caótica dos matacões que lhe dão forma. Ao comparar o desenho da caverna com os padrões morfológicos mais comuns, pensados a partir de contextos litológicos carbonáticos (PALMER, 1991), ele se assemelha ao padrão espongiforme, caracterizado por salões e condutos com formato irregular que se unem como os poros de uma esponja. No entanto, é mais apropriado dizer que o SAC possui uma morfologia labiríntica. Considerada uma designação genérica (AULER e PILÓ, 2019), já que pode, em função da densidade de galerias que se interconectam, englobar cavernas com diferentes traçados (espongiforme, ramiforme, reticulado e anastomosado), ainda é o termo que melhor descreve seu percurso em planta.

O SAC possui múltiplas galerias, as quais estão dispostas de forma paralela, perpendicular, transversal, sobreposta ou sotoposta umas em relação às outras, delimitadas por um ou mais matacões. Muitas dessas galerias divergem em determinado ponto e voltam a se conectar na sequência, possibilitando a existência de vários caminhos para se chegar a um mesmo local na caverna. Por estas características, não é possível apontar um conduto principal para a cavidade, mas sim um eixo preferencial de desenvolvimento, que é por onde as visadas do mapeamento avançaram ou tiveram continuidade.

As galerias são de dimensões e morfologias variáveis, enquadrando-se principalmente nas seguintes situações: a) amplas em largura e altura, permitindo o deslocamento em pé e de mais de uma pessoa ao mesmo tempo (caminhando lado a lado) (Figura 5.7); b) com teto baixo, permitindo o deslocamento com o corpo inclinado/abaixado ou somente por meio de rastejamento (Figura 5.8); c) estreitas, permitindo o deslocamento em pé de apenas uma pessoa, necessitando por vezes andar com o corpo de lado (Figura 5.9); d) estreitas e com teto baixo, onde a prospecção é feita por meio de rastejamento e arraste, com variações na posição do corpo para se adaptar à morfologia do conduto (Figura 5.10).

Em relação ao contorno das galerias, identificam-se as seguintes situações: a) paredes abauladas ou retilíneas; b) teto aberto ou fechado e; c) piso irregular (com desníveis, e/ou obstáculos) ou regular (plano a levemente inclinado e sem obstáculos). Tais características dependem da forma e arranjo dos matacões que delimitam os condutos e do tipo de substrato do piso (laje rochosa, material clástico - com granulometria variando de pequenos matacões à fração argila - ou solo).

Figura 5.7 – Galeria ampla, com largura e altura suficientes para deslocamento em pé de mais de uma pessoa ao mesmo tempo.



Fonte: Henrique Pontes

Figura 5.8 – Galeria com teto baixo, onde é necessário inclinar o corpo ou rastejar.



Fonte: a autora

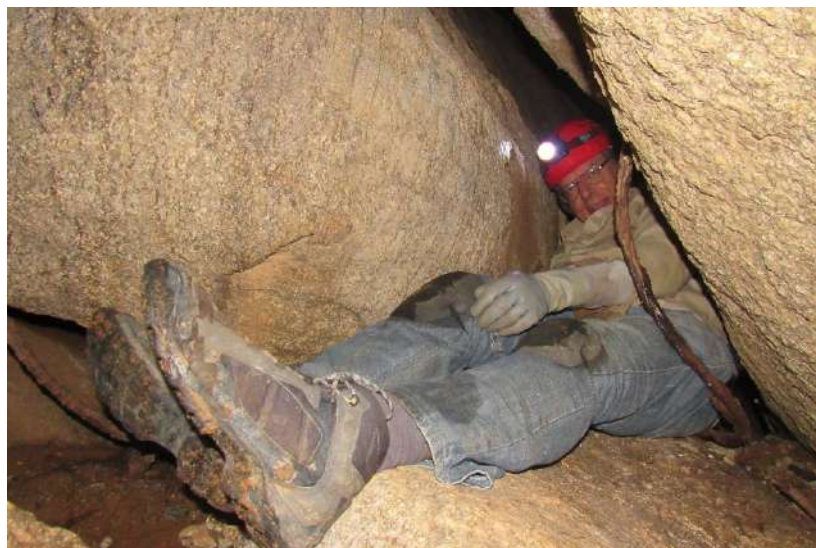


Figura 5.9 – Galeria estreita, mas com altura suficiente para andar em pé. À direita no piso (indicada pelas setas) há uma fenda com cerca de 2 m de profundidade e menos de 50 cm de largura por onde a água escorre e desaparece.



Fonte: Rodrigo Dalmolin

Figura 5.10 – Galeria com teto baixo e estreita, conhecida como “quebra-corpo”, onde é necessário rastejamento e manobras com o corpo para o deslocamento.



Fonte: a autora



Outro tipo de compartimento do SAC são os salões, que constituem áreas amplas, com dimensões maiores (combinação de largura, comprimento e altura) que as galerias e onde é possível se deslocar em pé. Ocorrem em menor quantidade que as galerias, sendo muitas vezes o ponto de encontro entre várias delas. Uma característica comum a alguns dos salões do SAC é o fato de possuírem matacões de grandes dimensões (entre uma e duas dezenas de metros de diâmetro) compondo seu teto, às vezes um único matacão, como é o caso do Salão Maior, uma das portas de entrada do SAC (Figura 5.11). O piso, tal como nas galerias, pode ser irregular, com desníveis e matacões pequenos a médios espalhados por toda a área, ou mais “limpo”, com material de granulometria menor e superfície plana a levemente inclinada (Figura 5.12).

Algumas galerias e salões do SAC possuem o teto parcialmente aberto, configurando zonas denominadas de claraboias, as quais constituem espaços de descontinuidade entre os matacões que participam da composição do teto da cavidade (um mesmo matacão pode, a depender de sua posição, formar parte da parede e do teto) (Figura 5.13). As claraboias são portas que tornam possíveis a entrada de luz, água e matéria orgânica e permitem o crescimento de vegetação dentro do SAC.

Em relação ao terreno em que está inserida, a caverna tem um desenvolvimento misto, entre horizontal e inclinado, com galerias e salões que se distribuem em diferentes níveis (ou cotas) da encosta. A interligação entre os compartimentos desses patamares é caracterizada por trechos inclinados, escarpados (Figura 5.14) e, mais raramente, por desníveis abruptos que só podem ser vencidos com uso de corda ou técnicas verticais. Nestas situações, para passar a um nível inferior ou superior sem o uso de tais equipamentos e técnicas, é necessário fazer um caminho alternativo saindo da caverna e adentrando-a por outro ponto. Esta estratégia também é útil para acessar pontos específicos da cavidade sem ter que realizar o caminhar apenas internamente, já que a prospecção da mesma possui um nível de dificuldade que varia entre médio e difícil.

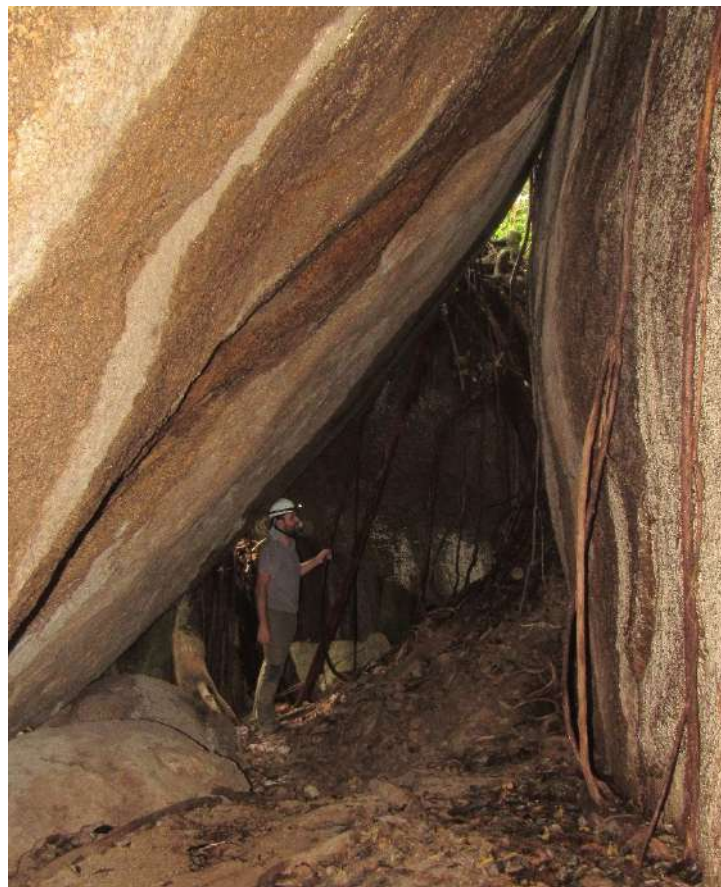
Esses níveis do SAC se sucedem na topografia, distribuindo-se em diferentes posições da encosta entre a cota mais alta e mais baixa da caverna. Há, no entanto, sobreposição de níveis em alguns setores, com no máximo dois patamares coincidentes. O nível que fica acima tem como piso os matacões que formam o teto e/ou paredes do nível inferior. No mapa espeleológico os níveis sotopostos foram representados apenas por seus contornos, em cor cinza e com traçado pontilhado. O detalhamento desses setores foi feito em projeções dos mesmos nas laterais do desenho principal.

Figura 5.11 – Setor do Salão Maior próximo à entrada (E). Um único matacão de grandes dimensões constitui o teto e matacões menores e arredondados aparecem dispersos no piso.



Fonte: Henrique Pontes

Figura 5.12 – Salão de menor dimensão formado pela junção de dois matacões e com piso limpo, levemente inclinado para esquerda.



Fonte: a autora

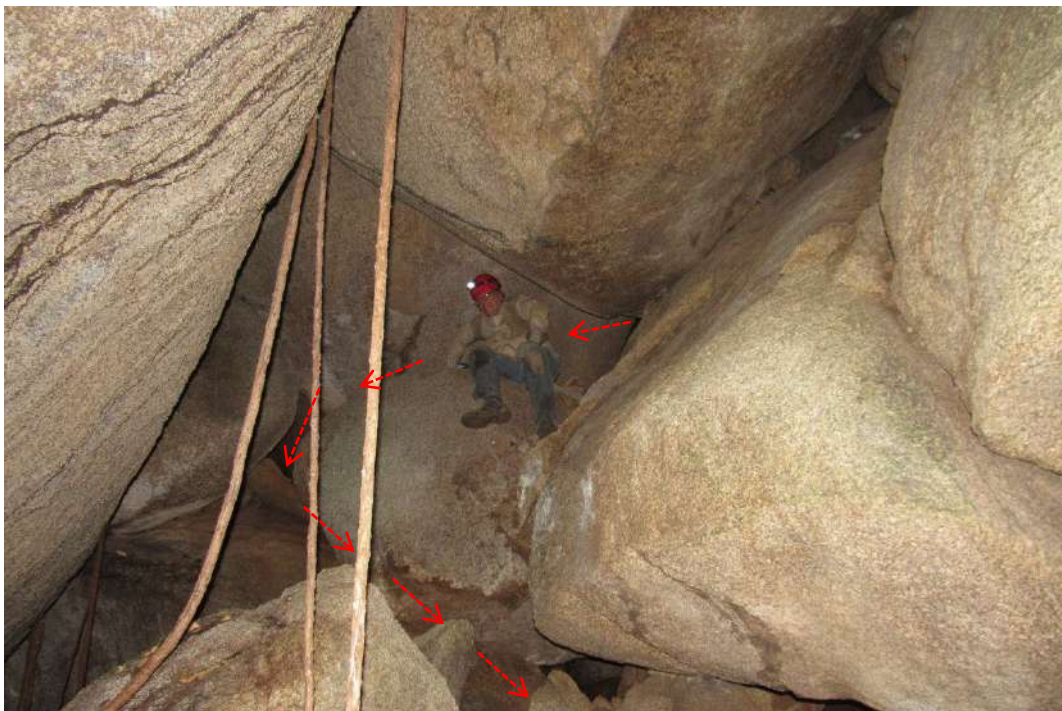


Figura 5.13 – Abertura de teto, característica comum do SAC em função da morfologia e arranjo dos matacões que compõem o teto ou da ausência destes.



Fonte: a autora

Figura 5.14 – Passagem escarpada de uma galeria superior para o Salão Maior. Setas indicam trajeto para contornar o trecho escarpado.



Fonte: a autora

### 5.3 GEOESPELEOLOGIA

A geoespeleologia engloba a apresentação e discussão dos principais aspectos físicos da caverna, incluindo seus materiais, estruturas, formas e processos, pretéritos e ativos, que lhe caracterizam atualmente e que ajudam a desvendar sua gênese e evolução ao longo do tempo. Não será incluído neste tópico um item sobre os espeleotemas, depósitos minerais secundários que, devido sua especificidade e relevância, serão abordados em capítulo à parte, englobando tanto o SAC como as outras cavernas em matacões graníticos da ISC.

#### 5.3.1 Litologias

As litologias que podem ser observadas no SAC são o Granito Ilha e o diabásio, na forma de matacões, blocos e seixos. Não foram identificadas exposições do maciço granítico propriamente dito ou diques de rocha básica no interior da cavidade. A partir da análise de amostras desses dois tipos de rochas coletadas no SAC foi realizada a descrição a seguir, que corrobora as informações da literatura para ambos os tipos litológicos.

##### 5.3.1.1 *Granito Ilha*

O Granito Ilha é a litologia predominante no SAC, expressa como matacões que delimitam a caverna e também em blocos e seixos encontrados no piso ao longo de toda a cavidade. No geral, o granito se encontra bastante intemperizado, mas em alguns setores da caverna é possível encontrar a rocha menos alterada. Nestes pontos são encontrados blocos poliédricos e lascas resultantes da atividade de cantaria pretérita, fato comprovado por relatos de moradores locais e pelo achado em campo junto a esses blocos de uma ponteira de ferro utilizada nesse tipo de atividade (Figura 5.15).

O Granito Ilha amostrado em um destes pontos (Figura 5.16) possui coloração acinzentada, é leucocrático (índice de cor de ~10), possui textura equigranular média a grossa para inequigranular, com maior presença de quartzo seguido de feldspato potássico, plagioclásio e biotita (Figura 5.17), com pouca participação a mais do feldspato potássico em relação ao plagioclásio, essencialmente no campo composicional monzogranítico.

Em relação ao quartzo, é possível observar diferentes gerações do mineral (Figura 5.18). Predominam cristais grandes, com forma e contorno mal definidos e que exibem

extinção ondulante à observação com ambos os polarizadores (nicóis) do microscópio petrográfico inseridos. Adicionalmente, há grupos de minúsculos grãos de quartzo (subgrãos) também com este padrão de extinção, ao passo que em alguns conjuntos de cristais ainda menores a extinção é normal. A extinção ondulante e a presença de subgrãos, resultado da subdivisão/trituração de grãos maiores, são indicadores de deformação tectônica e/ou contemporânea às fases finais de cristalização magmática. Como os demais minerais não apresentam sinais de deformação, apenas quartzo, por seu caráter tipicamente tardio de cristalização, infere-se que a mesma seja de origem magmática. Quanto aos subgrãos sem extinção ondulante, presume-se que tenham se formado posteriormente ao evento de deformação (recuperação seguida de recrystalização).

O feldspato potássico, tal como o quartzo, apresenta-se como cristais anédricos. Exibe geminação Carlsbad típica, mas, pontualmente, é possível observar a geminação em grade em grãos de microclínio. O plagioclásio está mais alterado que o feldspato potássico, com cristais bem formados (alongados e prismáticos), reflexo de sua cristalização precoce. Sob nicóis cruzados exibe geminação polissintética e alguns cristais possuem bordas de albita (albitização).

A biotita, claramente com menor participação, pode se apresentar parcialmente alterada, convertida em clorita, argilominerais e hidróxidos de ferro. Associados a ela aparecem grãos eudrais muito pequenos de apatita e zircão.

Como acessórios se identificam minerais opacos, principalmente magnetita, fluorita, allanita, epidoto (ocupando o núcleo de feldspatos ou em vênulas, associado ao quartzo) e titanita, parte deles típicos de processos de alteração hidrotermal da rocha. Em alguns matacões são observados sinais de propilitização (Figura 5.19), que é um tipo de alteração hidrotermal que, no granito, transforma o feldspato plagioclásio em clorita e epidoto, ambos de coloração esverdeada.



Figura 5.15 – Blocos poliédricos e lascas derivados de atividade de cantaria e ponteira de ferro utilizada nas ações de corte e desbaste da rocha. A ponteira tem 26 cm.



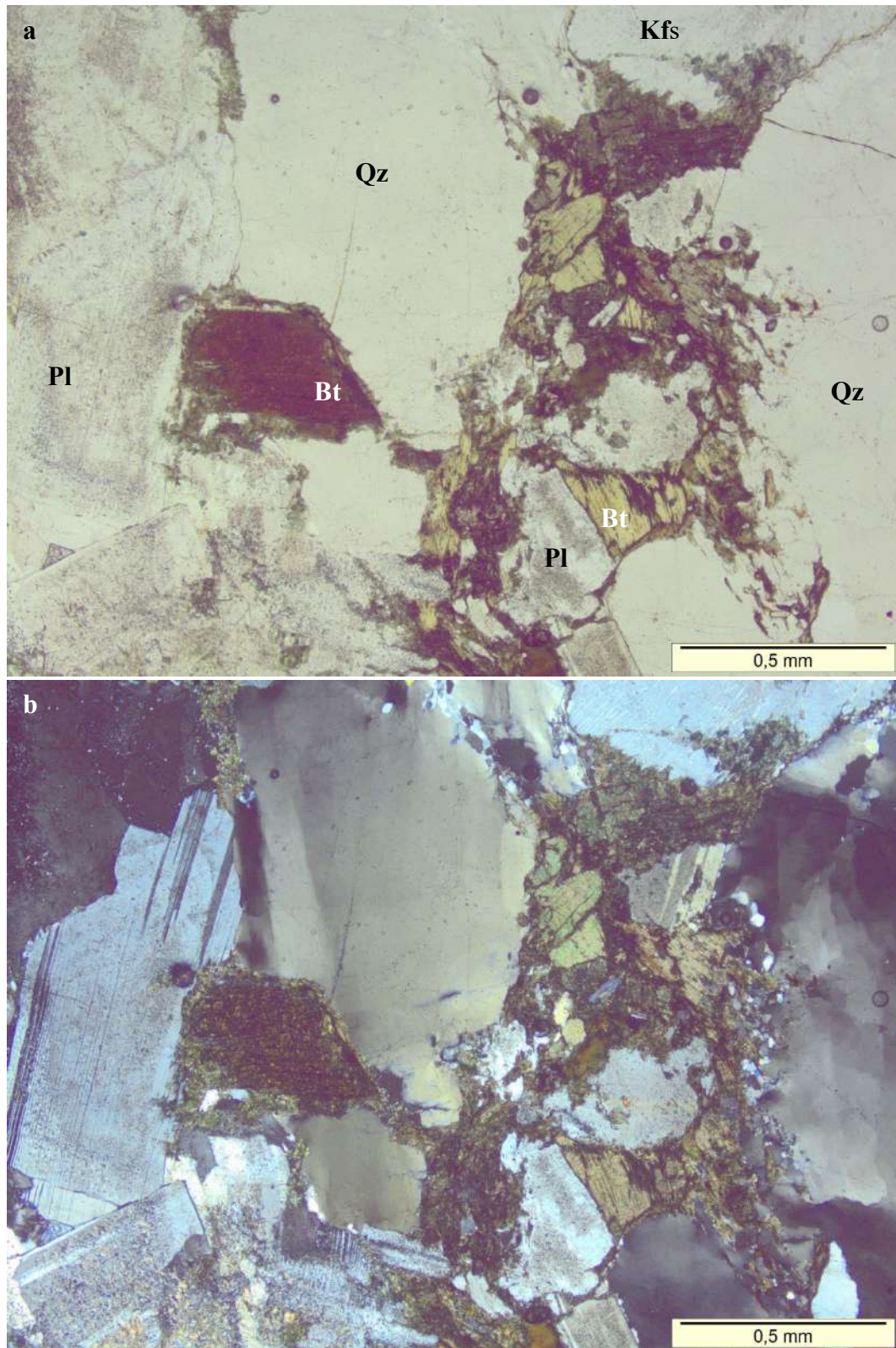
Fonte: a autora

Figura 5.16 – Amostra do Granito Ilha coletada no SAC (SAC 7) para análise petrográfica.



Fonte: a autora

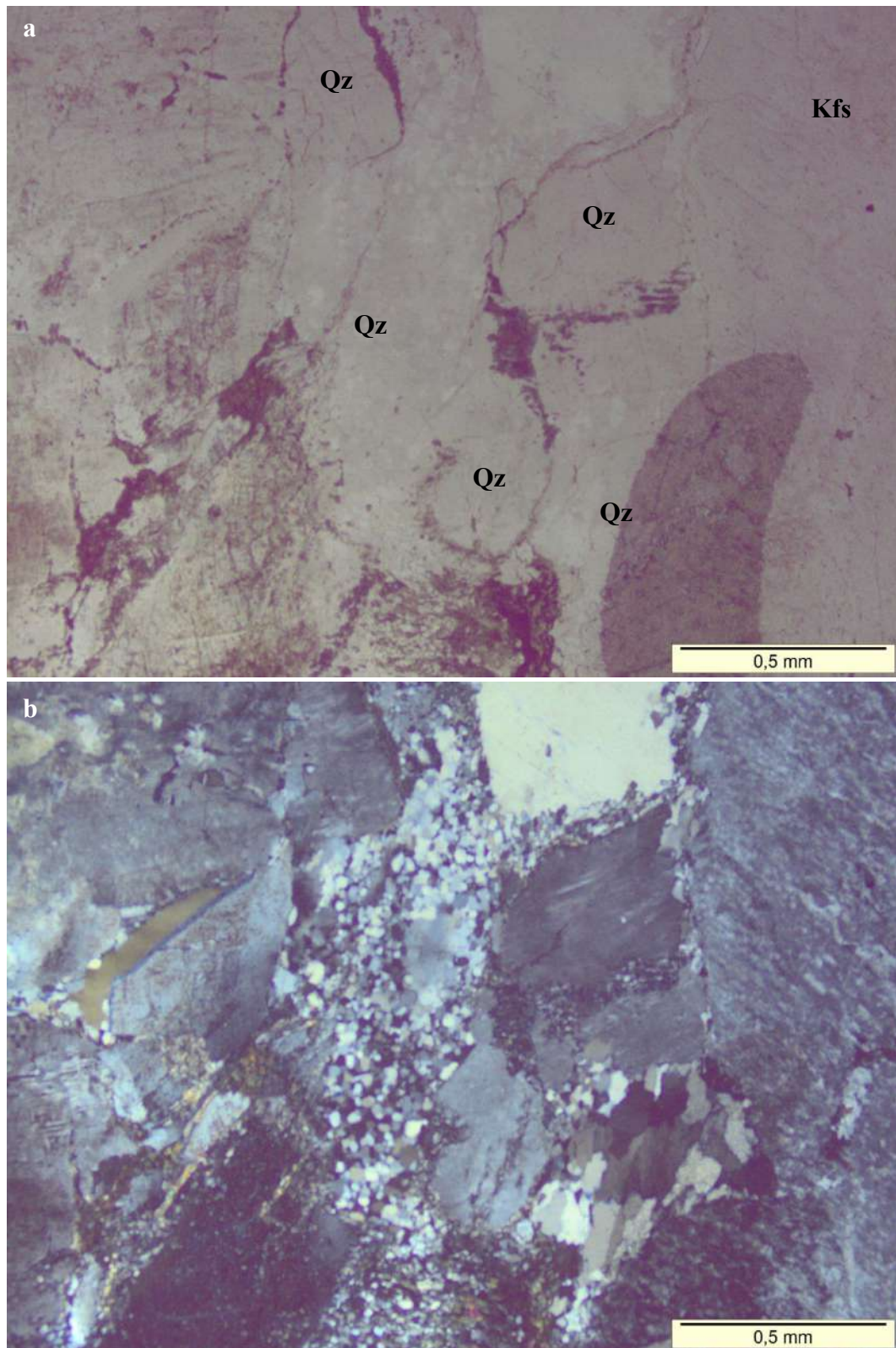
Figura 5.17 – Lâmina delgada da amostra SAC 7 mostrando seus minerais primários (Qz – quartzo; Kfs – feldspato potássico; Pl – plagioclásio; Bt – biotita): a) nicóis paralelos; b) nicóis cruzados.



Fonte: a autora



Figura 5.18 – Lâmina delgada da amostra SAC 7 mostrando diferentes gerações do quartzo, com e sem recuperação cristalina: a) nicóis paralelos; b) nicóis cruzados.



Fonte: a autora



Figura 5.19 – Matacão de granito propilitizado. A coloração esverdeada é resultado de alteração hidrotermal, que transformou o feldspato plagioclásio em clorita e epidoto, ambos de coloração esverdeada.



Fonte: a autora

#### 5.3.1.2 Diabásio

O diabásio está exposto na forma de pequenos matacões, blocos e seixos com forma principalmente tabular e, diferente do granito, não é amplamente distribuído na caverna. Concentra-se em áreas de entrada de sedimentos na cavidade por enxurradas, formando uma espécie de “leque” (Figura 5.20) e também ao longo dos cursos d’água que atravessam a cavidade. A forma tabular é resultante da redução em fragmentos controlados por estruturas originadas quando da colocação do corpo intrusivo ou por descompressão após sua exposição em superfície. O intemperismo e a erosão atuaram no conjunto de descontinuidades geradas, liberando blocos nesse formato (Figura 5.21).

A amostra analisada (Figura 5.22) trata-se de um diabásio típico, levemente porfirítico com cristais de feldspato plagioclásio bem formados (eudrais/idiomórficos) que predominam em relação aos piroxênios (Figura 5.23). Há muitos minerais opacos, destacando-se a magnetita, ilmenita e material de alteração. Localmente o padrão de disposição do plagioclásio e dos opacos é radial, conferindo uma textura esferulítica para alguns setores da amostra.

Figura 5.20 – Exposição de pequenos matacões, blocos e seixos de diabásio no SAC com formato tabular.



Fonte: a autora

Figura 5.21 – Matacão de diabásio com cerca de 30 cm de largura em processo de fragmentação em placas tabulares.



Fonte: Henrique Pontes

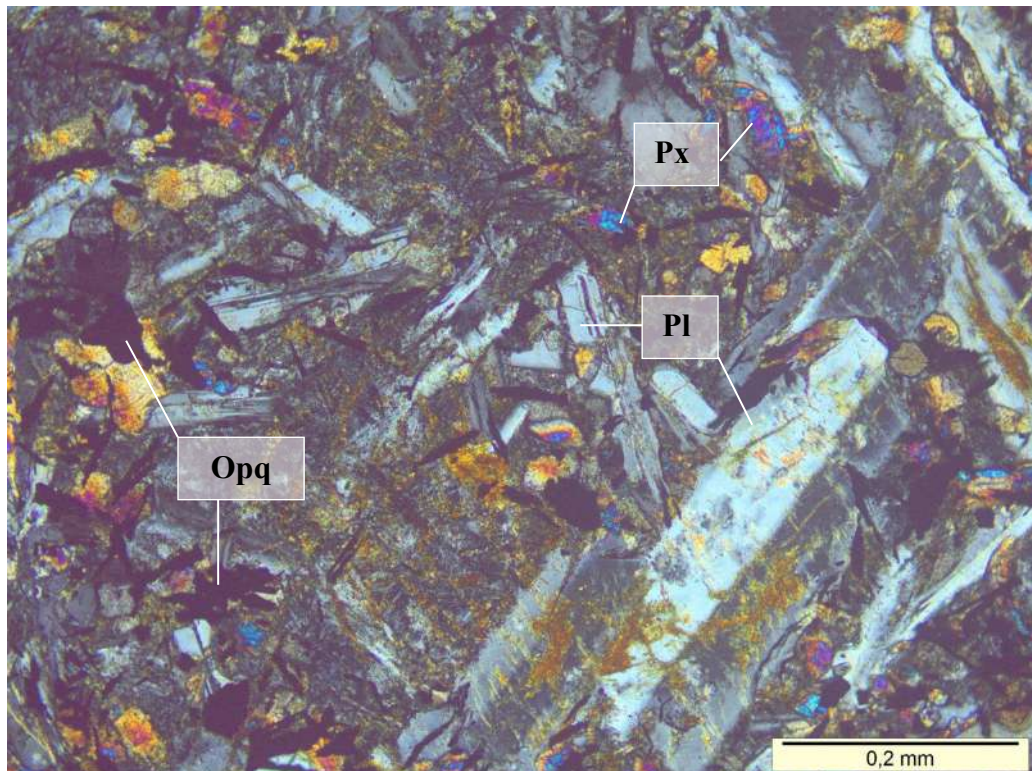


Figura 5.22 – Amostra de diabásio coletada no SAC (SAC 9) para análise petrográfica.



Fonte: a autora

Figura 5.23 – Lâmina delgada da amostra SAC 9 (nicóis cruzados) mostrando seus minerais primários (Pl – feldspato plagioclásio; Px – piroxênios; Opq – minerais opacos).



Fonte: a autora

### 5.3.2 Estruturas ígneas e tectônicas

Entrar em uma caverna é, na maioria das vezes, como entrar no maciço rochoso. As rochas estão expostas, limpas e, por vezes, pouco alteradas ou mesmo sãs, o que é menos comum em superfície, onde as coberturas de solo, vegetação e a maior exposição às intempéries restringem sua visualização. Este fato amplia as possibilidades de observação das características da rocha, como diferentes tipos de estruturas, que nas litologias ígneas são representadas principalmente pelas discontinuidades e pelas variações texturais (JERRAM e PETFORD, 2014).

No caso do SAC, pela sua configuração (caverna em matacões), não se trata de estar no contexto do maciço granítico, mas dá para ter uma ideia bastante aproximada. A morfologia dos matacões exibe várias faces dos litotipos que integram a unidade litoestratigráfica que é o Granito Ilha, permitindo, tal como dito acima, ampliar as possibilidades de exposição de suas características texturais e estruturais. Na sequência serão descritas as principais estruturas ígneas e tectônicas que são observadas no SAC.

#### 5.3.2.1 *Enclaves*

Os enclaves observados no SAC possuem contornos essencialmente arredondados, variando de circulares a elipsoidais (Figura 5.24). As dimensões variam entre 3 e 60 cm de diâmetro. Aparecem no mesmo nível que a superfície do granito ou em alto relevo (Figura 5.25), o que mostra o intemperismo diferencial em função de variações composicionais e texturais entre a inclusão e o granito.

Predominam enclaves com textura inequigranular a equigranular com tendência a grão fino e com um conteúdo alto em minerais máficos, o que mostra que sua origem também é ígnea, provavelmente associada a um magma básico, localmente com sinais de mistura magmática. Os enclaves maiores (com mais de 30 cm de diâmetro) são menos comuns, diferindo além do tamanho pela coloração mais clara, composição semelhante a do granito e textura um pouco mais fina que este (Figura 5.26).

Os enclaves são assimilados pelo magma granítico em diferentes níveis, o que é evidenciado por suas bordas/contatos e forma. As inclusões com contato abrupto e forma arredondada melhor definida mostram que houve pouca ou nenhuma assimilação (figuras 5.24 e 5.25). Já as inclusões com contatos transicionais, forma irregular e a diminuição da

quantidade de minerais máficos mostram que houve uma maior assimilação ou mescla dos magmas (Figura 5.27).

Tomazzoli e Pellerin (2015), ao descreverem o Granito Ilha, disseram que, como regra, este não exhibe enclaves. Corrêa (2016) disse que os enclaves microgranulares são escassos e ocorrem de forma localizada. Ao caracterizar estruturas observadas em afloramentos no norte da ISC o autor disse que são arredondados, com tamanho variando entre 3 e 35 cm, coloração cinza escuro e textura muito fina, provavelmente de composição básica. Tal descrição é compatível com a do conjunto principal de enclaves observados no SAC.

Considerando as informações dos autores acima, a identificação de enclaves microgranulares de composição básica e ácida no SAC amplia os locais de ocorrência de tais estruturas no Granito Ilha e passa a constituir um dado importante para complementações das descrições da unidade geológica e um melhor entendimento sobre a mesma.

Figura 5.24 – Enclave microgranular de composição provavelmente básica e formato elipsoidal. Nesta situação a estrutura aparece no mesmo nível superficial que o granito.



Fonte: a autora

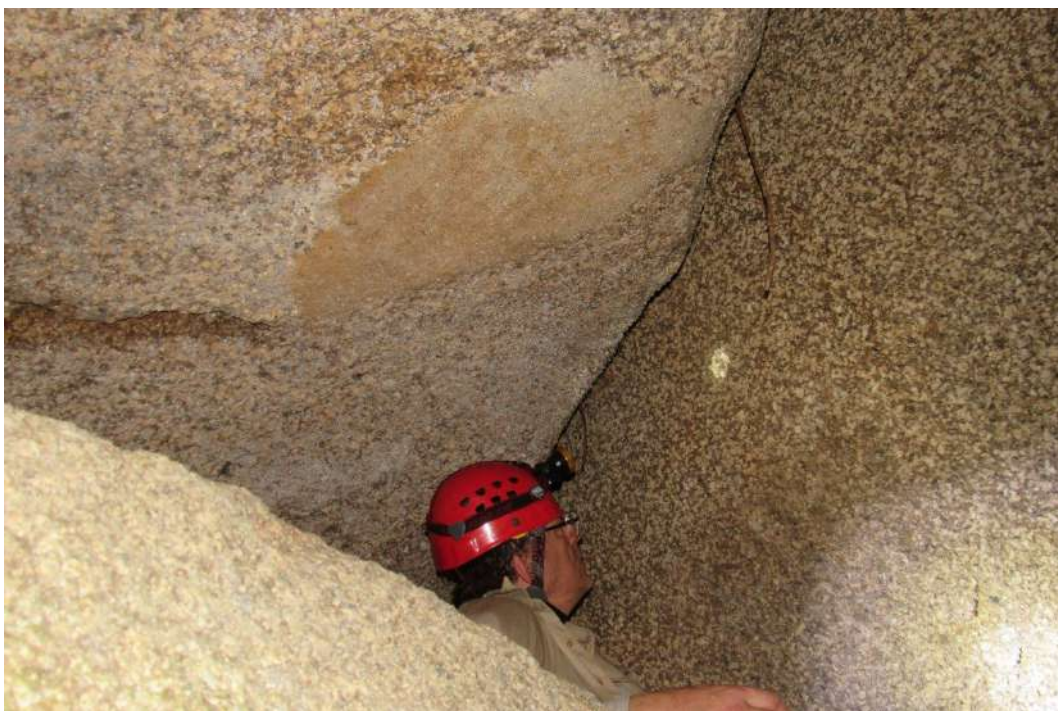


Figura 5.25 – Enclave microgranular em alto relevo em relação ao granito. Observa-se que o contorno é bem definido, evidenciando pouca ou nenhuma mescla dos magmas.



Fonte: a autora

Figura 5.26 – Enclave microgranular leucocrático (composição ácida) com formato elipsoidal e cerca de 60 cm de diâmetro (mancha em evidência acima da cabeça do espeleólogo).



Fonte: a autora

Figura 5.27 – Enclaves microgranulares (há ao menos duas estruturas, uma em cada extremidade) com borda irregular e menor quantidade de minerais máficos, evidenciando uma maior assimilação pelo magma granítico.



Fonte: a autora

#### 5.3.2.2 Fraturas

As fraturas, também chamadas de diáclases ou juntas, são estruturas comuns no SAC, presentes em toda a sua extensão e dispostas em posições que vão de vertical a horizontal, marcando e fragmentando os matacões graníticos. Como estes matacões não estão *in situ* (foram movimentados/rotacionados), tais estruturas assumem diferentes orientações, não havendo um padrão de direção preferencial.

O Granito Ilha é caracterizado por fraturas primárias, associadas à formação da rocha, e fraturas secundárias, impostas à rocha posteriormente, as quais ampliam e reforçam o conjunto de descontinuidades pré-existent. As fraturas primárias foram desencadeadas quando da colocação e resfriamento do magma, por contração, assumindo planos verticais, oblíquos e/ou horizontais. A presença de outras estruturas, como veios de aplito e pegmatito

(descritas adiante no texto), e de evidências de alteração hidrotermal da rocha (propilitização, por exemplo), são elementos que corroboram a existência desse conjunto de fraturas.

As fraturas secundárias são derivadas principalmente das forças tectônicas exercidas sobre todo o conjunto de unidades geológicas regionais durante a Reativação Wealdeniana, associada à separação do supercontinente Gondwana e abertura do Oceano Atlântico Sul durante o Cretáceo. Este evento é responsável por um conjunto de lineamentos e estruturas orientados preferencialmente na direção NE-SW e, secundariamente, nas direções N-S, NW-SE e E-W. Muitas dessas estruturas foram preenchidas por diques de composição básica a ácida, que em conjunto compõem o Enxame de Diques Florianópolis (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2014; 2015; TOMAZZOLI *et al.*, 2018; FLORISBAL *et al.*, 2018).

Há ainda um conjunto de fraturas secundárias mais recentes, ocasionado pelo alívio de pressão a que o maciço granítico foi submetido ao longo do processo de exposição em superfície pelo progresso da denudação regional. Estas estruturas são mais rasas em relação às demais citadas e tendem a assumir um padrão curvilíneo, dispostas de forma concêntrica.

Em conjunto, essas estruturas orientaram grande parte das transformações sobre o maciço granítico, a exemplo da formação dos matacões que dão corpo ao SAC. Dispostas em planos verticais, oblíquos, horizontais e curvos, formam uma rede ortogonal ou aproximadamente ortogonal, fragilizando a rocha e facilitando a passagem e ação da água meteórica.

A progressão do intemperismo se dá a partir dessa rede de fraturas, preferencialmente onde elas se interseccionam (cantos ou bordas), alargando estes setores e arredondando seus vértices e arestas, de modo que um matacão anguloso se converte em um matacão arredondado. A partir disso, esses núcleos residuais passam a se decompor de forma concêntrica, processo conhecido como decomposição ou esfoliação esferoidal.

Esse padrão se desenvolve principalmente em subsuperfície, na chamada frente de intemperismo, onde os matacões permanecem envolvidos pelo material de alteração do granito (saprolito ou regolito) até que sejam expostos pela erosão. Mas também pode se dar (ou ter continuidade) em superfície, agindo em porções do maciço granítico aflorante e em núcleos residuais parcialmente individualizados.

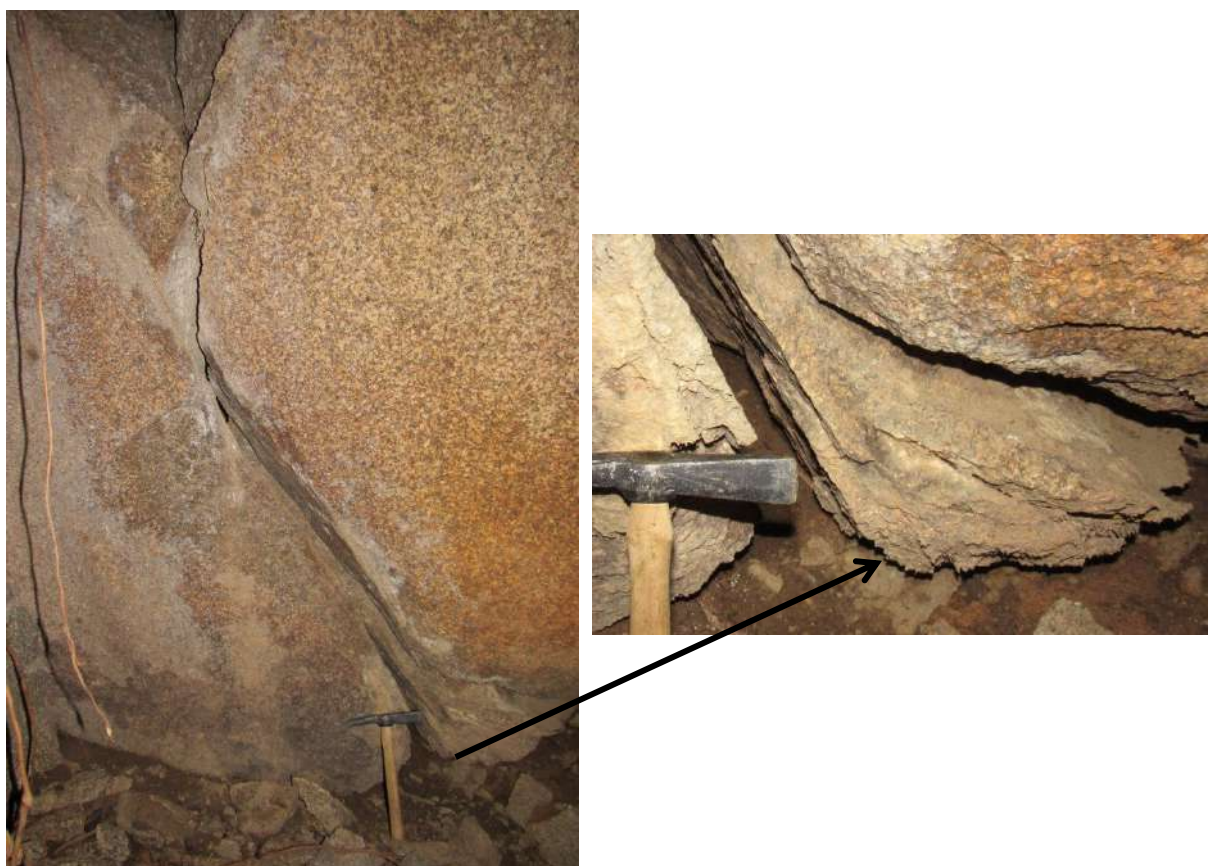
Na caverna já formada, as fraturas têm um papel importante na evolução do espaço subterrâneo, pois facilitam a entrada e circulação da água e do ar, acelerando a alteração da rocha (Figura 5.28), além de permitir a penetração de raízes que provocam a abertura das descontinuidades e mesmo o surgimento de novas fraturas (Figura 5.29). A progressão desses



processos divide matacões maiores em corpos menores que, pela nova configuração, podem se desestabilizar e tombar (Figura 5.30) e/ou rolar, assumindo uma posição diferente na cavidade, levando consequentemente à abertura ou fechamento de passagens e formação de novos condutos e salões. Adicionalmente, os matacões muitas vezes exercem tensões uns sobre os outros, provocando rupturas associadas às descontinuidades pré-existentes (Figura 5.31).

As fraturas ainda estão comumente relacionadas à ocorrência de espeleotemas no SAC, o que provavelmente se explica por serem elas caminhos preferenciais para a circulação de água e também setores onde os elementos em solução na água circulante entram em contato com o ar, situação favorável para sua precipitação.

Figura 5.28 – Fratura com segmentos nas posições oblíqua e vertical dividindo um matacão em duas partes. Nas bordas da descontinuidade é possível observar manchas de coloração esbranquiçada relacionadas à alteração da rocha e precipitação de opala, inclusive com a formação de pequenos espeleotemas (ver área próxima à ponta da seta).



Fonte: a autora

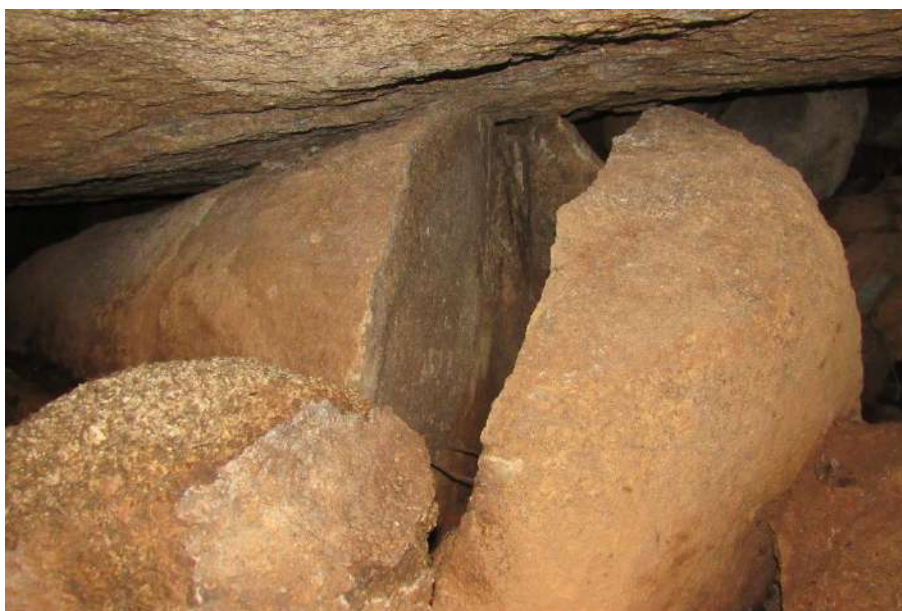
Figura 5.29 – Raízes crescendo ao longo de fraturas, com colaboração no processo de ampliação das aberturas, fragmentação dos matacões e formação de descontinuidades secundárias: a) teto da cavidade; b) matacão junto a uma das entradas do SAC.



Fonte: a autora



Figura 5.30 – Dois matacões resultantes da divisão de uma massa maior pela presença e evolução de uma descontinuidade na rocha. A pressão exercida pelo matacão do teto pode ter influenciado na ruptura. Do topo à base da imagem, aproximadamente 1,5 m.



Fonte: a autora

Figura 5.31 – Matacão fragmentado em dois pontos provavelmente em função da pressão exercida pelas massas maiores ao redor.



Fonte: a autora

### 5.3.2.3 Veios aplíticos e pegmatíticos

Veios aplíticos e pegmatíticos aparecem de forma muito pontual no SAC, mas são corpos caracterizados pela variação textural da rocha, sendo bastante comuns no Granito Ilha (TOMAZZOLI e PELLERIN, 2015).

Os veios aplíticos possuem espessura de até 3 cm, coloração clara, entre esbranquiçada e amarelada, com textura fina onde são visíveis grãos de quartzo, feldspato e biotita (Figura 5.32). Os pegmatitos assumem uma morfologia mais compatível com um bolsão e não um veio. Possuem grãos bem desenvolvidos, por vezes centimétricos, de quartzo, feldspato e biotita, muito maiores que os da rocha encaixante (Figura 5.33).

É comum observar tais estruturas nas faces de dois matacões opostos, separados por um conduto estreito. Elas são simétricas em relação à posição, tamanho e morfologia, o que mostra que o processo de fragmentação de matacões maiores em corpos menores a partir de fraturamentos separou os veios aplíticos e bolsões pegmatíticos antes contínuos (figuras 5.34 e 5.35) as massas resultantes permaneceram *in situ*. Tal fato revela mais sobre a dinâmica de evolução do SAC, uma vez que a partir desta divisão dos matacões novos condutos e salões da caverna se formam.

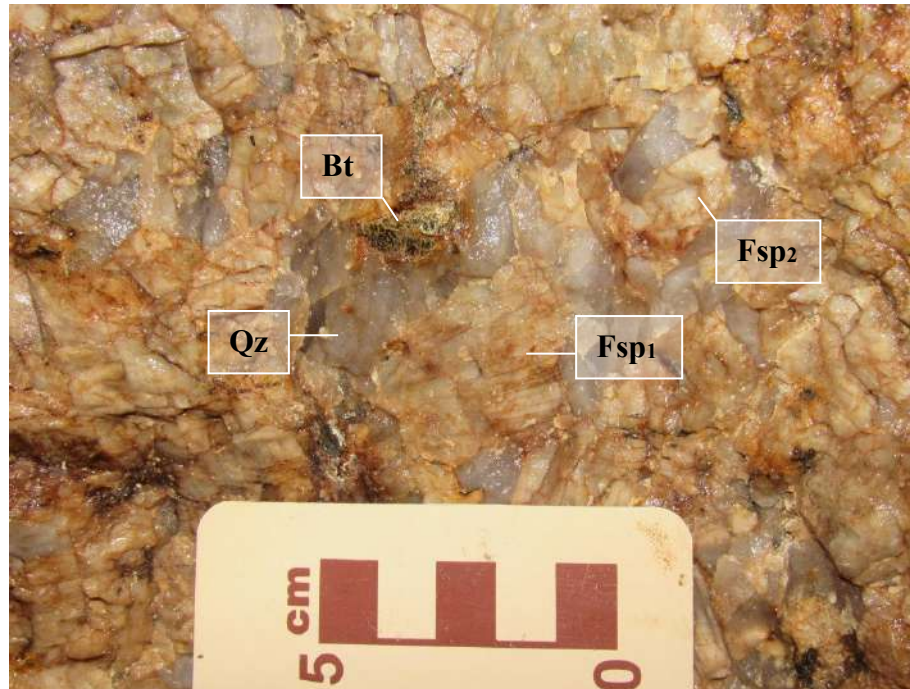
Figura 5.32 – Amostra de um veio de aplito (SAC 15) com os minerais já bastante alterados e possíveis precipitações de opala (manchas esbranquiçadas). Ver contraste entre a textura do aplito e a do Granito Ilha encaixante (por ex., na porção inferior da amostra, à direita).



Fonte: a autora



Figura 5.33 – Veio (ou bolsão) pegmatítico com os mesmos minerais primários do granito, porém com dimensões maiores (Qz – quartzo; Bt – biotita; Fsp<sub>1</sub> – feldspato potássico; Fsp<sub>2</sub> – feldspato plagioclásio [?]).



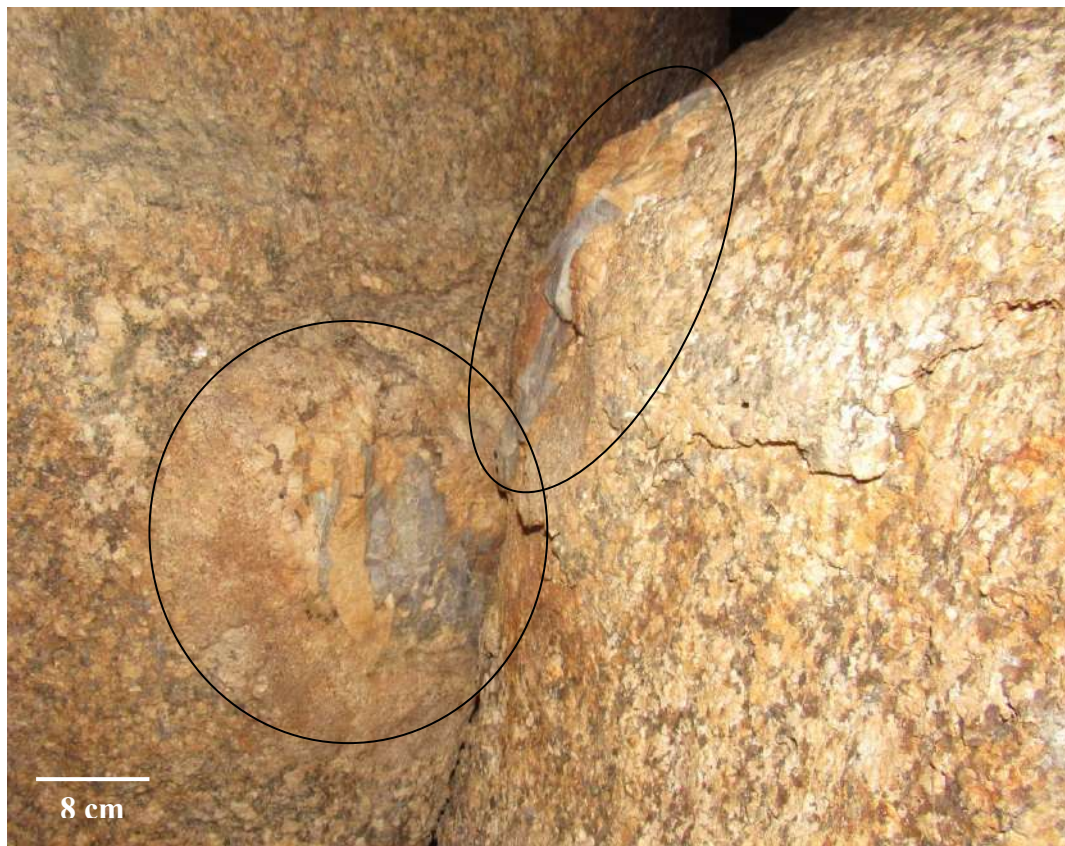
Fonte: a autora

Figura 5.34 – Veio aplítico (local de coleta da amostra SAC 15) antes contínuo e agora face a face em dois matacões opostos, uma evidência da abertura da galeria a partir de um fraturamento. A seta indica uma raiz em posição transversal ao veio.



Fonte: Rodrigo Dalmolin

Figura 5.35 – Veio (ou bolsão) pegmatítico antes contínuo dividido em dois matacões distintos, mas ainda encostados um no outro.



Fonte: a autora

### 5.3.3 Materiais e formas de alteração, erosão e deposição

Dos matacões que constituem o SAC até os demais materiais e formas que ocupam e ornamentam o piso, as paredes e o teto da cavidade, todos advêm de processos de alteração, erosão e/ou deposição, sejam eles protagonistas ou uma etapa na formação desses elementos.

Grande parte desses materiais e formas não é exclusiva do ambiente cavernícola, mas têm sido observados com alguma frequência no SAC e em outras cavidades em matacões graníticos da ISC, ajudando a caracterizar a paisagem subterrânea. Outros são restritos às cavernas (a exemplo dos espeleotemas), principalmente por serem estes locais abrigados e com algum nível de confinamento. A ausência de vegetação e solo também ajuda para que estejam mais à mostra que seus equivalentes em superfície. A seguir são descritos tais materiais e formas.

### 5.3.3.1 Matacões, blocos e seixos

Os matacões graníticos são as formas mais comuns no SAC, constituindo suas paredes, teto e piso, neste último caso como lajes ou como massas isoladas dispersas e/ou aglomeradas no chão da caverna. As dimensões dos matacões variam de centímetros (a partir de 25,6 cm) a mais de duas dezenas de metros de diâmetro, neste último caso, ocorrem em situações mais pontuais na caverna, formando o teto de salões.

Variam também em morfologia, essencialmente massas esféricas a elipsoidais com diferentes graus de arredondamento, mas também ocorrem em menor quantidade núcleos angulosos. Há matacões que são muito próximos de uma esfera perfeita, característica de massas pequenas a médias, com poucos metros de diâmetro. Outros são bem menos arredondados, poliédricos, tendo apenas os cantos e bordas abaulados, o que é mais comum em massas de dimensões maiores. Segundo Romaní e Twidale (1998) essas diferenças de tamanho e de forma são reflexos da densidade e do padrão dos fraturamentos e da persistência do processo de alteração, principalmente em subsuperfície. O transporte ao longo da encosta também pode ser um fator de diferenciação entre os núcleos rochosos.

Uma característica de muitos matacões que compõem o SAC é a evidência da decomposição (ou esfoliação) esferoidal, que se caracteriza por capas arredondadas e concêntricas de rocha alterada que envolvem núcleos de rocha sã ou menos alterada (Figura 5.36). Estas capas representam o progresso do processo de alteração (ainda em subsuperfície) sobre as massas graníticas produzidas pelo ataque preferencial dos agentes intempéricos às intersecções entre as fraturas do granito, tal como descrito no item 5.3.2.2.

As transformações sobre os matacões continuam em sua superfície, e estas capas, por constituírem as áreas mais externas dos núcleos residuais e já fragilizadas pela alteração da rocha, são aos poucos removidas num processo de descamação (Figura 5.37), o qual diminui gradativamente o diâmetro dos matacões e aumenta seu grau de arredondamento. A descamação ou esfoliação dá origem a lâminas e lascas, novos materiais que vão integrar o ambiente da caverna.

Matacões de diabásio também são encontrados no SAC, tanto dispersos como aglomerados no piso da cavidade. São com frequência decimétricos e, como descrito no item 5.3.1.2, assumem aspecto predominantemente tabular.

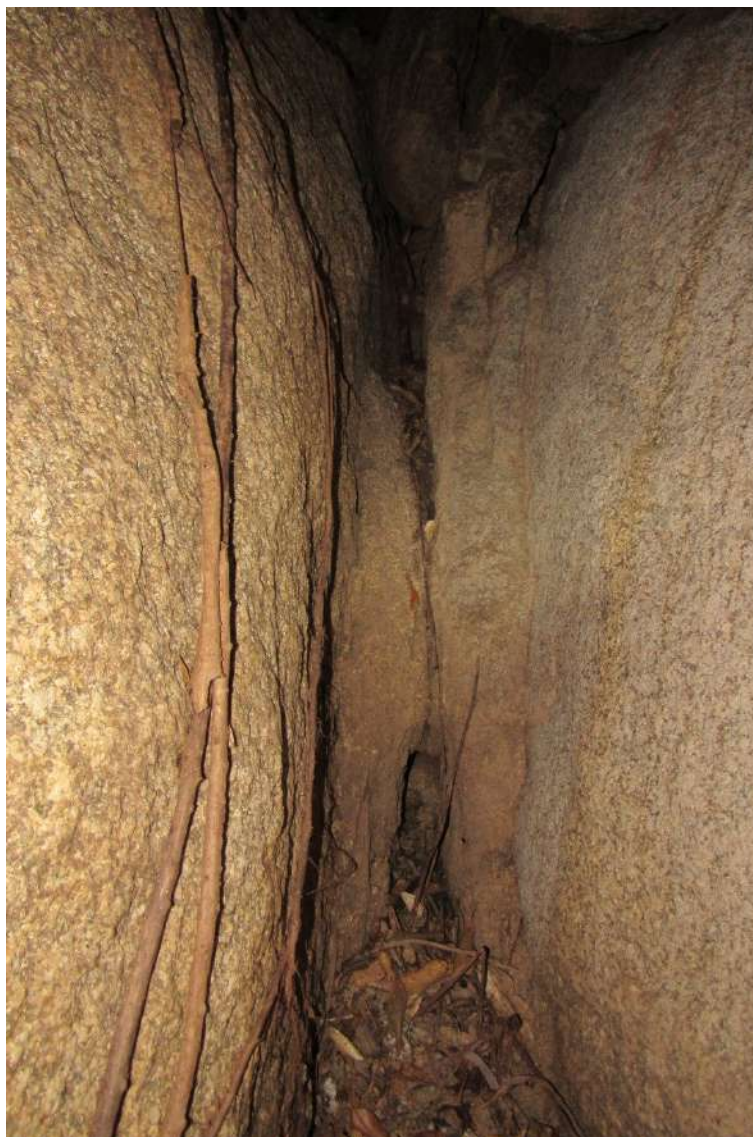
Blocos, seixos e mesmo outras frações granulométricas menores do granito (WENTWORTH, 1922), do diabásio e materiais como *duricrust* ferruginoso, são encontrados



no piso do SAC. Os blocos e seixos ocorrem tanto como fragmentos isolados dispersos como depósitos aglomerados em função da ação da gravidade e da água, sendo que neste último caso, há uma mistura das litologias e materiais (Figura 5.38).

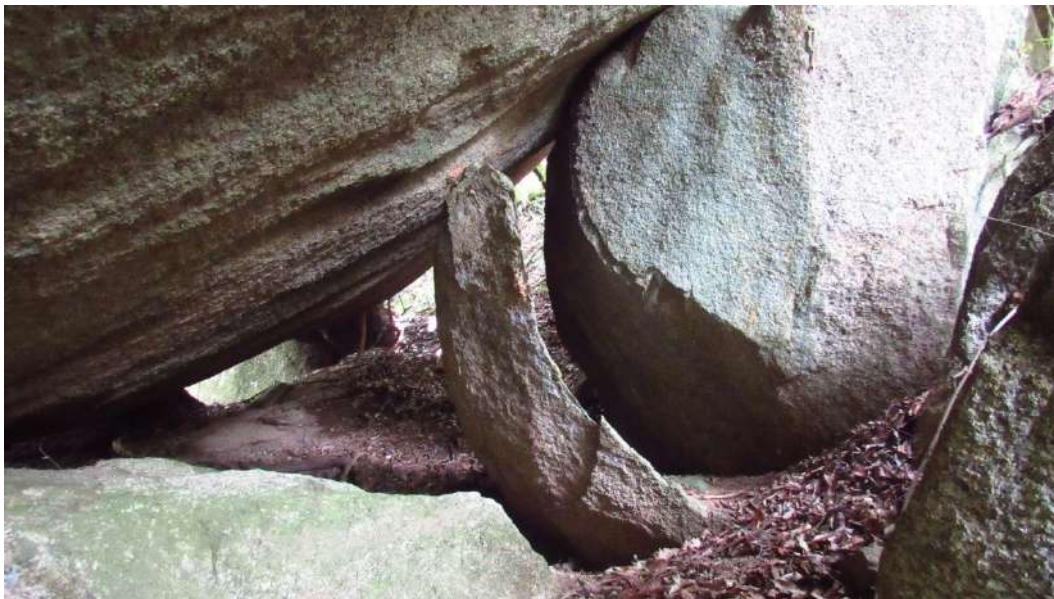
Como a caverna possui muitas entradas e dois cursos de água identificados (porém sem denominação) que drenam por seus condutos e salões, há aporte de material clástico oriundo da área externa, os quais se somam a materiais autóctones, produtos dos processos de intemperismo, erosão e deposição em curso dentro do SAC.

Figura 5.36 – Matacões parcialmente expostos formando a parede de uma galeria do SAC. Entre ambos é possível ver a descamação esferoidal e a ação do intemperismo individualizando as massas rochosas.



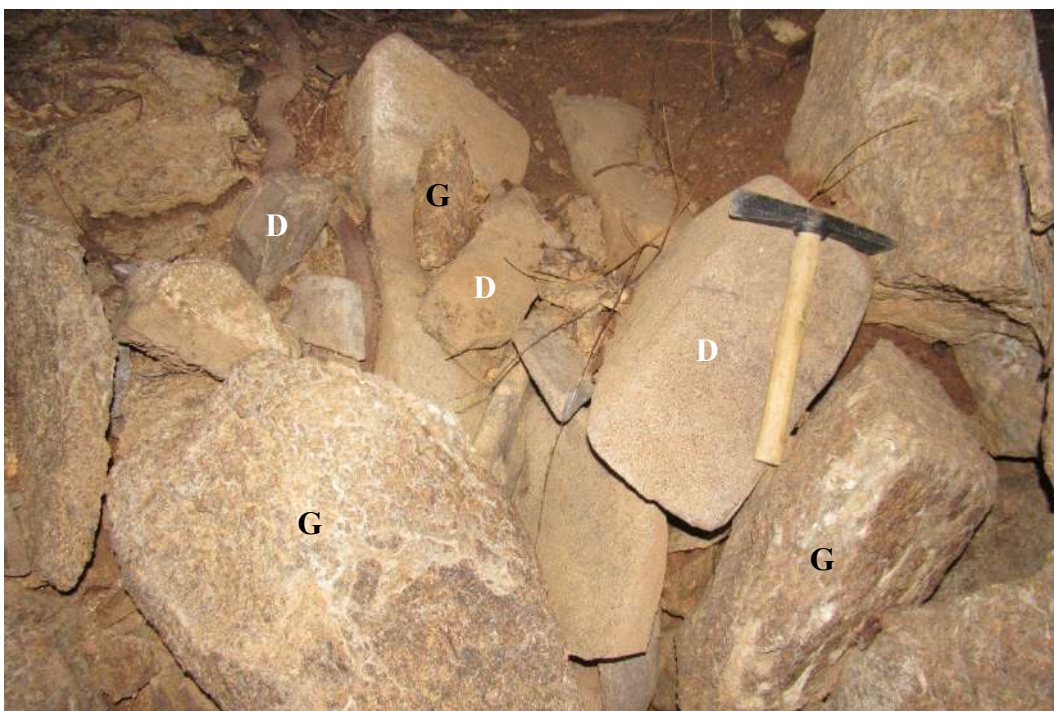
Fonte: a autora

Figura 5.37 – Grande fragmento de contornos curvilíneos, indicando a atuação de descamação esferoidal, destacado do matacão original à sua direita.



Fonte: a autora

Figura 5.38 – Depósito clástico gravitacional no piso do SAC formado por matacões, blocos e seixos de granito (G) e diabásio (D). Depósitos similares em outros pontos da caverna também incluem fragmentos de *duricrust* ferruginoso.



Fonte: a autora



### 5.3.3.2 *Duricrust ferruginoso*

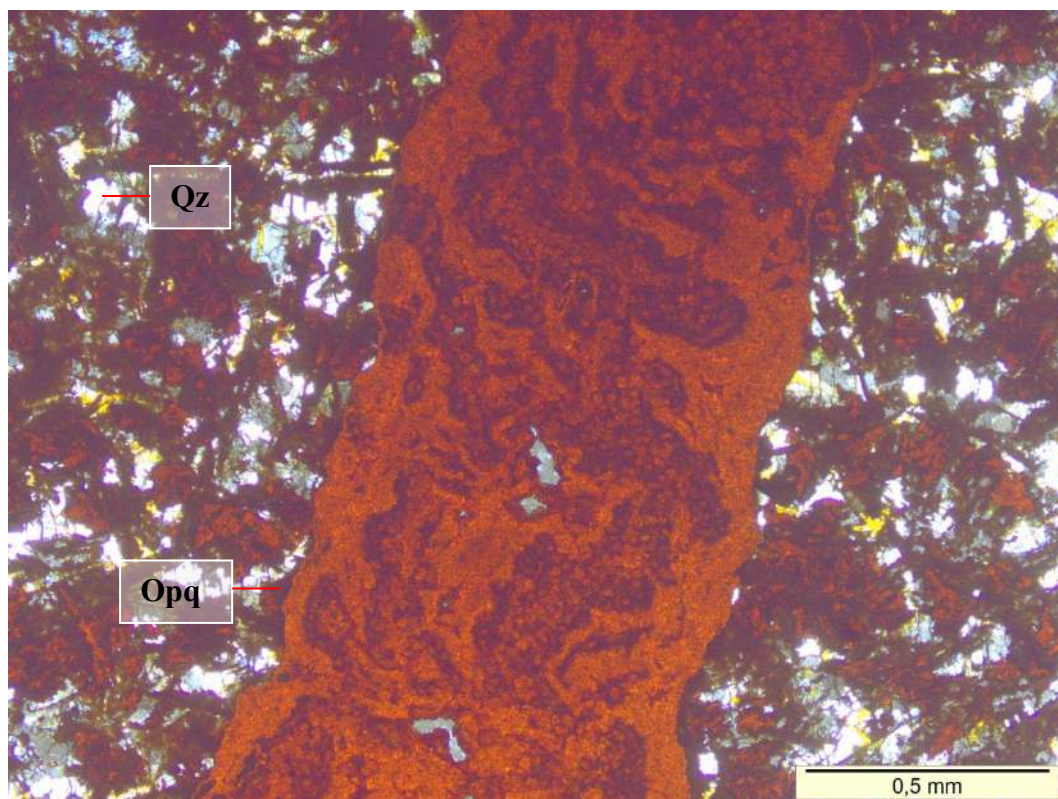
De forma mais restrita, no SAC aparecem blocos e seixos de *duricrust* ferruginoso (GENTILLI, 1968; DURY, 1969; WIDDOWSON, 2007), um produto de concentração residual de óxidos/hidróxidos de ferro que se forma durante fases intensas e prolongadas de intemperismo químico e pedogênese. A amostra coletada possui cor avermelhada, alta densidade e estrutura estratificada, com níveis que se diferenciam em função das variações texturais e de concentração dos minerais/mineraloides ricos em ferro (Figura 5.39). Ao microscópio ótico foram observados grãos de quartzo e minerais opacos, que pelo hábito cristalino devem incluir ao menos a goethita (Figura 5.40).

Figura 5.39 – Amostra de *duricrust* ferruginoso coletada no SAC (SAC 10), caracterizada pela coloração avermelhada, alta densidade e estrutura estratificada.



Fonte: a autora

Figura 5.40 – Lâmina delgada da amostra SAC 10 mostrando grãos de quartzo (Qz), minerais opacos (Opq) e uma faixa com maior concentração de hidróxido de ferro.



Fonte: a autora

### 5.3.3.3 Depósitos clásticos consolidados

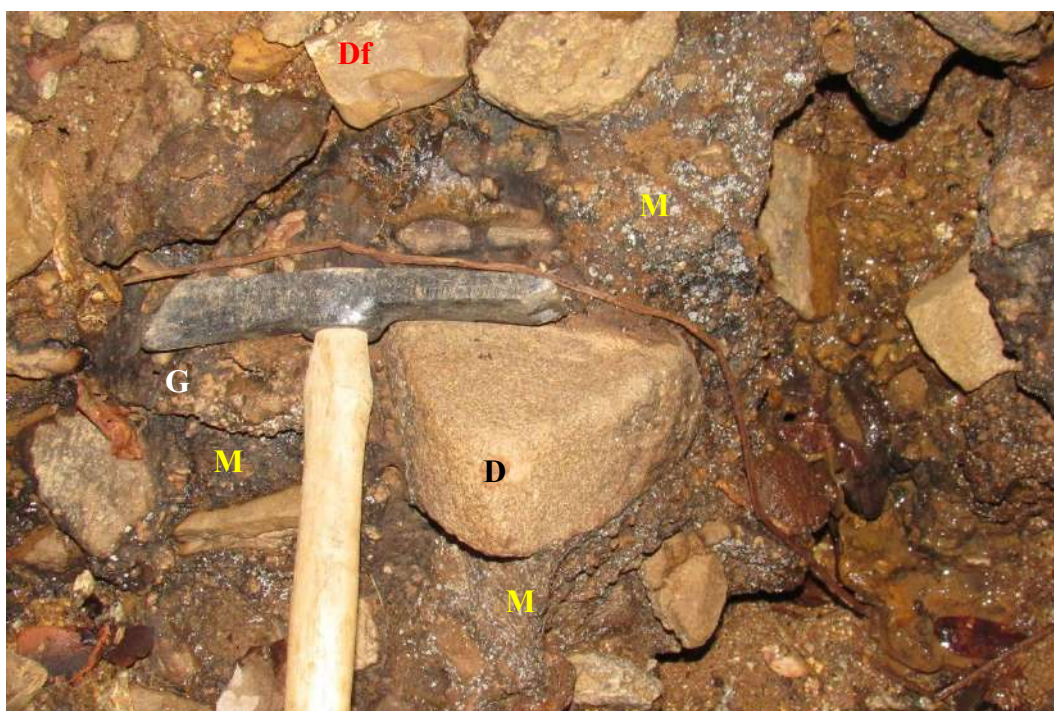
Os depósitos clásticos consolidados englobam sedimentos de diferentes granulometrias que estão agregados ou litificados, constituindo massas únicas de dimensões e geometrias variadas, os quais foram identificados em três pontos distintos do SAC (apenas um deles no setor já mapeado). Constituem depósitos clásticos rudáceos (psefíticos), onde a fração granulométrica que predomina é o cascalho de classes menores que a de matacão. O material está consolidado, ou seja, os processos de diagênese e litificação são evidentes, de modo que o mesmo pode ser classificado como uma rocha clástica, no caso, um conglomerado.

Os depósitos são polimíticos, uma vez que possuem clastos de diferentes fontes, sendo possível distinguir granito, diabásio e *duricrust* ferruginoso (Figura 5.41). No geral, estão equilibrados entre sustentado pela matriz e sustentado pelos clastos e o arcabouço, numa estimativa visual, possui curva de distribuição polimodal quanto ao tamanho, grau de arredondamento e esfericidade. A matriz é formada por um agregado de material detrítico

proveniente do granito e do *duricrust* ferruginoso, acompanhada de um cimento de natureza predominantemente ferruginosa (Figura 5.42). A gênese destes depósitos está ligada a fluxos hidrodinâmicos (enxurradas) que adentraram na caverna trazendo material detrítico com pouco retrabalhamento (área-fonte próxima), sendo atualmente observados em áreas com circulação perene de água, caracterizada por um fluxo de baixa intensidade, mas que pode se tornar mais forte em períodos chuvosos.

O depósito mais a jusante do SAC (área não mapeada) é o mais expressivo, se estendendo de forma descontínua por uma área de  $\sim 10 \text{ m}^2$ . Está associado a um dos cursos d'água que cruzam a cavidade, aparecendo no piso da margem esquerda da drenagem e na parede da direita (Figura 5.43), atestando o retrabalhamento erosivo por parte do corpo hídrico. Localmente, sobre estes depósitos, ocorrem espeleotemas cilíndricos e coraloides (Figura 5.44).

Figura 5.41 – Conglomerado polimítico cimentado por óxidos e hidróxidos de ferro (G – granito; D – diabásio; Df – *duricrust* ferruginoso; M - matriz).



Fonte: a autora

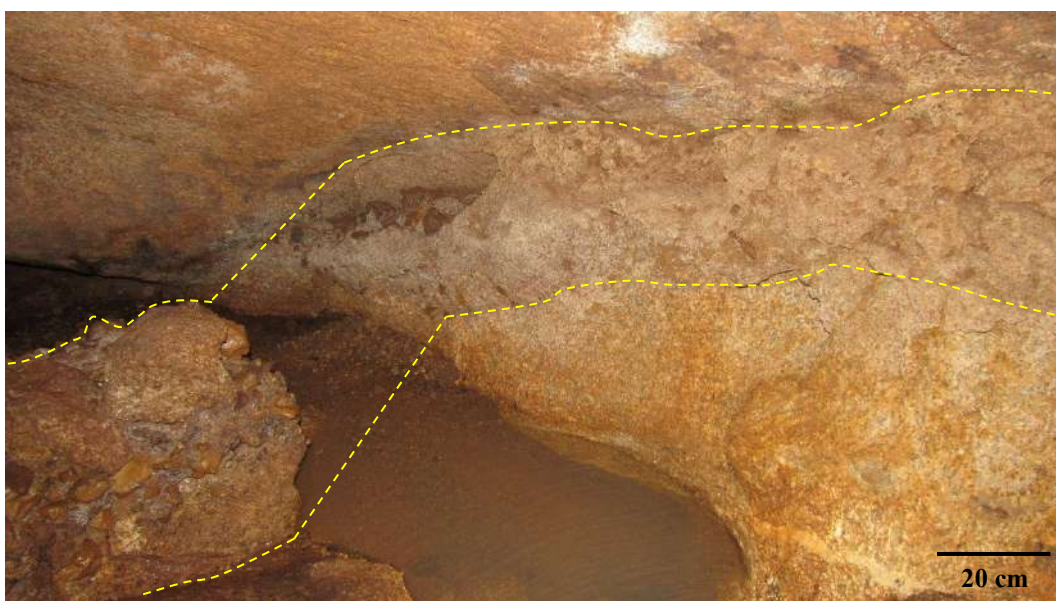


Figura 5.42 – Amostra do cimento ferruginoso que constitui a matriz do conglomerado (SAC 13).



Fonte: a autora

Figura 5.43 – Descontinuidade da camada conglomerática mais expressiva do SAC, erodida por ação fluvial. Do lado direito da drenagem porções residuais estão dispostas junto à parede, enquanto na margem esquerda há disposição descontínua, no piso ao longo de toda a galeria.



Fonte: a autora

Figura 5.44 – Espeleotemas cilíndricos e coraloides posicionados sobre conglomerado.



Fonte: a autora

#### 5.3.3.4 *Caneluras*

As caneluras são feições erosivas lineares, constituídas por arranjos de elevações (cristas) e depressões (vales), formando grupos de número variado destes pares, que podem ser consideradas comuns no SAC, ocorrendo tanto internamente na cavidade como em seus limites externos (Figura 5.45). Os sulcos podem ser suaves ou profundos, alcançando até 30 cm entre uma aresta e outra e até 20 cm de profundidade (Figura 5.46). Em ambas as situações, mas principalmente em matacões dentro da caverna, são encontradas caneluras dispostas em posição distinta da que se formaram, muito inclinadas ou na horizontal (Figura 5.47). Tal fato evidencia a movimentação e rolamento dos matacões que formam o SAC.

#### 5.3.3.5 *Superfícies polidas*

De forma muito restrita, ocorrem no SAC superfícies rochosas polidas por erosão fluvial. Na situação mais emblemática, a ação da água erodiu lateralmente um matacão, originando uma superfície côncava e com textura mais lisa do que as porções que não foram afetadas (Figura 5.48).



Figura 5.45 – Matacão localizado em uma das entradas secundárias do SAC, já na interface com a parte externa, com caneluras na posição em que foram formadas (na vertical).



Fonte: a autora

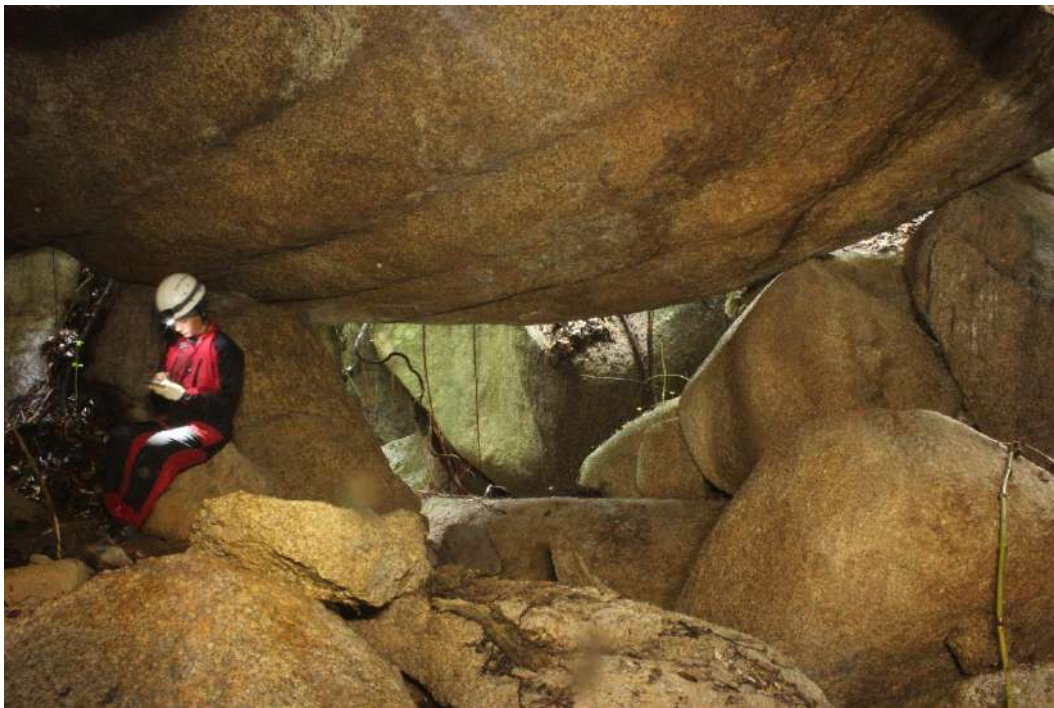
Figura 5.46 – Matacão tombado em um dos limites da cavidade com caneluras profundas distribuídas em toda sua circunferência.



Fonte: a autora



Figura 5.47 – Caneluras com relevo suave dispostas na horizontal em matacão que compõe o teto da caverna.



Fonte: Henrique Pontes

Figura 5.48 – Matacão junto a uma das drenagens que atravessam o SAC com superfície polida por ação das águas fluviais.



Fonte: a autora

### 5.3.3.6 Formas alveolares

Foram assim designadas concavidades observadas no teto e em paredes do SAC com morfologia arredondada e pouca profundidade. Ocorrem isoladas ou com baixa densidade de formas (duas a três, relativamente próximas) e suas dimensões variam entre 10 e 60 cm de diâmetro e menos que 5 cm de profundidade (Figura 5.49).

Este tipo de forma, embora apareça escassamente no SAC, foi identificada também em outras cavidades em granito da ISC, onde tem mais expressão, o que ajudou a levantar algumas possíveis explicações sobre sua gênese e evolução. Uma opção é que estas concavidades tenham se formado em subsuperfície, ao longo do processo de individualização dos matacões. Um pequeno desvio de percurso da água de infiltração, com consequente acumulação pontual de umidade, a existência de setores da rocha com menor resistência ao intemperismo ou de intersecções entre fraturamentos menores, secundários, poderiam ter favorecido a formação destas feições.

Outra possibilidade é que essas concavidades tenham origem em superfície, com os matacões já expostos, por intemperismo diferencial e/ou concentração pontual de umidade. Podem ainda constituir uma marca da antiga superfície de apoio entre dois matacões, aprofundadas pela retenção de umidade e/ou matéria orgânica neste ponto. Não se descarta ainda que tais formas, no SAC e nas diferentes cavernas em que foram observadas, possam ter gêneses diferentes, sendo plausível qualquer uma das explicações acima levantadas.

Figura 5.49 – Formas alveolares em um matacão no teto do SAC.



Fonte: Henrique Pontes



## 5.4 HIDROLOGIA

Dois pequenos cursos d'água atravessam o espaço subterrâneo do SAC. Estas drenagens de primeira ordem, não identificadas em bases cartográficas, são afluentes do rio do Mel, inserido na Bacia Hidrográfica do Saco Grande. Em diferentes anos, e em distintas épocas do ano em que a caverna foi visitada, mesmo em períodos de menor precipitação, tais drenagens sempre estiveram ativas, o que indica o caráter perene. O fato de serem utilizadas para captação de água por moradores locais reforça esta interpretação. Para facilitar a descrição, os cursos d'água serão aqui nominados de A e B.

O curso d'água A adentra ao SAC junto a uma de suas principais entradas a montante (Figura 5.50), por onde foi iniciado o trabalho de mapeamento espeleológico da caverna (ponto de coordenadas 1 no mapa espeleológico, ANEXO B). Deste ponto em diante tal curso d'água passa a correr de forma subterrânea, pelo que o local pode ser considerado um sumidouro. O curso d'água A vem da Gruta do Saco Grande, onde aparentemente está sua nascente, e atravessa a estrada situada entre ambas as cavernas antes de interseccionar o SAC.

Figura 5.50 – Ponto onde o curso d'água A adentra ao SAC.



Fonte: a autora

Ao longo de seu trajeto pelo SAC, a drenagem A flui para níveis inferiores da cavidade, por trechos que muitas vezes só permitem a passagem de água, sendo inacessíveis ao homem. O curso d'água aparece e desaparece em vários locais, dividindo-se em alguns pontos em filetes menores que convergem a jusante (ver o mapa espeleológico, ANEXO B).

A morfologia do SAC, marcada pela organização caótica dos matacões, com piso irregular e descontínuo e desenvolvimento de vários níveis e passagens, condiciona o comportamento da água, sendo praticamente impossível delinear seu caminho completo pela cavidade. O que se pode afirmar é que a drenagem A está orientada essencialmente na direção do eixo de maior desenvolvimento da metade superior do SAC (predominantemente SE-NW) e ao chegar à lateral direita da caverna (de montante para jusante), já próximo aos fundos do loteamento Jardim Recanto da Ilha, o curso d'água A se infiltra no solo e desaparece (Figura 5.51) reaparecendo em superfície já fora da cavidade, ponto que pode ser considerado sua ressurgência (Figura 5.52).

Figura 5.51 – Ponto um pouco a jusante de onde o curso d'água A deixa o SAC, infiltrando-se em material da unidade Depósitos Colúvio-aluvionares. Durante as obras do loteamento Jardim Recanto da Ilha houve uma tentativa de canalizar a drenagem, que com o tempo foi obstruída por sedimentos, o que teria induzido o curso d'água a assumir um novo percurso subterrâneo.



Fonte: Rodrigo Dalmolin



Figura 5.52 – Ponto onde os cursos d'água A e B ressurgem em superfície, já na área externa ao SAC (lateral direita de montante para jusante).



Fonte: Rodrigo Dalmolin

O curso d'água B corre pela porção mais a jusante do SAC (ainda não mapeada) atravessando transversalmente seu eixo de maior desenvolvimento. Não foi identificado o ponto onde a água adentra a caverna, sendo possível que sua origem seja confinada ao próprio SAC. Na porção mais baixa da caverna, não muito distante da sua principal entrada a jusante, a água se acumula em um ponto junto a uma entrada secundária, criando um empoçamento. Neste ponto a drenagem B se infiltra no piso da cavidade, adquirindo um comportamento típico de um sumidouro. Aparentemente, reaparece em superfície já fora do SAC, no mesmo ponto que a drenagem A. A partir daí, as drenagens se unem e formam um corpo hídrico único, que segue em superfície até desembocar no rio do Mel.

Mesmo se tratando de drenagens pequenas, de baixa competência hídrica, exercem um papel importante na dinâmica e evolução da caverna. São responsáveis pelo transporte de material clástico e matéria orgânica, para dentro e ao longo da caverna. Constituem agentes erosivos, atuando diretamente sobre os matacões e na remoção de material de alteração que os envolve, liberando espaços entre eles. Estão associados ainda à ocorrência de depósitos clásticos e químicos do SAC.

Em períodos de precipitação intensa aumentam o volume e força de água circulante no interior da cavidade, o que é possível constatar por marcas com sedimentos, folhas e galhos nas paredes (Figura 5.53). Mesmo que sejam eventos episódicos, têm potencial para provocar alterações mais rápidas e bruscas na caverna, como movimentação de blocos e



matacões pequenos e abertura e/ou interrupção de passagens. Em eventos desse tipo drenagens temporárias se formam e atuam na erosão de áreas que os cursos d'água perenes não afetam. Em um setor na parte mais alta do SAC uma dessas drenagens intermitentes está provocando a abertura de uma nova frente de exumação de matacões (Figura 5.54).

Para organismos aquáticos ou que necessitam da água em alguma das fases de seu ciclo de vida, a presença dos cursos d'água é essencial. Também são fontes para hidratação dos demais indivíduos da fauna cavernícola e para árvores que captam água subterrânea por meio de suas raízes.

O contexto cavernícola deve ser entendido como parte integrante do ciclo hidrológico. Assim, além das águas fluviais, água de origem pluvial também adentra e se desloca pela caverna. A depender da intensidade do fluxo, do ponto de infiltração, da superfície e posição dos matacões, ela vai circular por gotejamento e/ou escorrimentos concentrados ou difusos (circulação laminar). Ao visitar a caverna durante e logo após dias chuvosos notou-se que o espaço subterrâneo fica bastante úmido, e mesmo com a interrupção da precipitação e sucessão de dias com sol, a circulação da água meteórica continua ativa. Na situação de ausência de chuvas, em meios não saturados, a água circula no solo e substrato rochoso por capilaridade.

Essa água é responsável por desencadear diferentes processos dentro da caverna, como: a) remoção e transporte de sedimentos; b) reações relacionadas ao intemperismo químico; c) promoção de condições favoráveis para a colonização de microrganismos, os quais potencializam o poder de ataque químico desta água sobre a rocha; d) participação na formação de depósitos clásticos e químicos, a exemplo dos espeleotemas; e) gênese de formas como caneluras e concavidades.

Figura 5.53 – Marcas no piso e paredes que delimitam o curso d'água A, definidas por variação de coloração e fixação de carga sedimentar (incluindo matéria orgânica), mostrando as variações no nível e intensidade do fluxo de água.



Fonte: Rodrigo Dalmolin

Figura 5.54 – Ação de uma drenagem intermitente (ativada em períodos chuvosos com precipitações mais fortes) na remoção do manto de intemperismo que envolve matacões em um setor marginal do SAC. Estes matacões constituem núcleos residuais.



Fonte: a autora

## 5.5 ESPELEOGÊNESE

Rocha, estruturas, água, topografia, vegetação e tempo. A combinação destes fatores e as interações que se estabelecem entre eles estão na origem de grande parte das cavernas que conhecemos. Em contextos litológicos carbonáticos a água tem um papel preponderante na formação de cavidades subterrâneas, já que se tratam de rochas com altas taxas de solubilidade. Já em contextos não carbonáticos, a exemplo de rochas siliciclásticas e silicáticas, os fatores estruturais crescem em relevância.

Independente do protagonismo, é fato que ambos os fatores nestes contextos acabam tendo participação na gênese e também na evolução do vazio subterrâneo, podendo inclusive alternar e/ou dividir esta posição de protagonista ao longo do desenvolvimento da caverna. Isso acontece por conta de mudanças cíclicas no clima (sucessão de períodos glaciais e interglaciais ao longo do Quaternário) e/ou no relevo (soerguimento ou rebaixamento do terreno e mudanças do nível de base geral e/ou local).

O SAC é uma cavidade subterrânea que tem em sua origem a influência de fatores estruturais, hídricos e topográficos, participando de forma mais ou menos efetiva a depender das fases do desenvolvimento inicial da caverna. Estas foram sintetizadas aqui em quatro momentos: fase 1 - formação dos matacões; fase 2 - erosão do saprolito e exumação de matacões *in situ*; fase 3 - movimentação dos matacões; fase 4 – erosão secundária e acomodação dos matacões.

Em conjunto, essas etapas descrevem os processos de pedogênese e morfogênese que esculpturaram a paisagem ao longo do Quaternário nas regiões tropicais (MELO *et al.*, 2005; VITE, 2005; BIGARELLA, 2007; MIGON, 2009), responsáveis pela evolução da vertente onde o SAC se localiza, sendo a caverna um produto de tais processos.

### 5.5.1 Fase 1 - formação dos matacões

Considerando que a gênese de qualquer caverna acontece quando o vazio subterrâneo se origina, a formação de matacões não se enquadraria necessariamente como uma etapa espeleogenética. No entanto, o entendimento do SAC enquanto caverna passa pela compreensão desse momento anterior, relacionado às transformações no maciço rochoso, que tem como produto o material que lhe dá forma, constituindo suas paredes, teto e piso. De acordo com Ehlen (1990, p. 5):

*One cannot study the landforms developed in granitic rocks as isolated individuals; each suite has a history and each individual has evolved from something and will probably evolve into something else before it disappears. An understanding of the weathering characteristics of granitic rocks is thus integral to an understanding of the shapes of landforms composed of these rocks. Likewise, there is a general consensus that joint patterns probably control landform shape, and that other factors, such as mineralogy, grain size and rock texture, also play important roles in this relationship<sup>4</sup>*

Os fatores estruturais foram determinantes para a formação dos matacões que dão corpo ao SAC. A existência da rede de fraturas primárias e secundárias organizadas em um padrão aproximadamente ortogonal foi a primeira condição para fragmentação do maciço rochoso. O que se seguiu foi o processo de intemperismo químico com decomposição esferoidal, desenvolvendo e aprofundando o manto de alteração e gerando núcleos residuais com diferentes graus de arredondamento e tamanho envolvidos pelo saprolito. A descrição desse processo foi apresentada no item 5.3.2.2.

### **5.5.2 Fase 2 – erosão do saprolito e exumação de matacões *in situ***

A exumação dos matacões *in situ* ocorreu com a remoção gradativa do manto de intemperismo em um momento onde a morfogênese foi mais ativa na modelação da paisagem. As mudanças no nível de base em função do rebaixamento do nível do mar podem ter colaborado para isso.

Com a retirada do material de alteração que recobria e envolvia os matacões, os mesmos foram expostos parcialmente e/ou integralmente e passaram a sofrer a influência direta dos processos erosivos superficiais. A progressão da erosão para níveis mais profundos do manto de intemperismo retirou o material de menor coesão, deixando núcleos residuais que foram se ajustando a uma nova configuração de espaço, movimentando-se uns em relação aos outros, mas sem deslocamentos significativos em relação à área fonte. Neste contexto, cavidades em matacões residuais (*in situ*) têm sua origem.

---

<sup>4</sup> Não se pode estudar as formas de relevo desenvolvidas em rochas graníticas como indivíduos isolados; cada suíte tem uma história e cada indivíduo evoluiu a partir de algo e provavelmente evoluirá para outra coisa antes de desaparecer. Uma compreensão das características do intemperismo das rochas graníticas é, portanto, parte integrante de uma compreensão das formas de relevo constituídas por essas rochas. Da mesma maneira, existe um consenso geral de que os padrões de fraturamento provavelmente controlam detalhes das formas de relevo, e que outros fatores, como mineralogia, tamanho de grão e textura de rocha, também desempenham papéis importantes nessa relação.

### 5.5.3 Fase 3 – movimentação dos matacões

A grande maioria dos matacões que dão corpo ao SAC sofreu movimentação, estando em posição e contexto diferentes daquela/daquele onde foram formados. São duas situações principais: a) núcleos residuais (expostos *in situ*) provenientes da parte superior da encosta e movimentados por gravidade (queda/rolamento de fragmentos rochosos isolados) para a área ocupada hoje pela caverna, assumindo assim uma condição *ex situ*; b) matacões ainda envolvidos e recobertos pelo saprolito, transportados juntamente com o manto de alteração, também de cotas acima do SAC, por deslizamentos (expostos total ou parcialmente na fase 4).

Há em menor quantidade matacões interpretados como residuais no SAC, massas rochosas de grandes dimensões que constituem piso e paredes da cavidade, expostos apenas parcialmente, confundindo-se muitas vezes como uma exposição do próprio maciço granítico. Há também matacões que estão associados à erosão remontante de frentes de intemperismo presentes em setores marginais em cotas mais altas da caverna. Mesmo tendo passado por alguma movimentação ao longo do tempo, permanecem muito próximos à área fonte.

### 5.5.4 Fase 4 – erosão secundária e acomodação dos matacões

Na situação descrita no item “b” do tópico 5.5.3, movimentos de massa episódicos transportaram grande quantidade de material da parte superior da vertente, envolvendo desde matacões até clastos de granulometria muito fina. Esse volume de sedimentos se acomodou em depressões na encosta, na baixa vertente e em fundos de vale, sendo posteriormente retrabalhado pelo que se denominou aqui de um processo erosivo secundário, com a exumação dos matacões *ex situ*.

A evolução do depósito esteve relacionada à ação seletiva da água, de origem pluvial e fluvial, que removeu os sedimentos coluviais mais finos, deixando blocos e matacões expostos na superfície como um depósito residual. No SAC, os cursos d’água ativos que atravessam a cavidade foram importantes nesse processo, pela maior competência na remobilização e transporte dos sedimentos. Em função da remoção do material que havia entre os matacões, estes provavelmente sofreram novos movimentos, acomodando-se uns em relação aos outros, e foi no vazio gerado entre eles pela erosão que galerias e salões do SAC

tiveram sua origem. Somam-se a esses espaços aqueles gerados entre os matacões movimentados e acumulados pelo processo descrito no item “a” do tópico 5.5.3.

### 5.5.5 Uma classificação para o SAC

Considerando as principais classificações propostas para cavernas em granito apresentadas no capítulo 4 (SJÖBERG, 1986; FINLAYSON, 1986; ROMANÍ e TWIDALE, 1998; ROMANÍ e RODRIGUEZ, 2007; RODRÍGUEZ, 2011; RODRÍGUEZ, 2017), o SAC, como já vem sendo tratado até aqui no trabalho, trata-se de uma caverna em matacões. As descrições desse conjunto de autores para esse tipo de cavidade são semelhantes entre si, com maior detalhamento e propostas de subdivisão nos trabalhos mais recentes (ver item 4.1.1). No entanto, por não contemplarem plenamente as características do SAC, propõe-se uma complementação, considerando suas especificidades.

O SAC é uma **cavidade natural subterrânea em matacões graníticos (ou uma caverna em matacões)**. É descrita como o vazio ou espaço subterrâneo entre matacões graníticos de diferentes dimensões, principalmente arredondados, acumulados na parte baixa da encosta. É formada principalmente por núcleos movimentados (*ex situ*) provenientes de partes superiores da encosta e deslocados por gravidade (queda/rolamento de rocha e/ou deslizamentos), mas inclui também, de forma mais restrita, núcleos residuais, exumados *in situ* pela erosão. Matacões que foram movimentados juntamente com o manto de alteração, permanecendo total ou parcialmente encobertos, foram expostos por processos erosivos secundários, que retiraram o material mais fino deixando as massas rochosas como um depósito coluvial residual. A evolução do espaço subterrâneo teve (e continua tendo) a participação de drenagens perenes e intermitentes, mas seu desenvolvimento e seus traços morfológicos obedecem principalmente à topografia e à forma como os matacões se ajustaram a ela e entre si.

## 5.6 BIOESPELEOLOGIA

O SAC é uma cavidade subterrânea com grande riqueza biológica, e algumas das características de sua localização geográfica e de seus aspectos físicos podem ajudar a explicar isso. Inserida no contexto do Bioma Mata Atlântica, a fisionomia vegetal que



caracteriza seu entorno é a Floresta Ombrófila Densa. Na verdade, uma mata secundária em bom estado de regeneração (Figura 5.55), já que as florestas primárias da ISC foram amplamente devastadas. No entanto, em meio a esta mata secundária é possível encontrar espécies remanescentes da floresta original, como imponentes e frondosas figueiras e também perobas. Esta vegetação gera no meio epígeo um grande volume de matéria orgânica, como troncos, galhos, cascas de árvores, folhas, frutos e sementes, material que vai ajudar a constituir a base da cadeia alimentar da caverna.

O SAC possui incontáveis aberturas que conectam o meio hipógeo ao epígeo. Algumas delas, pela sua posição e tamanho, só permitem a passagem de luminosidade, mas a maioria permite que a matéria orgânica produzida na área externa adentre ao espaço subterrâneo (Figura 5.56). Paredes abruptas no interior da cavidade, a ação da gravidade, da água e de agentes biológicos são os fatores que protagonizam essa transferência.

As características climáticas do contexto onde a caverna está inserida, tal como umidade do ar alta, precipitações bem distribuídas ao longo do ano, temperaturas amenas e verão quente, são condições que aceleram o processo de decomposição da matéria orgânica ao favorecer a proliferação de fungos (Figura 5.57) e bactérias. Estes organismos estão na base da cadeia trófica cavernícola, sustentando a fauna que vive no SAC.

Fungos e bactérias não estão associados apenas à matéria orgânica, colonizam também as superfícies dos matacões, deixando-os com aspecto esbranquiçado e amarelado (Figura 5.58). A umidade alta e o ambiente sombreado ou escuro são fatores que favorecem a presença desses organismos. Já nas áreas com teto aberto, em função da entrada de luz, líquens e musgos se desenvolvem sobre os matacões (Figura 5.59).

Muitas árvores acima da caverna adentram o espaço subterrâneo por meio de longas raízes na busca por água (Figura 5.60). Estas raízes, além de colaborarem para o aporte de matéria orgânica para o meio hipógeo, servem como abrigo para indivíduos da fauna cavernícola e promovem o intemperismo biológico, atuando sobre matacões (Figura 5.61), ampliando fraturas, gerando novas descontinuidades e acelerando o processo de esfoliação esferoidal (Figura 5.62), participando assim da dinâmica e evolução da cavidade.

Figura 5.55 – Mata secundária sob a qual está localizado o SAC.



Fonte: a autora

Figura 5.56 – Entrada inclinada servindo como caminho da matéria orgânica produzida no meio epígeo para o hipógeo.



Fonte: a autora



Figura 5.57 – Exemplos de fungos que se desenvolvem sobre a matéria orgânica residual disposta no interior do SAC e que atuam na sua decomposição.



Fonte: Henrique Pontes

Figura 5.58 – Superfície úmida colonizada por fungos e provavelmente bactérias (manchas esbranquiçadas e amareladas).



Fonte: a autora

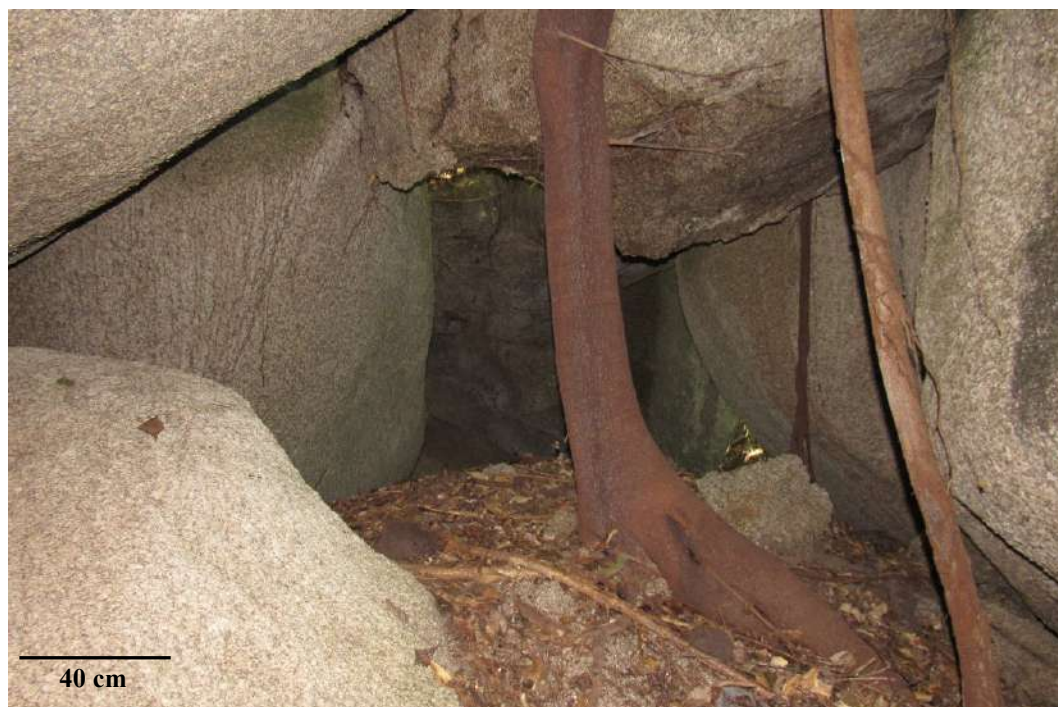


Figura 5.59 – Líquens (manchas esverdeadas na parte inferior da imagem) desenvolvidos sobre matacão disposto na zona fótica da cavidade.



Fonte: a autora

Figura 5.60 – Raízes de árvores adentrando à caverna por aberturas no teto.



Fonte: a autora

Figura 5.61 – Matacão envolvido pelas raízes de uma figueira em uma das entradas do SAC. Na imagem também é possível ver caneluras em posição vertical (matacão de cima) e horizontal (matacão de baixo; à direita do espeleólogo).



Fonte: a autora

Figura 5.62 – Raízes posicionadas na descontinuidade entre o matacão e lasca de sua decomposição esferoidal, colaborando no intemperismo e no transporte de matéria orgânica.



Fonte: a autora

Um levantamento bioespeleológico realizado no SAC e em outras quatro cavernas em matacões graníticos da ISC entre os anos de 2016 e 2017 deu um primeiro panorama sobre a fauna que caracteriza essas cavidades. Tal levantamento integra o primeiro estudo espeleológico realizado na ISC para fins de licenciamento ambiental, referente ao empreendimento residencial Jardim Recanto da Ilha (SATO *et al.*, 2018).

Os resultados do estudo bioespeleológico mostram que o SAC é a caverna que mais se destaca nos parâmetros analisados. Considerando o número de espécies encontradas, é a que obteve a maior quantidade, totalizando 84 registros, o que os autores definiram como riqueza de espécies alta para o universo pesquisado. Em relação aos índices de diversidade aplicados (Índice de Shannon, que melhor pontua comunidades com mais táxons e mais indivíduos compondo esses táxons, e Índice de Simpson, que mede a probabilidade de dois indivíduos, selecionados ao acaso, pertencerem à mesma espécie), o SAC fica na primeira posição. Os índices de equitatividade e dominância, derivados dos dois índices citados e que servem para corroborá-los, mostram números mais favoráveis ao SAC, comprovando que das cavernas em estudo, ela é a que possui maior diversidade.

Infelizmente este levantamento bioespeleológico ficou limitado a porções restritas do SAC, uma vez que a descrição do estudo espeleológico sobre as cavernas estudadas mostra que não houve um trabalho minucioso de caminharmento e prospecção na área e a exploração devida da caverna. O SAC é apresentado equivocadamente como um conjunto descontínuo de cavernas e muito menor do que realmente é. Se tivesse sido devidamente explorada, provavelmente os números relacionados à fauna seriam muito mais expressivos.

Mesmo com as limitações relacionadas à exploração do SAC, o levantamento bioespeleológico mostrou sua relevância ecossistêmica e das demais cavernas estudadas, tanto que o SAC foi classificado como uma caverna de relevância máxima. Apontou que são habitats de espécies ameaçadas de extinção, a exemplo do *Listrura camposi*, um pequeno bagre conhecido como candiru, e da *Ischnocnema manezinho*, uma rã que é endêmica da Ilha de Santa Catarina. Mostrou que as cavidades possuem potencial para descoberta de novos táxons, a exemplo da *Ochyrocera* sp. 1, uma pequena aranha encontrada no SAC e em outras duas cavidades próximas. Adicionalmente, o estudo estabeleceu correlações com outros levantamentos em cavernas em granito no Brasil, identificando semelhanças em relação aos dados de riqueza e abundância de espécies e aos tipos de táxons mais comuns.

Durante as etapas de campo da presente tese, foram realizadas observações e registros de fauna do SAC e de outras cavernas visitadas, a título de comparações. O objetivo



foi documentar a ocorrência e diversidade da fauna cavernícola para embasar discussões sobre o valor ecossistêmico da caverna, o que será tratado no último capítulo. Obviamente, não se trata de um trabalho sistemático e com identificação detalhada de táxons, mas complementa e confirma dados obtidos no levantamento do estudo espeleológico outrora citado (SATO *et al.*, 2018).

O SAC conjuga fatores ambientais como baixa ou nenhuma luminosidade, alta umidade, temperaturas amenas e constantes em relação à superfície, diversidade de abrigos, disponibilidade de água, presença de raízes e um bom aporte de matéria orgânica, fatores esses que possibilitam um habitat perfeito para um grande número de espécies.

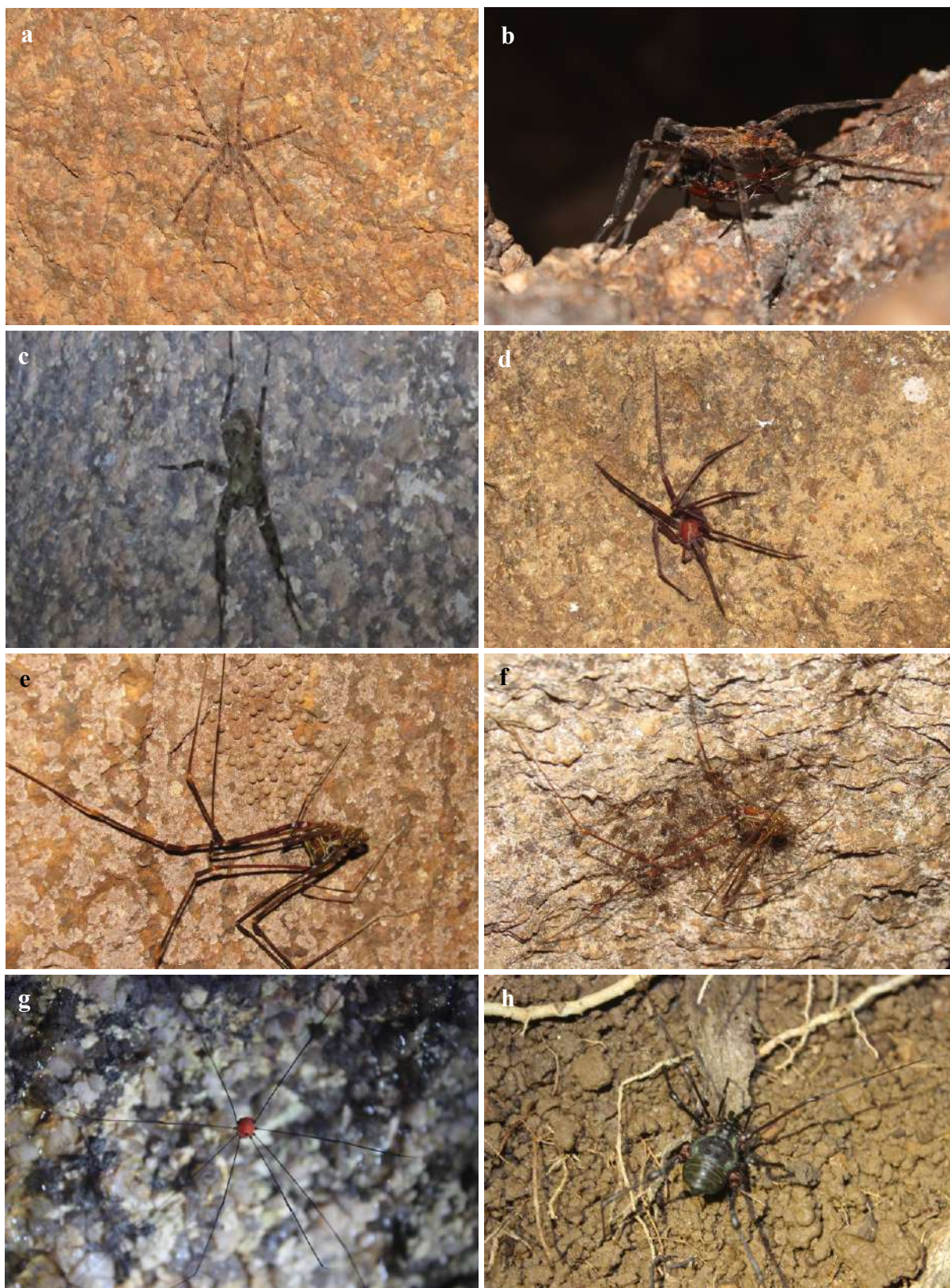
Devido à morfologia das cavernas, tais características costumam se manifestar de forma uniforme por toda extensão do vazio subterrâneo, e, conseqüentemente, permitem que os elementos da biodiversidade cavernícola não se restrinjam a setores específicos, como as entradas.

Os espécimes da fauna avistados e registrados foram (identificação pela comparação com SATO *et al.*, 2018 e a experiência da autora): aranhas (figuras 5.63a-d), opiliões (figuras 5.63e-h), grilos (figuras 5.64a, b), diplópodes (figuras 5.64c, d), dípteros, incluindo suas larvas (Figura 5.64e), larvas de tricópteros (Figura 5.64f), zelurus (Figura 5.64g), tatuzinhos de caverna (Figura 5.64h), besouros, ácaros, anuros (figura 5.65a-d) e morcegos.

Nenhum destes organismos é exclusivo da caverna, mas ao que parece são avistados com muito mais facilidade e frequência neste ambiente do que no meio epígeo. Muitos deles podem, inclusive, completar todo seu ciclo de vida dentro do espaço subterrâneo, ou, ao menos dependem de condições proporcionadas por este ambiente para alguma etapa desse ciclo. É fato que em maior ou menor grau, todos necessitam da caverna para alimentação, abrigo, reprodução, postura de ovos e cuidado com a prole.

Um aspecto que chama atenção em alguns espécimes da fauna do SAC é o seu tamanho e a adaptação ao ambiente subterrâneo. Opiliões e grilos são maiores do que seus pares em cavernas em arenito (comparação com cavernas nos Campos Gerais do Paraná). Os grilos, em especial, apresentam órgãos sensoriais bem desenvolvidos, que podem ser até duas vezes maiores que o restante de seu corpo. A oferta generosa de alimento e o isolamento podem ser fatores de influência nessas características.

Figura 5.63 – Invertebrados avistados no SAC: a, b, c e d): aranhas do gênero *Ctenus*; e) opilião *Serracutisoma catarina* com ovos; f) *Serracutisoma catarina* com ninfas; g e h) opiliões não identificados.



Fonte: a autora (a, c, d, e, f); Henrique Pontes (b, g, h)



Figura 5.64 – Invertebrados avistados no SAC: a e b) grilos; c e d) diplópodes; e) larva de díptero do gênero *Neoditomya* sp.; f) redes de seda de larvas de Trichoptera; g) zelurus camuflado com grãos de areia; h) tatuzinho de caverna.



Fonte: a autora (a, c, f); Henrique Pontes (b, d, g, h); Rodrigo Aguilar (e)



Figura 5.65 – Anuros avistados no SAC: a e b) *Ischnocnema manezinho*; c) anuro não identificado (~2 cm); d) *Bokermannohyla hylax*.



Fonte: Henrique Pontes (a, b); a autora (c, d)

## 5.7 CORRELAÇÕES DO SAC COM OUTRAS CAVIDADES SUBTERRÂNEAS EM MATAÇÕES GRANÍTICOS NA ILHA DE SANTA CATARINA

Das atuais 53 cavidades subterrâneas em matações graníticos da ISC, 16 foram visitadas em momentos anteriores ou durante o desenvolvimento da tese, incluindo o SAC, selecionada como a caverna-tipo da pesquisa. Algumas delas foram exploradas de forma mais detalhada, percorridas em toda ou grande parte de sua extensão com observação e registro fotográfico de aspectos geoespeleológicos e bioespeleológicos. Outras foram exploradas de modo menos abrangente, com registros fotográficos de aspectos mais relevantes, principalmente da geodiversidade, ou mesmo sem nenhum registro. A relação dessas cavidades e as informações básicas sobre elas estão organizadas no Quadro 5.1.

Algumas das cavernas exploradas de forma mais detalhada foram indicadas pelos espeleólogos Rodrigo Dalmolin e Hélio Carvalho Filho, que foram as pessoas responsáveis pela localização, exploração e cadastramento da maioria das cavidades subterrâneas da ISC. Outras já eram conhecidas pela pesquisadora quando de sua participação no Espeleo Grupo

Teju Jagua entre os anos de 2012 e 2013. A ideia foi priorizar as cavernas que apresentassem aspectos interessantes para comparação com o SAC, principalmente relacionados aos aspectos da geodiversidade, e que estivessem distribuídas em diferentes setores da ISC, permitindo obter um panorama mais abrangente sobre as ocorrências em matacões graníticos no território ilhéu.

Quadro 5.1 – Relação das cavidades subterrâneas em matacões graníticos visitadas na ISC, ordenadas a partir do maior detalhamento da visita e consideração na pesquisa.

| Nome                                 | Extensão (m) | Altitude (m)* | Localização (bairro) | Características da visita e enquadramento na pesquisa                                                      |
|--------------------------------------|--------------|---------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sistema de Cavernas da Água Corrente | 1026         | 24            | Saco Grande          | Exploração total, mapeamento espeleológico, levantamentos detalhados, registros fotográficos, caverna-tipo |
| Gruta do Saco Grande                 | 530          | 71            | Saco Grande          | Exploração total, registros fotográficos, comparação SAC                                                   |
| Gruta da Trilha do Saquinho I        | 114          | 44            | Saquinho             | Exploração total, registros fotográficos, comparação SAC                                                   |
| Gruta do Oiteiro                     | 214          | 60            | Rio Tavares          | Exploração parcial, registros fotográficos, comparação SAC                                                 |
| Grutas das Feiticeiras               | 131          | 5             | Ingleses             | Exploração parcial, registros fotográficos, comparação SAC                                                 |
| Caverna Central Park                 | 115          | 28            | Saco Grande          | exploração parcial, registros fotográficos, comparação SAC                                                 |
| Gruta da Jararaca                    | 915          | 20            | Saco Grande          | exploração parcial, registros fotográficos, comparação SAC                                                 |
| Grota do Riacho I                    | 22           | 132           | Saco Grande          | exploração parcial, registros fotográficos                                                                 |
| Grota do Riacho II                   | 32           | 120           | Saco Grande          | exploração parcial, registros fotográficos                                                                 |
| Gruta do Rei                         | 56           | 47            | Praia Brava          | exploração parcial, registros fotográficos                                                                 |
| Gruta do Lajão                       | 33           | 27            | Saco Grande          | exploração parcial, registros fotográficos                                                                 |
| Gruta do Riacho Subterrâneo          | 288          | 52            | Saco Grande          | exploração parcial, registros fotográficos                                                                 |
| Gruta dos Buracos                    | 89           | 141           | Saco Grande          | exploração parcial, sem registros fotográficos                                                             |
| Gruta do Monte Verde                 | 130          | 139           | Monte Verde          | exploração parcial, sem registros fotográficos                                                             |
| Gruta das Larvas                     | 20           | 137           | Saco Grande          | exploração superficial, registros fotográficos                                                             |
| Gruta das Pedras Grandes             | 276          | 66            | Saco Grande          | exploração superficial, sem registros fotográficos                                                         |

\*como referência preferencial, cota de uma de suas entradas. Fonte: a autora, a partir de dados do Cadastro Nacional de Cavernas (SBE, 2020).



Considerando que a litologia (Granito Ilha) e a configuração das cavernas (formadas por aglomerações de matacões) são as características primárias de convergência entre elas, serão apresentados aqui outros elementos que marcam suas similaridades e também as particularidades que as diferenciam. Um dos elementos comuns a todas as cavernas visitadas são os espeleotemas. Estas feições foram estudadas em detalhe durante a pesquisa e serão apresentadas no próximo capítulo, tanto com exemplos do SAC como das demais cavidades.

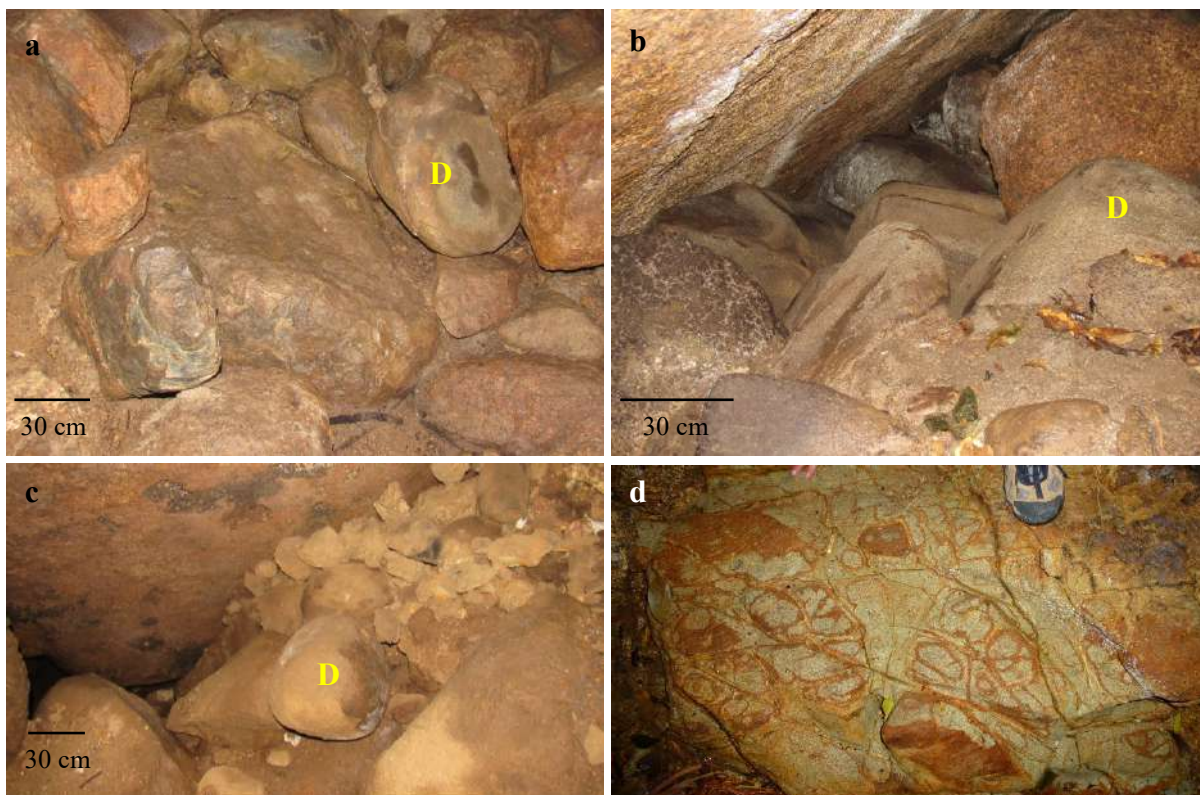
### 5.7.1 Aspectos geoespeleológicos

Em toda a sua extensão o Granito Ilha é seccionado por diques de composição básica a ácida do Enxame de Diques Florianópolis. Por esta razão, rochas vinculadas a estes corpos intrusivos estão presentes em algumas das cavernas visitadas, como diques *in situ* ou manifestações residuais, na forma de blocos e matacões.

Como visto anteriormente, no SAC aparecem blocos e matacões de diabásio com formato tabular. Na Gruta das Feiticeiras (figuras 5.66a, b) e na Gruta do Oiteiro (Figura 5.66c), diferente do SAC, os matacões são maiores, com até 1,5 m de diâmetro, e possuem formas variadas. São principalmente arredondados, de esferas quase perfeitas a morfologias elipsoidais, mas massas angulosas também são observadas. Na Gruta das Feiticeiras estes núcleos residuais atingem dimensões maiores e são mais numerosos que na Gruta do Oiteiro, concentrando-se principalmente no salão principal, logo após a entrada, e em outro um nível acima deste. Em ambas as cavernas aparecem no piso. Na Gruta das Jararacas há ocorrência de um dique *in situ*, bastante alterado (Figura 5.66d). Ocorrem também blocos e matacões pequenos de diabásio, com formas normalmente angulosas. Nas demais cavidades selecionadas para comparação com o SAC não foi observada a presença de diabásio ou outras litologias além do Granito Ilha.

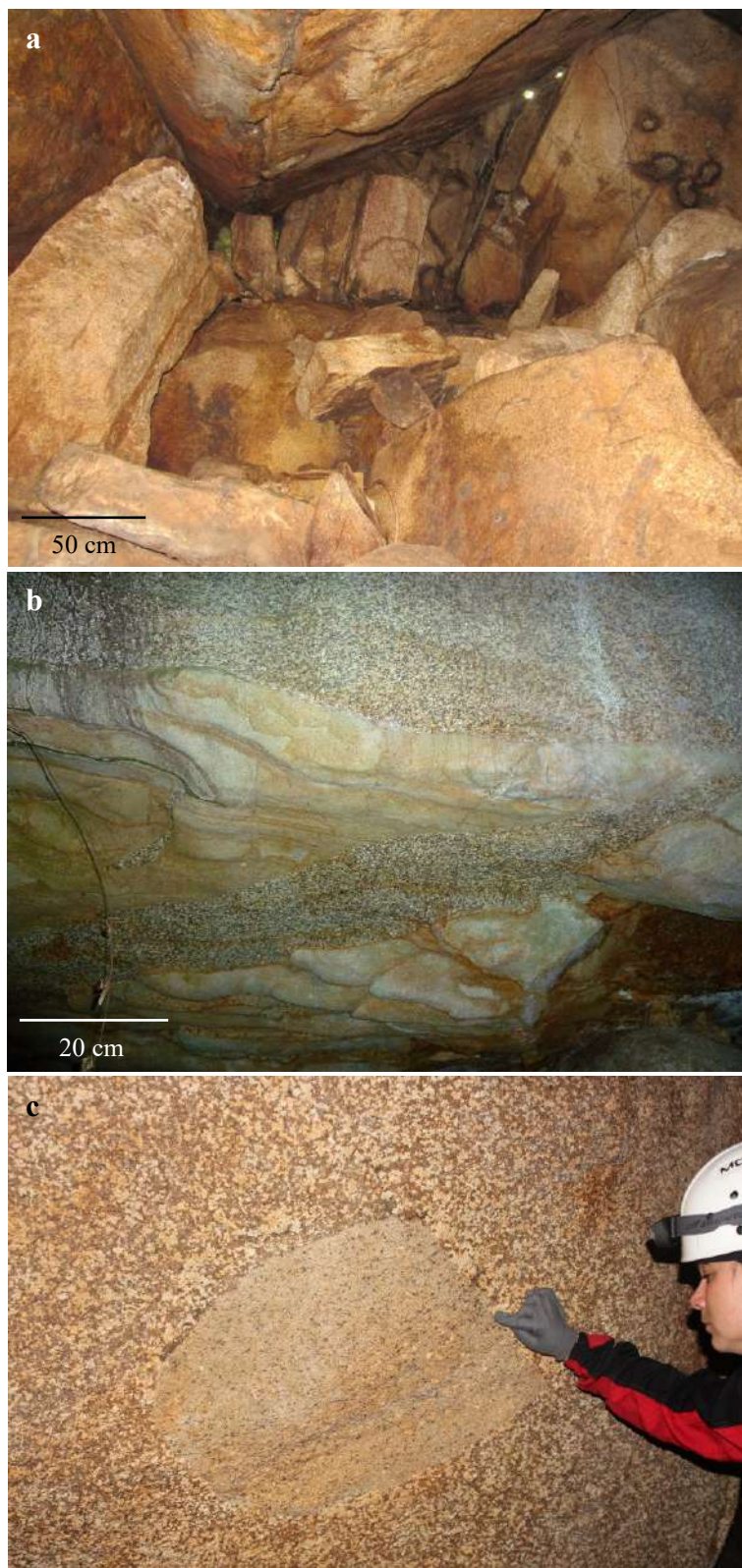
Em relação às estruturas tectônicas e ígneas, as fraturas são aquelas que podem ser vistas em todas as cavernas, no geral, com expressão semelhante as do SAC. A que mais se diferencia nesse aspecto é a Gruta da Trilha do Saquinho I, onde conjuntos de matacões aparecem bastante segmentados por fraturas paralelas dispostas principalmente na posição vertical (Figura 5.67a). Outras estruturas como veios de aplito e enclaves microgranulares foram observadas na Gruta do Saco Grande (figuras 5.67b e 5.67c), o que provavelmente se explica pela proximidade geográfica com o SAC e consequente extensão de características faciológicas do Granito Ilha, visíveis na caverna-tipo.

Figura 5.66 – Presença do diabásio (D) em outras cavernas em matacões graníticos da ISC: a e b) matacões e blocos em diferentes compartimentos da Gruta das Feiticeiras; c) pequenos matacões esféricos na Gruta do Oiteiro; d) dique na Gruta da Jararaca.



Fonte: a autora

Figura 5.67 – Estruturas tectônicas e ígneas observadas em outras cavernas em matacões graníticos da ISC: a) matacões fraturados na Gruta da Trilha do Saquinho I; b) veio aplítico no teto na Gruta do Saco Grande; c) enclave de composição provavelmente ácida (riolito ?) na Gruta do Saco Grande.



Fonte: a autora (a); Rodrigo Dalmolin (b); Henrique Pontes (c)

Dentre os materiais e formas relacionados aos processos de alteração, erosão e deposição, os matacões, blocos e seixos constituem o principal ponto de convergência entre as cavernas visitadas. Mesmo sendo uma característica óbvia, já que todas as cavidades estudadas são desenvolvidas a partir desse tipo de material, há diferenças relacionadas ao tamanho, grau de arredondamento, distribuição no espaço subterrâneo e nível de movimentação, as quais podem ajudar a contar um pouco sobre a gênese e evolução de cada caverna. Estas diferenças influenciam na morfologia, nas dimensões de condutos e salões, na quantidade de entradas e na ocorrência de áreas afóticas.

A Gruta do Saco Grande, localizada a montante do SAC, possui setores onde os matacões parecem estar *in situ* ou ter passado por pouca movimentação (Figura 5.68), a exemplo de massas de grandes dimensões que mostram equivalências morfológicas e estruturais com matacões vizinhos. Há ainda em níveis mais profundos núcleos residuais parcialmente envolvidos pelo saprolito (Figura 5.69), evidenciando diferentes estágios da formação e evolução do espaço subterrâneo.

Na Gruta das Feiticeiras e Gruta do Oiteiro se destacam os salões e condutos delimitados (tanto parede como teto) por matacões de grandes dimensões (Figura 5.70), com mais de uma dezena de metros de diâmetro. Massas menores caracterizam o piso das cavidades. Nessas cavernas é perceptível que os matacões foram rotacionados, como mostram caneluras em posição diferente da que foram formadas na Gruta do Oiteiro (Figura 5.71) e também, nesta mesma caverna, a ocorrência de marcas de atrito em três pontos distintos no teto (Figura 5.72). Tais marcas podem ter sido geradas pelo deslocamento de um matacão em relação a outro ou estar associadas a um plano de falha, neste último caso, são conhecidas como *slickenside* (TJIA, 1964; KIRKPATRICK e BRODSKY, 2014).

Nas três cavernas acima citadas, predominam matacões arredondados, tal como no SAC. Já na Gruta da Trilha do Saquinho I a presença de matacões angulosos e/ou com baixo grau de arredondamento é mais expressiva, tanto as massas principais, que delimitam a cavidade, como as que se distribuem por sua área interna. A principal diferença desta para as demais cavernas é o nítido controle estrutural sobre a configuração do espaço subterrâneo, expresso no “fatiamento” dos matacões, o que acaba influenciando na morfologia menos arredondada dos mesmos. Blocos e seixos caracterizam o piso das cavidades, tanto de granito como de diabásio, nas cavernas onde esta última litologia ocorre. Lascas derivadas do processo de esfoliação esferoidal também ocorrem na maioria das cavernas visitadas, no piso ou apoiadas próximas ao matacão de onde se desprenderam.



Figura 5.68 – Galeria da Gruta do Saco Grande delimitada por um único matacão (ou maciço rochoso ?) que, aparentemente, está *in situ*. A curvatura da parede e do teto sugere que a galeria se desenvolveu a partir de uma estrutura de alívio ou de descamação esferoidal, sendo o material da rampa à esquerda e do piso produto da alteração dessa massa rochosa, removido parcialmente pela erosão. Esta é uma das zonas afóticas da cavidade.



Fonte: Henrique Pontes

Figura 5.69 – Material de alteração envolvendo matacão (provavelmente *in situ*) em uma galeria mais profunda da Gruta do Saco Grande. Uma vez que esse material seja todo erodido, a galeria se ampliará e os núcleos menores vão passar a compor o piso.



Fonte: Rodrigo Dalmolin

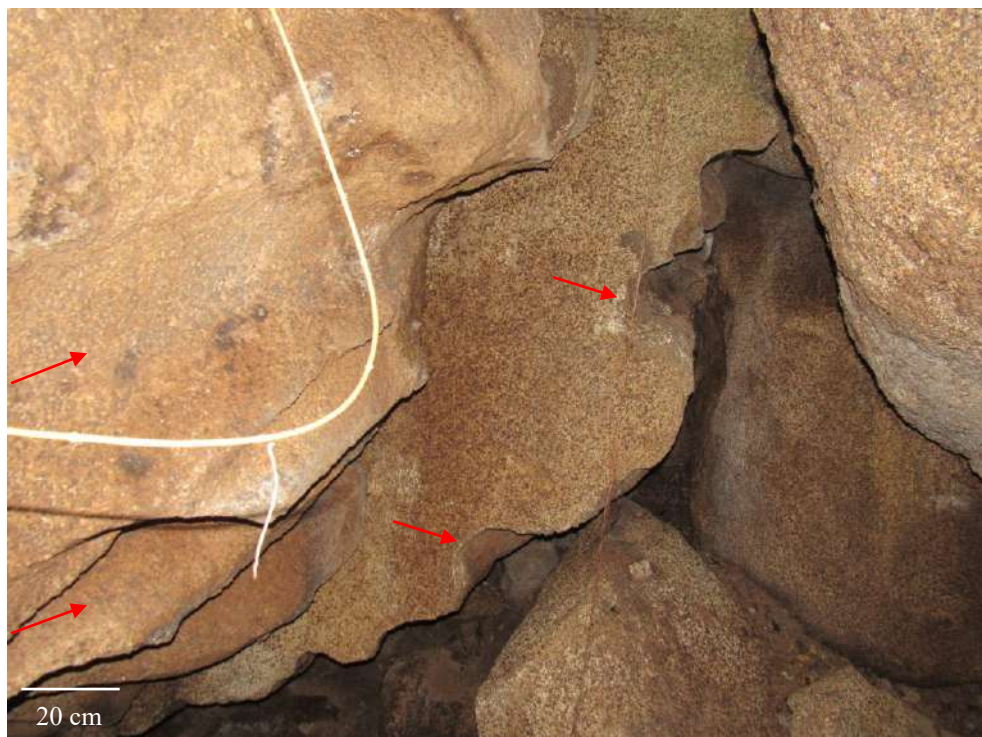


Figura 5.70 – Salão de entrada da Gruta das Feiticeiras, delimitado por matacões de grandes dimensões.



Fonte: a autora

Figura 5.71 – Matacões com caneluras dispostas na posição horizontal (ver setas) evidenciando o movimento e rotação dos mesmos – Gruta do Oiteiro.



Fonte: a autora

Figura 5.72 – Superfície estriada pelo atrito do deslocamento de um matacão em relação a outro ou de um plano de falha em teto inclinado da Gruta do Oiteiro.



Fonte: a autora

Formas alveolares ocorrem em grande quantidade na Gruta da Trilha do Saquinho I, caracterizadas por superfícies e bordas bastante alteradas (Figura 5.73), o que mostra que estão em processo de ampliação. O controle estrutural nesta gruta intensifica a entrada e a circulação da água meteórica através dos matacões graníticos e consequente manifestação de processos de alteração da rocha. A coloração avermelhada de paredes e teto chama a atenção, o que possivelmente está relacionado com a oxidação de minerais do granito e também pela precipitação de óxidos de ferro em solução na água circulante.

Essas formas alveolares evoluem para concavidades com maior diâmetro e profundidade que aos poucos vão remodelando os matacões (Figura 5.74). Em conjunto, estas ocorrências evidenciam a corrosão ou dissolução química do granito, ou seja, um processo de carstificação em contexto litológico não carbonático. Em algumas dessas concavidades, inclusive, desenvolvem-se espeleotemas.

O condicionamento de espeleotemas é outro aspecto relevante atribuído ao controle estrutural na Gruta da Trilha do Saquinho I, já que vários conjuntos aparecem associados às discontinuidades da rocha. No geral esta é uma caverna que apresenta uma quantidade



expressiva de espeleotemas de diferentes tipos, configurando-se como uma das mais ricas neste tipo de feições para o universo de cavidades visitadas.

Formas alveolares também foram observadas na Gruta do Saco Grande (Figura 5.75a), Gruta do Oiteiro (Figura 5.75b), Caverna Central Park (Figura 5.75c) e Gruta das Feiticeiras (Figura 5.75d). Nas três primeiras cavidades de modo pontual e com características parecidas com as encontradas no SAC, enquanto que na Gruta das Feiticeiras há grande semelhança com o que se vê na Gruta da Trilha do Saquinho I.

Depósitos clásticos consolidados do tipo conglomerados foram observados apenas na Gruta do Saco Grande (Figura 5.76). Blocos e seixos derivados de coberturas lateríticas e matacões com superfícies polidas por ação da água fluvial não foram observadas em outras cavidades além do SAC.

Figura 5.73 – Formas alveolares resultantes da alteração química do granito na Gruta da Trilha do Saquinho I.



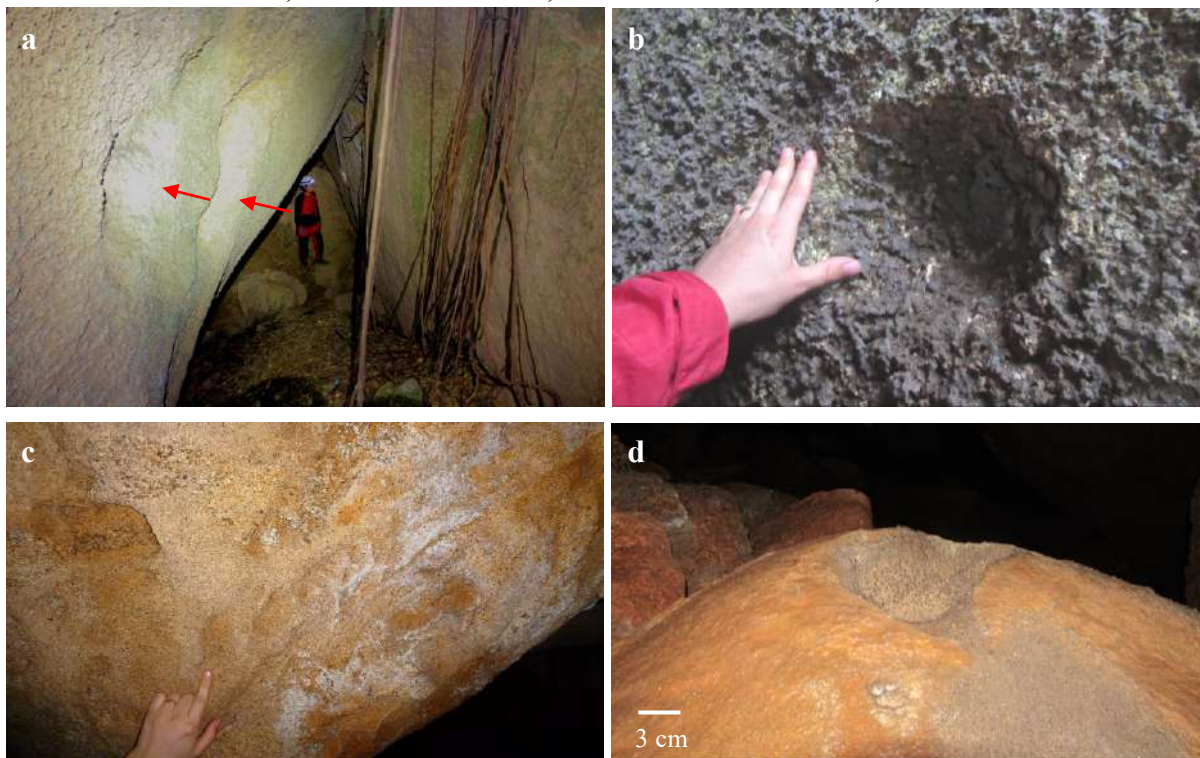
Fonte: a autora

Figura 5.74 – Evolução das formas alveolares da Figura 5.73 na base de um matacão. Na lateral direita da imagem há um conjunto de espeleotemas coraloídes que se desenvolveu em uma concavidade.



Fonte: a autora

Figura 5.75 – Formas alveolares em outras cavernas em matacões graníticos da ISC: a) Gruta do Saco Grande; b) Gruta do Oiteiro; c) Caverna Central Park; d) Gruta das Feiticeiras.



Fonte: a autora



Figura 5.76 – Conglomerado sustentado pelos clastos com cimento ferruginoso na Gruta do Saco Grande.



Fonte: Rodrigo Dalmolin

### 5.7.2 Aspectos morfológicos

Com exceção do SAC, nenhuma outra caverna dentre as que foram visitadas foi mapeada. Desta forma, as comparações em termos morfológicos são baseadas na prospecção realizada, registros fotográficos e avaliação do contexto geológico e geomorfológico onde as mesmas estão inseridas.

A morfologia labiríntica e a existência de diferentes níveis de desenvolvimento com áreas de sobreposição são os principais aspectos morfológicos de convergência entre as cavernas em questão, assim como a existência de várias entradas. Os desenhos das galerias e salões são compatíveis com aqueles descritos para o SAC.

Todas as cavidades ocorrem no contexto de uma encosta, variando a posição que ocupam na mesma (alta, média ou baixa encosta) e a declividade da vertente. Por isso acabam tendo diferenças em relação ao desnível e ao espraimento a partir do eixo principal de desenvolvimento.



### 5.7.3 Aspectos hidrológicos

A água é um elemento que está presente em todas as cavernas visitadas. A Gruta do Saco Grande compartilha de um mesmo curso d'água com o SAC, que provavelmente nasce na primeira cavidade, percorre parte de suas galerias e desce a encosta adentrando na segunda. A Gruta das Feiticeiras, Gruta do Oiteiro e Gruta da Jararaca também possuem cursos d'água perenes que atravessam algumas de suas galerias. Em todos os casos se tratam de drenagens pequenas, com baixa energia.

Nas cavernas acima citadas e nas demais selecionadas para comparação com o SAC (Gruta da Trilha do Saquinho I e Caverna Central Park) há umidade nas paredes e piso proveniente da água meteórica, que se expressa na forma de escorrimentos e gotejamentos. A condensação da umidade presente no ar também é uma fonte de água para o ambiente subterrâneo, com a formação de gotículas sobre as superfícies dos matacões.

Essa umidade advinda da infiltração e condensação oscila, com diminuição ou aumento da intensidade e pontos de ocorrência em função da alternância de períodos secos e chuvosos, mas nunca está completamente ausente. Sua presença é fundamental no desencadeamento de processo de alteração física, química e biológica da (s) rocha (s) e para a formação de espeleotemas.

### 5.7.4 Aspectos bioespeleológicos

Com exceção do SAC e da Gruta do Saco Grande, as demais cavernas foram visitadas uma única vez. Considerando que a fauna se movimenta pela caverna e assume comportamentos distintos em função da hora do dia, das variações de temperatura e umidade e do período reprodutivo, não é possível precisar com apenas uma observação as similaridades e diferenças bioespeleológicas entre as cavernas visitadas. No entanto, algumas considerações gerais poder ser apontadas.

Em essência, os mesmos indivíduos da fauna cavernícola que foram listados para o SAC foram avistados nas demais cavernas, com destaque para opiliões da família Gonyleptidae e aranhas da família Ctenidae, no caso dos invertebrados, e para anuros, no caso de vertebrados. A *Ischnocnema manezinho* é um dos exemplos de anuros avistados em mais de uma caverna visitada, como a Gruta do Saco Grande, Gruta do Oiteiro e Gruta das Feiticeiras.

O avistamento de morcegos é pouco expressivo, tanto no SAC como nas demais cavernas visitadas, sendo que o mais comum é observá-los isolados ou em grupos de até quatro indivíduos. Por conta disso, acumulações de guano também são restritas. Uma das cavernas que mais chamou atenção nesse aspecto foi a Gruta do Monte Verde, onde foi avistado um grupo maior de morcegos e, conseqüentemente, acumulações de guano mais significativas.

A ocorrência de fungos, macroscópicos ou não, e provavelmente de outros organismos como bactérias, é um aspecto comum às cavernas. O ambiente úmido, escuro e protegido associado à presença de matéria orgânica favorece a colonização destes organismos, os quais têm um papel importante nas alterações de pH da água que infiltra e circula pelos matacões graníticos, colaborando na alteração química e biológica da rocha e também no desenvolvimento de feições como os espeleotemas, como será abordado no capítulo seguinte da tese.

Adicionalmente, outra característica biológica convergente é a presença de raízes de árvores localizadas em meio epígeo que adentram o espaço subterrâneo pelas aberturas entre os matacões e por fraturas. Tais raízes, como comentado anteriormente em relação ao SAC, colaboram no transporte de matéria orgânica para o interior das cavernas, servem de abrigo e sustentação para elementos da fauna cavernícola e agem na ampliação de fraturas e mesmo na movimentação e/ou fixação dos matacões.

## 6 ESPELEOTEMAS: FEIÇÕES DE DESTAQUE DAS CAVERNAS ESTUDADAS

Espeleotemas foram encontrados em todas as cavernas investigadas nesta pesquisa, configurando-se como um dos principais elementos de convergência da geodiversidade desse conjunto de cavidades em matacões graníticos da ISC.

Estas feições se desenvolvem na superfície dos matacões em todas as posições por eles ocupadas dentro das cavidades, ou seja, no teto, nas paredes e no piso. Há ocorrência de espeleotemas em setores variados (próximo a entradas, zonas com baixa luminosidade e zonas afóticas) e sob diferentes condições de umidade e circulação de ar. Superfícies de quebra nos matacões (com fraturas e/ou arestas) ou afetadas pelo processo de decomposição esferoidal (com exposição das bordas das camadas/cascas) comumente apresentam espeleotemas associados. Como estas são zonas preferenciais de permeabilidade, provavelmente favorecem a circulação e precipitação de elementos que compõem essas feições.

Os espeleotemas se apresentam principalmente em conjuntos, sendo pouco comum encontrar unidades isoladas. Dentro desses conjuntos podem aparecer tanto individualizados como conectados/agrupados. A exceção são os espeleotemas planares, que constituem uma única feição. Não ocupam superfícies amplas e contínuas, o que pode ter relação com a irregularidade do teto, paredes e piso, em função da disposição caótica dos matacões e do formato arredondado dos mesmos.

### 6.1 CARACTERIZAÇÃO MACROSCÓPICA

Os espeleotemas foram classificados utilizando principalmente as designações presentes na literatura para feições encontradas em cavernas em granito ou em litologias onde há ocorrência de depósitos similares em tamanho, morfologia, composição e gênese, como arenitos e quartzitos, mas também de contextos carbonáticos. Neste último caso, as apropriações de nomenclatura são justificadas por equivalências morfológicas ou de posicionamento dentro das cavidades, pois os processos genéticos, em geral, são distintos.

Sendo assim, os espeleotemas encontrados nas cavernas em matacões graníticos da ISC foram enquadrados em três grupos principais, divididos por sua vez em subtipos ou variedades, os quais serão discriminados a seguir.

### 6.1.1 Espeleotemas cilíndricos

Englobam feições de aspecto tubular de diferentes dimensões. São encontrados em todas as cavernas investigadas, com ocorrência no piso e no teto das cavidades, sempre em conjuntos. Apresentam-se de forma individualizada ou agrupada dentro desses conjuntos, o que é dado em função da densidade de feições e da identificação (ou ausência) de um elemento integrador.

Mesmo tendo a forma cilíndrica como característica em comum, cada conjunto de espeleotemas possui suas peculiaridades, as quais podem indicar diferentes mecanismos envolvidos em sua gênese. As principais variedades de espeleotemas cilíndricos encontradas foram subdivididas a partir de dois critérios: posicionamento na cavidade (piso ou teto) e densidade das feições (individualizadas ou agrupadas).

#### 6.1.1.1 Espeleotemas cilíndricos de piso

a) feições individualizadas: no geral, estes espeleotemas ocupam pequenas áreas e estão isolados entre si (Figura 6.1). A densidade de feições varia, ocorrendo conjuntos com baixo número de espeleotemas e maior espaçamento entre os mesmos (Figura 6.2) e outros com muitos espeleotemas bem próximos entre si (Figura 6.3). Desenvolvem-se em contato direto com o substrato rochoso de granulometria variada (predomínio de cascalho), ancorados em grãos de quartzo e/ou feldspato (Figura 6.4). Além do formato cilíndrico (Figura 6.1), apresentam variações cônicas (Figura 6.3), onde o diâmetro da porção basal é maior que da porção apical, e mais raramente claviformes, onde a base é mais estreita em relação à terminação (Figura 6.2). Também foram observadas feições ramificadas, estas menos comuns, com várias pontas derivando de uma base comum (Figura 6.5). As dimensões desses espeleotemas se situam entre 1 e 2,5 cm de comprimento e 0,4 e 1,5 cm de diâmetro. A coloração varia entre tons de cinza e marrom;

b) feições agrupadas: estes espeleotemas englobam feições mais robustas que as anteriormente descritas (figuras 6.6 e 6.7), encontrando-se muito próximas umas das outras e conectadas por uma base comum (figuras 6.8 e 6.9), como uma crosta provavelmente de mesma composição que os espeleotemas. Estão distribuídas essencialmente sobre o pavimento rochoso horizontal, mas podem se estender para porções inclinadas e/ou verticais dos matacões (figuras 6.7 e 6.9). A coloração varia entre tons de cinza e marrom.

Figura 6.1 – Espeleotemas cilíndricos de piso individualizados – SAC.



Fonte: a autora

Figura 6.2 – Conjunto de espeleotemas cilíndricos, incluindo morfologias claviformes, com baixa densidade de feições – SAC.



Fonte: a autora



Figura 6.3 – Conjunto de espeleotemas predominantemente cônicos com alta densidade de feições – SAC.



Fonte: a autora

Figura 6.4 – Fotomicrografia de espeleotema cilíndrico de piso individualizado (corte longitudinal - amostra SAC 4) desenvolvido sobre grãos de quartzo (nicóis paralelos).



Fonte: a autora

Figura 6.5 – Espeleotema de piso com ramificações cilíndricas derivando de uma base comum – SAC (diâmetro da moeda de 22 mm).



Fonte: a autora

Figura 6.6 – Espeleotemas cilíndricos de piso agrupados – Gruta da Feiticeira. Detalhe do setor e direção de tomada da Figura 6.7.



Fonte: a autora



Figura 6.7 – Detalhe do conjunto da Figura 6.6 mostrando espeleotemas na face horizontal e inclinada do matacão granítico.



Fonte: a autora

Figura 6.8 – Em evidência, na porção do substrato logo abaixo do núcleo principal de espeleotemas (à esquerda da escala), a crosta que serve como base comum para as feições.



Fonte: A autora

Figura 6.9 – Espeleotemas cilíndricos agrupados distribuídos sobre pavimento horizontal e inclinado, unidos por uma base provavelmente da mesma composição das feições – Caverna Central Park.



Fonte: Rodrigo Dalmolin

#### 6.1.1.2 *Espeleotemas cilíndricos de teto*

a) feições agrupadas: semelhante aos seus equivalentes de piso, constituem conjuntos de espeleotemas com forma predominantemente cilíndrica, muito próximos entre si e/ou conectados. Os conjuntos observados na Gruta do Oiteiro foram os mais representativos para este tipo, principalmente pelas dimensões das feições (figuras 6.10, 6.11 e 6.12). Um destes conjuntos congrega os maiores espeleotemas registrados dentre todas as cavernas estudadas, alcançando até 4,5 cm de comprimento e diâmetro de até 2 cm (Figura 6.13). Estas ocorrências da Gruta do Oiteiro são caracterizadas por uma zona central do agrupamento com feições mais desenvolvidas (Figura 6.14), sendo que em direção à periferia dos conjuntos a densidade dos espeleotemas vai diminuindo, assim como o tamanho dos mesmos, com a morfologia dos indivíduos, assumindo um padrão nodular (Figura 6.15). Os espeleotemas são de coloração marrom e acinzentada, alguns com base esbranquiçada em função da presença de microrganismos (Figura 6.13). No dia da observação a umidade em um dos conjuntos era alta, inclusive com a presença de gotejamento (Figura 6.16). Associados ao conjunto com os maiores espeleotemas ocorrem feições cilíndricas com crescimento que se afasta da vertical, ou seja, inclinadas em relação ao substrato (figuras 6.17 e 6.18), podendo se tratar de anemólitos (com crescimento dirigido para sotavento, em relação ao sentido do paleofluxo de ar na cavidade).



b) feições em forma de grama: apresentam-se como um manto de espeleotemas finos com corpo cilíndrico a aproximadamente cilíndrico, sendo a porção apical comumente fina e alongada, pontiaguda (figuras 6.19 e 6.20). Apesar de muito próximos entre si, são individualizados. Num mesmo conjunto o tamanho dos espeleotemas pode variar entre 0,1 e 3 cm de comprimento, com diâmetros de até 0,5 cm. As cores variam entre diferentes tons de cinza, podendo apresentar áreas esbranquiçadas, principalmente na porção basal, no contato com a rocha. Não raro é fácil visualizar a ancoragem em grãos de feldspato ou quartzo (Figura 6.21).

Figura 6.10 – Espeleotemas cilíndricos de teto agrupados e coraloides associados. Diferente dos outros conjuntos deste tipo, as feições são mais finas e pontiagudas – Gruta do Oiteiro.



Fonte: a autora



Figura 6.11 – Espeleotemas cilíndricos de teto agrupados com até 1,5 cm de comprimento e 1 cm de diâmetro – Gruta do Oiteiro.



Fonte: a autora

Figura 6.12 – Espeleotemas cilíndricos de teto agrupados. Conjunto com as maiores feições dentre as cavernas estudadas – Gruta do Oiteiro.



Fonte: a autora

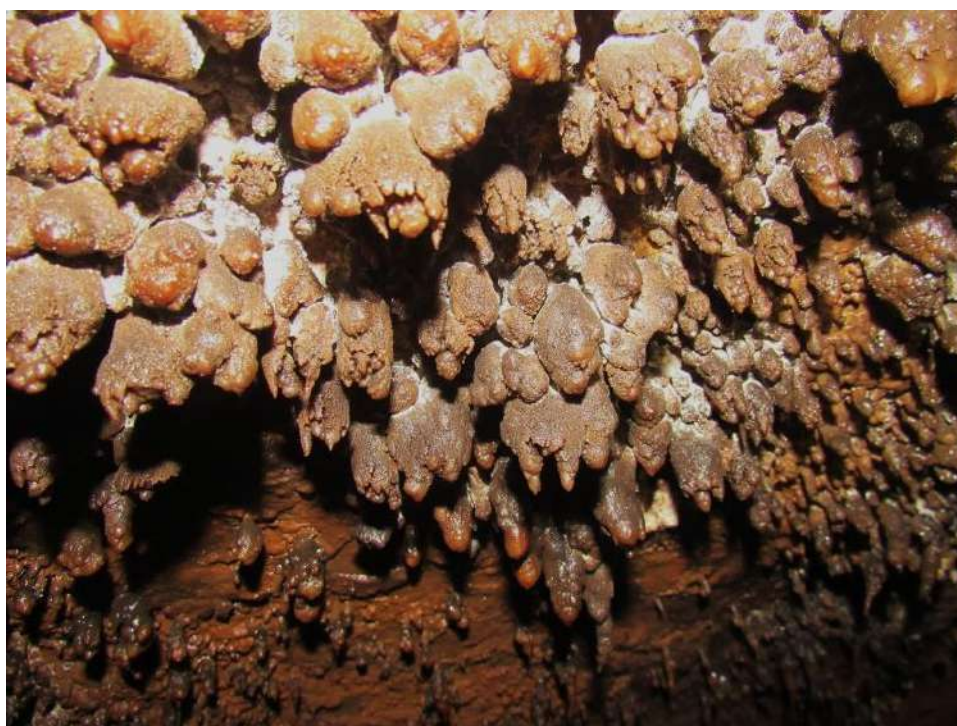


Figura 6.13 – Os maiores espeleotemas observados dentre as cavidades estudadas. De aspecto robusto, são bastante frágeis, principalmente pela presença de umidade, que amolece a base dos mesmos (neste caso com grande concentração de microrganismos) – Gruta do Oiteiro.



Fonte: a autora

Figura 6.14 – Detalhe do conjunto da Figura 6.12. A acreção sucessiva de material recobriu e uniu feições antes individualizadas, formando um núcleo de espeleotemas mais desenvolvidos, principalmente em largura.



Fonte: a autora



Figura 6.15 – Detalhe do conjunto de espeleotemas da Figura 6.11 mostrando um núcleo de feições maiores e muito próximas que vão ficando menores, mais espaçadas e com aspecto nodular na direção da borda do conjunto (porção superior da imagem).



Fonte: a autora

Figura 6.16 – Gotejamento em espeleotemas do conjunto da Figura 6.12, recobertos por microrganismos (porções de cor branca).



Fonte: a autora



Figura 6.17 – Conjunto de espeleotemas cilíndricos de teto, incluindo indivíduos com crescimento não vertical, inclinados em relação ao substrato.



Fonte: a autora

Figura 6.18 – Possíveis anemólitos. Diferente das feições agrupadas das quais estão próximos, além de inclinados, são mais finos e pontiagudos.



Fonte: a autora

Figura 6.19 – Espeleotemas em forma de grama, feições de teto próximas entre si, mas individualizadas, e com aspecto acicular predominante – SAC.



Fonte: a autora

Figura 6.20 – Outro conjunto de espeleotemas em forma de grama no SAC, onde foram realizadas coletas para análises de MEV, EDS, DRX e microscopia ótica.



Fonte: a autora



Figura 6.21 – Espeleotema coletado do conjunto da Figura 6.20 (amostra SAC 5A). Na base da feição, minerais primários do granito (quartzo e feldspato).



Fonte: a autora

### 6.1.2 Coraloides

A designação “coraloides” é consagrada na espeleologia (HILL e FORTI, 1995; ONAC e FORTI, 2011) e dada a espeleotemas com diferentes morfologias, as quais se assemelham a dos corais marinhos. Podem estar associados em um mesmo conjunto ou ocorrer individualmente. Nas cavernas estudadas esse é o tipo de espeleotema mais comum, distribuindo-se principalmente em paredes e teto, mas, ocasionalmente, no piso (Figura 6.22). A fim de detalhar melhor os coraloides encontrados, foram definidos aqui dois subtipos, os arborescentes e os nodulares.

#### 6.1.2.1 *Arborescentes*

Esta denominação aplica-se aos coraloides que se assemelham aos ramos e/ou copa de uma árvore, ou seja, com estrutura ramificada (figuras 6.23 e 6.24), os quais também são chamados de “couve-flor”. São feições que, no geral, possuem maior volume que os espeleotemas cilíndricos e apresentam coloração acinzentada. Foram observados também

conjuntos com coloração marrom, fruto do recobrimento por material de composição indeterminada (possivelmente ferruginoso e/ou com argilominerais) (Figura 6.25).

#### 6.1.2.2 *Nodulares*

Espeleotemas nodulares são como pequenos nós, também chamados de “pipocas”. Os conjuntos deste tipo de espeleotema foram observados principalmente em paredes. O tamanho é variável, chegando a até 3 cm de diâmetro (Figura 6.26), e as mesmas ocorrem tanto de forma individualizada (Figura 6.27) como agrupada (figuras 6.26 e 6.28). Usualmente apresentam coloração acinzentada, mas também foram observadas feições brancas, amareladas e alaranjadas.

Figura 6.22 – Coraloídes arborescentes e nodulares recobrindo todas as faces expostas de um bloco no piso da caverna - SAC.



Fonte: a autora

Figura 6.23 – Coraloides arborescentes no teto – Gruta do Saco Grande.



Fonte: Henrique Pontes

Figura 6.24 – Coraloides arborescentes na parede – Gruta do Oiteiro.



Fonte: a autora



Figura 6.25 – Coraloides arborescentes no teto – Gruta da Trilha do Saquinho I.



Fonte: a autora

Figura 6.26 – Coraloides nodulares agrupados na parede – Gruta da Trilha do Saquinho I.



Fonte: a autora



Figura 6.27 – Coraloides nodulares individualizados em parede – SAC.



Fonte: a autora

Figura 6.28 – Coraloides nodulares agrupados em parede e opiliões – Gruta das Feiticeiras.



Fonte: a autora

### 6.1.3 Espeleotemas planares

Este tipo de espeleotema está associado principalmente a faces inclinadas e verticais de matacões por onde há fluxo perene ou intermitente de água, a qual circula/circulou como um “lençol” ou de maneira concentrada (em filetes) sobre o substrato rochoso. Por essas características foi adotada aqui a designação *flowstone* (não há uma tradução consensual para o português. O termo em espanhol, colada, tal como no inglês, invoca a conexão do material rochoso com fluxos/derrames, neste caso hídricos) para essas feições (HILL e FORTI, 1995).

Os *flowstones* em “lençol” foram observados em paredes e associados ao leito e margens de um curso d’água (referido anteriormente como curso B). As feições de parede consistem em mantos de coloração negra (figuras 6.29 e 6.30) de espessura variável (a amostra coletada tem 0,5 cm). A textura é caracterizada por microconcavidades ou microbarragens (Figura 6.31), ornamentação denominada de *microgours* (ROMANÍ *et al.*, 2014). Em uma das ocorrências foram observados setores com morfologia diferenciada, caracterizada por linhas paralelas de relevo pronunciado orientadas no sentido do fluxo da água, o que pode indicar concentrações pontuais do escoamento (Figura 6.32) e, consequentemente, maior acúmulo de material.

Na feição associada à drenagem (Figura 6.33a) a textura é lisa, o que se dá em função do polimento pela água (figuras 6.33c, d). A ação fluvial posterior à formação dos depósitos é comprovada também pela existência de remanescentes destas crostas preservadas da erosão (Figura 6.33b). Além de recobrir o granito, o manto negro também reveste/envolve seixos ligados à drenagem (Figura 6.33c).

Os *flowstones* derivados de uma circulação de água em filete se formam em paredes e tetos inclinados e constituem feições lineares com uma morfologia serrilhada ou dentada, sendo estes “dentes” do mesmo tamanho e regularmente espaçados (Figura 6.34). Provavelmente são *microgours* mais desenvolvidos, o que mostra a ocorrência observada na Gruta da Jararaca, onde o espeleotema apresenta uma ornamentação de relevo mais suave em um segmento seguida de estruturas mais pronunciadas em outro (Figura 6.34b). A coloração varia entre cores claras (branco e alaranjado) e escuras (cinza escuro e preto). Embora possuam alguma resistência, são bastante frágeis, desagregando-se com facilidade ao contato. A amostra analisada foi coletada de um conjunto na Gruta do Saco Grande (GSG 2; Figura 6.35), pois até então não se tinha observado este tipo de espeleotema no SAC, o que aconteceu na última etapa de campo da pesquisa (Figura 6.34a).

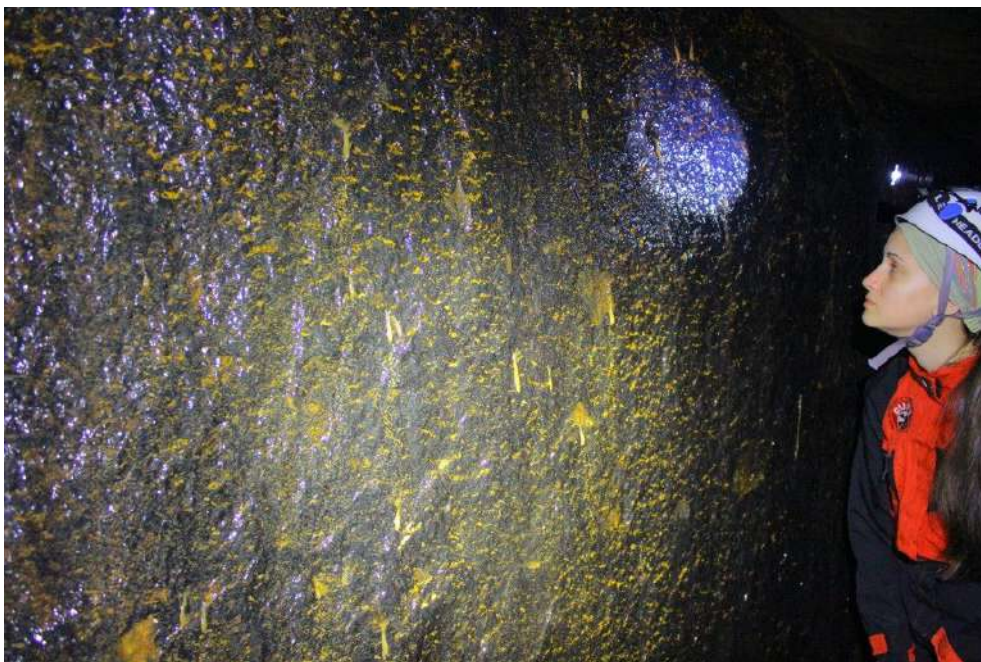


Figura 6.29 – Espeleotema planar do tipo *flowstone* em parede – SAC.



Fonte: a autora

Figura 6.30 – Aproximação no espeleotema da Figura 6.29. A água escorre de forma lenta, como um lençol sobre a rocha.



Fonte: Henrique Pontes

Figura 6.31 – O *flowstone* em detalhe (amostra SAC 14). Uma fina crosta de deposição ornamentada por *microgours* – SAC.



Fonte: a autora

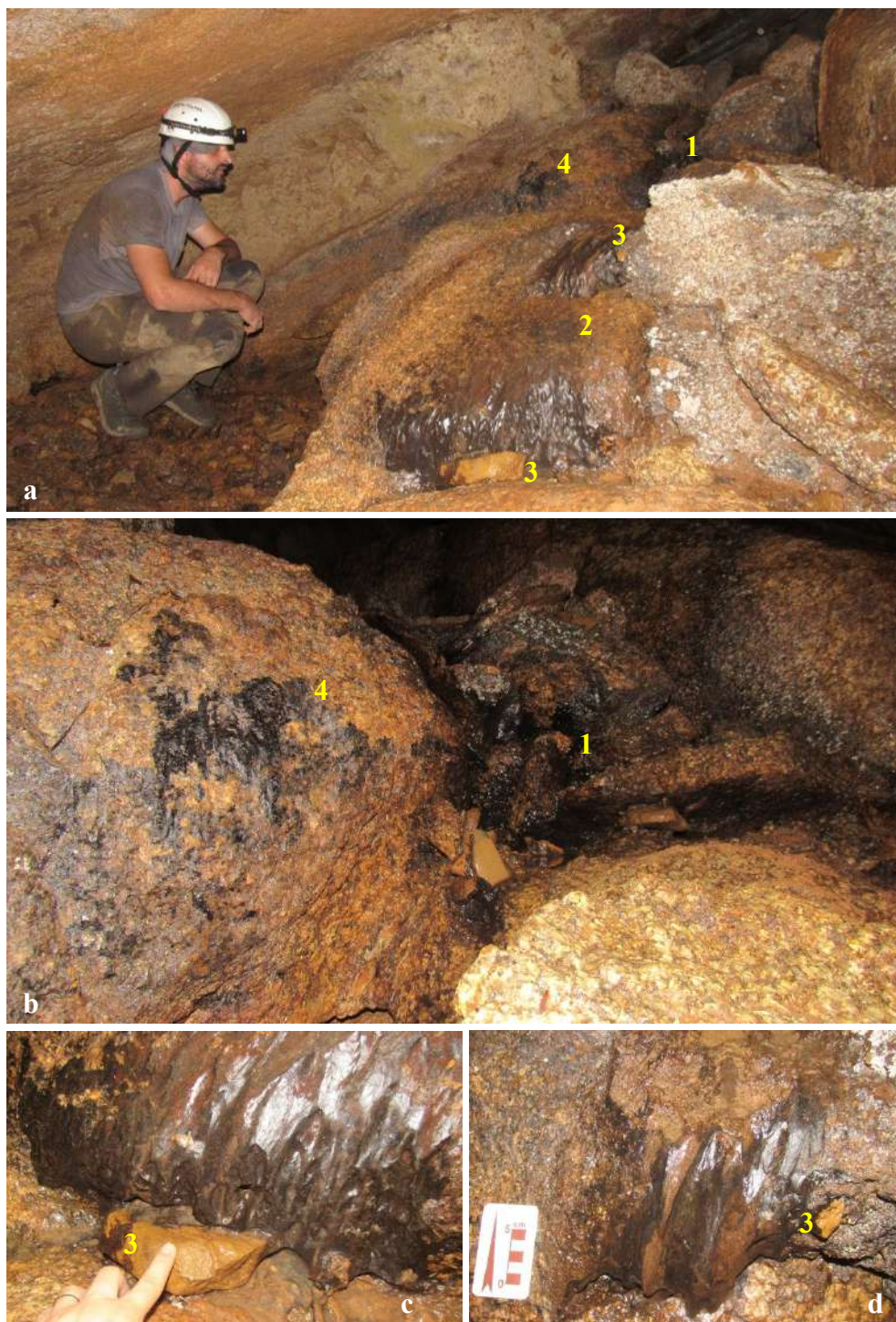
Figura 6.32 – Setor com morfologia diferenciada em *flowstone* de parede – SAC.



Fonte: Rodrigo Dalmolin



Figura 6.33 – Ocorrência de *flowstone* no leito (1) e nas margens (2) de um pequeno curso d'água que corta o SAC. O material precipitado envolve seixos associados à drenagem e ruditos (3) e em alguns locais aparece polido (3) e desgastado pela erosão fluvial (4). As imagens b, c e d são detalhes de setores em a.



Fonte: a autora

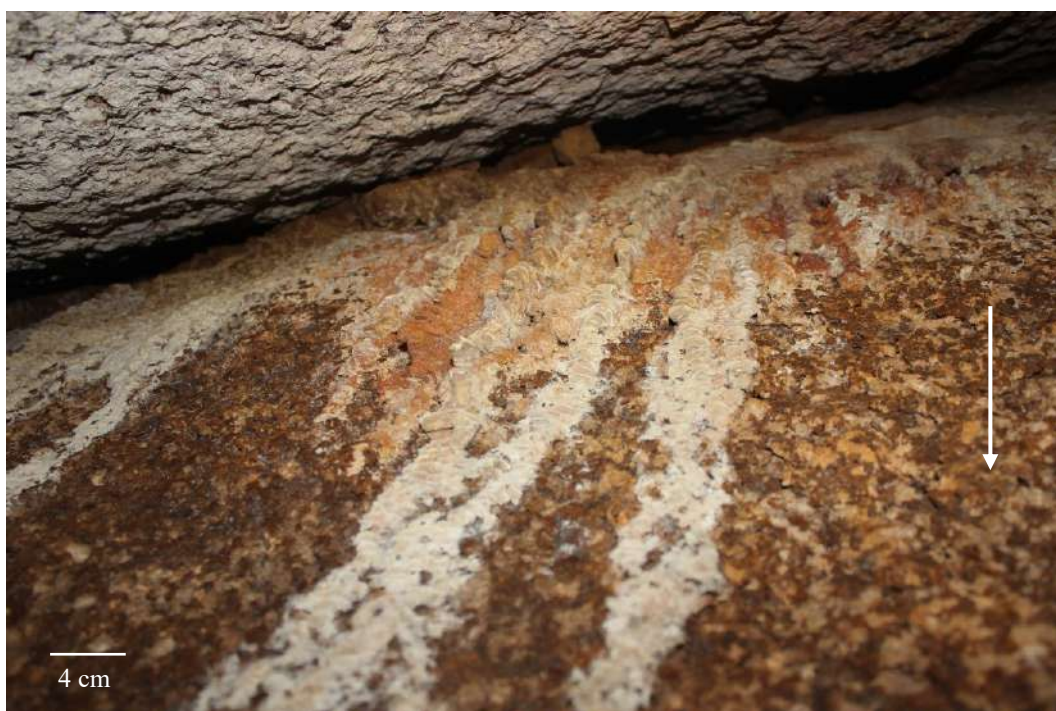


Figura 6.34 – *Flowstone* associado à circulação concentrada da água (em filete): a) em matacão no teto do SAC. As proeminências possuem cerca de 0,5 cm do ápice à base; b) em matacão no teto da Gruta da Jararaca. Na porção superior a ornamentação tem relevo mais suave (seta).



Fonte: a autora (a); Rodrigo Dalmolin (b)

Figura 6.35 – *Flowstone* associado à circulação concentrada da água (a seta indica o sentido do fluxo) em pontos próximos, gerando feições lineares paralelas em parede na Gruta do Saco Grande (local de coleta da amostra GSG 2, submetida às análises de MEV e DRX).



Fonte: Henrique Pontes

## 6.2 CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA

A análise em lupa estereoscópica associada ao uso de MEV e microscopia ótica possibilitou o detalhamento petrográfico dos espeleotemas amostrados, principalmente de aspectos texturais, estruturais e mineralógicos que não são visíveis a olho nu. Em relação aos aspectos mineralógicos, as análises de DRX ajudaram a complementar e confirmar as informações da microscopia ótica.

Ao menos um subtipo dentro dos principais tipos de espeleotemas descritos anteriormente foi submetido a alguma das técnicas laboratoriais acima citadas (vide item 3.3), permitindo, além de descrevê-los, estabelecer diferenças e similaridades entre os mesmos em termos microscópicos.

### 6.2.1 Textura

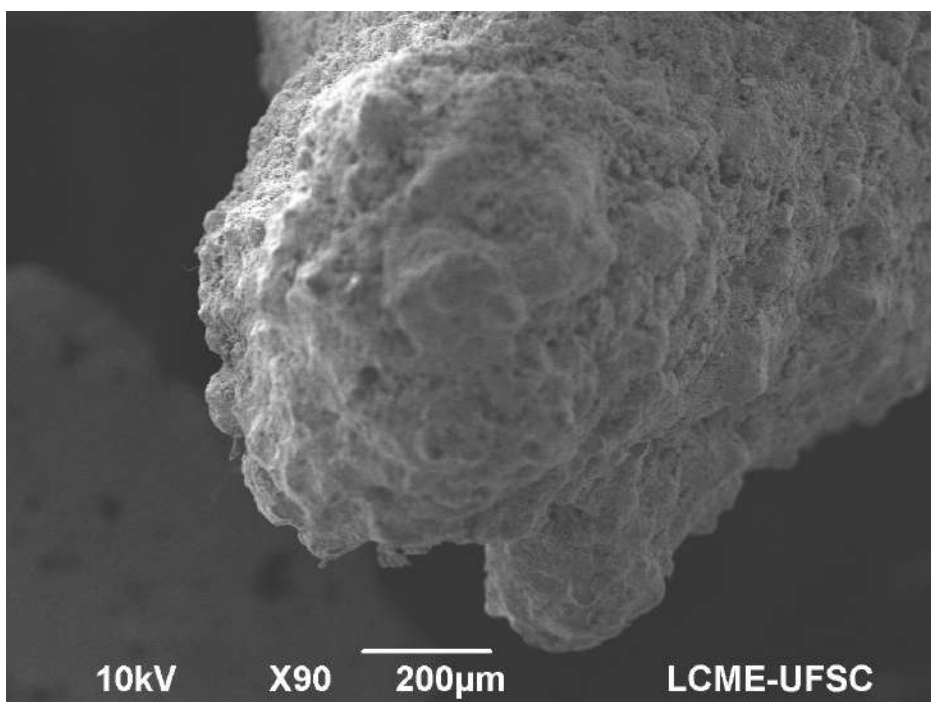
Os espeleotemas cilíndricos de teto (amostra SAC 5A) e de piso (amostra SAC 4) apresentam uma superfície externa com textura variando entre rugosa e granular (figuras 6.36

e 6.37a). No caso da feição de teto alguns setores exibem textura globular, caracterizada por microesferas coalescidas (Figura 6.38).

Internamente, ambas as amostras são caracterizadas por uma massa amorfa que, principalmente naquela proveniente do piso, tem aspecto poroso (figuras 6.37a e 6.39). Nas feições de teto esta porosidade é mais pronunciada nas bordas (contato superfície externa-interna) (Figura 6.40) e, pontualmente, aparecem concavidades e buracos maiores internamente (figuras 6.38 e 6.40). Na microscopia ótica foi possível identificar microcristais aprisionados nessa matriz amorfa em ambos os tipos de espeleotemas, o que será abordado adiante quando da descrição mineralógica das amostras.

Nos coraloídes arborescentes (amostras GSG 1A e GSG 1B) a superfície externa tem textura globular, formada por microesferas de tamanho relativamente uniforme ( $\sim 0,1$  mm ou  $100\text{ }\mu\text{m}$ ) colmatadas e recobertas por uma crosta de material precipitado (Figura 6.41). Embora apresentem uma morfologia ramificada, internamente, em áreas de quebra, não sustentam esse padrão. São semelhantes às feições cilíndricas, caracterizadas por uma massa de material amorfo de textura porosa (Figura 6.42). O coraloíde nodular analisado (amostra SAC 12) possui superfície externa irregular e, internamente, é semelhante aos demais tipos de espeleotemas descritos (Figura 6.43).

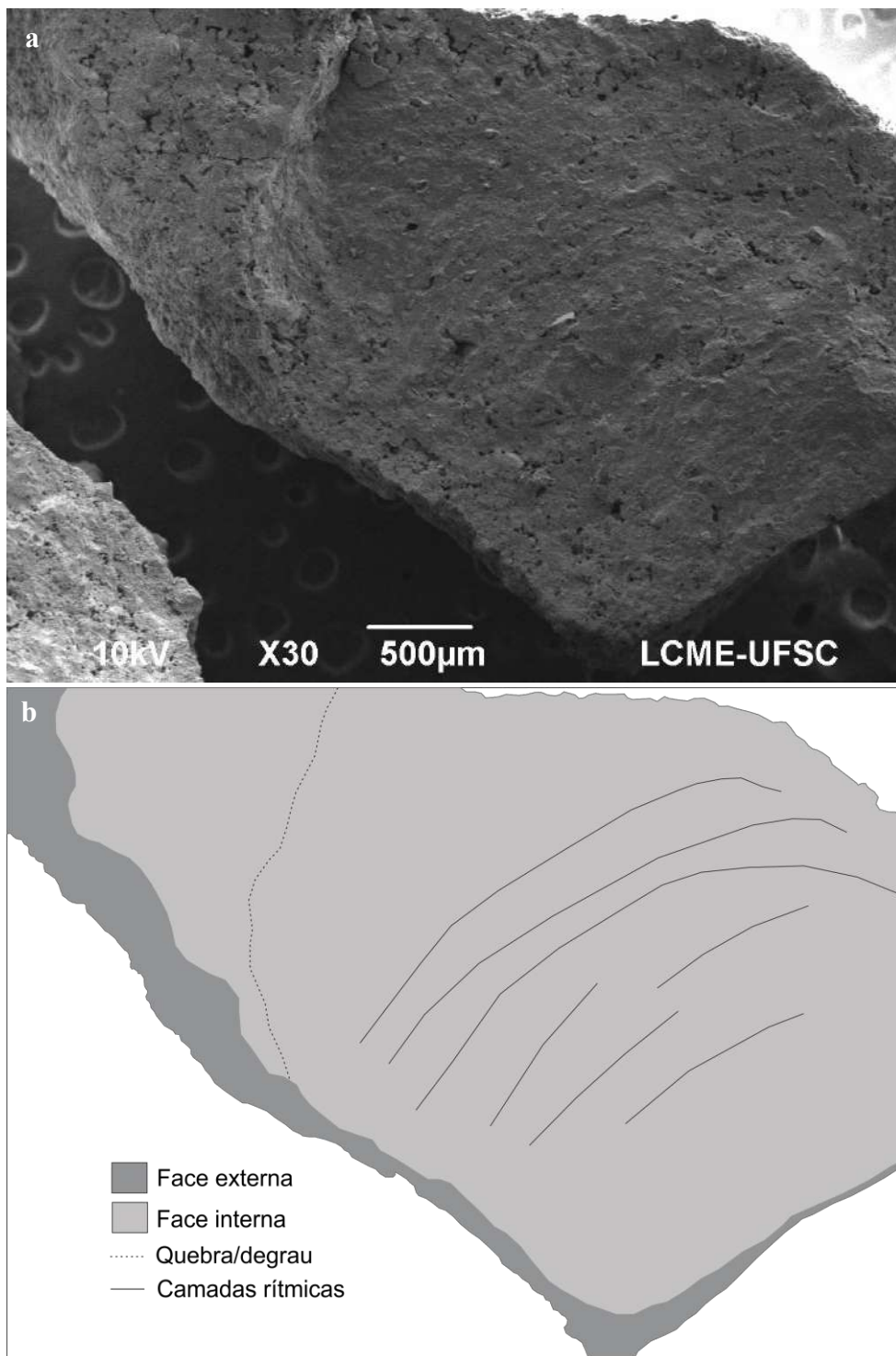
Figura 6.36 – Imagem de MEV da ponta da amostra SAC 5A, apresentando uma superfície irregular, de aspecto rugoso-granular.



Fonte: LCME-UFSC

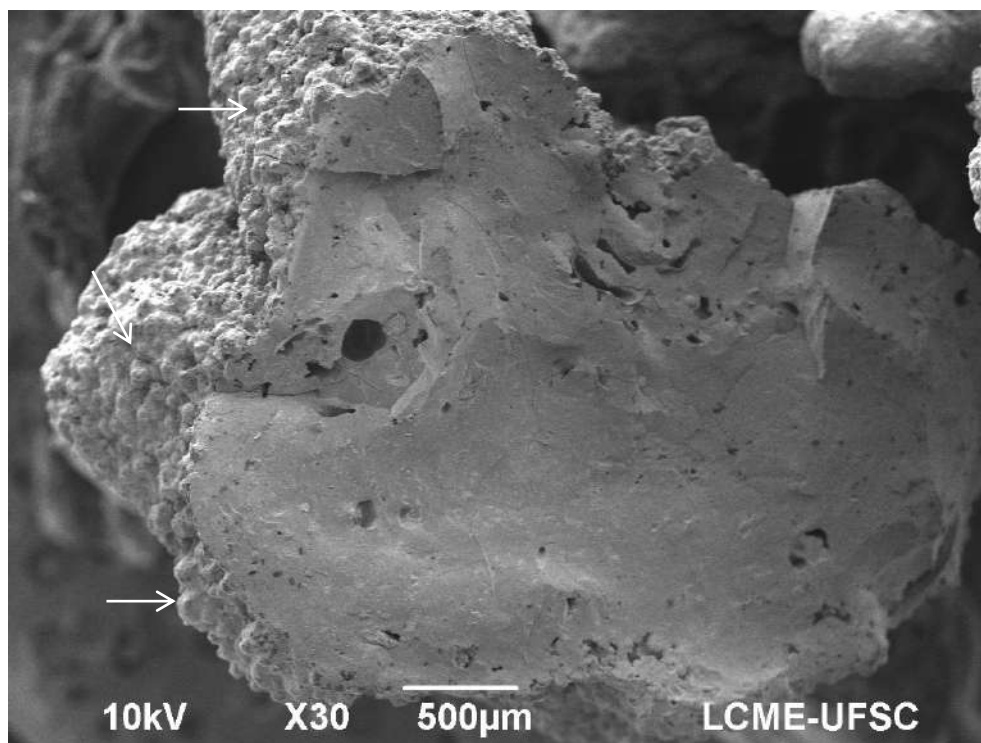


Figura 6.37 – Corte longitudinal da amostra SAC 4: a) a superfície externa é irregular, de textura rugosa, já a face interna mostra que a massa amorfa tem aspecto poroso; b) croqui da Figura 6.37a, evidenciando a estrutura interna organizada em camadas rítmicas, sutil na imagem de MEV.



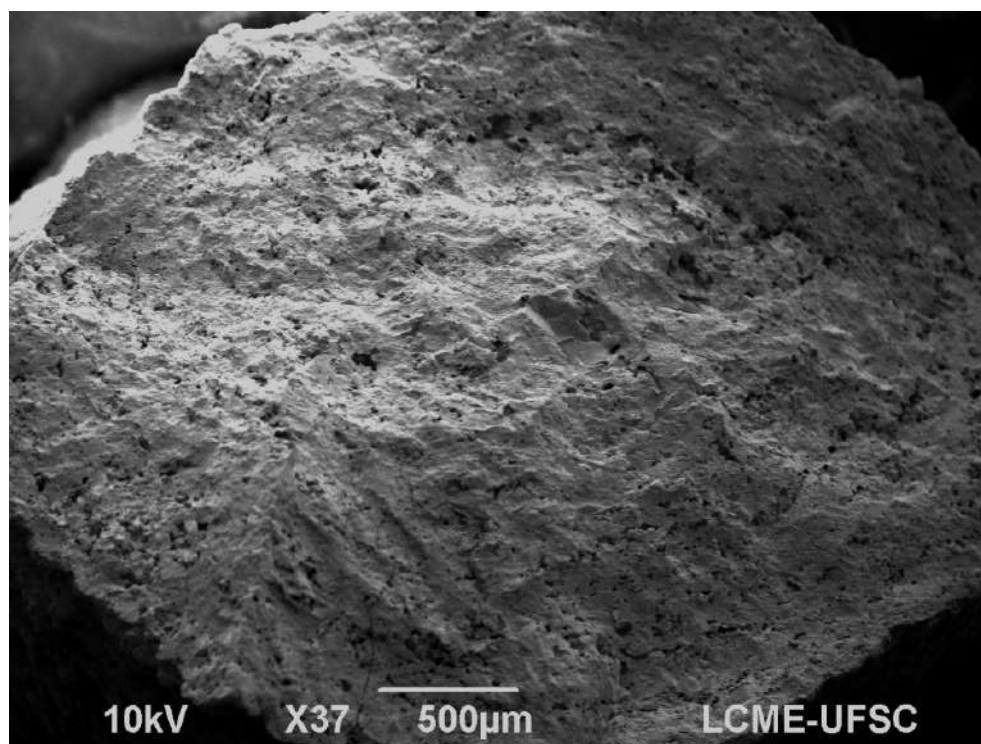
Fonte: LCME-UFSC (a); a autora (b)

Figura 6.38 – Imagem de MEV de corte transversal na amostra SAC 5A. A superfície externa é formada por microesferas coalescidas (setas).



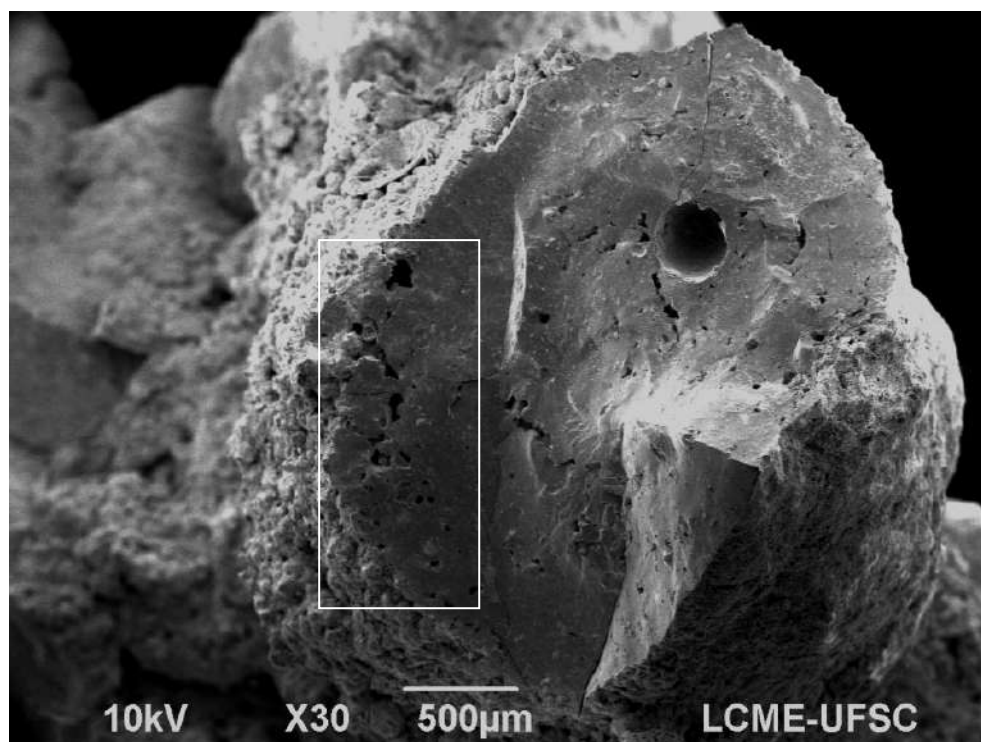
Fonte: LCME-UFSC

Figura 6.39 – Imagem de MEV de corte transversal na amostra SAC 4. A superfície interna é caracterizada por uma massa amorfa de textura porosa. Nesta seção é possível ver melhor a estrutura em camadas rítmicas concêntricas.



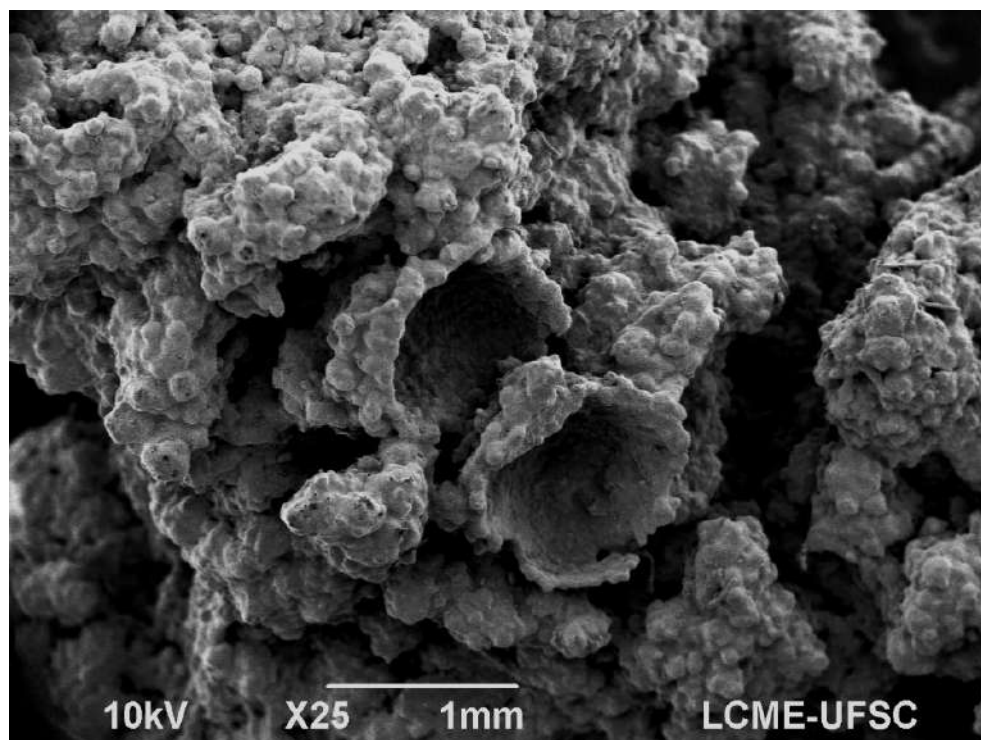
Fonte: LCME-UFSC

Figura 6.40 – Imagem de MEV de corte transversal na amostra SAC 5A. A porosidade é mais pronunciada na borda (em destaque). Concavidades e buracos maiores foram observados internamente.



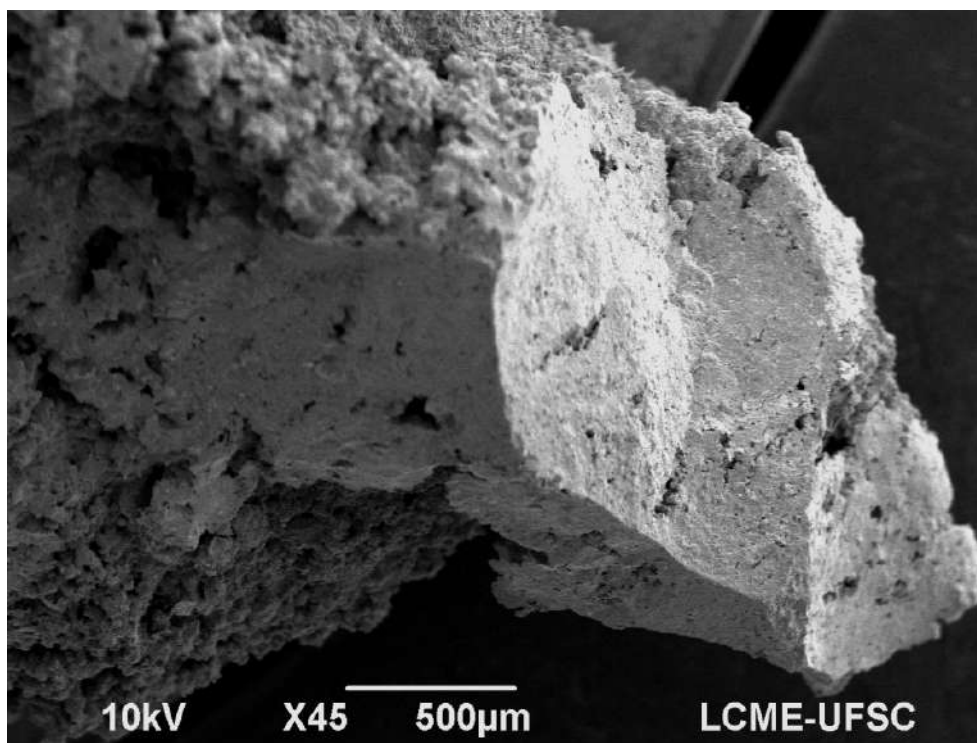
Fonte: LCME-UFSC

Figura 6.41 – Imagem de MEV da superfície externa de coraloide arborescente (amostra GSG 1A). A textura é globular, formada por microesferas colmatadas.



Fonte: LCME-UFSC

Figura 6.42 – Imagem de MEV de superfícies de quebra de coraloide arborescente (amostra GSG 1A).



Fonte: LCME-UFSC

Figura 6.43 – Imagem de MEV de corte transversal de coraloide nodular (amostra SAC 12).



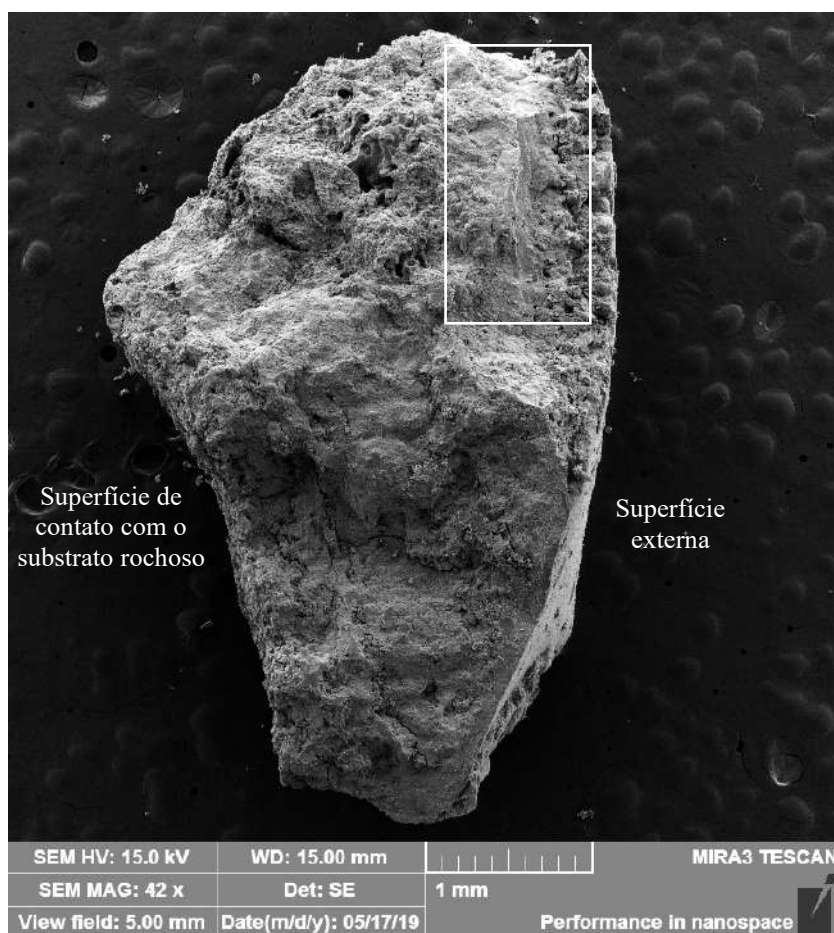
Fonte: C-LABMU-UEPG



Dentre os *flowstones*, a amostra SAC 14 é caracterizada por um relevo com pequenas concavidades ou barreiras, as quais, principalmente em suas bases (área que propicia a retenção de material transportado pela água) possuem uma superfície rugosa (ver Figura 6.31). Nos demais setores (principalmente aqueles com alguma convexidade) a superfície tem aspecto liso e lustroso, resultado do polimento por ação da água. Internamente (perfil da crosta) é constituído de uma massa de textura amorfa e porosa (Figura 6.44).

A superfície externa da amostra GSG 2 é rugosa, caracterizada por um agregado de minúsculos grumos esféricos (Figura 6.45). Internamente, mostra-se como uma massa amorfa porosa e mostra estruturas que lembram gretas de contração (Figura 6.46), provavelmente geradas no processo de preparação do material (secagem em estufa).

Figura 6.44 – Imagem de MEV do perfil da crosta que constitui o *flowstone* (amostra SAC 14). Em destaque, setor com estrutura estratificada.



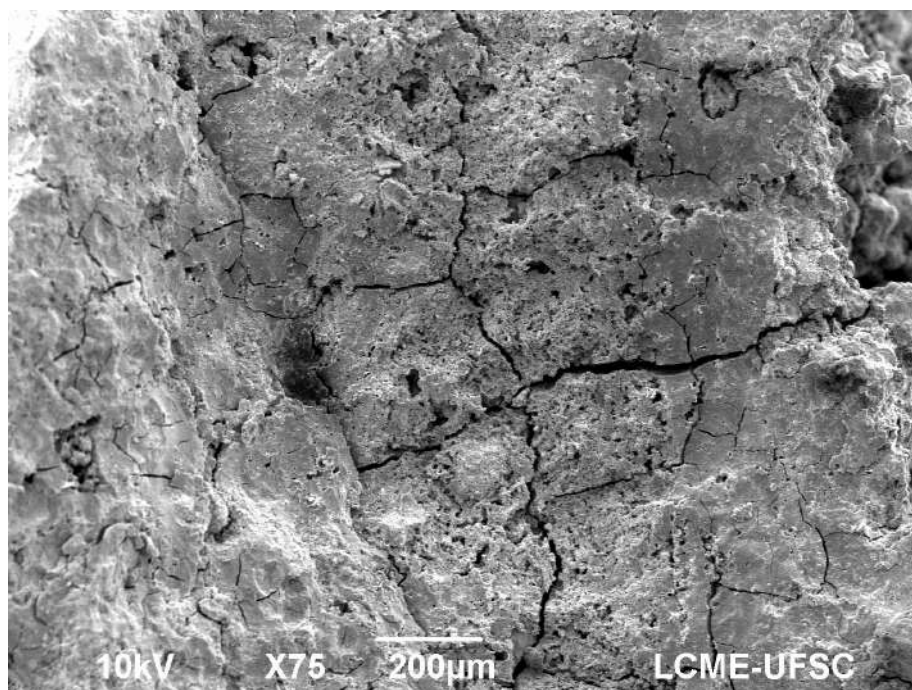
Fonte: C-LABMU-UEPG

Figura 6.45 – Amostra GSG 2, *flowstone* de morfologia linear dentada formado em área com escoamento lento e concentrado de água (em filete). A superfície externa é formada por um agregado de minúsculos grumos esféricos. As linhas pronunciadas (*microgours*) indicam onde houve maior acúmulo/precipitação de material.



Fonte: a autora

Figura 6.46 – Imagem da superfície interna da amostra GSG 2 obtida por MEV, mostrando aspecto poroso e rachaduras que lembram gretas de contração, formadas provavelmente no processo de secagem do material em estufa.



Fonte: LCME-UFSC

### 6.2.2 Estrutura

Os espeleotemas cilíndricos e coraloides possuem uma estrutura estratificada, com vetores de crescimento da base para porção apical e do centro para as bordas, caracterizada por camadas rítmicas micrométricas de coloração escura e clara, as quais são perceptíveis a olho nu quando da observação de áreas de quebra nas feições (figuras 6.47a, b). As imagens obtidas com o uso de MEV não evidenciaram de forma tão nítida essa estrutura, sutilmente percebida na amostra do espeleotema cilíndrico de piso (figuras 6.37 e 6.39) e do coraloide nodular (Figura 6.43), mas foi possível observá-la e descrevê-la melhor a partir da análise de lâminas delgadas em lupa e microscópio petrográfico.

No espeleotema cilíndrico de piso as camadas rítmicas refletem a morfologia da feição, convexas em relação ao sentido de crescimento base-ápice, o que é possível verificar em um corte longitudinal na amostra analisada (figuras 6.47a e 6.48). Em cortes transversais as camadas aparecem como círculos concêntricos.

Em relação à estrutura, é possível distinguir três setores principais na amostra SAC 4: basal, intermediário e apical (Figura 6.48). Os microestratos são mais visíveis na porção basal do espeleotema, onde acompanham a morfologia do substrato (neste caso, grãos de quartzo do granito), sucedendo-se num desenho levemente convexo. Já na porção intermediária há uma região central onde não é possível identificar a organização em estratos. Este núcleo é contornado por uma sequência de camadas concêntricas com curvatura bem pronunciada. Na porção apical as laminações rítmicas não estão nítidas.

No espeleotema cilíndrico de teto (em forma de grama), as camadas rítmicas são visíveis ao longo de toda a amostra (figuras 6.47b e 6.49), com padrão concêntrico em cortes transversais e, longitudinalmente, organizadas em função de um eixo central que orienta a morfologia da feição, convexas em relação ao sentido de crescimento da mesma.

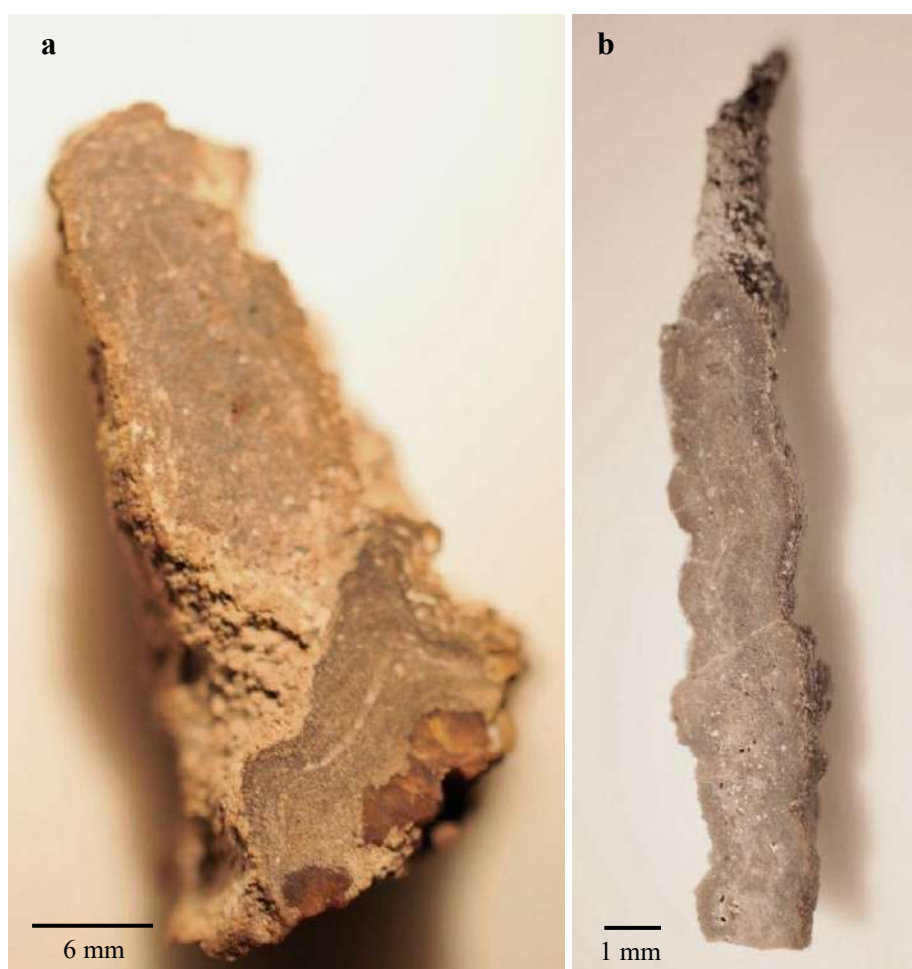
As lâminas delgadas dos coraloides arborescentes contemplaram apenas fragmentos isolados das amostras, mas mesmo não tendo um panorama completo das feições é possível observar o arranjo rítmico concêntrico. Há sucessões de microestratos em cada uma das ramificações dos espeleotemas, orientados no sentido de crescimento dos mesmos (Figura 6.50).

No coraloide nodular as camadas rítmicas são bastante nítidas em lupa, sendo mais sutis ao MEV (Figura 6.43). A amostra possui três pequenas pontas que derivam do corpo principal do espeleotema (Figura 6.51), e os microestratos orientam essa morfologia.

No caso do *flowstone* referente à amostra SAC 14, seja a olho nu, seja na observação em lupa, a estrutura é aparentemente maciça. No entanto, na análise de MEV é possível identificar setores estratificados na amostra (figuras 6.44 e 6.52), principalmente próximo à superfície externa, o que mostrou que ela não possui uma estrutura homogênea. No caso da outra amostra de *flowstone* (GSG2), não foi observada estrutura em camadas em nenhuma das análises.

Este aparente contraste em relação aos dos espeleotemas cilíndricos e coraloides, organizados em camadas rítmicas de constatação mais imediata, pode sugerir comportamentos distintos de mudanças pós-deposicionais, ligados às diferenças composicionais (ver adiante) e aprisionamento e retenção de clastos de origem mineral ou orgânica.

Figura 6.47 – Cortes longitudinais nos espeleotemas cilíndricos: a) amostra SAC 4 evidenciando a estrutura organizada em camadas rítmicas, especialmente na porção basal; b) amostra SAC 5A ( porção intermediária e apical) onde é nítida a estrutura organizada em camadas rítmicas a partir de um eixo de crescimento também longitudinal.



Fonte: Edison R. Tomazzoli



Figura 6.48 – Lâmina da amostra SAC 4 (nicóis paralelos), dividida em setores a partir de suas características estruturais. Espeleotema assentado sobre o substrato granítico (aqui, apenas cristais de quartzo).

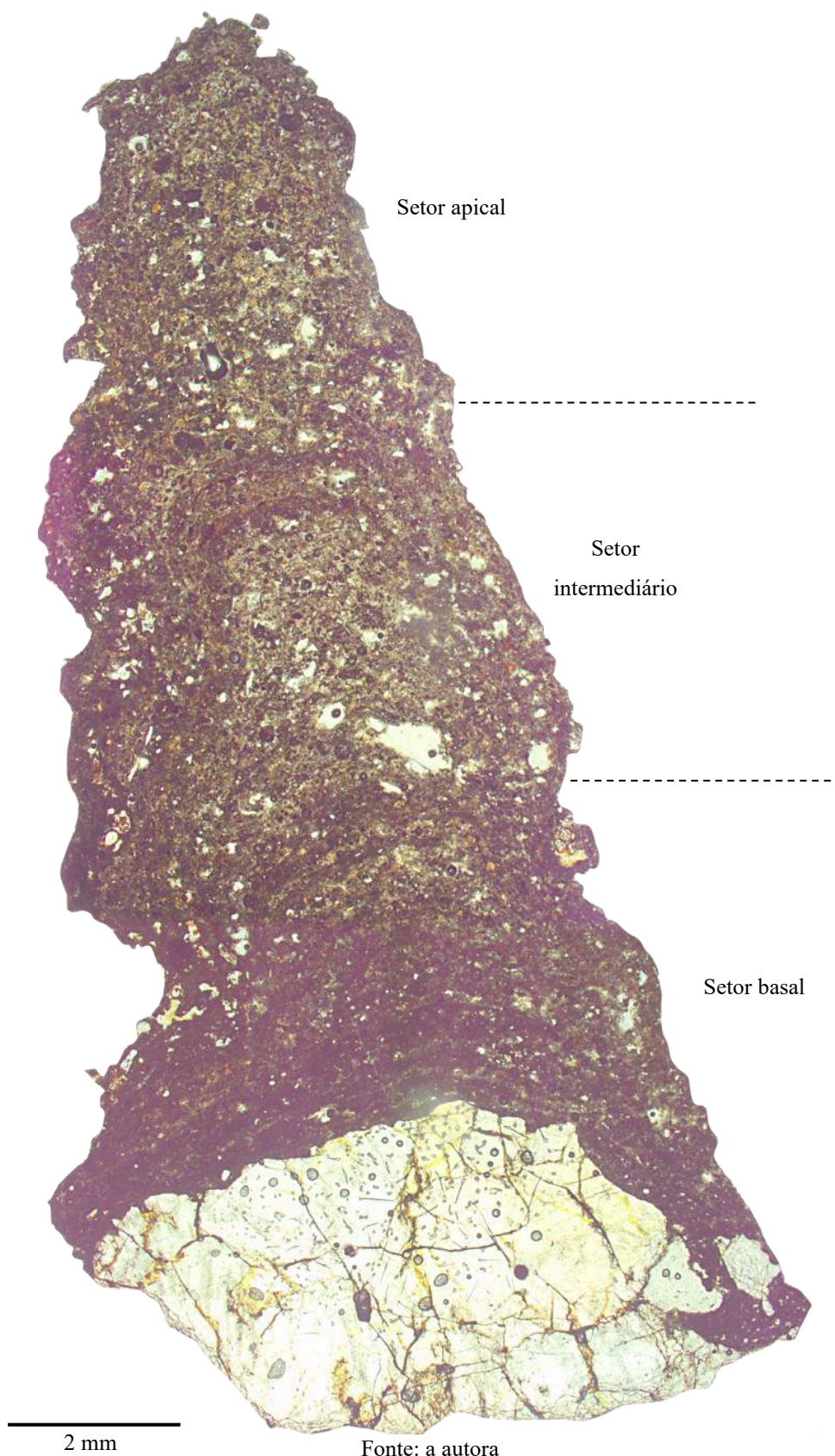
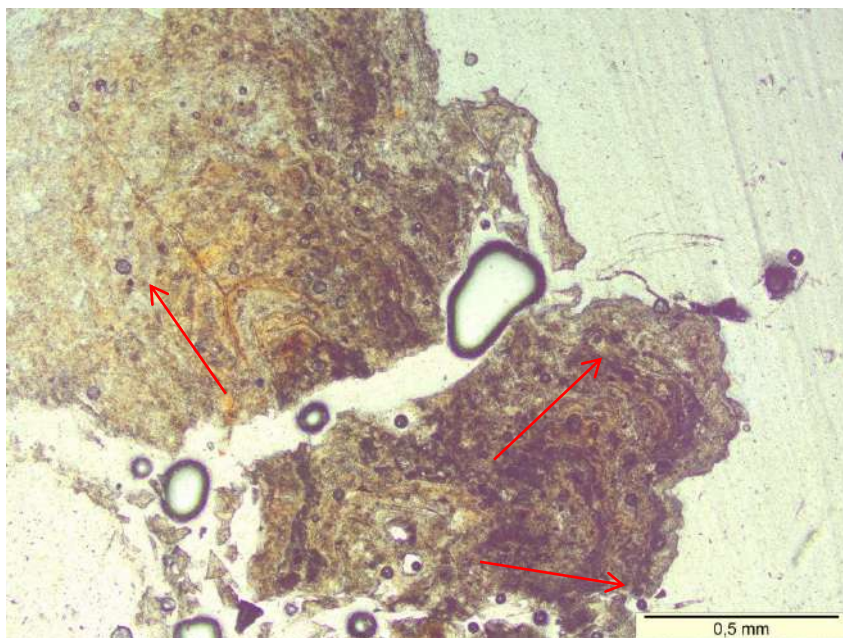


Figura 6.49 – Mosaico das lâminas da amostra SAC 5A (obtido em lupa estereoscópica). As porções intermediária e apical correspondem à Figura 6.47b. Na base da imagem cristais de quartzo do substrato granítico.



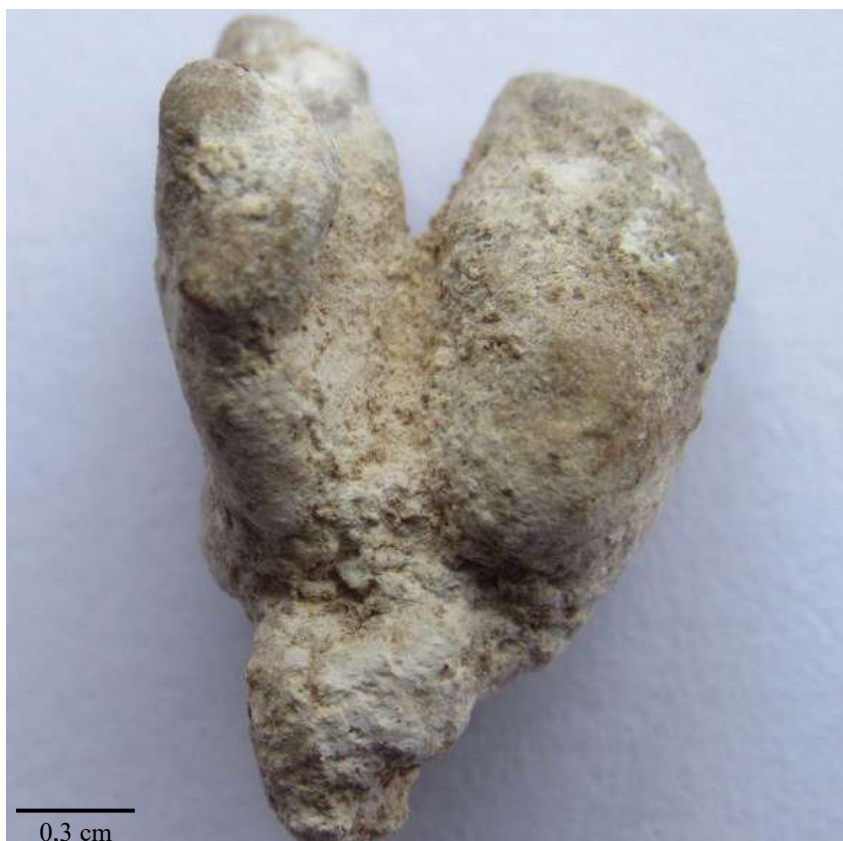
Fonte: a autora

Figura 6.50 – Lâmina de um fragmento da amostra SAC 6 (nicóis paralelos). As camadas rítmicas acompanham as ramificações do espeleotema (setas). As bolhas e fraturas representam defeitos na confecção da lâmina, em função da porosidade e fragilidade do material.



Fonte: a autora

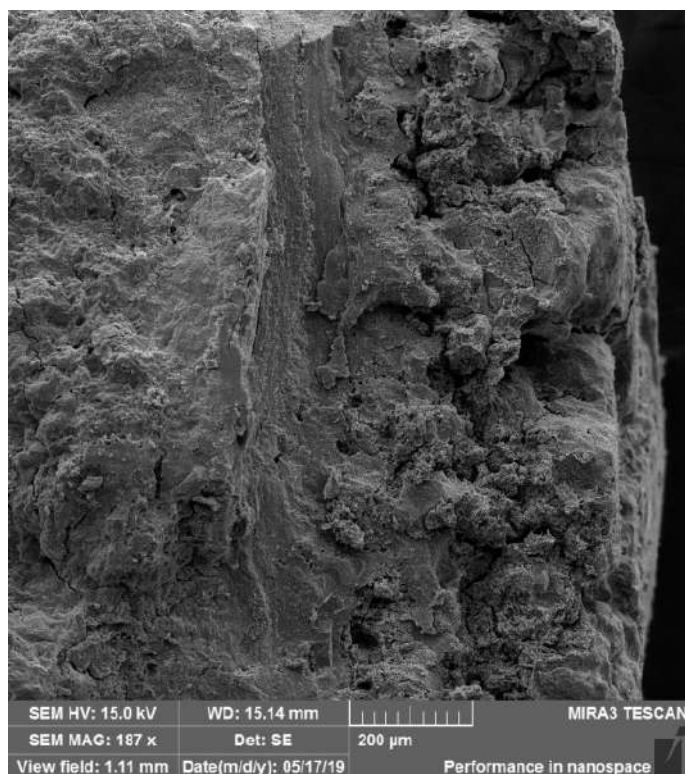
Figura 6.51 – Aspectos da morfologia do coraloide nodular (amostra SAC 12).



Fonte: a autora



Figura 6.52 – Setor com estrutura estratificada no *flowstone* (amostra SAC 14). Aumento na área destacada da Figura 6.44.



Fonte: C-LABMU-UEPG

### 6.2.3 Caracterização mineralógica

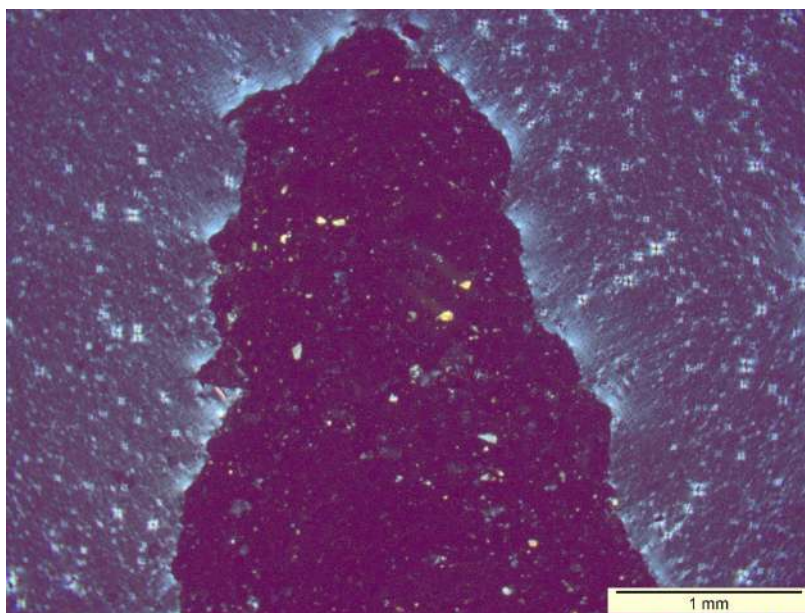
A caracterização mineralógica dos espeleotemas está baseada principalmente nas análises de microscopia ótica e de DRX, que se complementaram, permitindo assim uma interpretação mais segura dos dados obtidos, à luz da bibliografia pertinente ao tema.

#### 6.2.3.1 Espeleotemas cilíndricos e coraloides

Os espeleotemas cilíndricos e coraloides são constituídos por uma matriz amorfa, com comportamento isótropo ao microscópio petrográfico (Figura 6.53). Com nicóis paralelos essa matriz é de coloração clara (tons de bege e marrom) e aspecto fosco (Figura 6.54). Ao longo do corpo dos espeleotemas, imersos na matriz amorfa, aparecem grãos detríticos de quartzo (Figura 6.55), feldspato (Figura 6.56), biotita (Figura 6.57) e magnetita (Figura 6.58), todos estes minerais presentes no Granito Ilha. Este material detrítico é visível em maior quantidade e tamanho no espeleotema cilíndrico de piso (SAC 4) do que no espeleotema cilíndrico de teto (SAC 5A).

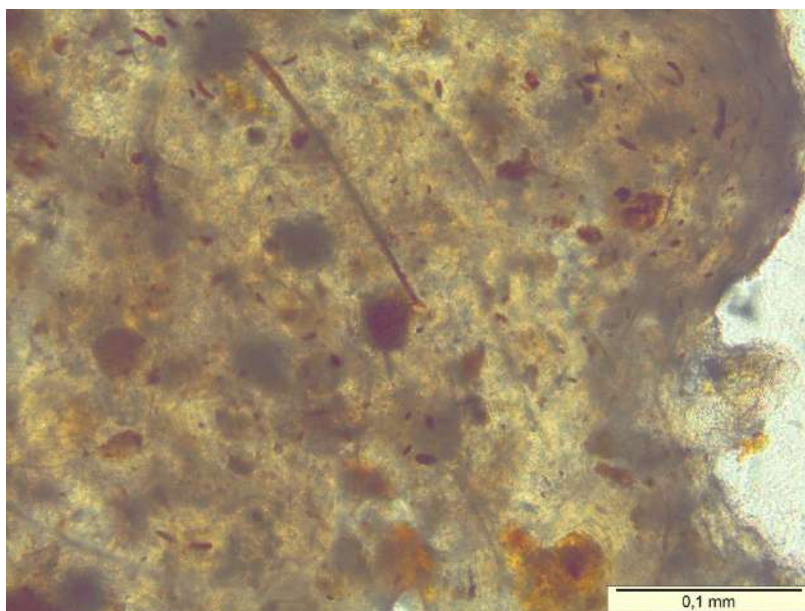


Figura 6.53 – Setor apical e parte do setor intermediário da amostra SAC 4 ao microscópio ótico (nicóis cruzados). A matriz amorfa é isótropa, já os pequenos pontos com birrefringência são grãos detríticos de minerais como quartzo, feldspato e biotita.



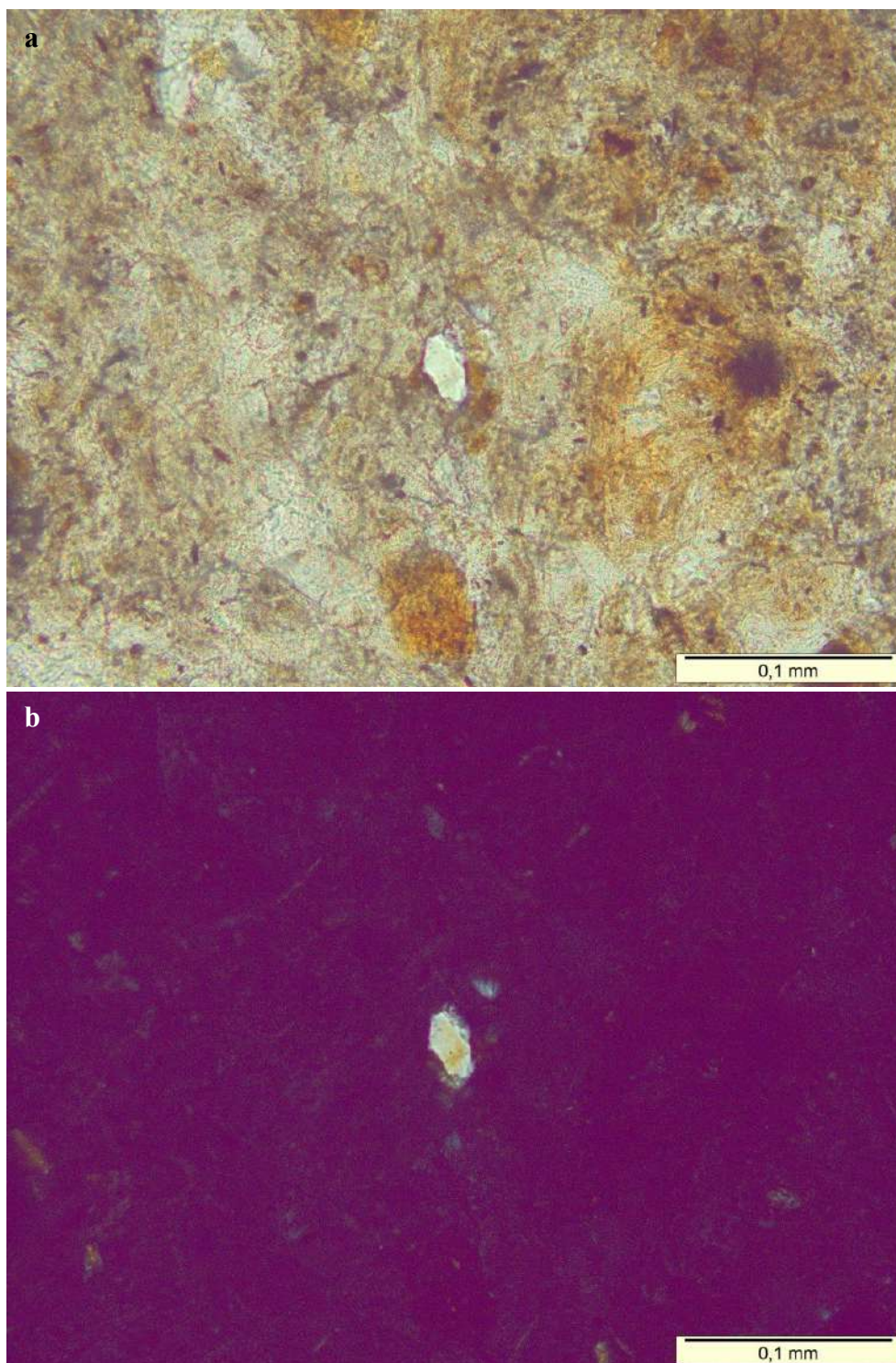
Fonte: a autora

Figura 6.54 – Setor apical da amostra SAC 5A ao microscópio ótico (nicóis paralelos). A matriz tem coloração clara e aspecto fosco/enevado. Os elementos arredondados e aciculares representam grãos de minerais detríticos e material biológico.



Fonte: a autora

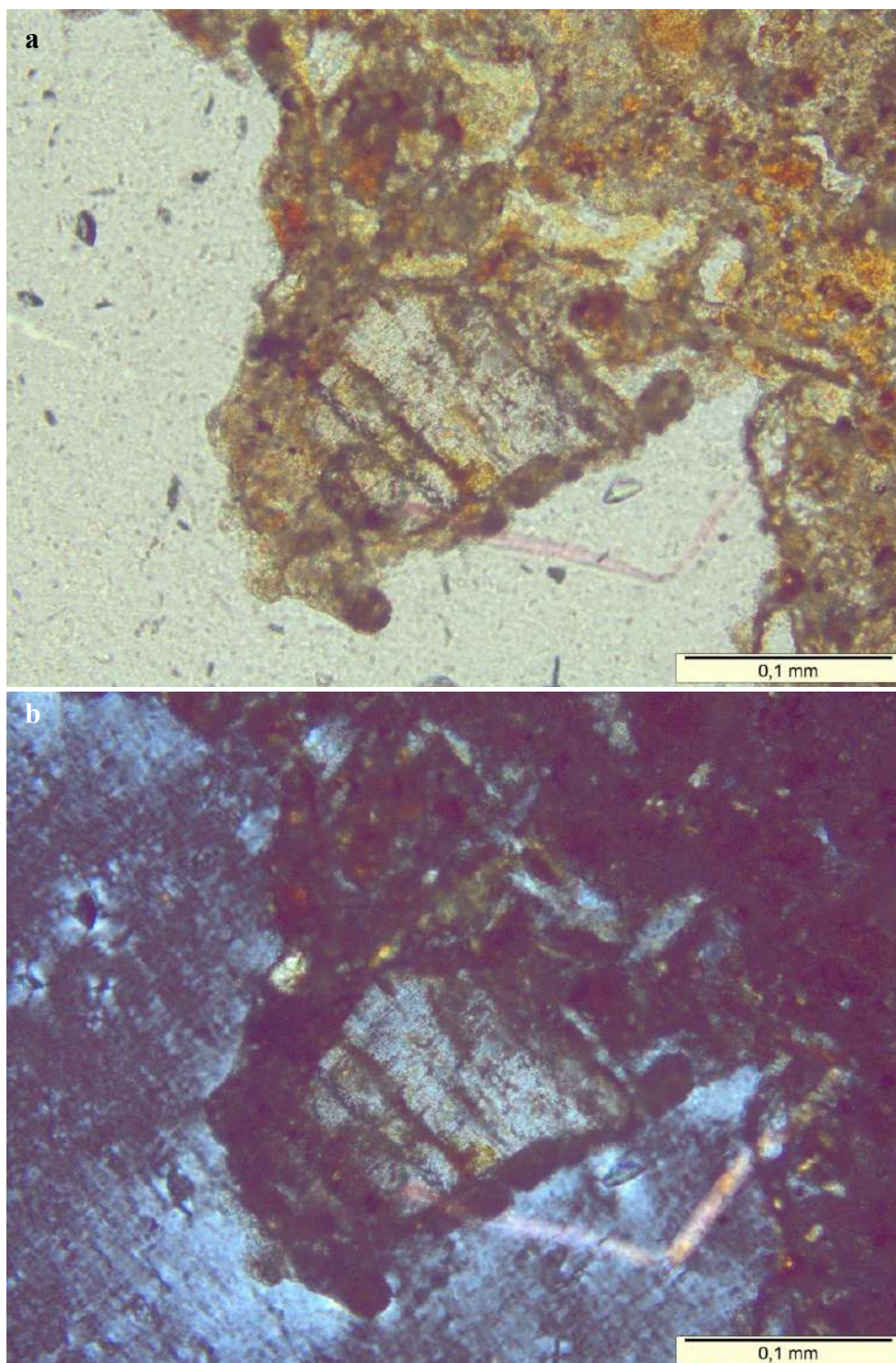
Figura 6.55 – Grão de quartzo na matriz amorfa do espeleotema cilíndrico de teto (amostra SAC 5A): a) imagem com nicóis paralelos; b) imagem com nicóis cruzados.



Fonte: a autora

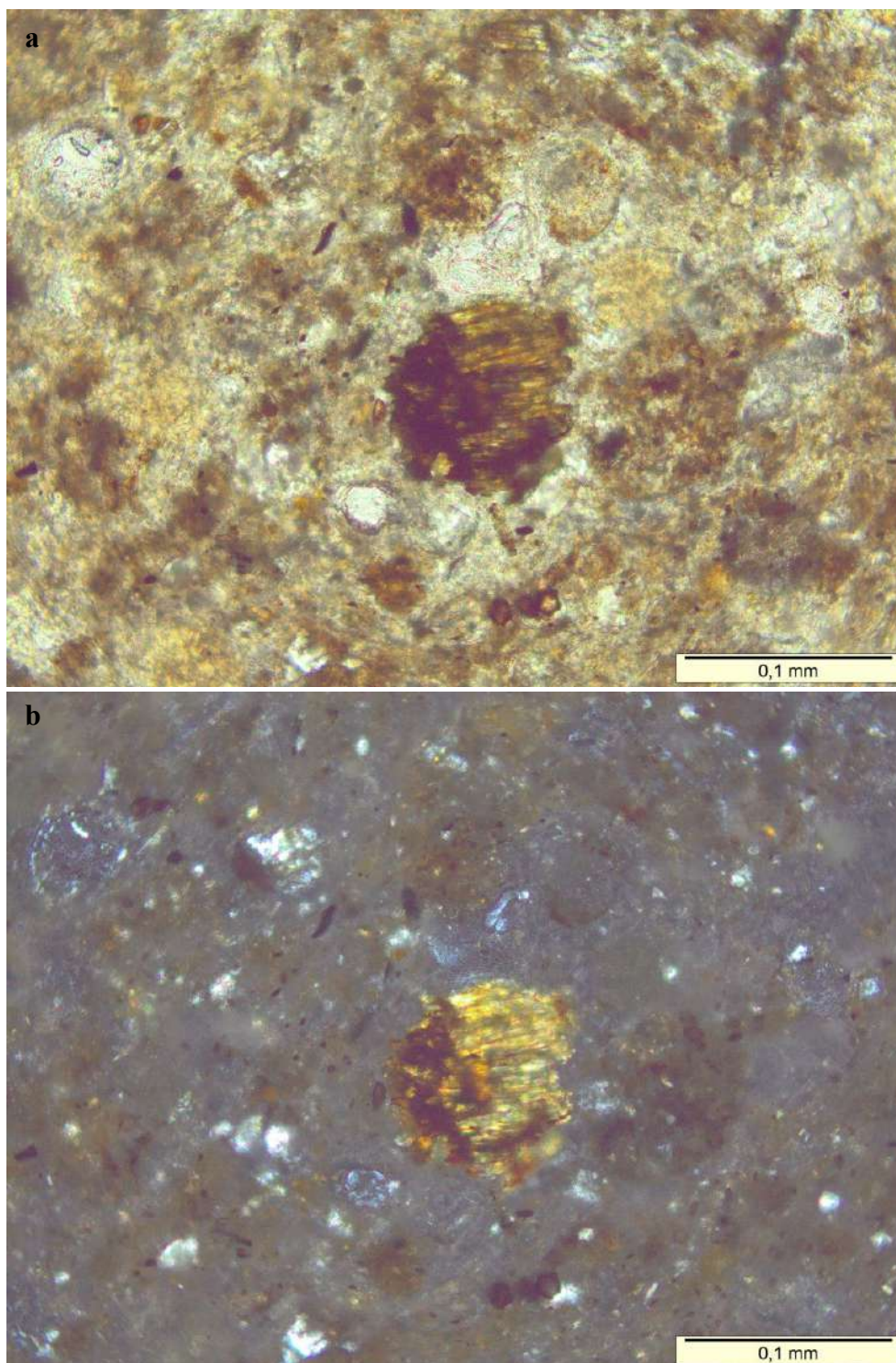


Figura 6.56 – Grão de feldspato na matriz amorfa do espeleotema cilíndrico de piso (amostra SAC 4): a) imagem com nicóis paralelos; b) imagem com nicóis cruzados.



Fonte: a autora

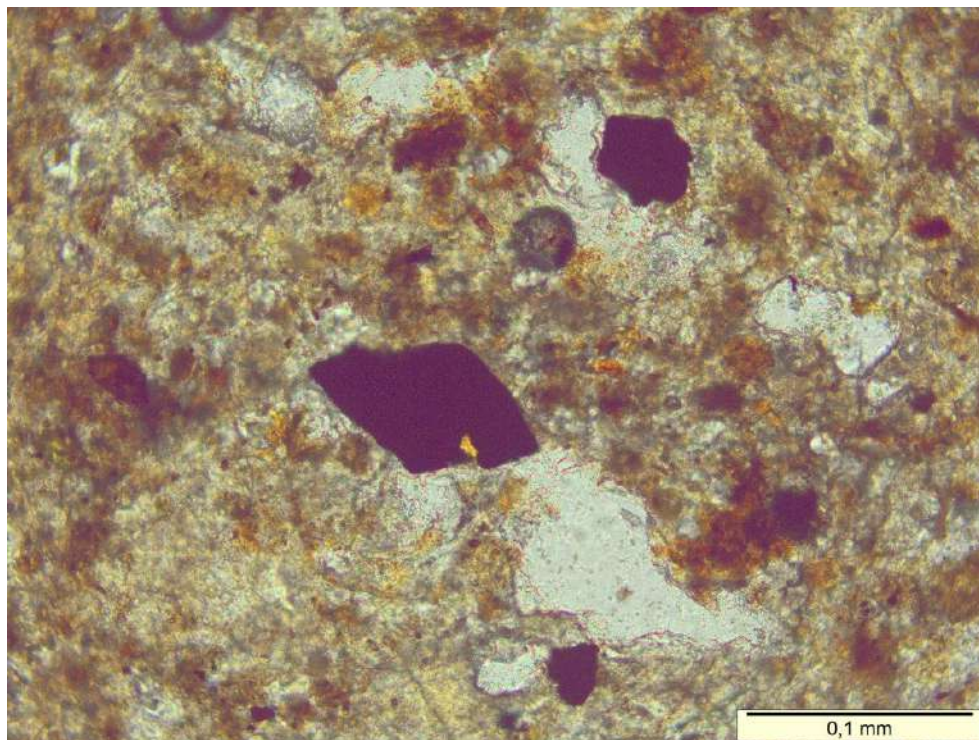
Figura 6.57 – Grão de biotita na matriz amorfa do espeleotema cilíndrico de piso (amostra SAC 4): a) imagem com nicóis paralelos; b) imagem com nicóis cruzados.



Fonte: a autora



Figura 6.58 – Grãos de magnetita (mineral acessório do Granito Ilha) na matriz amorfa do espeleotema cilíndrico de piso (amostra SAC 4) a nicóis paralelos.



Fonte: a autora

Nos difratogramas gerados a partir das análises de DRX os espeleotemas cilíndricos e coraloides (amostras SAC 4, SAC 5A, SAC 6, GSG 1A e SAC 12) mostram halo(s) típico de material amorfo juntamente com picos agudos que indicam a presença de fases cristalinas (figuras 6.59, 6.60 e 6.61 e Tabela 6.1). O material amorfo foi interpretado como opala-A ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), uma sílica hidratada que, pela ausência de estrutura cristalina ou baixa cristalinidade, é classificada como um mineraloide. O padrão difratométrico da opala-A é caracterizado por uma reflexão difusa/ampla que se distribui entre  $15^\circ$   $2\theta$  com um máximo centrado em torno de  $22^\circ$   $2\theta$  (SWOPE, 1983; FLÖRKE *et al.*, 1991; ELZEA e RICE, 1996; AUBRECHT *et al.*, 2008; ABOU e HARB, 2014; DAZA *et al.*, 2014).

Na análise de MEV as amostras SAC 5A, GSG 1A e GSG 1B apresentaram uma superfície externa formada por microesferas coalescidas (figuras 6.38 e 6.41), que é uma manifestação morfológica comum da precipitação da opala. Segundo Lech e Trewin (2013) a opala normalmente se forma quando a água que contém sílica dissolvida é evaporada lentamente. A sílica residual contém menos água e forma um gel, o qual se converte em esferas de sílica amorfa hidratada. Nesse (2004) descreve a opala como uma mistura de sílica amorfa e cristalina, sendo que a sílica amorfa consiste usualmente em massas esféricas

extremamente pequenas que estão intimamente compactadas, e o material cristalino geralmente consiste de cristais muito pequenos de cristobalita e/ou tridimita.

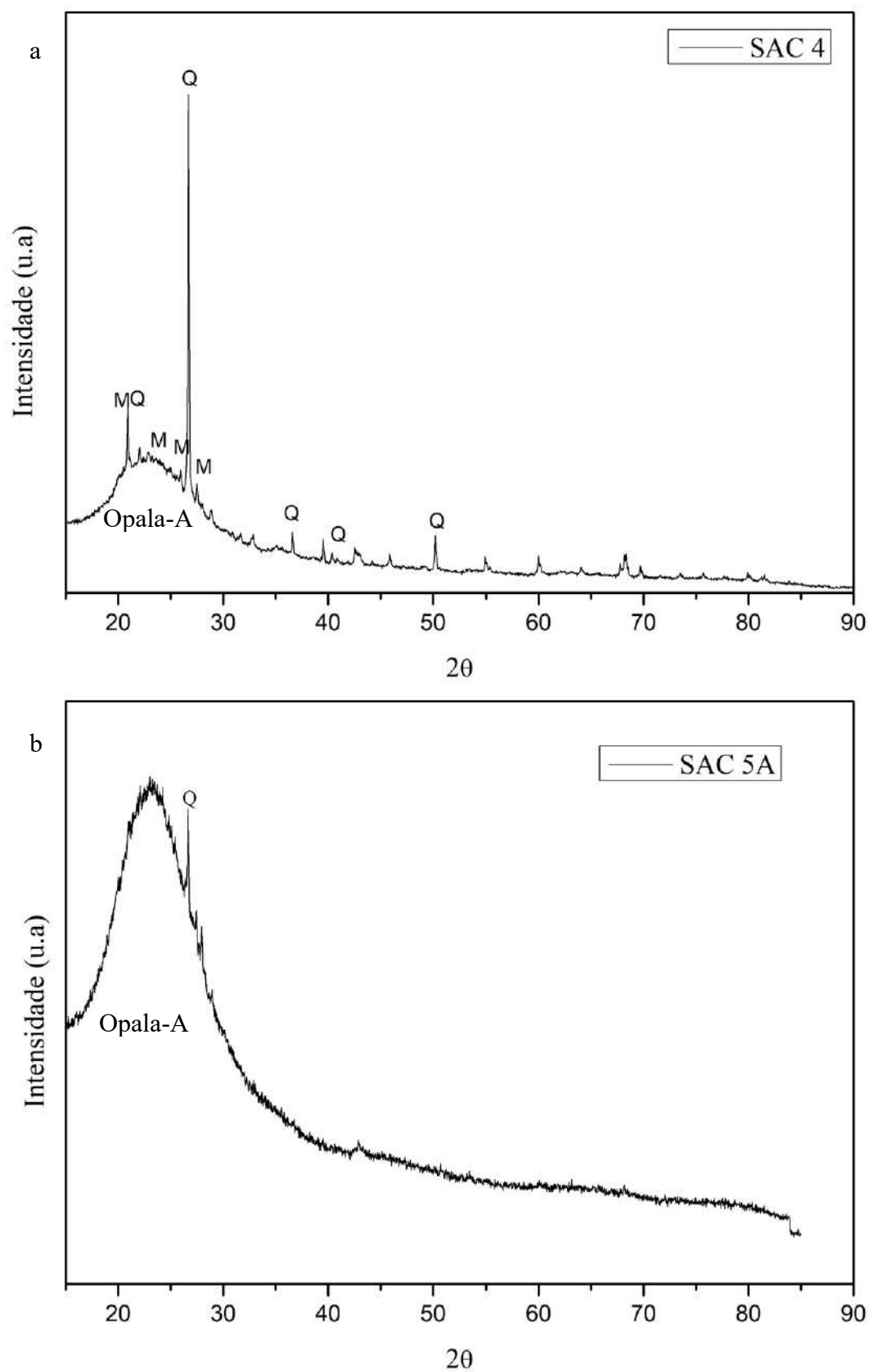
As microesferas que caracterizam a superfície externa dos espeleotemas citados são recobertas por uma fina camada, também de opala, fruto da redissolução e reprecipitação do material pela ação da água circulante. Este processo é responsável pela coalescência das microesferas e pelo preenchimento ou colmatação de áreas porosas dos espeleotemas. Adicionalmente, em lupa, observou-se em superfícies de quebra dos espeleotemas um padrão de fratura conchoidal, que é típica da opala.

Em relação aos picos mais proeminentes em alguns dos difratogramas, que indicam a presença de material cristalino, constatou-se que são compatíveis com quartzo- $\alpha$ . Aubrecht *et al.* (2008), analisando espeleotemas em cavernas areníticas da Venezuela, mostraram difratogramas semelhantes aos aqui obtidos. Na interpretação dos autores, a maioria dos espeleotemas analisados é formada inteiramente por opala-A e os picos encontrados revelam a recristalização da opala-A para microquartzo, presente principalmente nas zonas internas e mais antigas das feições. Romaní e Rodríguez (2007), descrevendo espeleotemas de cavernas graníticas, apontaram em suas análises de DRX a presença de material amorfo e de picos característicos de polimorfos de sílica (especialmente cristobalita e quartzo). Segundo os autores os materiais cristalinos são fragmentos da rocha que foram incorporados à matriz amorfa do espeleotema (material detrítico).

A amostra SAC 4 foi a que apresentou a maior quantidade de picos no difratograma, também os mais bem definidos (Figura 6.59a). Além do quartzo- $\alpha$ , também foram identificados picos compatíveis com microclínio (um polimorfo de feldspato potássico). Nela, o material detrítico (a exemplo dos grãos de quartzo e feldspato) foi identificado em maior proporção que nas demais amostras, o que pode ser explicado pela concentração desse material oriundo do intemperismo físico e erosão da rocha no piso da caverna. Estes minúsculos fragmentos minerais são os responsáveis pelos picos relativos às fases cristalinas nos difratogramas, o que seria compatível com a descrição de Romaní e Rodríguez (2007). O difratograma da amostra SAC 12 apresentou maior ruído, dificultando a identificação de picos associados a fases cristalinas.

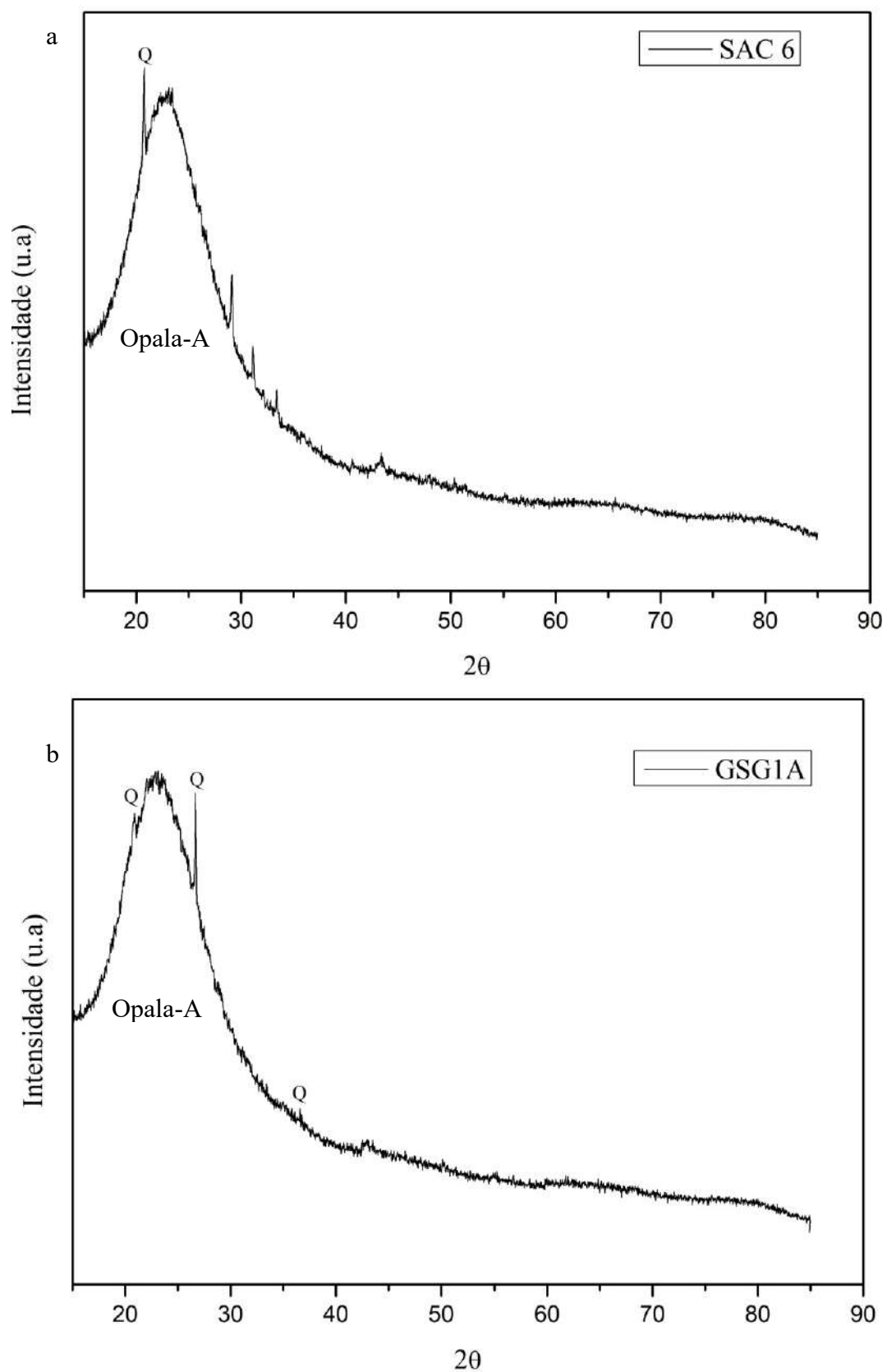
Em síntese, os padrões de DRX aqui obtidos para os espeleotemas cilíndricos e coraloides, assim como a interpretação sugerida, alinham-se às descrições de espeleotemas equivalentes encontrados em cavernas graníticas em outras regiões do mundo (ROMANÍ e VILAPLANA, 1984; FINLAYSON e WEBB, 1985; ROMANÍ e RODRÍGUEZ, 2007).

Figura 6.59 – Difratomogramas dos espeleotemas cilíndricos: a) SAC 4 (piso); b) SAC 5A (teto) (Q = quartzo- $\alpha$ ; M = microclínio).



Fonte: a autora e Elenice H. C. Lacerda

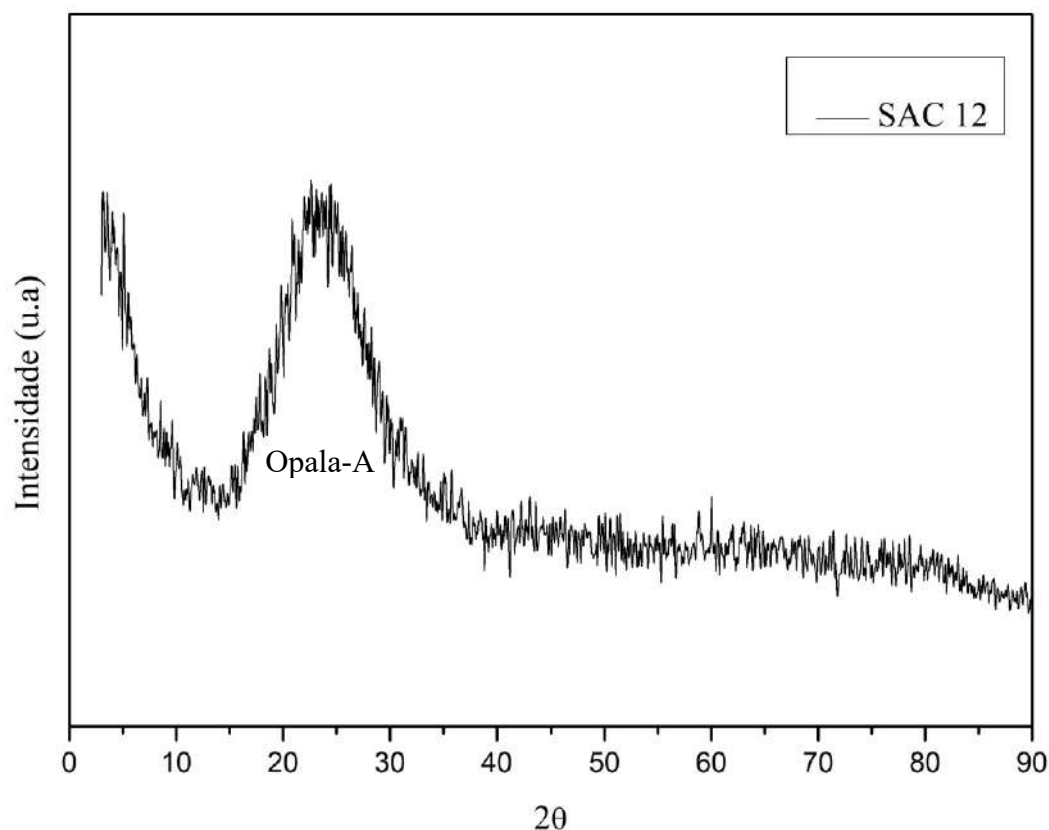
Figura 6.60 – Difratomogramas dos espeleotemas coraloídes arborescentes: a) SAC 6; b) GSG 1A (Q = quartzo- $\alpha$ ).



Fonte: a autora e Elenice H. C. Lacerda



Figura 6.61– Difratoograma do espeleotema coraloide nodular – SAC 12.



Fonte: a autora e Elenice H. C. Lacerda

Tabela 6.1 – Fases minerais identificadas nos espeleotemas analisados com seus respectivos arquivos de informações cristalográficas (código do acervo do *Inorganic Crystal Structure Database* - ICSD), ângulos de difração ( $2\theta$ ) e distâncias interplanares ( $d$  [Å]).

| Amostra | Estrutura                        | $2\theta$ | $d$ (Å) |
|---------|----------------------------------|-----------|---------|
| SAC 4   | quartzo- $\alpha$<br>ICSD 029122 | 20,8°     | 4,26    |
|         |                                  | 26,6°     | 3,37    |
|         |                                  | 36,5°     | 2,45    |
|         |                                  | 40,2°     | 2,23    |
|         |                                  | 50,1°     | 1,81    |
|         | microclínio<br>ICSD 100495       | 20,9°     | 4,23    |
|         |                                  | 23,6°     | 3,75    |
|         |                                  | 25,9°     | 3,43    |
|         |                                  | 27,1°     | 3,28    |
| SAC 5A  | quartzo- $\alpha$<br>ICSD 029122 | 26,6°     | 3,37    |
| SAC 6   | quartzo- $\alpha$<br>ICSD 029122 | 20,8°     | 4,26    |
| GSG 1A  | quartzo- $\alpha$<br>ICSD 029122 | 20,8°     | 4,26    |
|         |                                  | 29,6°     | 3,37    |
|         |                                  | 36,5°     | 2,45    |

Fonte: a autora e Elenice H. C. Lacerda.

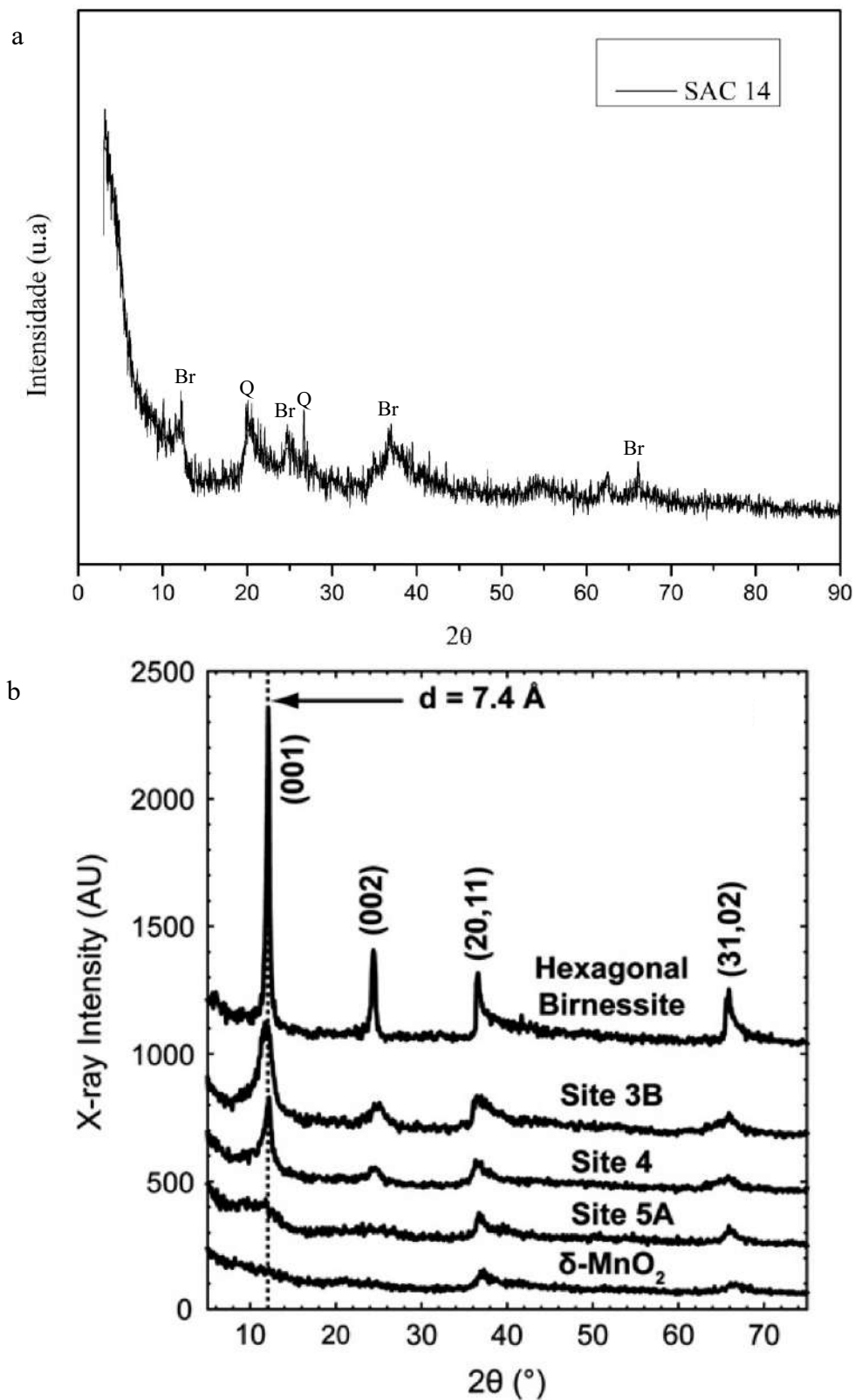
### 6.2.3.2 Espeleotemas planares

O difratograma do *flowstone* referente à amostra SAC 14 apresentou muito ruído, picos alargados e poucos picos bem definidos (Figura 6.62a), o que se deve principalmente à baixa cristalinidade do material. Em função disso, a definição da composição mineralógica da amostra a partir apenas do gráfico não foi conclusiva, tendo sido baseada principalmente nos dados de EDS, que mostraram importante participação de oxigênio e manganês em sua composição química, nas imagens de MEV, na avaliação macroscópica e também em comparações com a bibliografia. Concluiu-se que se trata de um óxido de manganês, mas por conta das limitações da análise de DRX a indicação de um mineral específico e mesmo de outros elementos na composição do espeleotema foi feita por comparação.

A dificuldade na identificação de uma fase mineral específica de depósitos de óxido de manganês em cavernas é relatada por White *et al.* (2009), apontando a baixa cristalinidade do material como um fator limitante. Post (1999) disse ainda que muitos dos minerais de óxido de manganês apresentam padrões difratométricos semelhantes em função de terem uma estrutura cristalina parecida, o que pode dificultar a identificação de uma fase mineral particular. Adicionalmente, pode haver contaminação por material detrítico nas amostras, como argilominerais e sílica oriundos do substrato (WHITE *et al.*, 2009; GÁZQUEZ *et al.*, 2011), resultando em um padrão multifásico no difratograma, ou seja, que indica tanto a presença dos componentes principais como das impurezas.

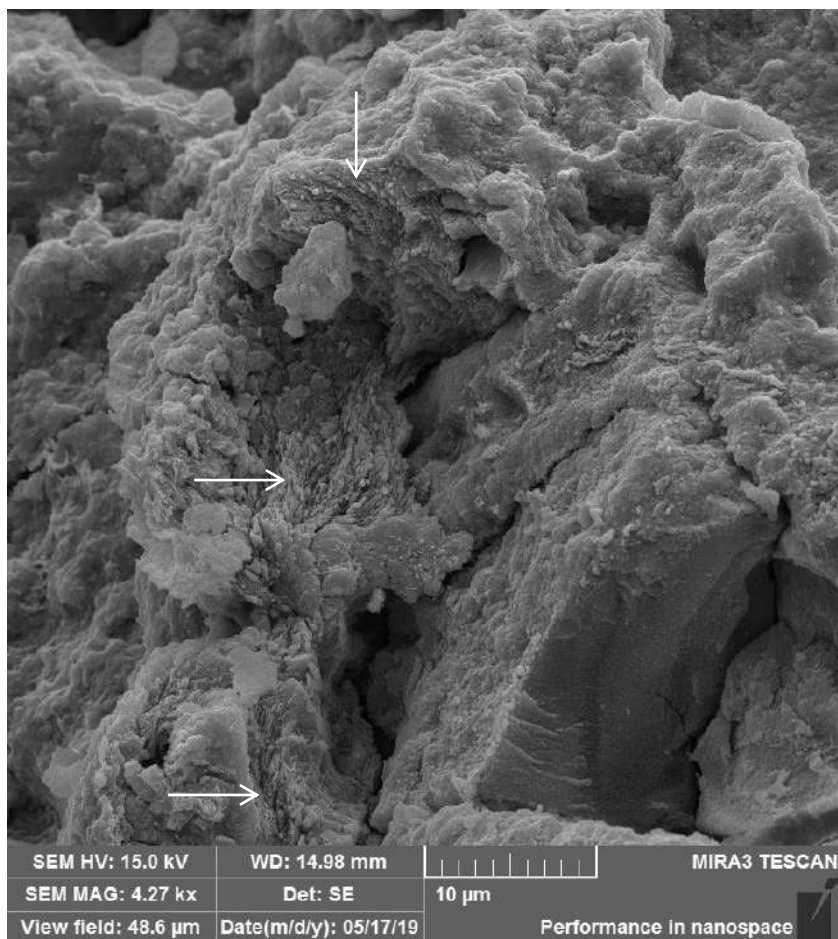
Depósitos constituídos por óxidos e hidróxidos de manganês e de ferro são muito comuns em cavernas (BROUGHTON, 1971; MOORE, 1981; KASHIMA, 1983; GRADZINSKI *et al.*, 1995; WHITE *et al.*, 2009; GÁZQUEZ *et al.*, 2011; ONAC e FORTI, 2011). No caso específico dos minerais de óxido de manganês a birnessita é o mais comumente identificado, em depósitos frequentemente laminares (Figura 6.63) (BROUGHTON, 1971; MOORE, 1981; WHITE *et al.*, 2009; FRIERDICH *et al.*, 2011; PIAZZA, 2016). O padrão de DRX da birnessita apresentado em alguns destes trabalhos se assemelha visualmente ao aqui obtido (Figura 6.62b). Assim, na ausência de uma identificação precisa, este mineral de óxido de manganês é apontado como a primeira opção para a indicação da composição do espeleotema.

Figura 6.62 – Difratomogramas da amostra SAC 14 e de materiais compostos por birnessita, para comparação: a) amostra do *flowstone* coletado no SAC com indicação das prováveis fases cristalinas, por comparação (Br – birnessita; Q – quartzo- $\alpha$ ); b) amostras de depósitos de óxido de manganês da Pautler Cave, sudoeste de Illinois (EUA).



Fonte: a autora e Elenice H. C Lacerda (a); Friedrich *et al.* (2011)

Figura 6.63 – Aspecto laminar/foliado de um setor do *flowstone* (amostra SAC 14), característica da birnessita. Um indício de que este pode ser o mineral de óxido de manganês que compõe o espeleotema.



Fonte: C-LABMU-UEPG



O difratograma do *flowstone* referente à amostra GSG 2 (Figura 6.64a) também não foi conclusivo para determinação de sua composição mineralógica. Mostra que é um material amorfo ou de baixa cristalinidade, caracterizado por dois halos amplos, sendo o primeiro mais proeminente. Um pico se destaca no primeiro halo (Figura 6.64a), sendo compatível com o que aparece nos difratogramas dos espeleotemas silicosos, tratando-se provavelmente de quartzo- $\alpha$  (material detrítico).

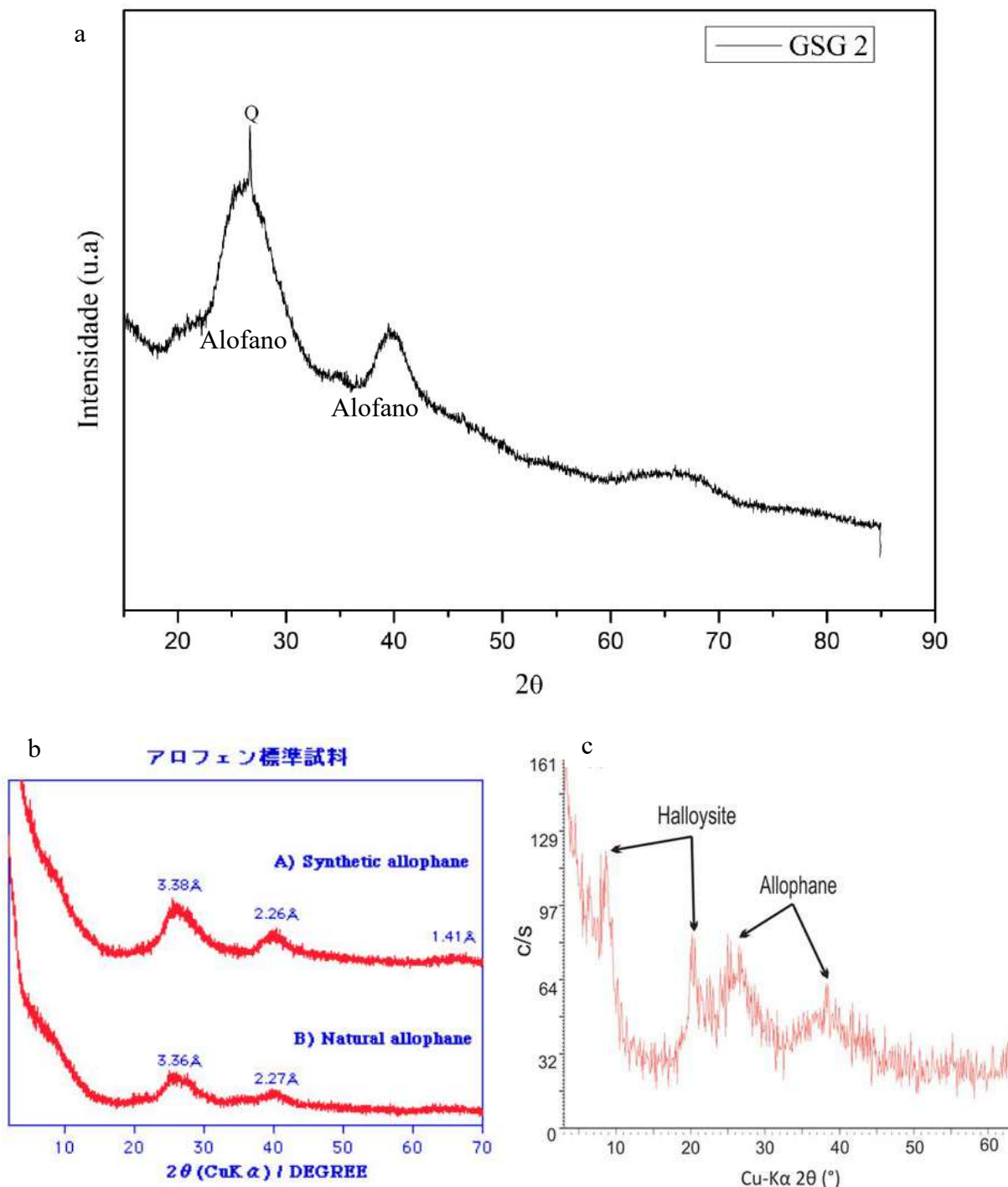
A análise macroscópica (posição na caverna, dureza, morfologia, textura e coloração), os dados da EDS, que apontaram a presença majoritária de alumínio, oxigênio e silício na amostra, e as indicações de composição sugeridas na bibliografia para espeleotemas equivalentes apontaram para o mineraloide alofano, um silicato hidratado de alumínio pertencente ao grupo dos filossilicatos (NAVARRO *et al.*, 2017).

Segundo Finlayson e Webb (1985), amostras de mão do alofano são facilmente confundidas com outros minerais argilosos ou óxidos de ferro, tratando-se de um material muito frágil, de dureza baixa (entre 2 e 3). Imagens de microscopia eletrônica são úteis para sua identificação, evidenciando uma superfície formada por agregados de microesferas (HENMI e WADA, 1976; FINLAYSON e WEBB, 1985).

O padrão de DRX do alofano carece de picos bem definidos e apresenta bandas largas, centradas em aproximadamente 3,3 Å e 2,2 Å (Figura 6.64b), sendo o segundo o mais fraco. Esse padrão é relativamente consistente, mas não diagnóstico (FINLAYSON e WEBB, 1985). Em trabalho sobre espeleotemas com essa composição desenvolvidos em cavernas vulcânicas no arquipélago dos Açores, Daza e Bustillo (2015) apresentaram análises de DRX do alofano, indicando no difratograma dois halos proeminentes (Figura 6.64c), o primeiro entre 15-35° 2 $\theta$ , com pico em 26/27° 2 $\theta$  (3,3 Å), o segundo, menor, entre 35-45° 2 $\theta$ , com um máximo de 40° 2 $\theta$  (2,2 Å). Tais padrões são compatíveis com o da amostra GSG 2.

Em cavernas, o alofano é associado a espeleotemas do tipo *flowstone*, formando crostas/incrustações em paredes e pisos, geralmente ornamentadas por *microgours* (WEBB e FINLAYSON, 1984; FINLAYSON e WEBB, 1985), mas também pode dar forma aos coraloides e estalactites (DAZA e BUSTILLO, 2015).

Figura 6.64 – Difratomogramas da amostra GSG 2 e de materiais compostos por alofano, para comparação: a) amostra do *flowstone* coletado na Gruta do Saco Grande (Q = quartzo- $\alpha$ ); b) amostras de alofano sintético e natural, figura obtida em um banco de difratogramas; c) amostra de espeleotema associado a raízes proveniente de uma caverna vulcânica (Açores).



Fonte: a autora e Elenice H. C. Lacerda (a); [https://www.sci.kagoshima-u.ac.jp/kawano/clay\\_standard/index.html#Allophane](https://www.sci.kagoshima-u.ac.jp/kawano/clay_standard/index.html#Allophane) (b); Daza e Bustillo (2015) (c)

#### 6.2.4 Conteúdo biológico

As análises de lupa, MEV e microscopia ótica evidenciaram diferentes elementos biológicos incorporados à estrutura interna dos espeleotemas e colonizando os mesmos externamente. Tratam-se de organismos inteiros ou partes deles e produtos de suas atividades. Em sua maioria são autóctones, ou seja, os espeleotemas constituem o meio onde eles se desenvolvem, vivem e morrem. Mas também há ocorrência de elementos alóctones, que acabaram sendo incorporados às feições por ação da água e do vento (fragmentos vegetais, por exemplo) e pela própria ação de microrganismos e da macrobiota local (fios de seda de teias de aranha, por exemplo) (SANJURJO *et al.*, 2007).

Os microrganismos (inteiros ou parte deles), fragmentos vegetais e fios de seda são observados em duas condições: recobertos por opala, que forma o próprio espeleotema onde eles se encontram, e recobrindo por sua vez a opala, a exemplo de uma nova fase de colonização por bactérias, que muitas vezes se instalam no local justamente em função da sílica disponível. Segundo Galindo (2013), a sílica é fundamental para o desenvolvimento de muitos microrganismos, seja para nutrição ou uso em estruturas de proteção.

##### 6.2.4.1 Bactérias

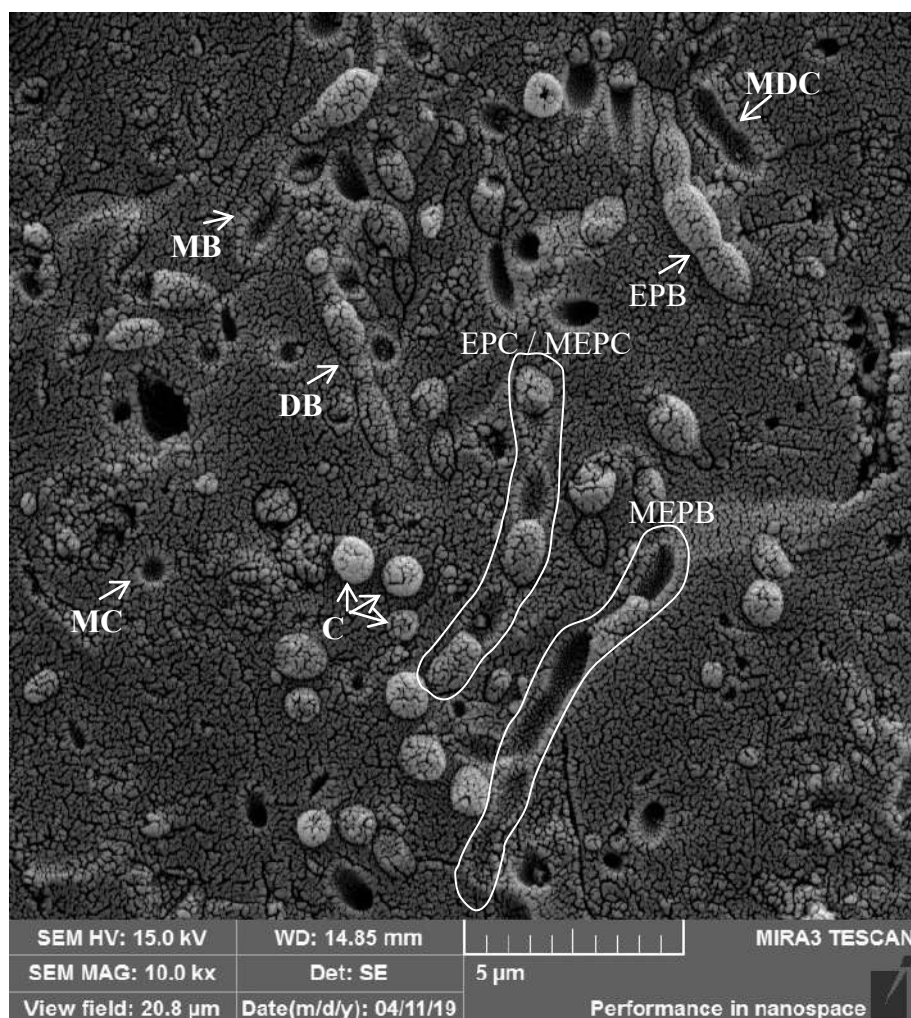
As bactérias foram os microrganismos mais abundantes identificados nos espeleotemas amostrados, presentes tanto na superfície externa como em superfícies internas das feições, neste último caso integrando a estrutura das mesmas. A identificação foi feita a partir de suas dimensões e características morfológicas.

Segundo Nogueira e Miguel (2009), as bactérias possuem dimensões micrométricas, sendo que as mais comuns medem de 0,5 a 1,0  $\mu\text{m}$  de diâmetro por 2,0 a 5,0  $\mu\text{m}$  de comprimento. Em relação à morfologia, são três tipos fundamentais: cocos (esféricos), bacilos (cilíndricos) e espirilos (em espiral). Estes tipos básicos podem aparecer de forma isolada ou se organizar em diferentes arranjos e formas de transição, de acordo com a sua divisão celular, sendo: a) diplococos - cocos agrupados aos pares; b) estreptococos – cocos agrupados em cadeia; c) tétrades – agrupamento de quatro cocos; d) sarcinas – agrupamento de oito cocos em forma cúbica; e) estafilococos – agrupamentos irregulares de cocos, lembrando um cacho de uvas; f) diplobacilos – pares de bacilos; g) estreptobacilos – bacilos em cadeia; h)

cocobacilos – bacilos muito curtos; i) vibriões – células em forma de bastonete curvo (em vírgula).

Foram identificadas bactérias (restos de organismos completos e seus moldes) no espeleotema cilíndrico de piso (SAC 4), coraloides arborescente (GSG 1A) e nodular (SAC 12) e no *flowstone* (SAC 14), sendo dos seguintes tipos: cocos, diplococos, estreptococos (Figura 6.65), estafilococos (Figura 6.66), bacilos (Figura 6.65), diplobacilos (figuras 6.65 e 6.67) e estreptobacilos (Figura 6.65). Os moldes evidenciam o recobrimento das bactérias por opala quando da formação dos espeleotemas e sua incorporação na estrutura das feições.

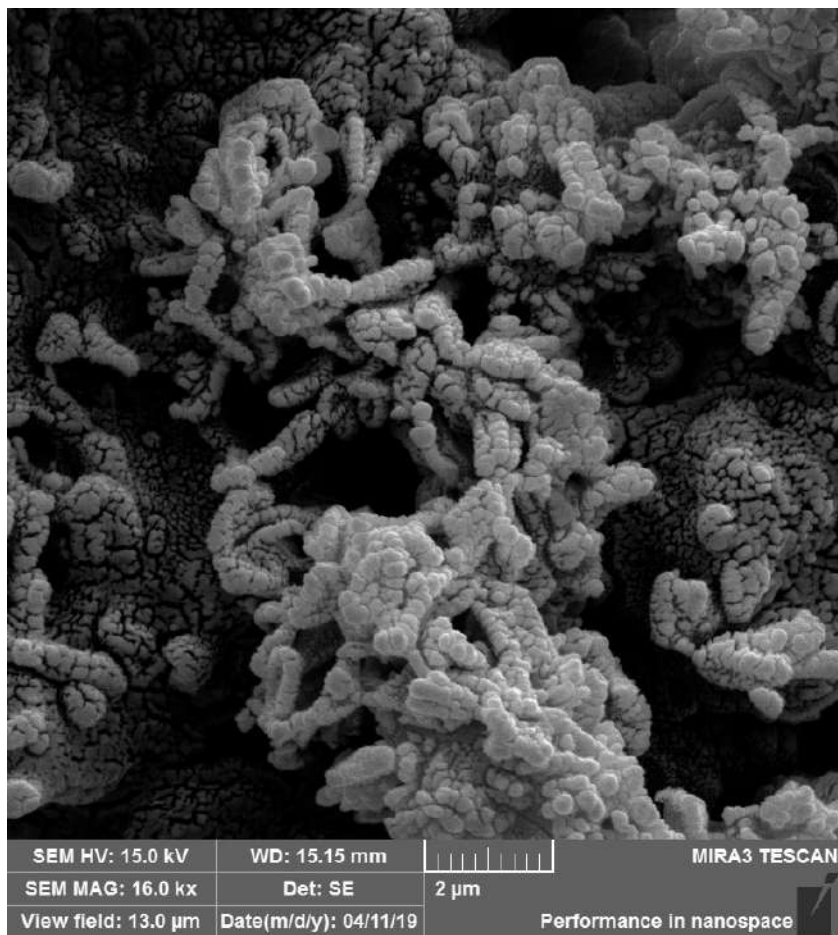
Figura 6.65 – Diferentes tipos de bactérias em corte transversal na amostra SAC 12. O aspecto granuloso da amostra se deve provavelmente ao ressecamento excessivo em estufa (C – cocos; MC – molde de cocos; MDC – molde de diplococos; EPC – estreptococos; MEPC – molde de estreptococos; B – bacilos; MB – molde de bacilos; DB – diplobacilos; EPB – estreptobacilos; MEPB – molde de estreptobacilos).



Fonte: C-LABMU-UEPG

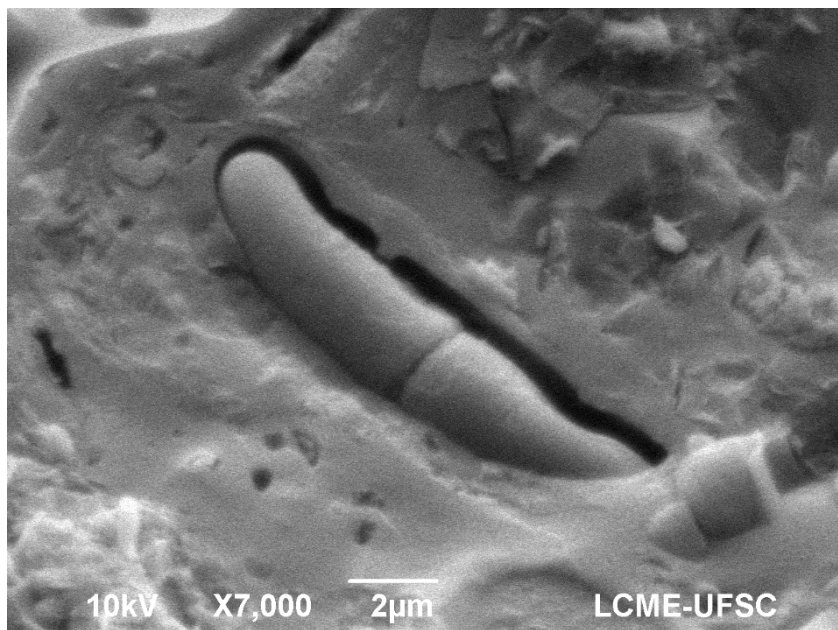


Figura 6.66 – Bactérias do tipo estafilococos na amostra SAC 12.



Fonte: C-LABMU-UEPG

Figura 6.67 – Diplobacilos (e seus moldes) na amostra SAC 4.



Fonte: LCME-UFSC

#### 6.2.4.2 Fungos

Os fungos são abundantes e amplamente distribuídos nas cavernas estudadas, dispostos em paredes e teto, associados à matéria orgânica e raízes das árvores que adentram as cavidades. Também estão presentes nos espeleotemas, recobrando as feições externamente e impregnados em sua estrutura interna (microlaminações) e ocupando setores porosos.

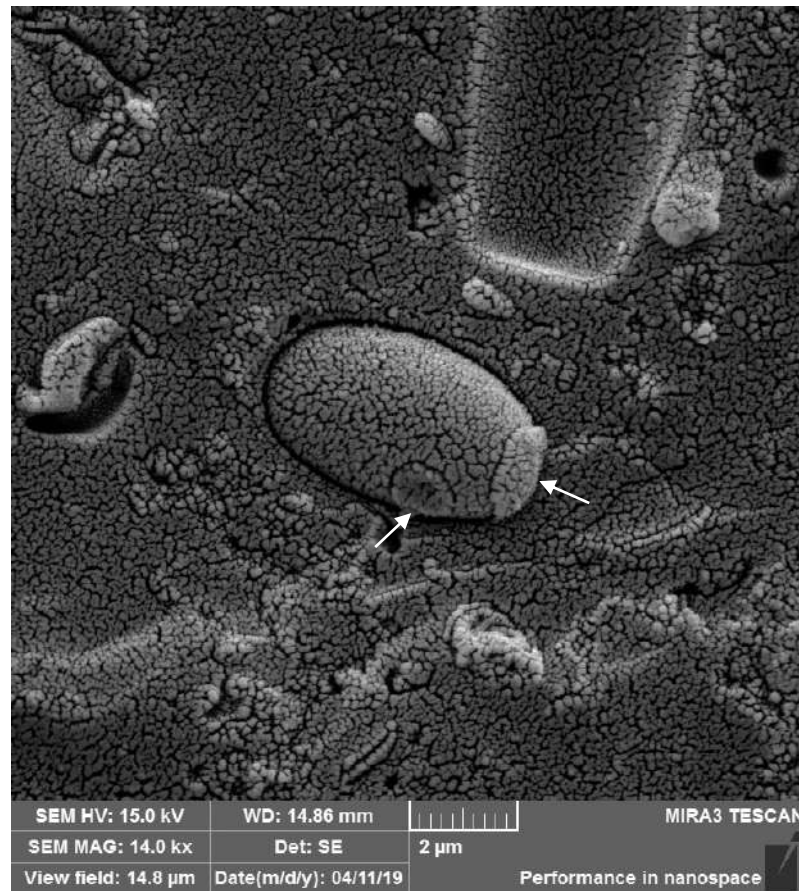
Os fungos são organismos eucariontes, aclorofilados e heterotróficos, utilizando componentes orgânicos como fonte de energia. Podem ser unicelulares (as leveduras) ou pluricelulares (mofos e bolores). As leveduras possuem forma geralmente ovalada, podendo ser também alongadas ou esféricas, e podem ter de 1,0 a 5,0  $\mu\text{m}$  de diâmetro e de 5,0 a 30  $\mu\text{m}$  de comprimento. Os mofos e bolores são filamentosos, sendo os filamentos conhecidos como hifas, que em conjunto constituem o micélio. Os fungos podem se reproduzir de forma assexuada ou sexuada, onde no caso dos filamentosos o processo ocorre principalmente por meio de esporos. Já as leveduras, além dos esporos, também podem se reproduzir por brotamento e cissiparidade (VIEIRA e FERNANDES, 2012; SANTOS, 2015).

Nos espeleotemas amostrados foram identificadas tanto leveduras (Figura 6.68) como estruturas filamentosas (Figura 6.69). As leveduras apresentam cicatrizes do processo de reprodução por brotamento, que acontece quando uma célula-mãe dá origem a uma célula-filha a partir de um broto, estrutura que se desenvolve e cresce até o ponto de se separar da matriz, passando a constituir uma nova célula (VIEIRA e FERNANDES, 2012). O brotamento é uma característica reprodutiva das leveduras da família *Saccharomycetaceae*, que engloba espécies tradicionalmente utilizadas na indústria de bebidas e alimentos.

#### 6.2.4.3 Amebas tecadas

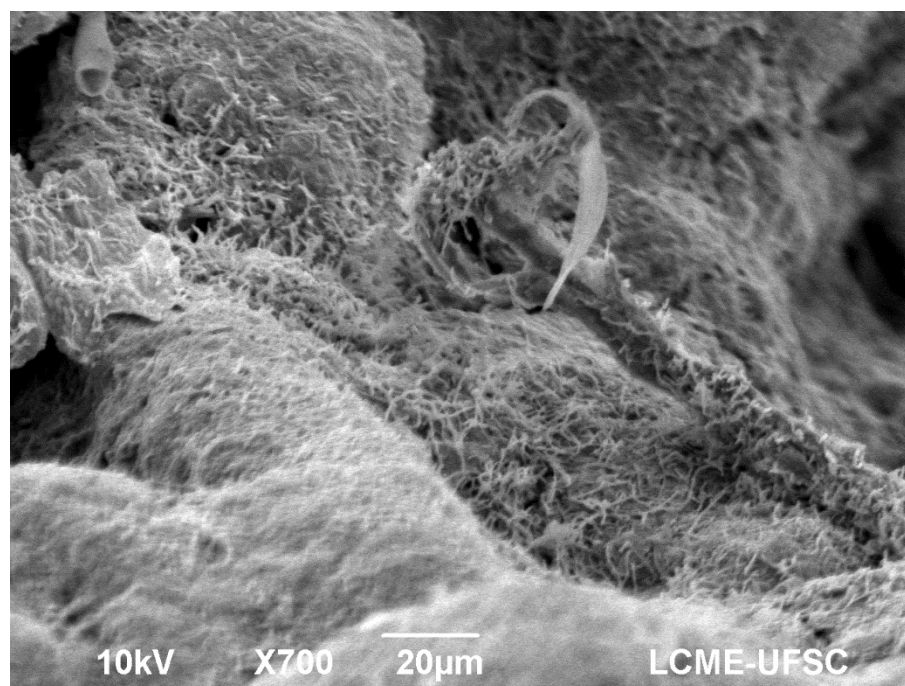
Na superfície externa das amostras GSG 1A, GSG 1B e SAC 5A foram identificadas testas ou tecas de amebas conhecidas como tecadas (testáceas), incluindo um grupo complexo de protozoários em que a célula única fica fechada numa espécie de carapaça (a teca). Esta é constituída por placas de material autosssegado (proteínas, calcita, sílica) ou incorporado do meio, possuindo uma abertura que permite sua relação com o exterior por meio de pseudópodes (LÓPEZ *et al.*, 2012; GALINDO, 2013).

Figura 6.68 – Levedura com cicatrizes de brotamento na amostra SAC 12.



Fonte: C-LABMU-UEPG

Figura 6.69 – Fungos filamentosos recobrindo a amostra GSG 1A.



Fonte: LCME-UFSC

A maior parte das tecas encontradas pertencem a indivíduos do gênero *Assulina*<sup>5</sup>, provavelmente da espécie *Assulina muscorum* (Figura 6.70). A ordem Euglyphida, a qual pertence esta espécie, é, no geral, caracterizada por táxons com escamas de sílica secretada (Figura 6.71), unidas por um cimento orgânico (SIEMENSMA, 2019). Foram identificadas também três tecas de amebas da ordem Arcellinida. Uma delas é do gênero *Difflugia* (Figura 6.72a), já para as demais não foi possível precisar os táxons inferiores, sendo que uma pode ser do gênero *Difflugia* ou do gênero *Centropyxis* (Figura 6.72b) e a terceira tem características compatíveis com o gênero *Arcella* (Figura 6.72c).

A ocorrência desses organismos em espeleotemas similares é discutida nos trabalhos de López *et al.* (2012) e Galindo (2013). Segundo os autores, as amebas tecadas podem ser encontradas em uma grande variedade de ambientes, sendo a umidade um fator importante para sua presença e sobrevivência. No entanto, conseguem se adaptar às condições de mudanças no regime hídrico, por meio do fechamento de sua teca.

Nos espeleotemas amostrados só foram observadas as tecas vazias e fragmentadas. A mudança das condições de umidade nos locais de coleta, com ausência permanente de água, pode ser um dos fatores que ocasionou a morte dos organismos, um estado além da capacidade de adaptação dos mesmos.

As amebas tecadas são, no geral, microrganismos heterótrofos, ou seja, não produzem seu próprio alimento. Bactérias, fungos, leveduras, algas, detritos, húmus e mesmo outros protozoários fazem parte de seu cardápio (GILBERT *et al.*, 2000). Como estes são elementos comuns nos espeleotemas, principalmente as bactérias, fungos e material detrítico, evidencia-se a disponibilidade de alimento para as amebas.

Para além da água e alimento, outro componente importante que condiciona a presença de amebas tecadas é a disponibilidade de sílica e material detrítico, principalmente grãos minerais, utilizados para confecção de seu abrigo, a teca. Segundo Galindo (2013) a composição da teca pode ser de material proteico aglutinado a diferentes tipos de materiais, como grãos minerais, frústulas de diatomáceas, fragmentos vegetais e mesmo restos de outros organismos, ou seja, material externo (tecas xenossômicas, Figura 6.72a), ou pode ser constituída por placas de sílica secretada, ordenadas em fileiras e unidas por um cimento

---

<sup>5</sup> A identificação das amebas tecadas foi feita com a ajuda de Ferry Siemensma, protistologista holandês especialista em organismos ameboides e heliozoários. O pesquisador é responsável pela página *Microworld, world of amoeboid organisms* (<https://www.arcella.nl/>) que foi utilizada para consultas.

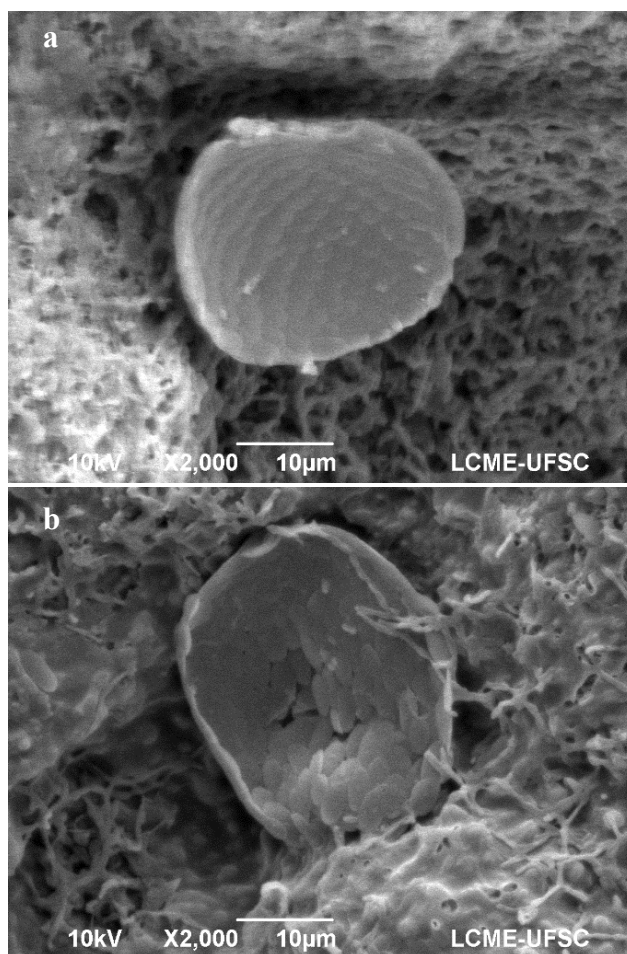


orgânico, um processo de absorção e sintetização interno do organismo (tecas idiossômicas, Figura 6.70).

Du Châtelet *et al.* (2015) identificaram 24 tipos de minerais, entre silicatos, óxidos e carbonatos, em 11 espécies diferentes de amebas tecadas. Nestas, o quartzo e o feldspato predominam. As teclas idiossômicas são compostas por sílica, provavelmente amorfa, e recobertas por material orgânico. Os autores explicam que a preponderância de material silicoso na confecção das teclas se dá tanto pela alta disponibilidade deste composto nos mais variados tipos de ambientes como pela resistência do mesmo aos processos de degradação.

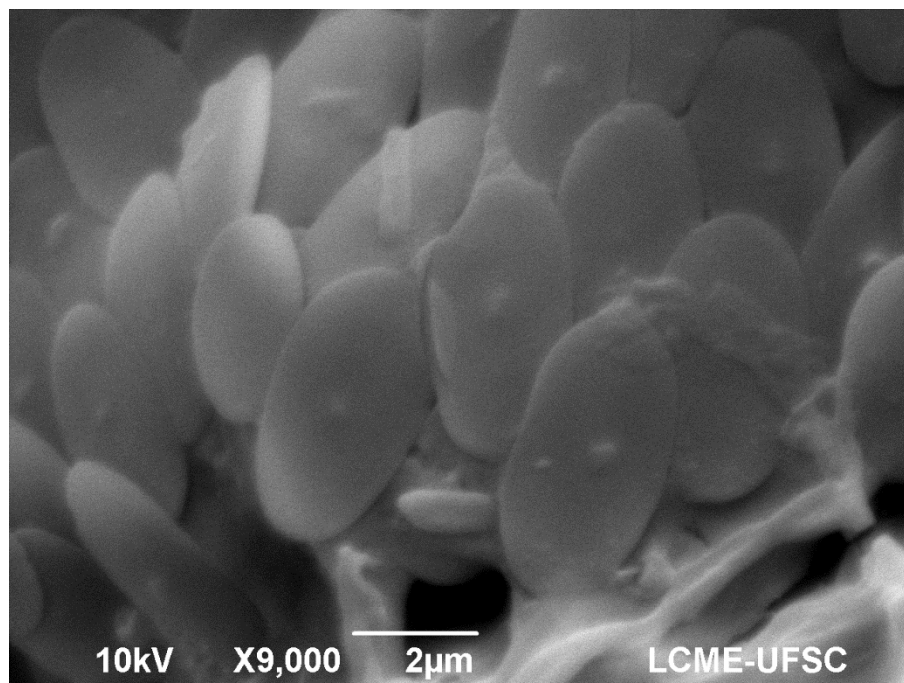
Nos espeleotemas silicosos que caracterizam as cavidades subterrâneas estudadas, além da sílica, minerais detríticos oriundos do granito possibilitam uma fonte *in situ* de matéria-prima para as amebas tecadas, as quais, por sua vez, tornam a disponibilizar este material para o ambiente por meio de seus processos metabólicos e/ou morte.

Figura 6.70 – Tecas de amebas da espécie *Assulina muscorum* (?) na amostra GSG 1B. Em b estreptobacilos recobrem parcialmente a teca.

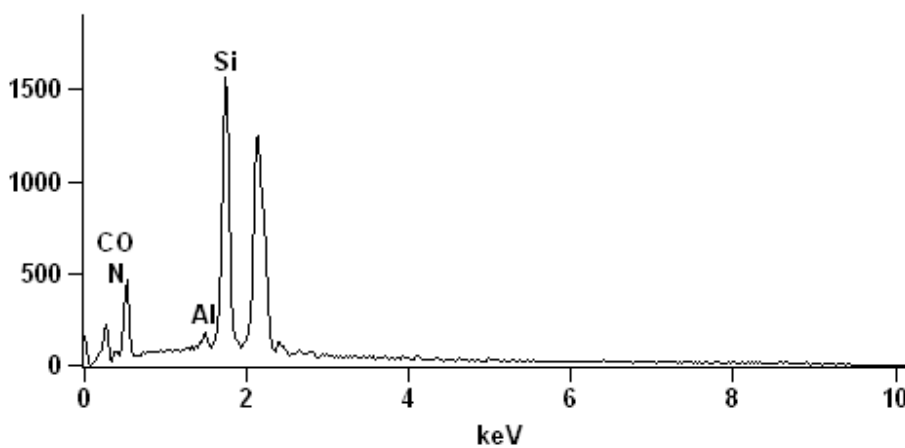


Fonte: LCME-UFSC

Figura 6.71 – Detalhe das escamas de sílica que dão corpo à teca da Figura 6.70b. O gráfico da análise de EDS de uma das escamas mostra a participação predominante do Si (40,64%) C (31,69%) e O (19,49%), seguidos de N (7,12%) e Al (1,06%). O pico sem identificação é do ouro utilizado no recobrimento da amostra.

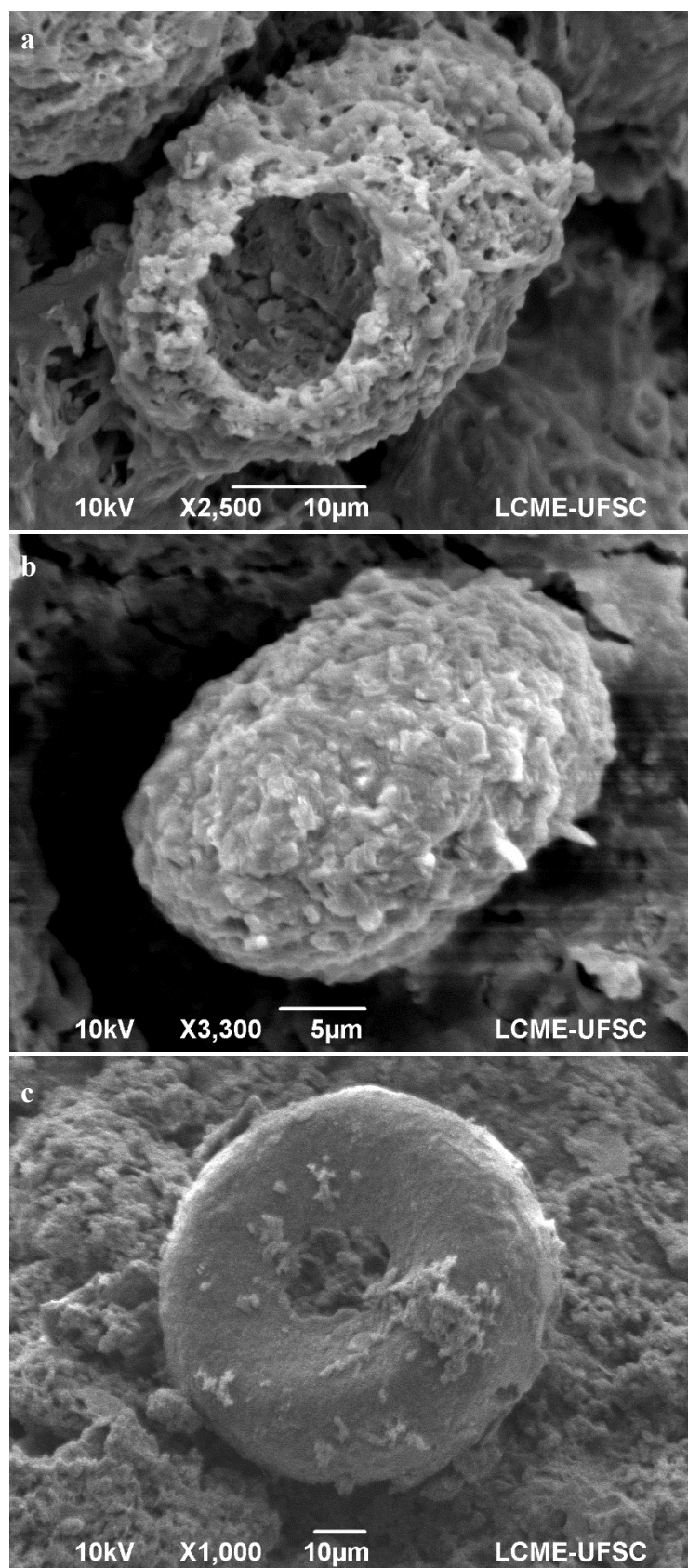


Full scale counts: 1563



Fonte: LCME-UFSC

Figura 6.72 – Tecas de amebas da ordem Arcellinida: a) *Difflugia* na amostra GSG 1B; b) *Difflugia* ou *Centropyxis* (?) na amostra GSG 1A; c) *Arcella* (?) na amostra SAC 5A.



Fonte: LCME-UFSC

#### 6.2.4.4 Fios de seda de teias de aranha

Os espeleotemas não constituem um tipo de ecossistema apenas para organismos microscópicos, servindo de suporte para outros representantes da biota cavernícola, como pequenas aranhas. As superfícies rugosas geradas pelos conjuntos de espeleotemas, com frestas e microcavidades, são ambientes propícios para abrigo, reprodução e mesmo para a captura de presas.

As aranhas utilizam os espeleotemas como pontos de apoio e sustentação para suas teias (figuras 6.73 e 6.74). Os fios de seda passam a funcionar então como armadilhas para material detrítico e como núcleos para precipitação da opala, sendo recobertos e incorporados à estrutura dos espeleotemas. Nas análises de lupa, MEV e microscopia ótica foram observadas estruturas filamentosas e aciculares compatíveis com fios de seda (figuras 6.75 e 6.76), principalmente nos espeleotemas cilíndricos de teto e coraloides arborescentes.

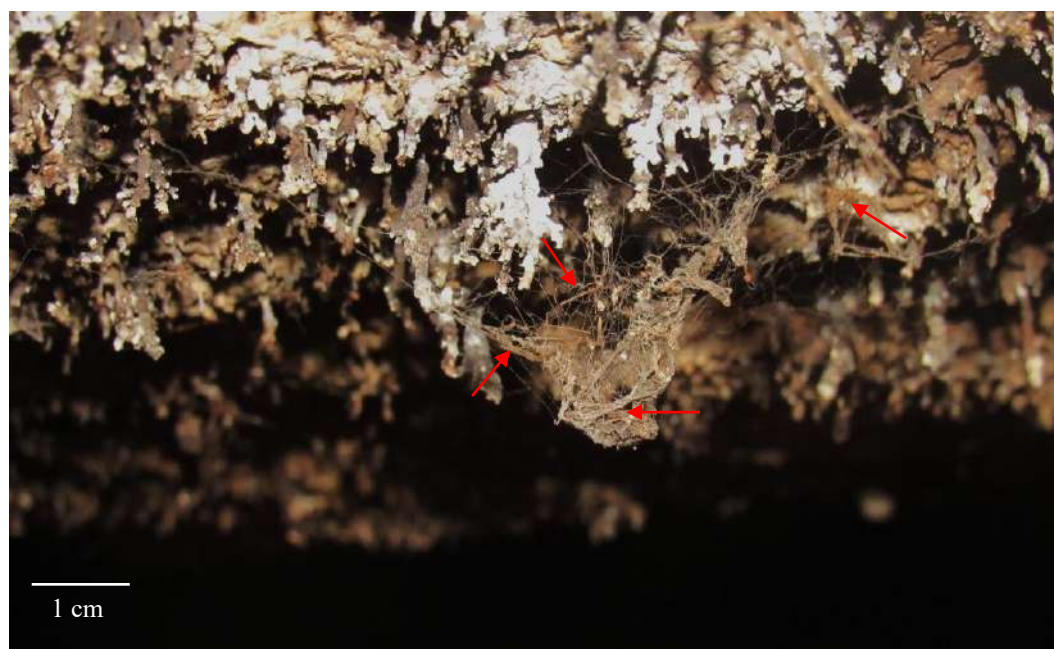
Figura 6.73 – Fios de seda confeccionados por aranhas em um conjunto de espeleotemas coraloides arborescentes – SAC.



Fonte: Henrique Pontes

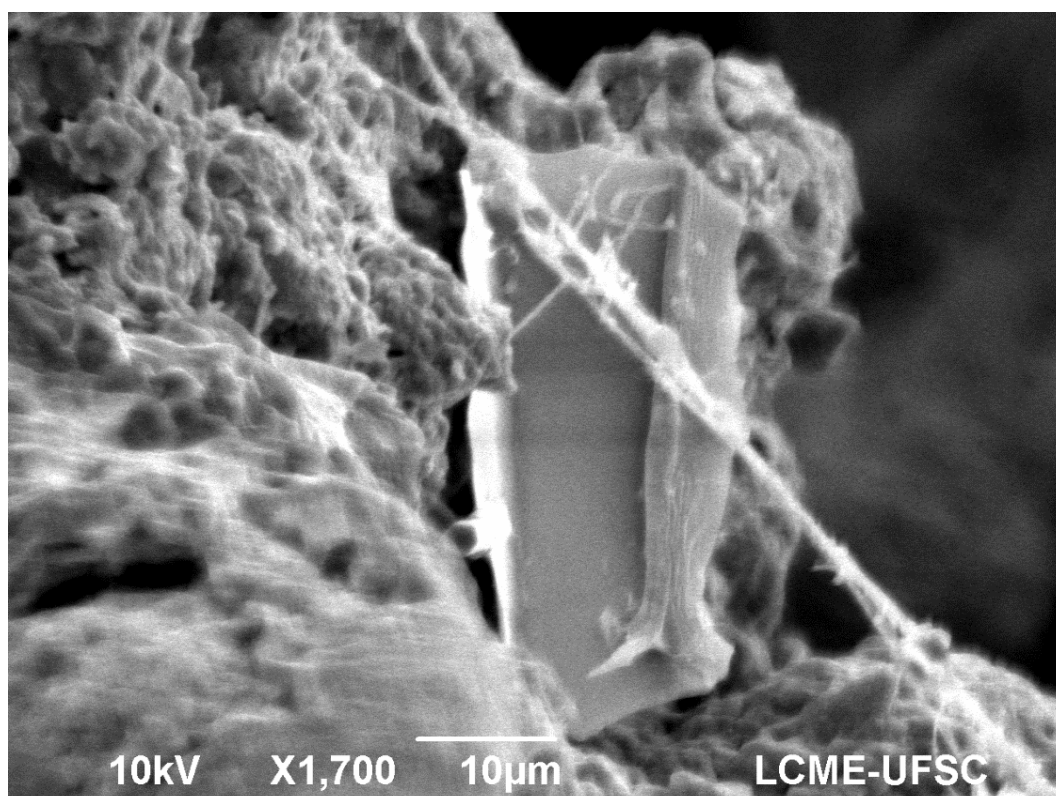


Figura 6.74 – Teia de aranha confeccionada em um conjunto de espeleotemas coraloides arborescentes envolvendo também fragmentos vegetais e partes de insetos (setas) – SAC.



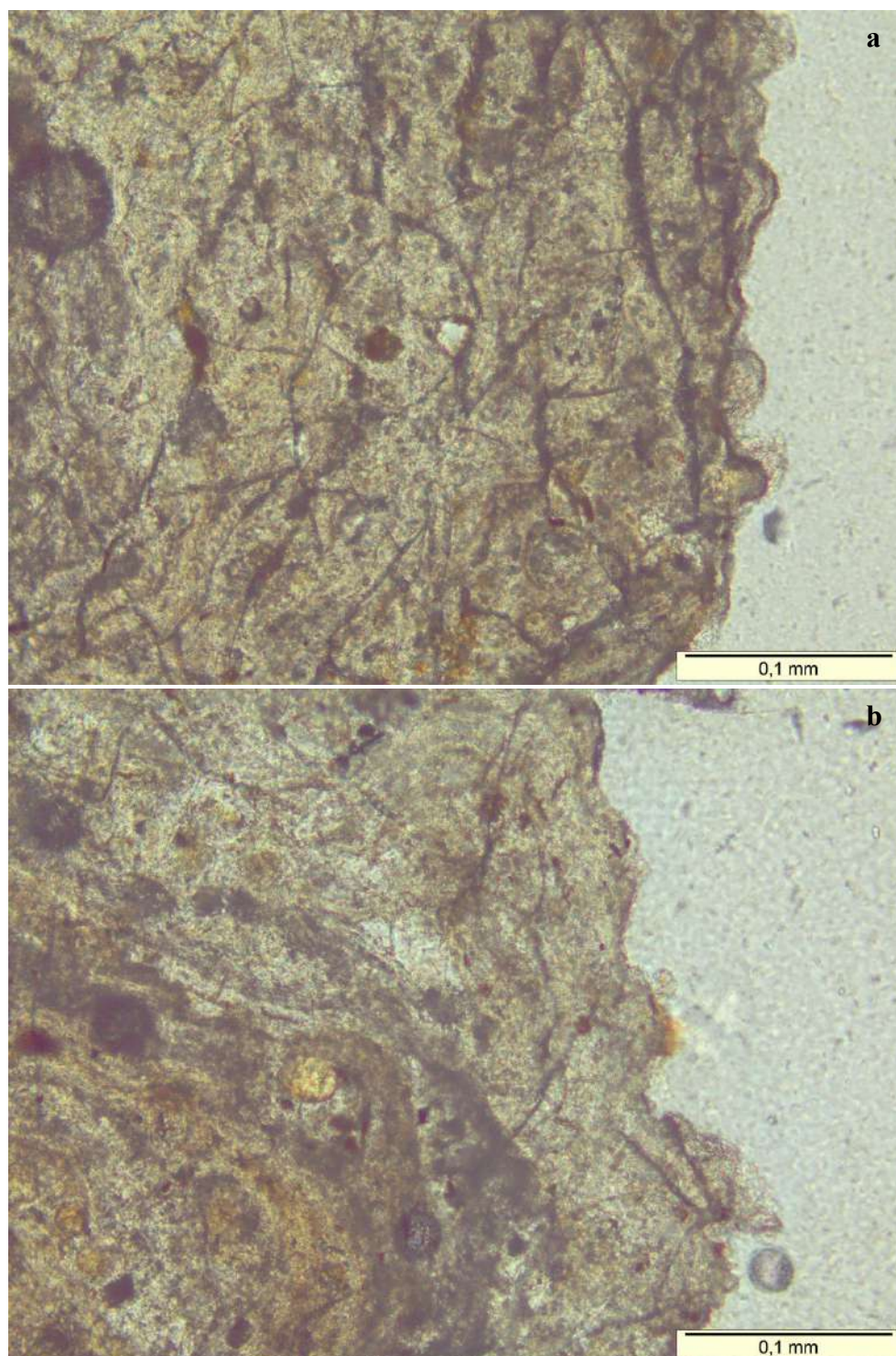
Fonte: a autora

Figura 6.75 – Fios de seda de teia de aranha na amostra GSG 1A e elemento biológico não identificado.



Fonte: LCME-UFSC

Figura 6.76 – Fragmentos de fios de seda de teias de aranha (elementos filamentosos/aciculares de coloração escura) em lâminas delgadas (nicóis paralelos): a) amostra SAC 5A; b) amostra SAC 6.



Fonte: a autora



#### 6.2.4.5 Outros elementos biológicos

Anteriormente no texto foram descritos os principais elementos que caracterizam o conteúdo biológico dos espeleotemas analisados. No entanto, outros organismos e materiais foram observados de forma isolada, a exemplo de ácaros, fragmentos vegetais e elementos que por suas características morfológicas e dimensões foram enquadrados como “bio”, mas para os quais não foi possível precisar uma identificação taxonômica (reino e níveis inferiores).

Os ácaros, tais como as aranhas, foram avistados em campo (Figura 6.77), utilizando os espeleotemas provavelmente como abrigo e para alimentação. Os trabalhos de Romaní *et al.* (2010a) e Galindo (2013; 2018) são alguns dos que documentaram os ácaros em espeleotemas silicosos em cavernas em granito, tanto os organismos inteiros como fragmentos dos mesmos. Galindo (2018) discutiu especificamente o papel que estes pequenos animais têm na construção e intemperismo dos espeleotemas. Segundo a autora, eles costumam ocupar a superfície externa das feições modificando-as por meio de perfurações e remobilização do material poliminerálico que as constituem.

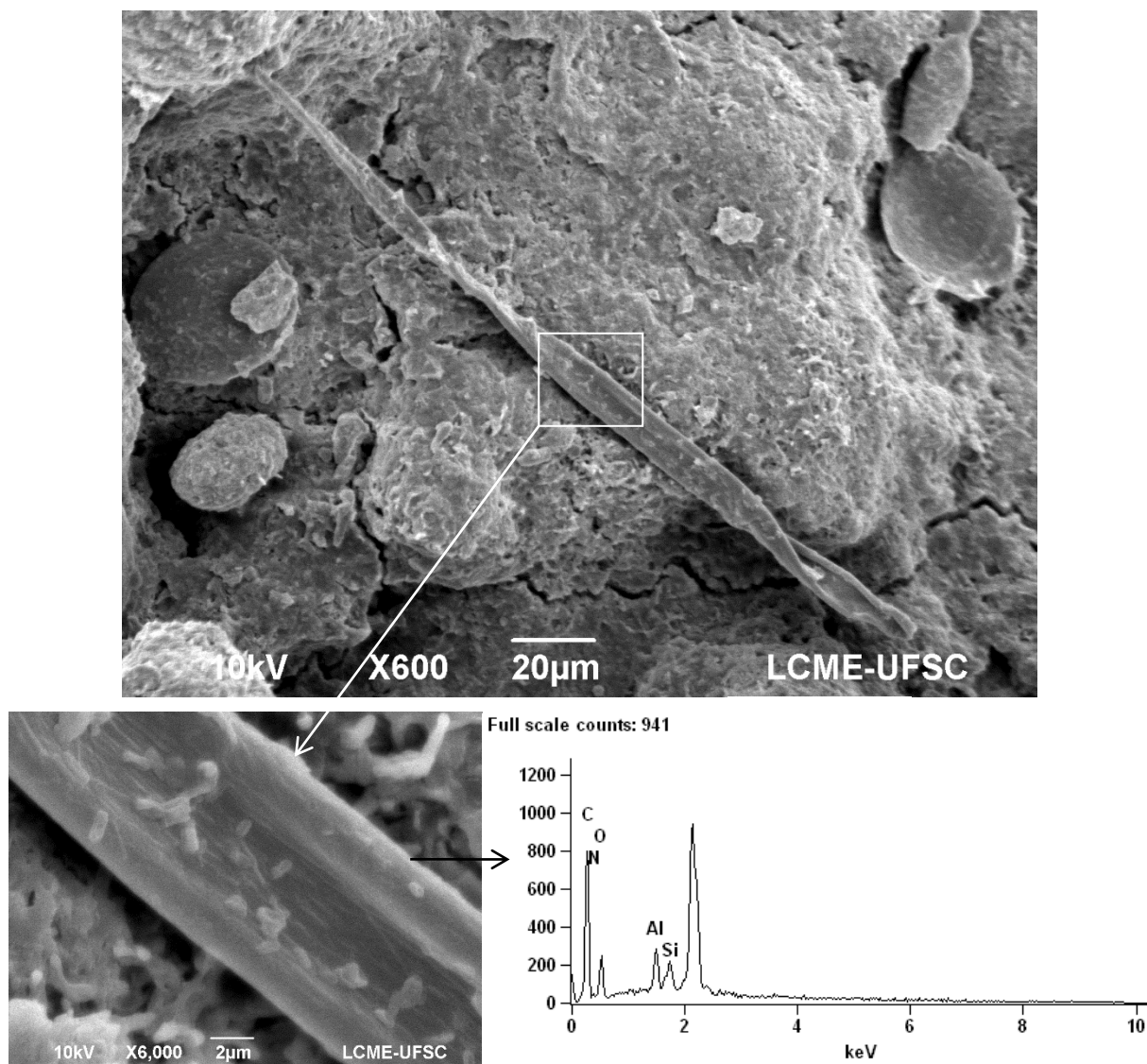
Fragmentos de vegetais também foram observados em algumas das amostras (Figura 6.78), enquadrados assim em função do tamanho, da morfologia e do aspecto fibroso. Este material é alóctone, ou seja, foi incorporado aos espeleotemas pela ação da água, do vento ou mesmo de outros organismos. Um conjunto de elementos não identificados completa o quadro biológico associado aos espeleotemas (Figura 6.79).

Figura 6.77 – Ácaros avistados em conjunto de espeleotemas coraloides arborescentes – SAC.



Fonte: Henrique Pontes

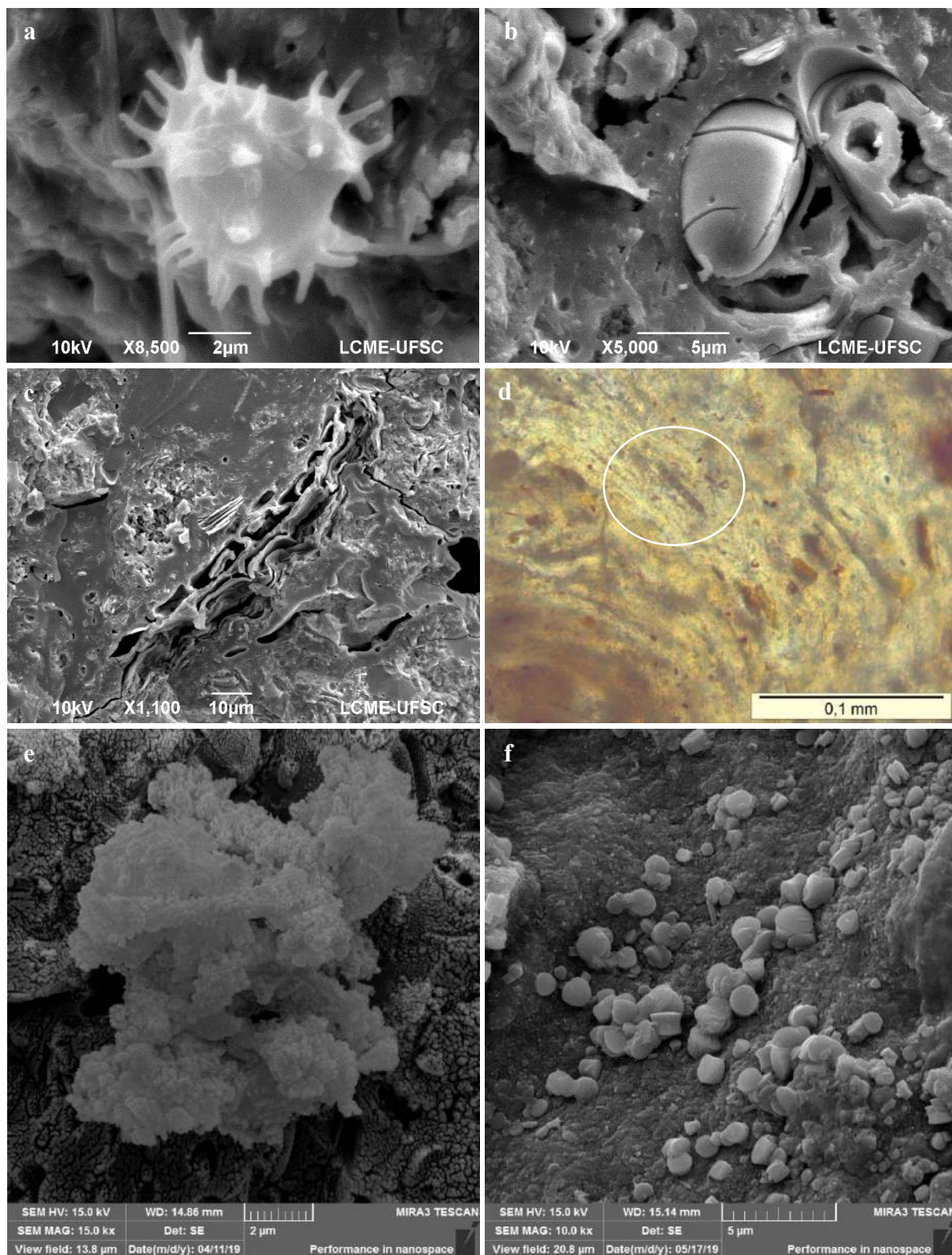
Figura 6.78 – Fragmento vegetal recoberto por bacilos na amostra GSG 1. À direita e à esquerda, tecas de amebas. No detalhe, setor que foi analisado por EDS, onde o carbono tem uma participação em porcentagem em peso de quase 70%. O pico não identificado é do ouro utilizado no recobrimento da amostra.



Fonte: LCME-UFSC



Figura 6.79 – Elementos biológicos não identificados observados nas amostras de espeleotemas: a) GSG 1A; b) e c) SAC 2; d) SAC 5A; e) SAC 12; f) SAC 14.



Fonte: LCME-UFSC (a, b, c); A autora (d); C-LABMU-UEPG (e, f)

### 6.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As microanálises de EDS permitiram uma avaliação qualitativa sobre a composição química dos espeleotemas, úteis, principalmente, na complementação e confirmação dos dados obtidos nas demais análises realizadas. Em relação às amostras dos espeleotemas cilíndricos e coraloides, os elementos químicos detectados foram: silício (Si), oxigênio (O), carbono (C), alumínio (Al), potássio (K), ferro (Fe), nitrogênio (N), magnésio (Mg), sódio (Na), cálcio (Ca), titânio (Ti) e bromo (Br) (Tabela 6.2 e 6.3). Si, O e C são os elementos comuns a todas as amostras e com maior participação de porcentagem em peso, alternando-se nas três primeiras colocações em função tanto da amostra como do setor ou ponto de análise.

Na amostra SAC 4 (espeleotema cilíndrico de piso) o Si é o que possui a maior porcentagem em peso, seguido do O e do C. Os dois primeiros elementos se destacam mesmo com o foco do EDS no conteúdo biológico (Tabela 6.2). Os demais componentes detectados possuem uma participação pequena (entre 0,25 e 2,02%). Na amostra SAC 5A (espeleotema cilíndrico de teto) o trio Si, O e C varia mais de posição em função do foco de análise (Tabela 6.2), o C prevalece apenas na seleção específica de conteúdo biológico.

Nas análises dos coraloides foi dada ênfase aos elementos biológicos, os quais se destacavam na estrutura das feições. Na amostra GSG 1A, com exceção de superfícies de quebra, onde o foco era a matriz e o Si teve mais peso, o C é majoritário. O N, que está intimamente ligado aos microrganismos, também se destaca (Tabela 6.3). A amostra SAC 12 apresenta valores expressivos em relação ao C, mas Si e O são os elementos com maior peso (Tabela 6.3).

Com exceção do C, N e Br, que estão associados ao conteúdo biológico que recobrem e/ou estão incorporados aos espeleotemas, todos os demais elementos químicos estão presentes na composição dos minerais primários do Granito Ilha, como quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) feldspato alcalino ( $[\text{K,Na}]\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ), feldspato plagioclásio ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8/\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) e biotita ( $\text{K}[\text{Mg,Fe}]_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}][\text{F,OH}]_2$ ), ou secundários, como é o caso da titanita ( $\text{CaTiOSiO}_5$ ). Como foi visto no item 6.2, alguns desses minerais foram identificados no corpo dos espeleotemas. Não se descarta também a contribuição de argilominerais presentes no substrato e na superfície externa das feições.

O Si e o O são os principais componentes químicos da opala ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), e a participação majoritária de ambos nas áreas amostradas confirma a composição mineralógica dos espeleotemas. Como visto, estes elementos estão associados também ao conteúdo

biológico identificado nas feições, evidenciando o recobrimento e mesmo o processo de sepultamento/fossilização desse material por opala.

O C foi identificado em diferentes setores das amostras, independente do feixe analítico estar dirigido a um material biológico específico ou na matriz (superfície mais homogênea). Já o N estava exclusivamente ligado aos elementos biológicos selecionados. Os espeleotemas são recobertos externamente por um emaranhado de elementos filamentosos, que também aparecem na porção interna, principalmente em áreas porosas. Ademais, a provável participação biológica na formação destas feições implica na incorporação de resquícios dos organismos e/ou de elementos gerados a partir de seus processos metabólicos, de modo que a detecção mais ampla do C não é uma anomalia ou indicação de contaminação (ex.: fita adesiva de carbono que fixa o material no porta-amostra).

Tabela 6.2 – Elementos químicos (em % peso\*) detectados por EDS nas amostras de espeleotemas cilíndricos de piso e de teto (\*erro  $\pm 1$  Sigma; \*\*detecção na camada/raia L).

| Amostra | Si    | O     | C     | Al    | K    | Fe   | N    | Mg   | Na   | Ca   | Br** | Setor analisado                         |
|---------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------------------------|
| SAC 4   | 44,78 | 36,94 | 17,30 | 0,98  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | Contato superfície externa e interna    |
|         | 56,72 | 29,17 | 14,10 | -     | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | Matriz parte interna (PI)               |
|         | 52,73 | 34,33 | 11,66 | 0,81  | 0,47 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | Área porosa PI com elementos biológicos |
|         | 59,21 | 28,70 | 10,69 | -     | -    | -    | -    | -    | 0,25 | -    | 0,25 | Área porosa PI com elementos biológicos |
|         | 45,51 | 32,62 | 19,57 | 0,79  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 1,51 | Placas e filamentos PI                  |
|         | 58,34 | 24,91 | 14,72 | 2,02  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | Elemento cilíndrico PI                  |
|         | 50,04 | 32,04 | 17,21 | 0,70  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | Matriz PI                               |
| SAC 5A  | 62,51 | 8,73  | 22,45 | 2,43  | 3,88 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | Borda cavidade PI                       |
|         | 48,71 | 32,06 | 16,32 | 1,85  | 0,59 | -    | -    | -    | -    | 0,47 | -    | PI                                      |
|         | 24,92 | 24,92 | 41,51 | 2,27  | 0,29 | -    | -    | 0,13 | -    | 1,4  | 4,56 | Interior concavidade PI                 |
|         | 34,67 | 28,02 | 23,14 | 10,25 | 1,64 | 1,49 | -    | 0,38 | 0,23 | 0,19 | -    | Contato porção basal – rocha            |
|         | 55,91 | 33,48 | 10,5  | 0,11  | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | Microesferas superfície externa (SE)    |
|         | 31,81 | 20,47 | 34,96 | 4,29  | 1,28 | 1,83 | 4,05 | -    | -    | 1,32 | -    | Material biológico SE                   |

Fonte: a autora, a partir de dados obtidos pelo LCME-UFSC e C-LABMU-UEPG.

Tabela 6.3 – Elementos químicos (em % peso\*) detectados por EDS nas amostras de espeleotemas coraloides arborescente e nodular (\*erro  $\pm 1$  Sigma).

| Amostra | Si    | O     | C     | Al   | K    | Fe   | N     | Mg   | Na   | Ca | Ti   | Setor analisado                         |
|---------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|----|------|-----------------------------------------|
| GSG 1A  | 19,95 | 25,61 | 37,96 | 1,47 | -    | -    | 15,01 | -    | -    | -  | -    | Superfície externa (SE)                 |
|         | 25,83 | 27,40 | 39,00 | 1,77 | -    | -    | 5,99  | -    | -    | -  | -    | SE                                      |
|         | 10,48 | 15,96 | 57,34 | 6,31 | 1,58 | -    | 8,33  | -    | -    | -  | -    | Material biológico SE                   |
|         | 12,59 | 14,76 | 56,06 | 3,12 | -    | 1,77 | 10,97 | -    | -    | -  | 0,73 | Material biológico SE                   |
|         | 6,52  | 12,24 | 68,49 | 4,32 | -    | -    | 8,43  | -    | -    | -  | -    | Material biológico (vegetal ?) SE       |
|         | 15,65 | 16,39 | 57,03 | 1,49 | -    | -    | 9,44  | -    | -    | -  | -    | Material biológico filamentoso SE       |
|         | 53,13 | 41,87 | 1,98  | 2,66 | -    | -    | -     | -    | 0,36 | -  | -    | Superfície de quebra parte interna (PI) |
|         | 6,65  | 2,28  | 79,15 | -    | -    | -    | 11,93 | -    | -    | -  | -    | Material biológico (vegetal?) SE        |
|         | 41,79 | 25,12 | 30,79 | 1,72 | -    | -    | -     | 0,32 | 0,26 | -  | -    | Superfície de quebra PI                 |
|         | 10,20 | 7,98  | 76,32 | 0,39 | -    | -    | 5,12  | -    | -    | -  | -    | Materiais biológicos SE                 |
|         | 16,02 | 9,63  | 67,07 | 0,83 | -    | -    | 6,46  | -    | -    | -  | -    | Materiais biológicos SE                 |
| SAC 12  | 29,82 | 40,67 | 26,96 | 2,55 | -    | -    | -     | -    | -    | -  | -    | Material biológico esférico PI          |
|         | 44,83 | 27,88 | 24,53 | 2,75 | -    | -    | -     | -    | -    | -  | -    | Material biológico esférico PI          |
|         | 32,49 | 49,80 | 16,61 | 1,10 | -    | -    | -     | -    | -    | -  | -    | Material arborescente PI                |
|         | 38,56 | 32,59 | 24,29 | 4,56 | -    | -    | -     | -    | -    | -  | -    | Área porosa PI                          |
|         | 30,21 | 45,75 | 18,78 | 1,68 | -    | -    | 3,58  | -    | -    | -  | -    | Materiais biológicos PI                 |

Fonte: a autora, a partir de dados obtidos pelo LCME-UFSC e C-LABMU-UEPG.

No *flowstone* referente à amostra SAC 14 os dados obtidos por EDS confirmam um óxido de manganês na composição do espeleotema, tendo sido detectados os seguintes elementos químicos: Si, O, C, Al, Fe, N e manganês (Mn). O e Mn são os que possuem a maior participação (porcentagem em peso), C e Al aparecem na sequência, com uma participação semelhante entre si (Tabela 6.4).

O Mn é um elemento químico de transição, ou seja, está localizado no meio da tabela periódica, no limiar entre os metais e os não metais. Na natureza é encontrado em uma grande diversidade de ambientes geológicos, combinado com outros elementos na formação de minerais, principalmente na forma de óxidos, destacando-se: dióxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos (SAMPAIO *et al.*, 2008).



Uma combinação bastante comum do Mn é com o Fe, devido às similaridades químicas entre os dois elementos. Na amostra analisada esta combinação está presente, principalmente no setor estratificado da amostra. O Al e o Si sugerem contaminação por sílica e argilominerais, provavelmente do contato com o substrato, já o C e o N endossam o que foi atestado no MEV, que é a presença de microrganismos na estrutura da feição.

A análise de EDS do *flowstone* referente à amostra GSG 2 mostrou a presença de O, Al, Si, C e N, sendo que os três primeiros aparecem em maior proporção com participações relativamente parecidas. Tais elementos químicos, como dito anteriormente, indicam provavelmente que estas feições são compostas por alofano, um silicato hidratado de alumínio. O C tem uma presença expressiva em todos os pontos analisados, já o N é mais restrito e aparece em pouca quantidade. Ambos são provenientes da presença de compostos orgânicos e microrganismos na amostra, tais como fungos e bactérias, identificados por MEV.

Tabela 6.4 – Elementos químicos (em % peso\*) detectados por EDS nas amostras de espeleotemas planares do tipo *flowstone* (\*erro  $\pm 1$  Sigma).

| Amostra | Si    | O     | C     | Al    | Fe    | N    | Mn    | Sector analisado                      |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|---------------------------------------|
| SAC 14  | 9,15  | 52,62 | 17,21 | 10,87 | -     | 5,06 | 5,08  | Material biológico parte interna (PI) |
|         | 5,03  | 43,55 | 11,09 | 12,17 | 3,36  | -    | 24,80 | Materiais esféricos PI                |
|         | 3,11  | 32,79 | 8,03  | 7,75  | 14,41 | -    | 33,91 | Área estratificada PI                 |
|         | 12,48 | 36,98 | 12,56 | 14,64 | 3,56  | -    | 19,78 | Superfície de quebra PI               |
| GSG 2   | 20,92 | 36,82 | 16,46 | 25,80 | -     | -    | -     | Material biológico PI                 |
|         | 22,70 | 34,55 | 11,90 | 29,61 | -     | 1,24 | -     | Substrato PI                          |
|         | 20,77 | 33,17 | 18,33 | 25,45 | -     | 2,28 | -     | Substrato PI                          |
|         | 18,02 | 40,17 | 13,41 | 28,41 | -     | -    | -     | Substrato PI                          |
|         | 30,94 | 13,68 | 23,57 | 31,81 | -     | -    | -     | Substrato PI                          |

Fonte: a autora, a partir de dados obtidos pelo C-LABMU-UEPG e LCME-UFSC.

#### 6.4 GÊNESE E DESENVOLVIMENTO DOS ESPELEOTEMAS

Os espeleotemas amostrados e analisados, provenientes do SAC e da GSG, são produtos da combinação de mecanismos inorgânicos e orgânicos que têm na ação da água e de microrganismos seus principais fatores desencadeadores. No entanto, há diferenças importantes entre os processos e dinâmica envolvidos na gênese dos espeleotemas silicosos (cilíndricos e coraloides) e os *flowstones*, composto por óxidos de manganês e alofano.

#### 6.4.1 Espeleotemas cilíndricos e coraloides

Na área externa às cavernas, os matacões estão, na maioria das situações, envolvidos/recobertos parcial ou totalmente por solo e serapilheira (figuras 6.80a, b). Em seus topos e mesmo nas superfícies laterais são recobertos por vegetação, como pequenas árvores, cipós, bromélias e briófitas (Figura 6.81), o que favorece a formação de matéria orgânica residual e mesmo de solo, além da retenção de umidade.

As águas pluviais, antes mesmo de adentrarem às cavernas, passam por esta camada de vegetação, restos orgânicos, solo e microrganismos associados, incorporando os ácidos orgânicos e outras substâncias por eles produzidos, o que pode potencializar seu ataque químico à rocha. Os microrganismos que colonizam a parte interna da caverna também contribuem na adição de ácidos orgânicos e compostos quelantes à água percolante.

Figura 6.80 – Matacões parcialmente envolvidos/recobertos por solo e serapilheira: a) entrada secundária do SAC; b) entrada da Gruta dos Buracos.



Fonte: a autora (a); Rodrigo Dalmolin (b)

Com passagem facilitada pelas várias aberturas que as cavernas em matacões possuem e, principalmente, pelas fraturas e descontinuidades inerentes à rocha, a água meteórica circula superficialmente e internamente pelo granito, remobilizando minerais pela cadeia de eventos intemperismo físico/erosão/transporte (material detrítico) e dissolvendo minerais por intemperismo químico, colocando as substâncias derivadas das reações que caracterizam esse processo em solução.

A sílica é uma dessas substâncias, proveniente da alteração dos silicatos que compõem o granito, em especial os feldspatos, fases minerais mais susceptíveis ao intemperismo químico (os feldspatos alcalinos são mais resistentes que os feldspatos do tipo plagioclásio com teores moderados a altos de cálcio) (Figura 6.82). Segundo Finlayson e Webb (1985) a conversão de feldspato em argila é mais importante na liberação de sílica do que a dissolução direta de quartzo, inclusive com as águas subterrâneas associadas a rochas ricas em plagioclásio teor de sílica maior. Não se descarta, entretanto, que haja uma dissolução, ao menos parcial, do quartzo, principalmente pela influência de ácidos orgânicos (BENNETT, 1991; SANJURJO *et al.*, 2007, ROMANÍ *et al.*, 2010a).

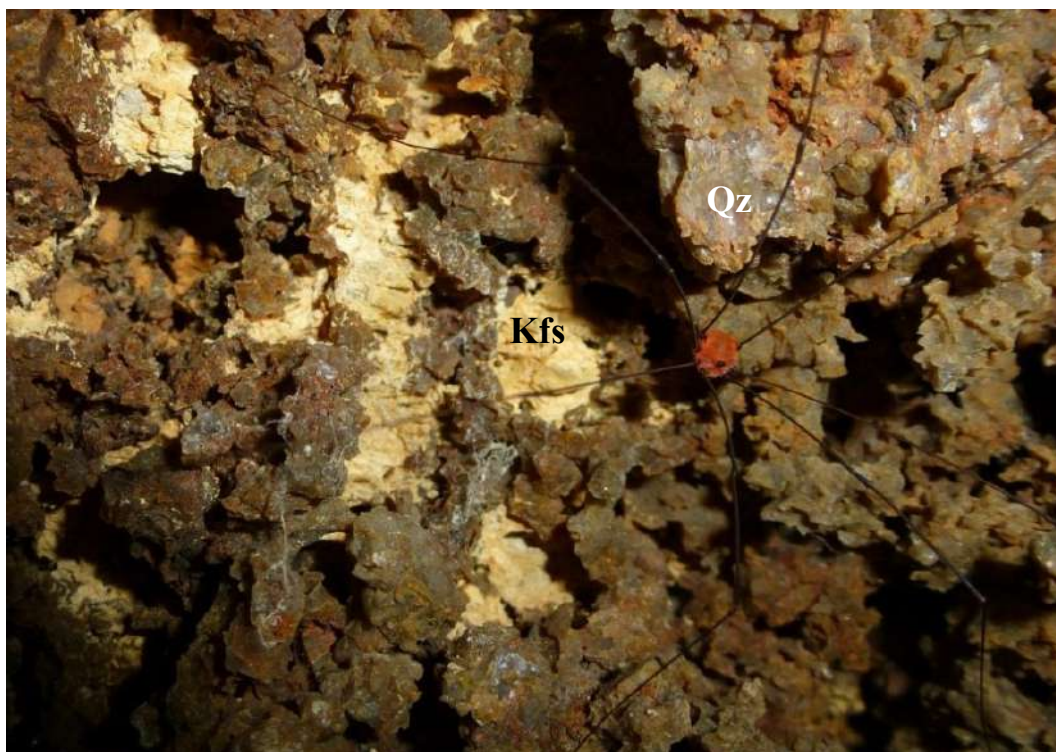
Figura 6.81 – Área externa do SAC. Os topos e superfícies laterais dos matacões que formam a caverna são recobertos por árvores, cipós, muitas bromélias e briófitas, além dos resíduos orgânicos gerados por essa vegetação.



Fonte: a autora



Figura 6.82 – Contraste entre o quartzo (Qz), em relevo e desprovido de sinais de alteração, e o feldspato potássico (Kfs), já alterado para caulinita – Gruta do Riacho Subterrâneo. O opilião tem um corpo (cefalotórax + abdômen) de ~3 mm.



Fonte: Rodrigo Dalmolin

A água enriquecida em sílica (gel de sílica) circula lentamente pelas fraturas, interstícios e pelas superfícies dos matacões. Na zona vadosa (contato água – ar) a evaporação gradual da água eleva a concentração da sílica acima do limite de saturação e, por desidratação, o gel de sílica se transforma em opala. O precipitado de opala se deposita na superfície rochosa na forma de microesferas de cor esbranquiçada (figuras 6.83, 6.84 e 6.85) as quais constituem a fase inicial de formação dos espeleotemas.

Para que a sílica se precipite e os espeleotemas se formem é essencial que a água circule em baixa velocidade. Um entendimento do que ocorre com a sílica passa pela compreensão de aspectos físicos afetos ao movimento da água, como tensão superficial, capilaridade e gravidade, os quais vão determinar o desenvolvimento de diferentes tipos de feições (ROMANÍ e VILAPLANA, 1984; SANJURJO *et al.*, 2007, ROMANÍ *et al.*, 2010b).

Dentre os espeleotemas silicosos analisados, os cilíndricos e coraloides localizados no teto provavelmente tiveram sua gênese relacionada a uma circulação laminar e/ou descendente da água, com influência da gravidade. Infere-se que não houve gotejamento, sendo a lâmina e as gotículas de água sustentadas junto ao substrato rochoso por tensão



superficial. As feições cilíndricas de piso e os coraloides, tanto de piso como de parede, muito provavelmente foram formados por processo de exsudação de água do substrato, onde soluções aquosas, por capilaridade, circularam lenta e descontinuamente através de fraturas e interstícios na rocha. Galindo (2013, p. 110), inclusive, refere-se a espeleotemas desse tipo como depósitos de exsudação, destacando que são os mais abundantes e característicos das cavernas por ela estudadas.

*Son aquellos depósitos formados a partir de soluciones acuosas que, por capilaridad, circulan lenta y discontinuamente por los poros intersticiales de las rocas y espeleotemas preexistentes. Para su formación es necesario que el movimiento de aguas sea extremadamente reducido para que no se formen gotas en los puntos de salida. No es la gravedad el proceso desencadenante de su génesis sino la evaporación del agua y la capilaridad.*<sup>6</sup>

A precipitação da opala, além de acontecer a partir de processos inorgânicos/abióticos, também pode ser induzida pela ação de diferentes microrganismos que colonizam a superfície da rocha, como bactérias, amebas e fungos (Figura 6.86), que foram identificados associados aos espeleotemas, e também líquens, diatomáceas e outras algas, que, embora não tenham sido identificados, muito provavelmente também ocorram nas cavernas estudadas. Como foi visto anteriormente, mesmo pequenas aranhas podem contribuir para a precipitação da opala através de suas teias.

Segundo Sanjurjo *et al.* (2007) os microrganismos, além de favorecerem a meteorização da rocha por meio da produção de compostos quelantes e ácidos orgânicos, que provocam alterações de pH, ainda podem atuar como núcleos de precipitação da opala e como incorporadores do Si disponível para confecção de suas estruturas orgânicas.

Para Galindo (2013), a presença dos microrganismos é decisiva para a formação dos espeleotemas nas cavernas graníticas, estabelecendo-se uma relação de interdependência entre ambos. De um lado, a participação biológica na alteração dos minerais do granito e na precipitação da opala, de outro, o papel da sílica no condicionamento de determinados microrganismos e dos espeleotemas como substrato para estas e outras formas de vida (ver item 6.2.4).

---

<sup>6</sup> São aqueles depósitos formados a partir de soluções aquosas que, por capilaridade, circulam lenta e descontinuamente pelos poros intersticiais das rochas e espeleotemas preexistentes. Para sua formação é necessário que o movimento da água seja extremamente reduzido para que não se formem gotas nos pontos de saída. Não é a gravidade o processo desencadeante de sua gênese, mas sim a evaporação da água e a capilaridade.

Figura 6.83 – Precipitado de opala na forma de microesferas aglutinadas revestindo o granito no SAC. Há na imagem diferentes estágios de desenvolvimento dos espeleotemas, das microesferas de opala às feições coraloides já formadas. Na porção esquerda da imagem é possível ver fios de teias de aranha sobre os espeleotemas.



Fonte: Henrique Pontes

Figura 6.84 – Microesferas de opala revestindo o granito na Gruta do Saco Grande (amostra GSG 1B). Neste contexto se desenvolvem coraloides arborescentes (amostra GSG 1A).



Fonte: a autora

Figura 6.85 – Precipitado de opala revestindo o granito na Gruta das Feiticeiras. Na metade direita da imagem ocorrem coraloídes bem desenvolvidos.



Fonte: a autora

Figura 6.86 – Teto da Gruta das Feiticeiras colonizado por fungos e possivelmente líquens (porção esbranquiçada).



Fonte: a autora



No processo de desenvolvimento das feições, os materiais inorgânicos e orgânicos se conectam a partir de novos episódios de precipitação de opala e/ou da redissolução e reprecipitação da mesma, recobrando e incorporando os elementos biológicos à fábrica dos espeleotemas (ver figuras 6.65, 6.67 e 6.68). Material detrítico, como minúsculos grãos minerais removidos por intemperismo físico e transportados pela água (ver figuras 6.53 a 6.58), além de fragmentos vegetais (ver Figura 6.78), também são capturados neste microambiente e integrados pela opala ao corpo dos espeleotemas.

A redissolução e reprecipitação da opala são processos importantes para mudanças texturais nos espeleotemas ao longo de sua formação, os quais acontecem quando a água volta a circular em locais com espeleotemas pré-existent. A solubilidade aquosa da sílica amorfa é até 10 vezes maior que a do quartzo a uma temperatura de 25°C e pH equilibrado/neutro (WILLIAMS *et al.*, 1985), o que facilita esses processos a cada novo episódio de chuvas.

Sanjurjo *et al.* (2007, p.129) descreveram três tipos de texturas, as quais representam diferentes estágios no desenvolvimento das feições:

*(1) textura porosa brechoide/conglomerática, grano soportada, con fábrica abierta con ópalo-A precipitado como esferoides y pequeños clastos. Ocasionalmente se incluyen fragmentos de cuarzo o feldespato, restos orgánicos y microorganismos; (2) textura semi-porosa con ópalo precipitado en mayor proporción, con una fábrica más cerrada al aumentar el tamaño de los oolitos por acreción, aunque conserva una porosidad interconectada; (3) textura casi cerrada donde el ópalo precipitado en cantidades mayores ocasiona la colmatación de los poros e incluso el recubrimiento superficial del espeleotema.*<sup>7</sup>

O espeleotema cilíndrico de piso (ver figuras 6.37 e 6.39) e os coraloides arborescente (ver Figura 6.42) e nodular (ver Figura 6.43), embora apresentem setores pontuais compatíveis com a descrição do tipo de textura 1, no geral, correspondem ao tipo 2. Já o espeleotema cilíndrico de teto (em forma de grama) apresenta uma textura bem mais fechada, do tipo 3 (ver figuras 6.38, 6.40 e 6.87).

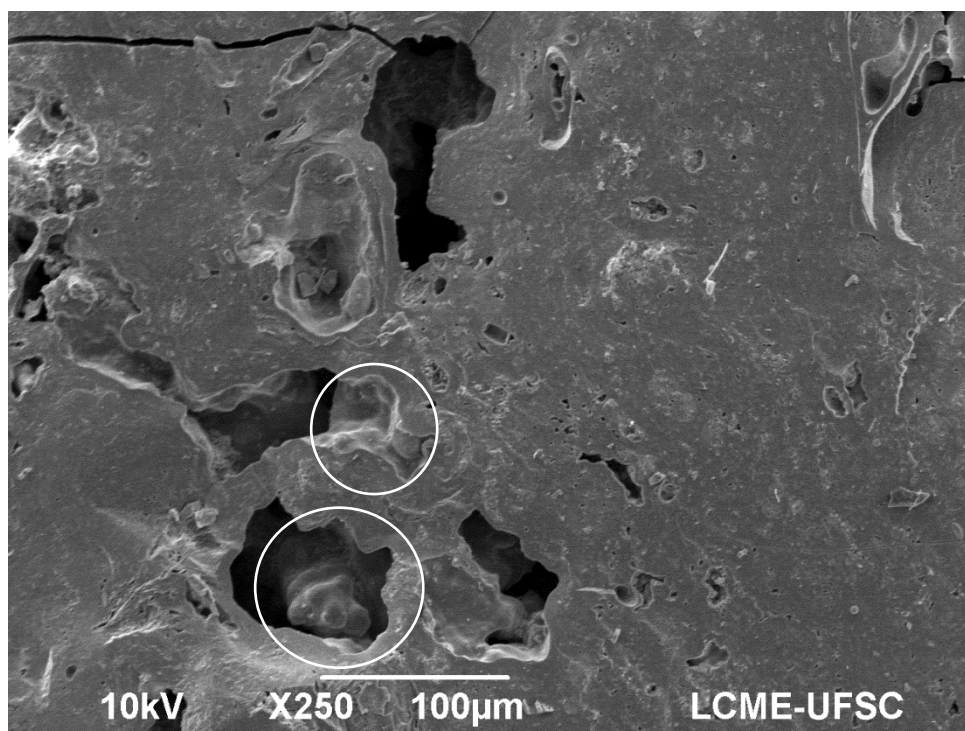
A formação dos espeleotemas é descontínua, o que é evidenciado pela estrutura organizada em camadas rítmicas, as quais marcam a sucessão das condições ambientais que vigoraram ao longo de seu desenvolvimento, principalmente em relação à umidade (períodos úmidos x períodos secos) (ROMANÍ e RODRÍGUEZ, 2007). Nos espeleotemas analisados foi

<sup>7</sup> (1) textura porosa brechoide/conglomerática, grão suportada, com fábrica aberta com opala-A precipitada como esferoides e pequenos clastos. Ocasionalmente incluem fragmentos de quartzo ou feldspato, restos orgânicos e microorganismos; (2) textura semiporosa com opala precipitada em maior proporção, com uma fábrica mais fechada ao aumentar o tamanho dos oólitos por acreção, embora mantenha uma porosidade interconectada; (3) textura quase fechada onde a opala precipitada em quantidades maiores ocasiona a colmatação dos poros e até mesmo o recobrimento superficial do espeleotema.



observada uma sucessão de camadas de coloração clara e escura, perceptíveis principalmente a olho nu, em lupa e nos menores aumentos no microscópio ótico (ver figuras 6.47 a 6.50). Segundo Romaní *et al.* (2003) o final de cada camada de acréscimo de sílica amorfa pode ser marcado por um acúmulo de óxidos amorfos (ex.: óxido de ferro).

Figura 6.87 – Aspecto textural interno do espeleotema cilíndrico de teto (amostra SAC 5A). Nas poucas áreas porosas é possível ver as microesferas de opala bem coalescidas em função dos processos de redissolução e reprecipitação da opala, que tornam a textura mais compacta e maciça.



Fonte: LCME-UFSC

Alguns dos principais trabalhos que abordam espeleotemas silicosos em cavernas graníticas (ROMANÍ e VILAPLANA, 1984; ROMANÍ e TWIDALE, 1998; VERDÍA *et al.*, 2000; ROMANÍ *et al.*, 2003; SANJURJO *et al.*, 2007; ROMANÍ *et al.*, 2010a; ROMANÍ *et al.*, 2010b; GALINDO, 2013 e ROMANÍ *et al.*, 2014) apontam que a etapa final no desenvolvimento das feições consiste na formação de minerais idiomorfos de composições diversas, como gipso, carbonato cálcico e fosfatos, principalmente na extremidade (ponta) das mesmas.

Em relação ao gipso, que é o mais comum, Sanjurjo *et al.* (2007) disseram que este mineral é precipitado a partir da evaporação da água remanescente acumulada nas áreas porosas do próprio espeleotema, formando penachos geminados curvos, chamados de

*triquitos* e *whiskers* (no português, “bigodes”). São cristais bem formados, podendo assumir formas prismáticas, aciculares ou planares. Segundo os autores, os elementos químicos em solução que dão origem a estes depósitos são o Ca e o S (enxofre), o primeiro provavelmente proveniente da alteração do feldspato plagioclásio, o segundo de origem incerta, mas provavelmente oriundo da passagem da água por matéria orgânica antes de adentrar a caverna.

A ocorrência destes tipos de minerais, principalmente gipso, associados de forma pontual a espeleotemas de opala foi documentada nos trabalhos de Willems *et al.* (2002) e Ciaccale *et al.* (2008) em cavernas em granito, Daza *et al.* (2016) em tubos de lava e Sauro *et al.* (2014) em cavernas em quartzo-arenito.

Nas amostras de espeleotemas analisados e nos conjuntos observados em campo não foi identificada a ocorrência destes depósitos minerais, seja de gipso ou com outras composições. Há duas hipóteses principais para este fato: 1) clima atual úmido, com pluviosidade alta e regular, o que permite um aporte constante de água para as cavernas e uma alta umidade do ar no ambiente subterrâneo, impedindo a evaporação completa da água associada aos espeleotemas e a consequente formação desses minerais. Tais condições também podem ter implicado na dissolução dos minerais eventualmente formados em uma situação pretérita, de clima mais seco, já que se tratam de materiais frágeis, solúveis e assim efêmeros; 2) quantidade baixa de enxofre e dos outros elementos químicos em solução necessários para a formação dos depósitos.

#### 6.4.2 Flowstones

Os *flowstones* se formam em locais onde há circulação perene e/ou temporária de água, escoando lentamente sobre o substrato na forma de um “lençol” ou de forma concentrada, em filete. No primeiro caso as feições são caracterizadas por uma crosta escura constituída por óxido de manganês, provavelmente birnessita. No segundo caso os espeleotemas são lineares, podendo haver uma única feição ou um conjunto delas num mesmo local, possuem colorações variadas e são constituídas provavelmente por alofano. Em ambas as situações, os *flowstones* são ornamentados por *microgours*, que nas feições lineares são mais proeminentes ou desenvolvidos.

Nos *flowstones* de óxido de manganês (ver figuras 6.30 e 6.32) o fluxo de água principal pode ter ramificações em função da morfologia e descontinuidades dos matacões,

gerando “braços” secundários do espeleotema (figuras 6.88a, b). Essa característica mostra a ligação desses depósitos com a água corrente.

Segundo Frierdich *et al.* (2011) os óxidos de Mn se formam em cavernas úmidas, sendo depositados tanto pela água oriunda da infiltração quanto por cursos de água que circulam pela caverna, sendo a segunda situação a mais comum. No caso do SAC, a área de precipitação desse material se restringe a locais onde a água circula de forma perene, não tendo sido observados em áreas com circulação intermitente de água.

Estes depósitos ocorrem quando o manganês solúvel em sua forma divalente ( $\text{Mn}^{2+}$ ) é oxidado em manganês trivalente ( $\text{Mn}^{3+}$ ) ou tetravalente ( $\text{Mn}^{4+}$ ) nos ambientes superficiais e oxigenados (POST, 1999; FRIERDICH *et al.*, 2011). Nos casos observados, os espeleotemas ocorrem onde a água ressurge em setores abertos da caverna, ou seja, quando passa de uma área confinada (ambiente redutor) para a atmosfera subterrânea (ambiente oxidante).

Figura 6.88 – “Braços” secundários de *flowstones* de óxido de manganês associados a ramificações do caminho principal de fluxo da água em função da morfologia e descontinuidades dos matacões: a) ramificação ligada ao espeleotema da Figura 6.29; b) ramificação ligada ao espeleotema da Figura 6.32.



Fonte: a autora

As rochas e os solos são as principais fontes do Mn (POST, 1999). No Granito Ilha, mesmo em baixas concentrações, este é um elemento que figura na análise geoquímica da rocha (CORRÊA, 2016). No SAC também foram encontrados muitos seixos e blocos de *duricrust* ferruginoso, mostrando que tanto o Fe como o Mn estão disponíveis no ambiente onde a caverna se insere.

Embora processos físico-químicos estejam envolvidos na formação dos depósitos de óxidos de Mn, sendo a concentração de Mn em solução, a temperatura e o pH fatores determinantes, a ação microbiana é tida como relevante no desenvolvimento dos mesmos (GRADZIŃSKI *et al.*, 1995; MILLER *et al.*, 2012). Tebo *et al.* (2004), baseados nas constatações de vários outros autores, afirmaram que microrganismos como bactérias e fungos, que têm capacidade de oxidar o manganês (+2 para +3 ou +4), estão presentes de forma generalizada na natureza e aceleram muito a taxa de oxidação em diferentes ambientes, compensando inclusive condições abióticas (como pH e temperatura) não favoráveis.

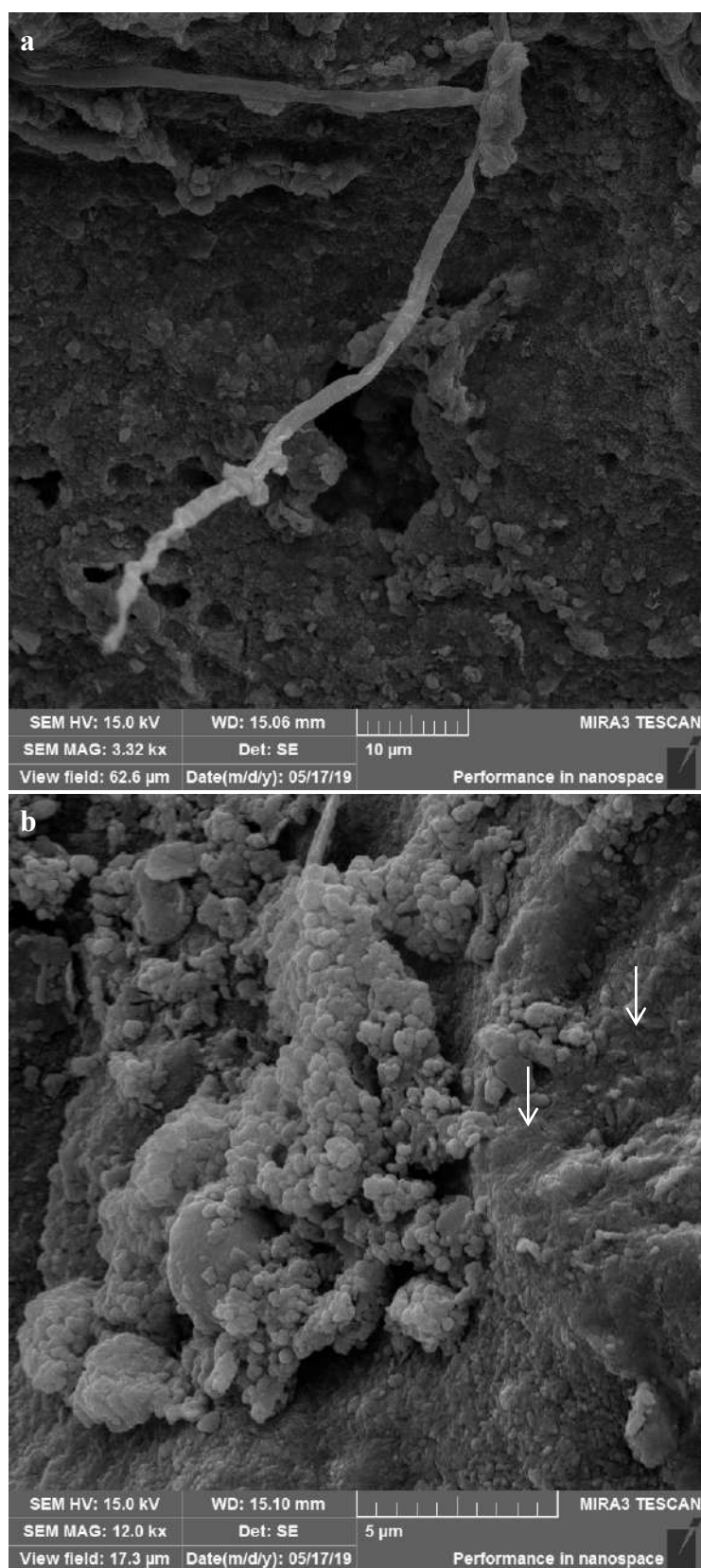
A ação mais conhecida e compreendida é a das bactérias, que segundo Tebo *et al.* (2004) podem catalisar a oxidação do  $Mn^{2+}$  por processos diretos e indiretos. A catálise indireta acontece quando os microrganismos modificam o pH e/ou as condições redox do ambiente aquoso local ou liberam substâncias metabólicas que oxidam o  $Mn^{2+}$ . Diretamente, esta mudança se dá por processos enzimáticos, através da produção de polissacarídeos e proteínas que catalisam a reação. Estes caminhos diretos e indiretos da participação da biota, especificamente bactérias, também são relatados por Vodyanitskii (2009).

Por acréscimos sucessivos de material forma-se o revestimento negro que constitui o espeleotema e, segundo Gradziński *et al.* (1995), o processo diagenético provoca a mineralização dos microrganismos, incorporando-os à estrutura dos depósitos. Estes podem, inclusive, servir como núcleos de deposição, gerando formas globulares e filamentosas. Tebo *et al.* (2004) também fazem menção a este fato, dizendo que na etapa final da oxidação do  $Mn^{2+}$  as bactérias oxidantes frequentemente ficam incrustadas no óxido de Mn formado.

O *flowstone* analisado é rico em conteúdo biológico que, pelas características morfológicas, consiste principalmente de fungos (Figura 6.89a) e bactérias (Figura 6.89b). Este fato corrobora as informações sobre a presença e possível participação biológica na formação dos espeleotemas.



Figura 6.89 – Microrganismos observados por MEV na parte interna da amostra do *flowstone* (SAC 14): a) Esporo e hifas (?); b) Estafilococos e sarcinas (?) recobrendo elemento esférico. No substrato, bacilos agrupados (setas) (?).



Fonte: C-LABMU-UEPG

As microconcavidades ou microbarreiras que caracterizam a superfície dos *flowstones* associados às faces inclinadas e verticais dos matacões são produto da combinação da posição em que se formam e da velocidade do filme de água. Segundo Romaní *et al.* (2014), nessas situações, o fluxo lento da água favorece a deposição e adesão de materiais em solução e detríticos à superfície rochosa, levando ao desenvolvimento de estruturas lineares com bordas sinuosas no sentido do escoamento. O padrão dos *microgours* é relativamente homogêneo, mas as bordas podem se ampliar preferencialmente na direção de um fluxo de água individualizado. Já as feições formadas junto ao curso d'água não são ornamentados por *microgours*, as superfícies são lisas e em grande parte desgastadas pela ação da água.

Os *flowstones* de alofano estão relacionados à circulação intermitente de água, não tendo sido observados fluxos ativos ou qualquer outro tipo de umidade nos locais onde foram observados. Na Gruta do Saco Grande a feição se desenvolve em uma parede vertical, a água adentra pelo contato entre o matacão que forma esta parede e o matacão que forma o teto, escorrendo em vários pontos, gerando um conjunto de feições lineares paralelas (ver Figura 6.35). No SAC e na Gruta da Jararaca as feições são individuais e estão associadas a matacões de teto, condicionadas a arestas que marcam as faces menos arredondadas dos mesmos, por onde a água que adentra pelas aberturas entre os matacões tende a concentrar seu fluxo (ver Figura 6.34).

Segundo Webb e Finlayson (1984) a água que entra na caverna passa antes por camadas de vegetação, matéria orgânica e solo, incorporando elementos como alumina e sílica (muito comuns em solos derivados da decomposição do granito), ácidos orgânicos e CO<sub>2</sub>, estes dois últimos componentes que provocam alterações no pH da água. Segundo os autores, ao adentrar na caverna a solução perde CO<sub>2</sub>, o que aumenta seu pH e altera a solubilidade dos colóides de alumina e sílica, fazendo com que se precipitem na forma de um gel, que vai formar o alofano. Além de alterações no pH da água, mudanças sutis na temperatura atmosférica ou no potencial redox podem favorecer esse processo (WEBB e FINLAYSON, 1984; FINLAYSON e WEBB, 1985). A participação de microrganismos na precipitação do alofano também é considerada, sendo muito comum encontrá-los associados à estrutura dos espeleotemas (DAZA e BUSTILLO, 2015).

## 7 VALORAÇÃO E GEOCONSERVAÇÃO DAS CAVERNAS EM MATAÇÕES GRANÍTICOS DA ILHA DE SANTA CATARINA

As cavernas em matações graníticos da ISC, a exemplo do SAC e das demais cavidades abordadas nesta pesquisa, são elementos do seu patrimônio natural com importantes valores associados. Identificar e discutir esses valores são etapas necessárias no processo de construção do conhecimento sobre essas cavidades subterrâneas, principalmente por mostrar porquê e para que (quem) elas são relevantes. Outras discussões presentes nesse capítulo estão relacionadas às ameaças às quais esse conjunto de cavernas está sujeito e às estratégias de geoconservação presentes e futuras que podem salvaguardá-las.

### 7.1 VALORAÇÃO DAS CAVERNAS

As cavernas em matações graníticos são elementos da geodiversidade da ISC, conceito este que abarca a diversidade de materiais, formas e processos de origem geológica, geomorfológica, pedológica e hidrológica que caracterizam nosso planeta, incluindo seus conjuntos, estruturas, sistemas e contribuições para as paisagens (GRAY, 2013). Ao mesmo tempo, mudando a escala de observação (da paisagem para o sítio), cada uma dessas cavidades subterrâneas possui seu próprio leque de elementos da geodiversidade.

Um dos trabalhos-chave na identificação e discussão de valores para a geodiversidade é a obra de Gray (2004), na qual o autor propôs sete categorias principais de valores desdobradas, por sua vez, em 32 subcategorias (Quadro 7.1). Os sete principais são: intrínseco, cultural, estético, econômico, funcional, científico e didático, os dois últimos tratados num mesmo quadro descritivo em função de suas interfaces. Este sistema de valoração da geodiversidade foi aplicado por pesquisadores em diferentes áreas pelo mundo, a exemplo do Brasil (PEREIRA, 2010; MOCHIUTTI *et al.* 2011; 2012), inclusive no município de Florianópolis (ALENCAR, 2013; COVELO *et al.*, 2017; COVELO, 2018).

Seguindo uma tendência mundial de avaliação e valorização da natureza com enfoque em bens e serviços ecossistêmicos, que teve como contribuição mais recente a *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), estudo este organizado e publicado sob os auspícios da Organização das Nações Unidas, o sistema de valoração da geodiversidade proposto por Gray (2004) foi reformulado pelo autor em diferentes trabalhos ao longo dos últimos dez anos (GRAY, 2011; 2012; 2018; 2019; GRAY *et al.*, 2013).

Quadro 7.1 – Sistema de valoração da geodiversidade proposto por Gray (2004).

| <b>Categoria de valor</b>    | <b>Subcategoria de valor</b>                                                                                                                                                                                         | <b>Exemplos</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Intrínseco</b>            | 1. Valor intrínseco                                                                                                                                                                                                  | Natureza abiótica livre da valoração do homem                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Cultural</b>              | 2. Folclórico<br>3. Arqueológico e histórico<br>4. Espiritual<br>5. Senso de local                                                                                                                                   | Calçada dos Gigantes (Reino Unido); Torre do Diabo (EUA)<br>Petra (Jordânia); Stonehenge (Reino Unido); ferramentas e artefatos locais<br>Monte Uluru (Austrália); locais indígenas norte-americanos<br>White Cliffs (Dover - Reino Unido); Pedra de Gibraltar                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Estético</b>              | 6. Paisagens locais<br>7. Geoturismo<br>8. Atividades de lazer<br>9. Apreciação à distância<br>10. Atividades voluntárias<br>11. Inspiração artística                                                                | Vistas do mar; caminhadas em áreas rurais; edificações características<br>Grand Canyon (EUA); fiordes noruegueses; Montanhas Rochosas canadenses<br>Escalada; <i>rafting</i> ; passeios em cavernas; coleta de fósseis<br>A natureza em revistas e programas de TV; “Caminhando com os Dinossauros (BBC)”<br>Concerto de muros; construção de trilhas pedestres; restauração de áreas mineradas<br>Literatura (Hardy); música (Sibelius); pintura (Turner)             |
| <b>Econômico</b>             | 12. Energia<br>13. Minerais industriais<br>14. Minerais metálicos<br>15. Minerais para construção<br>16. Gemas<br>17. Fósseis<br>18. Solos                                                                           | Carvão e turfa; óleo e gás; urânio; geotermal; hidroelétrica; marés<br>Potássio; fluorita; caulinita; halita<br>Ferro; cobre; cromo; zinco; estanho; ouro; platina<br>Pedra-brita; agregados; calcário; argila estrutural; gipso; betume<br>Diamante; safira; esmeralda, ônix, ágata<br>Tiranossauro “Sue”; lojas de fósseis e minerais<br>Produção de alimentos; vinho; madeira; fibras                                                                               |
| <b>Funcional</b>             | 19. Plataformas<br>20. Estocagem e reciclagem<br>21. Saúde<br>22. Sepultamento<br>23. Controle da poluição<br>24. Química da água<br>25. Funções do solo<br>26. Funções geossistêmicas<br>27. Funções ecossistêmicas | Edificações e construção de infra-estruturas;<br>Carbono no solo e turfa; óleo e gás em armadilhas; ciclo hidrológico<br>Nutrientes e minerais; paisagens terapêuticas<br>Sepultamentos humanos; aterros sanitários; câmaras nucleares subterrâneas<br>Solos e rochas como filtros de água; espessura do solo<br>Água mineral; whisky<br>Agricultura; vinicultura; florestamento<br>Operação contínua de processos fluviais, costeiros, eólicos, etc<br>Biodiversidade |
| <b>Científico e Didático</b> | 28. Descoberta científica<br>29. História da Terra<br>30. História da pesquisa<br>31. Monitoramento do meio ambiente<br>32. Educação e treinamento                                                                   | Geoprocessos; geotecnologia; geoforenses;<br>Evolução; história geológica da Terra; geoarqueologia<br>Primeira identificação de discordâncias; atividade ígnea, etc<br>Sondagens em capas de gelo; mudanças no nível do mar; monitoramento de poluição<br>Estudos de campo; treinamento profissional                                                                                                                                                                   |

Fonte: a autora a partir de Gray (2004).



A MEA define ecossistema como “um complexo dinâmico de comunidades de plantas, animais e microrganismos e os ambientes não vivos, interagindo como uma unidade funcional” (MEA, 2005, p.V). Já os serviços ecossistêmicos são definidos no documento como os benefícios que o ser humano obtém dos ecossistemas, como serviços de provisão (alimentos, água, madeira, fibras, combustível, etc.), regulação (clima, inundações, doenças, resíduos, qualidade da água, etc.), suporte (formação dos solos, ciclagem de nutrientes, produção primária, etc.) e culturais (estética, espiritualidade, recreação, educação, etc.). Em sua abordagem o estudo subestima serviços prestados exclusivamente pelos elementos abióticos, valorizando essencialmente a biodiversidade (GRAY *et al.*, 2013).

No sentido de chamar a atenção para essa lacuna na MEA (e mesmo em outros estudos e relatórios equivalentes) e evidenciar o protagonismo da geodiversidade na prestação de serviços ecossistêmicos, Gray, começando pelo seu trabalho de 2011, converteu e adaptou os valores e subvalores propostos em seu trabalho de 2004 às mesmas categorias de serviços e bens utilizadas na MEA (Quadro 7.2), à exceção do valor intrínseco, que não se encaixa em uma avaliação utilitária. Adicionou uma nova categoria de serviço à lista, denominada “conhecimento”, alusiva aos valores científico e didático, e passou a designar este conjunto de serviços como geossistêmicos.

Segundo Gray *et al.* (2013) o conceito de bens e serviços ecossistêmicos e sua avaliação qualitativa e quantitativa são vitais para obter apoio público e político à conservação da natureza, global e nacionalmente. Desta forma, é importante que a geodiversidade seja colocada sob a mesma perspectiva que a biodiversidade e que estudos futuros, semelhantes ao MEA incorporem isso de forma natural e óbvia.

A identificação de valores ou serviços geossistêmicos em uma área ampla, com diferentes sítios e elementos da geodiversidade (ex.: um município, uma região, uma Unidade de Conservação) possibilita o levantamento e discussão de várias categorias e subcategorias, inclusive com sobreposição de valores/serviços para um mesmo ponto. No caso das cavernas em análise, os enquadramentos são mais limitados, já que constituem sítios específicos (e não áreas) que entre si possuem uma geodiversidade muito parecida. No entanto, como o importante não é a quantidade de valores/serviços identificados, mas a relevância daqueles que forem levantados, a aplicação de um sistema de valoração é legítima, principalmente para fundamentar as discussões sequenciais sobre ameaças e geoconservação.

Quadro 7.2 – Serviços geossistêmicos (providos pela geodiversidade) propostos por Gray, com indicação dos valores da geodiversidade aos quais se equivalem.

|                               |              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Valor Funcional               | Regulação    | 1. Processos atmosféricos e oceânicos (ex.: circulação dinâmica, química atmosférica, qualidade do ar, regulação do clima, ciclo hidrológico)<br>2. Processos terrestres (ex.: ciclo das rochas, do carbono e outros ciclos biogeoquímicos, sequestro de carbono, armazenamento e regulação climática, processos geomorfológicos, regulação de desastres naturais, regulação da erosão)<br>3. Regulação de inundações (ex.: infiltração, ilhas barreira, diques marginais, dunas de areia, planícies de inundação)<br>4. Regulação da qualidade da água (ex.: solos e rochas como filtros naturais)                                                                                       |
|                               | Suporte      | 5. Processos do solo (ex.: intemperismo, desenvolvimento do perfil do solo) e solo como meio de sustentação do crescimento de plantas<br>6. Provisão de habitat (ex.: habitats dinâmicos, cavernas, lapiás, falésias, pântanos salgados)<br>7. Terra e água como plataforma para atividades humanas (ex.: construção em terra, infraestruturas de geração de energia a partir das ondas e marés)<br>8. Sepultamento e armazenamento (ex.: sepultamento humano e animal, aterros municipais, armazenamento de resíduos radioativos, reservatórios de petróleo e gás, sequestro e armazenamento de carbono, armazenamento de água em aquíferos, lagos, geleiras, reservatórios artificiais) |
| Valor Econômico               | Provisão     | 9. Alimentos e bebidas (ex.: água potável e mineral, sal, geofagia)<br>10. Nutrientes e minerais para uma alimentação e crescimento saudável<br>11. Combustível (ex.: carvão, petróleo, gás, urânio, energia geotérmica e hidrelétrica, energia de marés, ondas e eólica)<br>12. Materiais de construção (ex.: pedras ornamentais, tijolo, agregados, aço, cimento, betume, vidro)<br>13. Minerais industriais (ex.: fertilizantes, produtos farmacêuticos, metais, ligas)<br>14. Produtos ornamentais (ex.: gemas, metais preciosos e semipreciosos)<br>15. Fósseis <sup>8</sup>                                                                                                         |
| Valores Cultural e Estético   | Cultural     | 16. Qualidade ambiental (ex.: paisagens locais características, paisagens terapêuticas para saúde e bem-estar)<br>17. Geoturismo e lazer (ex.: vistas espetaculares de montanhas, recreação ao ar livre, escalada em rocha, coleta de fósseis) <sup>9</sup><br>18. Significados culturais, espirituais, e históricos (ex.: folclore, sítios sagrados, senso de lugar)<br>19. Inspiração artística (ex.: escultura em rocha, literatura, música, poesia, pintura)<br>20. Desenvolvimento social (ex.: sociedades geológicas locais, voluntariado, trabalhos de campo)                                                                                                                      |
| Valores Científico e Didático | Conhecimento | 21. História da Terra (ex.: evolução da vida, extinções, origem das formas terrestres, paleoambientes)<br>22. História da pesquisa (ex.: identificação de discordâncias, fósseis, rochas ígneas)<br>23. Monitoramento e previsão ambiental (ex.: dados de base para pesquisas sobre clima e poluição, testemunhos de sondagem em geleiras, variações no nível do mar)<br>24. Geologia forense<br>25. Educação e emprego (ex.: sítios usados em trabalhos de campo e para treinamento profissional, emprego em geoparques)                                                                                                                                                                 |

Fonte: a autora a partir de Gray (2004; 2011; 2012; 2019).

<sup>8</sup> Na Europa o comércio de fósseis é uma prática legalizada, por isso esse elemento da geodiversidade é listado dentro do serviço de provisão. No Brasil o Decreto-Lei nº 4.146/1942 enquadra os depósitos fossilíferos como bens da união, sendo vetado o comércio desse tipo de material.

<sup>9</sup> No Brasil, matéria disciplinada pelo Título IV (da autorização e da comunicação prévia para extração de fósseis), artigos 296 a 320, da Portaria DNPM 155/2016.

Optou-se por aplicar neste trabalho a abordagem mais recente, dos serviços geossistêmicos, a qual está disseminada nos vários artigos de Gray publicados entre 2011 e 2019, sendo utilizadas aqui principalmente as referências Gray (2011; 2012; 2019). Esta linha também foi incorporada em alguns trabalhos no Brasil, a exemplo de Silva e Nascimento (2016; 2019) para a cidade de Natal (RN). A identificação dos serviços geossistêmicos no SAC e nas demais cavernas em matacões graníticos investigadas na pesquisa está sintetizada no Quadro 7.3, seguida da descrição e discussão dos mesmos.

Quadro 7.3 – Serviços geossistêmicos identificados no SAC e em outras cavernas em matacões graníticos da ISC.

| Serviços geossistêmicos | Exemplos identificados em cavernas em matacões graníticos da ISC                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Regulação</b>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Participação em etapas do ciclo das rochas (produto e palco de processos de intemperismo, erosão e deposição)</li> <li>• Participação em etapas do ciclo hidrológico (áreas de recarga, retenção temporária e fluxos subterrâneos de água, alimentando drenagens superficiais)</li> <li>• Regulação da qualidade da água, tendo os matacões, sedimentos de menor granulometria e o solo como filtros naturais</li> </ul>                                                                                                                                                      |
| <b>Suporte</b>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Habitat para animais (principalmente invertebrados e vertebrados típicos da fauna cavernícola), plantas (matacões como substrato para o desenvolvimento de vegetação rupícola), líquens, fungos e microrganismos diversos</li> <li>• Ambiente propício para formação de depósitos clásticos e químicos (espeleotemas) e formas de alteração</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Provisão</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Fornecimento regular de água potável para moradores locais</li> <li>• Potencial fonte de material microbiológico com aplicações industriais (ex.: fármacos, biofertilizantes, alimentos e bebidas)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Cultural</b>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencial geoturístico de cavernas próximas a trilhas que levam a outros atrativos</li> <li>• Atuação de um grupo de espeleologia e espeleólogos autônomos na ISC</li> <li>• Registro de atividade de cantaria no séc. XX</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Conhecimento</b>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Registros da dinâmica e evolução das encostas dos morros da ISC ao longo do Quaternário</li> <li>• Ampliação do conhecimento sobre o Granito Ilha</li> <li>• Potencial para aprofundamento do estudo sobre os espeleotemas, incluindo abordagens paleoambientais</li> <li>• Pesquisas e publicações (contribuições à espeleologia brasileira sobre cavernas em litologia não carbonática)</li> <li>• Formação de geocientistas (cursos e palestras sobre as cavernas da ISC para cursos de Geografia - UFSC e UDESC e Geologia - UFSC, sítios para aulas de campo)</li> </ul> |

Fonte: a autora inspirada em Gray (2011; 2012; 2019).

### 7.1.1 Serviços de regulação

Os serviços de regulação são aqueles responsáveis por controlar o funcionamento do sistema físico do Planeta, beneficiando a sociedade com a distribuição, ciclagem e balanço de fenômenos, processos e materiais que, em muitos casos, são determinantes para a existência e manutenção da vida na Terra (GRAY, 2012). Alguns exemplos podem ser vistos no Quadro 7.2. Estes serviços podem se manifestar desde a escala global até uma escala local, e é nesta última que os serviços geossistêmicos relacionados às cavernas estudadas exercem influência mais direta.

#### *7.1.1.1 Participação em etapas do ciclo das rochas*

As acumulações de matacões e demais materiais de menor granulometria que dão corpo às cavernas são produtos de uma história longa de transformações sobre o Granito Ilha, que envolve a exposição do maciço rochoso em superfície, o desenvolvimento de um manto de alteração, a formação de matacões a partir das descontinuidades da rocha, a remoção, transporte e deposição desse conjunto de materiais ao longo da encosta ou para além dela (planície costeira e vales fluviais).

Na caverna já formada, esses processos continuam acontecendo e fazem parte da evolução do espaço subterrâneo. Os matacões são continuamente intemperizados pela ação da água, das variações de temperatura e da biota, decompondo-se em “cascas” arredondadas e o saprolito. Materiais menores, incluindo contribuições de outras fontes, como o diabásio e o *duricrust* ferruginoso, são transportados por gravidade e por cursos d’água pela caverna, depositando-se em pontos favoráveis (por ex., em áreas em que a velocidade e o regime de fluxo foram alterados por mudanças de gradiente, tais como as proporcionadas por obstáculos ao longo dos cursos d’água) e se consolidando em conglomerados.

Os sedimentos transportados pelos cursos d’água que nascem e/ou drenam pelas cavidades seguem seu caminho para além das mesmas, podendo até chegar ao mar, integrando novos ambientes e participando da composição dos depósitos continentais e costeiros que caracterizam a ISC. Nesse processo, além da ciclagem das rochas, o relevo se renova, os rios se ajustam às variações nos níveis de base (local e geral) e ao fluxo de descarga de energia e matéria no mar, promovendo um equilíbrio dinâmico entre os diferentes sistemas geomorfológicos envolvidos.



### *7.1.1.2 Participação em etapas do ciclo hidrológico e regulação da qualidade da água*

As cavernas constituem áreas de recarga de aquíferos, a partir da infiltração da água da chuva, que alimenta nascentes e cursos d'água perenes e intermitentes que drenam por suas galerias e salões. Estes cursos d'água subterrâneos, por sua vez, são tributários de drenagens superficiais, que na ISC percorrem percursos curtos até desembocar no mar. A água de origem meteórica também circula pelo espaço subterrâneo a partir de escorrimentos e gotejamentos, que são ativados e/ou intensificados nos períodos chuvosos, e por capilaridade, na situação de ausência de chuvas e em meio não saturado, quando a água se move de forma lenta pelas descontinuidades e interstícios da rocha, de sedimentos e do solo.

A passagem da água pelas cavernas a partir desses diferentes modos de circulação se dá em velocidades distintas, com possibilidade de retenção temporária. Nesse processo, em contato com diferentes substratos e organismos, compostos químicos, orgânicos e detríticos são somados e/ou retirados da solução aquosa, a exemplo da sílica e do óxido de manganês, que por evaporação e/ou ação de microrganismos são precipitados/depositados dando origem a espeleotemas. Tais substratos, a exemplos dos matacões, material de alteração e solo, atuam como filtros naturais, podendo reter eventuais impurezas e contaminantes presentes na água.

### **7.1.2 Serviços de suporte**

O serviço de suporte está relacionado ao apoio ou sustentação que a geodiversidade dá para outros bens e serviços valorizados pela sociedade, a exemplo daqueles que são providos pela biodiversidade (GRAY, 2012), já que geodiversidade é o substrato que permite o desenvolvimento da natureza biótica. Na sua ausência, ou mesmo modificação, a existência de bens e serviços derivados fica comprometida.

#### *7.1.2.1 Habitat para macro e microbiota*

Dos serviços geossistêmicos listados no Quadro 7.3, este é o mais facilmente reconhecido nesse conjunto de cavidades, provavelmente aquele que terá mais apelo em foros distintos das Geociências para a conservação das mesmas. Como visto nos itens 5.6 e 5.7.4 do capítulo 5, o SAC e as demais cavernas visitadas são habitats para uma grande variedade de animais, fungos e microrganismos (a exemplo de fungos microscópicos e bactérias), os quais,

em menor ou maior grau, dependem da existência desses ambientes subterrâneos para se abrigar, alimentar e/ou completar determinadas etapas de seus ciclos de vida.

O SAC e outras das cavernas consideradas na pesquisa são do tipo depósitos coluviais, resultantes de movimentos de massa pretéritos que esculturaram as encostas dos morros da ISC. Estes eventos produziram uma perturbação no ambiente, que passou a buscar sua restauração por meio de mecanismos de autorregulação, a exemplo da sucessão ecológica. Fato é que, principalmente nos casos em estudo, habitats subterrâneos foram formados, com características distintas do meio epígeo, e passaram a sustentar organismos especializados a estas novas condições ambientais.

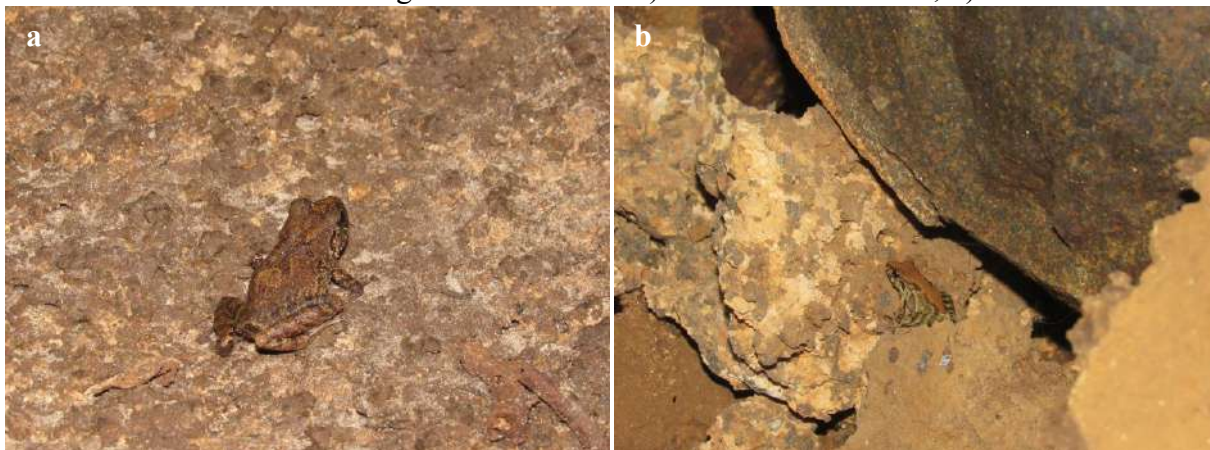
Ao analisarem o impacto dos movimentos de massa na geo e biodiversidade da região dos Cárpatos poloneses, Alexandrowicz e Margielewski (2010) colocaram que esses eventos transformam totalmente o ambiente natural onde ocorrem. Modificam a morfologia da encosta, gerando superfícies côncavas e/ou convexas, podem deslocar grandes quantidades de solo e rochas e alteram a circulação da água e as condições pedogenéticas. A partir das transformações no substrato um mosaico de pequenos habitats com novos recursos naturais se desenvolve. Os autores, que são responsáveis por vários artigos sobre o tema, citam a ocorrência de cavernas no contexto dos movimentos de massa analisados, desenvolvidas tanto em fraturas, antecedendo o processo de ruptura e deslocamento de solo e rochas, como nas acumulações de material resultante desse processo, a exemplo das cavernas em tálus.

Segundo Gonzalez-Ollauri e Mickovski (2017) os deslizamentos de terra são geralmente vistos como processos geomorfológicos catastróficos, provocando perdas de solo e vidas, além de prejuízos materiais à sociedade. No entanto, sob uma perspectiva ecológica, são entendidos como distúrbios naturais que ocorrem com frequência e intensidade variadas com grande contribuição para o desenvolvimento e evolução de ecossistemas em áreas inclinadas. Após estudo de uma pequena vertente com deslizamentos rasos em uma região da Escócia, os autores constataram que a topografia aliada à dinâmica e características do deslizamento desempenharam um papel importante na disponibilidade de nitrogênio no solo e na luminosidade, com consequências na evolução e capacidade de autorregulação da paisagem. A nova realidade em termos de substrato, mesmo em pequena escala, contribuiu para o aumento da diversidade e riqueza de espécies de plantas e consequente estratificação da encosta em diferentes habitats.

Avalia-se que a existência das cavernas em matacões graníticos na ISC tem sido importante para a ampliação das áreas de ocorrência de algumas espécies, a exemplo da

*Ischnocnema manezinho* (GARCIA, 1996), rã endêmica da ISC (OSWALD *et al.*, 2019)<sup>10</sup> que foi observada em várias cavidades (figuras 5.65a, b e 7.1). Embora seja comumente associada ao folhiço, a rãzinha mostra também uma afinidade com o substrato rochoso, o que provavelmente favorece a presença das mesmas nessas cavernas.

Figura 7.1 – Indivíduos de *Ischnocnema manezinho* avistados sobre substrato rochoso em duas cavidades em matacões graníticos da ISC: a) Gruta das Feiticeiras; b) Gruta do Oiteiro.



Fonte: a autora

A associação entre substrato rochoso e água corrente também é um dos fatores que condiciona a ocorrência de um tipo de larva nessas cavernas, observada no SAC e em outras cavidades, como a Gruta das Larvas, que recebeu este nome justamente em função da presença de muitos desses organismos. Estas larvas representam o estágio imaturo de insetos da ordem Trichoptera, possivelmente da família Philopotamidae, que têm como característica a fabricação de refúgios como sacos de seda na forma de uma meia, fixos a determinada superfície (WAHLBERG e JOHANSON, 2014), os quais funcionam como uma rede para captura de alimento (figuras 5.64f, 6.31 e 7.2). Estes insetos são muito sensíveis a perturbações físico-químicas na água, por conta disso são comumente utilizados como bioindicadores da qualidade de ambientes aquáticos (CALOR, 2007; WAHLBERG e JOHANSON, 2014).

Os matacões graníticos que formam as cavernas também sustentam espécimes vegetais diversas, incluindo árvores de pequeno a médio porte, plantas rupícolas, como bromélias, musgos, orquídeas e rainhas do abismo, e líquens. Essa vegetação se desenvolve

<sup>10</sup> <https://www.hojeemdia.com.br/horizontes/v%C3%ADdeo-de-esp%C3%A9cie-amea%C3%A7ada-de-r%C3%A3-ganha-pr%C3%AAmio-de-divulga%C3%A7%C3%A3o-cient%C3%ADfica-no-gen%C3%A9tica-2019-assista-1.748595>

principalmente no meio epígeo, recobrando as massas rochosas que formam o teto e paredes das cavidades ou em áreas internas onde há aberturas que permitem a entrada de luz.

Para além do papel desempenhado pelo substrato rochoso na sustentação da fauna e da flora, as características ambientais exclusivas destes contextos subterrâneos, como estabilidade das condições de temperatura e umidade em relação à área externa, a luminosidade baixa e/ou ausente, a disponibilidade de abrigos, a boa oferta de alimento e o relativo confinamento que protege esses locais de distúrbios comuns nas áreas externas, são fatores importantes para a ocupação por diferentes táxons, principalmente aqueles característicos da fauna cavernícola, além de fungos e microrganismos diversos.

Figura 7.2 – Larva de Trichoptera dentro de seu saco de seda. Indivíduo coletado no SAC.



Fonte: Rafaela Falaschi

#### *7.1.2.2 Ambiente para a formação de depósitos clásticos, espeleotemas e formas de alteração*

Os serviços anteriormente apresentados mostram que as cavernas em foco são ambientes dinâmicos, palcos de processos físicos, químicos e biológicos que, isoladamente ou combinados, dão origem a materiais e formas muitas vezes restritos ao espaço subterrâneo, a exemplo dos espeleotemas, feições cavernícolas por excelência.



Os diferentes tipos de espeleotemas descritos e analisados no capítulo 6 são um dos aspectos mais interessantes da geodiversidade dessas cavernas. As feições cilíndricas e coraloides de composição silicosa constituem um denominador comum e também um ponto de convergência com cavernas em outras litologias em outras regiões do Brasil, mostrando equivalências genéticas, morfológicas e mesmo composicionais. Estas feições necessitam das condições ambientais providas pelas cavernas para se desenvolverem, uma atmosfera relativamente estável, sem correntes intensas de ar, circulação lenta de água e a presença dos microrganismos que colaboram na dissolução dos minerais do granito e posteriormente na precipitação da opala.

Os conglomerados e as feições alveolares também têm sua formação favorecida pelas características do ambiente cavernícola, principalmente o fato de ser um local abrigado onde os processos acontecem de forma mais lenta, sem tantas interferências, como seria na área externa. Os conglomerados podem estar relacionados à morfologia das galerias, que acabam retraindo material transportado pela gravidade e pela água em pontos mais apertados, com obstáculos à passagem ou topograficamente favoráveis.

### **7.1.3 Serviços de provisão**

Os serviços de provisão estão relacionados aos ativos que a sociedade obtém direta ou indiretamente da natureza abiótica, seja para consumo, saúde, geração de energia, matérias-primas em diferentes processos de transformação ou comércio (GRAY, 2012).

#### *7.1.3.1 Fornecimento de água potável*

No SAC, na Gruta do Saco Grande e na Gruta das Jararacas, as três com presença de drenagens perenes, foram observados pontos de captação de água feitos por moradores de residências localizadas nas imediações das cavidades. A partir da implantação de pequenas estruturas de represamento (observadas apenas na Gruta do Saco Grande) e da utilização de mangueiras este recurso chega até a casa dessas pessoas. Embora não tenha sido feita nenhuma análise dessa água, considerando que não há a montante e no entorno imediato das cavernas nenhuma atividade potencialmente poluidora, é possível que seja potável.

A água proveniente das cavernas citadas também está associada ao abastecimento urbano, uma vez que deságua no rio do Mel, com um ponto de captação da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento a jusante.

#### 7.1.3.2 *Potencial microbiológico*

Segundo Barton e Jurado (2007) a microbiologia de cavernas é um campo de estudo interdisciplinar que emergiu ao final do século XX com o desafio de entender a diversidade, o metabolismo e a biogeoquímica das espécies microbianas do contexto subterrâneo, colaborando para o reconhecimento da importância desses organismos e do ecossistema onde se encontram. Tais estudos, a exemplo dos que são realizados em outros ecossistemas considerados extremos (ex.: desertos, zonas abissais dos oceanos, áreas congeladas), têm revelado uma grande diversidade microbiana, incluindo muitas espécies inéditas, com aplicações biotecnológicas, a exemplo da indústria de fármacos, biofertilizantes e alimentos (NORTHUP e BOSTON, 2005; RODRIGUES *et al.*, 2009; MARQUES *et al.*, 2015; CANDIROGLU e GUNGOR, 2017; GHOSH *et al.*, 2017).

A microbiota que coloniza as cavidades estudadas constitui um mundo à parte, microscópico, do qual foi possível ter uma pequena amostra durante a análise dos espeleotemas. O papel que fungos, bactérias e outros microrganismos exercem na alteração do granito, na formação dos espeleotemas silicosos e de óxido de manganês, nos ciclos biogeoquímicos e na cadeia trófica das cavernas, foi indicado como uma possibilidade nesta pesquisa, tendo como base observações de campo, pistas obtidas em laboratório e considerações da bibliografia. Este é um campo de investigação em aberto, que além de confirmar e explicar as funções listadas acima com propriedade e profundidade, pode revelar implicações dessa microbiota para além do espaço subterrâneo.

As cavernas em matacões graníticos da ISC possuem uma conexão muito forte com o ambiente epígeo, principalmente pela grande quantidade de entradas e aberturas que possibilitam essa interação. Este aspecto geoespeleológico garante uma oferta regular de alimento e de água, maior incidência de luz ao longo das galerias e salões e boa circulação de ar. No entanto, tais características se distribuem de forma heterogênea pelas cavidades, há zonas com maior nível de confinamento, afóticas, que podem ser bastante singulares. Essas são peculiaridades a serem consideradas em possíveis estudos microbiológicos nessas cavernas.

### 7.1.4 Serviços culturais

Os serviços culturais são entendidos como aos significados sociais que as pessoas ou comunidades em diferentes escalas atribuem a alguns aspectos da geodiversidade em função de vínculos identitários, históricos, artísticos, estéticos, folclóricos e religiosos (GRAY, 2012). Do conjunto de serviços geossistêmicos considerados esses são os que menos se destacam nas cavernas estudadas, muito provavelmente pelo desconhecimento da população local sobre tais ocorrências.

#### 7.1.4.1 Potencial geoturístico

O geoturismo é uma forma de turismo em áreas naturais que tem como foco principal a apreciação e compreensão de elementos pontuais da geodiversidade ou de uma paisagem onde os componentes abióticos estejam em destaque (DOWLING, 2011). Quando se fala em compreensão associada à apreciação, refere-se ao provimento de meios interpretativos para que o visitante, individualmente ou acompanhado por um guia, possa ter acesso aos conhecimentos científicos sobre o local visitado (HOSE, 2000; MOREIRA, 2010).

A atividade turística em cavernas, também chamada de espeleoturismo (LOBO *et al.*, 2008), demanda a observação de uma legislação específica no Brasil, que tem como objetivo não só a normatização da visitação, mas também a conservação das cavidades subterrâneas brasileiras com potencial turístico. Segundo Lobo *et al.* (2008, p. 63) “o ambiente subterrâneo, face às suas características geológicas, morfológicas, climáticas e bióticas diferenciadas do meio externo, se coloca como uma das mais complexas situações de manejo de áreas naturais para o turismo”. O principal mecanismo legal que versa sobre o uso turístico de cavernas é a Resolução CONAMA nº 347/2004 (MMA, 2004), que institui o Plano de Manejo Espeleológico (PME), um instrumento obrigatório que deve ser elaborado por entes públicos ou privados que visem o aproveitamento turístico de uma cavidade natural subterrânea. As diretrizes para elaboração do PME são fornecidas pelo CECAV<sup>11</sup>.

A grande maioria das cavidades em matacões graníticos da ISC não é propícia ao espeleoturismo, seja pelas dificuldades de acesso, uma vez que estão em áreas de encosta, no meio da mata fechada, sem trilhas definidas, e também pelas características do espaço

---

<sup>11</sup> [http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Orientacoes/Diretrizes\\_PME\\_sitio\\_CECAV.pdf](http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/downloads/Orientacoes/Diretrizes_PME_sitio_CECAV.pdf)

subterrâneo, onde o caminhar é difícil para o público em geral. No entanto, algumas cavernas estão próximas a trilhas conhecidas, as quais levam a outros atrativos naturais da ISC, a exemplo da Gruta das Feiticeiras e Gruta da Trilha do Saquinho I. Estas cavernas possuem uma morfologia e topografia mais favorável para o deslocamento interno, além de aspectos geoespeleológicos e bioespeleológicos interessantes, tanto para um público especializado como para leigos.

A indicação do potencial geoturístico é feita aqui com alguma reserva, não pelo tipo de turismo em si, que seria o segmento ideal para ambientes como estes (com enfoque científico e educativo), mas pelas dificuldades de gestão, controle e fiscalização das atividades, com riscos tanto para as cavernas como para os visitantes. De todo modo, descartar totalmente essa possibilidade não parece ser a melhor estratégia na promoção do conhecimento, valorização e conservação desse patrimônio ilhéu.

#### *7.1.4.2 Atuação de espeleólogos*

Na discussão que faz dos serviços culturais Gray (2012) aponta a existência de sociedades geológicas locais como um fator para o desenvolvimento de interesses individuais e coletivos relacionados às geociências ou à natureza como um todo. Tais grupos são muito comuns em alguns países europeus, incluindo leigos e profissionais da área, com atividades como reuniões, palestras e trabalhos de campo.

No Brasil, um paralelo com estas sociedades seriam os grupos de espeleologia, disseminados por todo o país e com forte atuação em suas sedes, onde no geral há uma ocorrência significativa de cavernas, fator que motiva a formação de tais coletivos. É comum que sejam constituídos por pessoas com perfis e interesses diversos, de diferentes áreas do conhecimento.

Em Florianópolis, além de espeleólogos que atuam individualmente, há um grupo de espeleologia associado à SBE, o Espeleo Grupo Teju Jagua, criado em 2012. O Teju foi responsável pela descoberta, exploração e cadastramento de grande parte das cavernas da ISC, a exemplo do SAC, caverna-tipo desta pesquisa. Os trabalhos de campo sempre foram o forte do grupo, que também tem como atividades reuniões, encaminhamento de denúncias envolvendo ameaças ao patrimônio espeleológico, participação em cursos e eventos e colaborações com grupos e espeleólogos de outras regiões do Brasil. Atualmente o Teju Jagua tem sido menos ativo, mas a existência desse grupo local foi decisiva para a promoção da



espeleologia da capital catarinense no cenário nacional e para a formação e/ou fortalecimento de espeleólogos e geocientistas.

#### *7.1.4.3 Atividade de cantaria*

No SAC foram observados registros da extração artesanal do granito, compatível com a cantaria, ofício onde a rocha bruta é talhada com ferramentas manuais em formas geométricas menores, principalmente paralelepípedos. São blocos poliédricos e material de refugo espalhados por algumas galerias da cavidade e ponteiros de ferro utilizadas para fragmentar e esculpir esse material. Moradores locais relataram que a extração principal era realizada na área (hoje em recuperação ambiental) ao lado da Gruta do Saco Grande e acabou se estendendo também para o SAC. Não há informações sobre o período exato em que essa atividade aconteceu e sobre a destinação do granito extraído.

### **7.1.5 Serviços de conhecimento**

Os serviços de conhecimento dizem respeito aos benefícios que a sociedade obtém a partir da compreensão da história da Terra, da origem e evolução da vida e dos processos físicos que atuam sobre as águas e o clima, que geram solos e formas variadas de relevo (GRAY *et al.*, 2013). Para além do serviço de suporte relacionado à provisão de habitat, este é um dos serviços que se destacam no caso das cavernas estudadas, tendo a realização desta pesquisa como um exemplo do valor científico e educativo a elas associados.

#### *7.1.5.1 Ampliação dos conhecimentos sobre a geodiversidade local*

A descrição geoespeleológica e espeleogenética do SAC e de outras cavidades do tipo na ISC, apresentada no capítulo 5, evidenciou aspectos que ampliam o conhecimento e compreensão sobre a geodiversidade local. As cavernas em si constituem registros da dinâmica e evolução das encostas dos morros ao longo do Quaternário, um produto da história geológica recente da ISC. Os matacões que formam as cavidades aumentam as áreas de visualização do Granito Ilha, permitindo conhecer mais sobre suas características litológicas (ex.: ocorrência de enclaves microgranulares). Os espeleotemas são elementos da geodiversidade cavernícola com grande potencial para investigação científica. Os resultados

apresentados nesta pesquisa (capítulo 6) são um passo inicial no conhecimento sobre essas feições, que carecem ser objeto de estudos exclusivos e aprofundados, com maior número de amostras e cavernas envolvidas, ampliação dos tipos de análises, incluindo estudos paleoambientais, e, se possível, de enquadramento geocronológico.

#### *7.1.5.2 Pesquisas e publicações*

No ano de 2011, no 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia, realizado na cidade de Ponta Grossa (PR) era apresentado o primeiro trabalho científico sobre as cavernas da ISC, um estudo preliminar envolvendo tanto as cavernas em matacões como as marinhas (TOMAZZOLI *et al.*, 2011), o qual foi posteriormente convertido em um artigo na principal revista dedicada à espeleologia no país (TOMAZZOLI *et al.*, 2012). Este trabalho abriu passagem para a criação em 2012 do Espeleo Grupo Teju Jagua e para outras pesquisas e publicações relacionadas à espeleologia da ISC desenvolvidas por professores e acadêmicos da UFSC e da Universidade Federal do Paraná em nível de graduação e pós-graduação, alguns deles membros ou ex-membros do Teju Jagua e do GUPE. As publicações acima mencionadas foram listadas no item 4.3.

Paralelamente aos trabalhos de cunho científico, várias inserções sobre as cavernas da ISC apareceram no informativo da SBE, o SBE Notícias<sup>12</sup>, com relatos das novas descobertas, atividades de campo ou denúncias (ex.: nº 385/2018, nº398/2019, nº 401/2019).

No conjunto, essas pesquisas e publicações mostram que a descoberta de cavernas na ISC nos últimos 10 anos abriu um novo campo de investigação científica. Florianópolis é atualmente um dos municípios com maior número de registros de cavernas no Sul do Brasil (84 segundo o CNC, consultado em 15 de março do corrente ano), um setor do estado de Santa Catarina onde provavelmente não se esperava encontrar esse tipo de ocorrência, principalmente nessa quantidade. Adicionalmente, as cavernas em matacões graníticos e marinhas são pouco conhecidas e estudadas no país. Nesse sentido, além da contribuição para a espeleologia regional, os estudos que foram e estão sendo desenvolvidos na ISC são uma importante contribuição para a espeleologia brasileira, principalmente por somar conhecimentos sobre cavernas em rochas não carbonáticas com presença de processos e feições cársticas.

---

<sup>12</sup> <http://www.sbe.com.br/sbenoticias.asp>

### 7.1.5.3 Formação de geocientistas

As duas principais instituições de ensino superior em Florianópolis a formar geocientistas são a UFSC e a UDESC, nos cursos de geografia, oceanografia e geologia (estes dois últimos apenas na UFSC). Considerando as grades curriculares desses cursos, futuros geógrafos e geólogos são aqueles que mais possuem afinidades com a espeleologia.

Ao longo dos últimos anos acadêmicos dos cursos de geografia e geologia, além de alunos da pós-graduação em geografia das instituições acima referidas, tiveram a oportunidade de conhecer um pouco sobre as cavernas da ISC, seja em trabalhos de campo, seja por meio de palestras e cursos. As atividades realizadas das quais se têm registros foram as seguintes:

- a) Minicurso “Geologia Costeira e introdução à espeleologia da Ilha de Santa Catarina” para acadêmicos do curso de Geografia da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) dentro do I Seminário de Geologia Costeira do PET (Programa de Educação Tutorial). O minicurso contou com uma parte teórica e um trabalho de campo para a Furna do Matadeiro (autores: Marinês da Silva, Nair Fernanda Mochiutti, Roberta Alencar e Rodrigo Dalmolin, 2012);
- b) Minicurso “Aspectos espeleológicos da ilha de Santa Catarina” na XXXV Semana de Geografia da UFSC, com parte teórica e prática em cavernas da ISC (autores: Marinês da Silva e Rodrigo Dalmolin, 2014);
- c) Minicurso “Aspectos espeleológicos da ilha de Santa Catarina” na XVIII Semana de Pesquisa e Extensão da UFSC (autores: Marinês da Silva e Alex Morales, 2014);
- d) Trabalho de campo para a Gruta do Saco Grande e SAC na disciplina de “Geologia e geomorfologia da Planície Costeira de Santa Catarina em base ao estudo dos depósitos quaternários”, do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFSC (autor: Prof. Norberto Horn, 2016);
- e) Palestra “Cavernas da Ilha de Santa Catarina” no projeto Quintas Geológicas do Centro Acadêmico Martelo de Prata, da UFSC (autores: Marinês da Silva e Alex Morales, 2017);
- f) 2019: palestra e minicurso sobre Espeleologia e Geoconservação dentro da VII Semana de Estudos Geológicos de Santa Catarina, na UFSC, com trabalho de campo para cavernas da ISC (autor: Prof. Daniel Parizoto, 2019).

Sabe-se que alguns alunos da UFSC, a partir do contato com estes conhecimentos, têm investido em pesquisas relacionadas à espeleologia, e sem dúvida esse é um dos pontos

importantes da inserção desse tipo de conhecimento junto a esses cursos, fomentando o estudo desses ambientes. No entanto, vai além disso, pois profissionais habilitados a trabalhar com consultoria ambiental ou em órgãos públicos afetos ao meio ambiente precisam ser capacitados e estar preparados para prospectar e reconhecer a ocorrência de cavernas em campo e dar os devidos encaminhamentos legais em estudos de impacto ambiental, planos de manejo, emissão de pareceres e concessão de licenças.

Outra área com interface com as geociências e total conexão com a espeleologia é a biologia. Tanto a UDESC como a UFSC possuem cursos de ciências biológicas, aos quais atividades como as acima listadas podem e devem ser estendidas, haja visto o potencial bioespeleológico praticamente inexplorado das cavernas da ISC e a importância desse tipo de caracterização em estudos espeleológicos, para fins de licenciamento ambiental ou planos de manejo.

## 7.2 AMEAÇAS

A identificação de cavernas na ISC é um fato recente nas descrições de seu quadro natural, sendo a prospecção, exploração, cadastramento e investigação científica dessas cavidades subterrâneas ações desenvolvidas a menos de uma década. Junto à sociedade e ao poder público local esse conhecimento ainda representa uma grande novidade, de modo que só muito recentemente órgãos ambientais e promotorias relacionadas ao meio ambiente têm buscado capacitação e orientação de especialistas para resolver questões emergentes relacionadas ao tema, a exemplo de denúncias, elaboração de pareceres, etc..

Por este motivo, tais cavidades foram desconsideradas ao longo de todo o processo de expansão urbana de Florianópolis, na implantação de empreendimentos e infraestruturas potencialmente impactantes, na criação de Unidades de Conservação (UCS) e na formulação de políticas públicas e leis voltadas ao meio ambiente no município. É possível que nesse tempo muitas cavernas em matacões graníticos tenham sido parcialmente afetadas ou completamente destruídas.

O desconhecimento ou desinformação podem constituir ameaças à geodiversidade (GRAY, 2004), fato que corrobora a importância da compreensão e valorização dos serviços geossistêmicos ligados às cavernas estudadas. Pode-se dizer que essa realidade tem gradativamente mudado em Florianópolis, principalmente a partir das ações de espeleólogos (ligados ou não ao Espelo Grupo Teju Jagua) e iniciativas de órgãos públicos competentes,



tais como o CECAV, Ministério Público Federal (MPF), Instituto de Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA) e Departamento de Unidades de Conservação do município (DEPUC). Um detalhamento destas ações e iniciativas será feito adiante no texto, no item 7.3, sobre estratégias de geoconservação.

Se por um lado o desconhecimento sobre as cavernas pode significar uma ameaça às mesmas, por outro, o anonimato pode lhes resguardar de ações indevidas, como vandalismo e visitação sem controle e normatização, o que já tem acontecido pontualmente na ISC, tanto com as cavernas em matacões como com as cavernas marinhas. De acordo com Hjort *et al.* (2015) atividades de recreação e turísticas podem gerar impactos à geodiversidade, tal como o comprometimento da integridade do sítio, a erosão de trilhas de acesso ou do local visitado e a perda de matéria orgânica do solo. Em relação às cavernas, os impactos mais comuns são erosão e/ou compactação do solo e de depósitos clásticos, dano a feições como espeleotemas, perturbação da fauna, coleta de material biológico e geológico sem finalidade científica e autorização devida e alterações na atmosfera subterrânea. Mesmo atividades regulamentadas estão sujeitas a causar impactos, mas por certo estes são minimizados e/ou reduzidos em função de haver algum estudo e controle. Sobre isso Lobo *et al.* (2008, p. 73) disseram que:

Os impactos ambientais do turismo em cavernas integram a própria essência da atividade, já que é praticamente impossível adentrar no ambiente subterrâneo sem lhe causar algum tipo de alteração. O que vai mudar é a forma de utilização das cavernas, que pode ser mais ou menos danosa em função das propostas de visitação e das práticas turísticas adotadas. Atividades turísticas de massa, para fins religiosos, recreativos ou contemplacionais, tendem a ser mais danosas pelo volume de visitação do que aquelas com uma roupagem mais sustentável, para fins de educação, contemplação ou aventura. Mas a postura do visitante também é decisiva nesse aspecto.

É importante dizer que não é só o ambiente natural que é colocado em risco quando da realização de atividades turísticas em cavernas sem controle e sem normatização, mas também o visitante, principalmente na ausência de um guia turístico credenciado e capacitado, de equipamentos básicos de segurança e do aval de órgãos competentes, a exemplo de atividades que aconteçam dentro de UCs.

As cavernas em matacões da ISC estão localizadas em um contexto urbano, e de uma cidade que se expandiu (e ainda se expande) até muito perto ou além dos limites estabelecidos legalmente para ocupação. Por esse motivo, a urbanização, através da implantação de novos loteamentos, condomínios, obras de infraestrutura e empreendimentos comerciais e

industriais, constitui uma ameaça a essas cavidades subterrâneas, principalmente aquelas que estão localizadas fora de Áreas de Preservação Permanente e UCs.

Segundo Hjort *et al.* (2015), obras urbanas geram impactos na geodiversidade, como alteração do relevo, fragmentação de sítios e, por consequência, de suas relações funcionais/sistêmicas, mudanças na circulação da água e interrupção de processos geológicos e geomorfológicos, os quais se aplicam perfeitamente às cavernas. Ao alterar a paisagem e suprimir a vegetação, a urbanização pode alterar também o aporte de matéria orgânica para o meio hipógeo.

Outra potencial ameaça é a atividade de mineração, como é o caso da exploração do granito para transformação em materiais diversos para a construção civil. Em Florianópolis essa atividade já existe, a exemplo da empresa Pedrita, com duas unidades na ISC. Essa é uma atividade econômica necessária, mas que tem impactos bastante invasivos na paisagem, com a perda irreversível da geodiversidade original. Há descaracterização e, em certa medida, destruição do relevo e do solo, com perda da estrutura e da biota do solo, exposição de sedimentos e rochas, alterações no suprimento de carga sedimentar para o sistema natural, comprometendo processos geomorfológicos e hidrológicos (HJORT *et al.*, 2015).

Tanto os exemplos relacionados à expansão urbana como à mineração são atividades que necessitam de licenciamento ambiental e consequente elaboração de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA). No estado de Santa Catarina o IMA é o responsável legal pelo licenciamento ambiental que prevê modalidade trifásica (emissão de Licença Ambiental Prévia, Licença Ambiental de Instalação e Licença Ambiental de Operação) ou modalidade unificada (emissão de Autorização Ambiental ou Licença Ambiental por Compromisso), conforme definido na Resolução CONSEMA nº 98/2017 (SANTA CATARINA, 2017). Em áreas com cavernas ou com potencial para ocorrência de cavernas que possam ser afetadas direta ou indiretamente por atividades como as outrora referidas, o processo de licenciamento deve seguir um rito legal específico, com estudos que contemplem o patrimônio espeleológico, como determina a Resolução CONAMA nº 347/2004.

A não observância da lei de licenciamento ambiental relacionada ao patrimônio espeleológico, assim como a ausência de profissionais habilitados e capacitados em espeleologia nos quadros dos órgãos licenciadores para reconhecer essas ocorrências e emitir pareceres e licenças, podem também ser encaradas como ameaças às cavernas estudadas.

### 7.3 ESTRATÉGIAS DE GEOCONSERVAÇÃO

Paulatinamente o conhecimento gerado a partir da prospecção, exploração e estudo das cavidades subterrâneas da ISC tem sido apresentado à comunidade acadêmica e científica, principalmente a ligada à espeleologia e, conseqüentemente, aos órgãos públicos responsáveis pela gestão, proteção e fiscalização do patrimônio espeleológico brasileiro. Em consequência disso, ações voltadas à geoconservação dessas cavernas ou que indiretamente podem protegê-las têm sido planejadas e mesmo efetivadas em diferentes âmbitos (político, acadêmico e civil) e esferas administrativas (municipal, estadual e federal).

Esse conhecimento é fruto das ações desenvolvidas pelo Espeleo Grupo Teju Jagua e espeleólogos individuais que atuam no município de Florianópolis, exemplo do engajamento civil na proteção das cavernas da ISC, e das pesquisas desenvolvidas por professores e alunos da UFSC, que são imprescindíveis para a tomada de decisões e gestão relacionadas ao patrimônio espeleológico no âmbito político.

Um importante desdobramento da inserção das cavernas da ISC “no mapa” foi a inclusão das mesmas no documento organizado pelo CECAV, intitulado “Áreas Prioritárias para Conservação do Patrimônio Espeleológico Brasileiro” (ICMBIO, 2018). Esta publicação atende o Plano de Ação de Conservação das Cavernas do São Francisco<sup>13</sup>, fundamentado nas diretrizes do Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico (Portaria MMA nº 358/2009)<sup>14</sup>.

O documento apresenta mapas dos estados da federação com a indicação de áreas (chamadas de unidades de planejamento) que englobam desde uma caverna a conjuntos de cavernas próximas entre si, as quais, pelas suas características bióticas, físicas e sócio-histórico-culturais, são importantes para conservação. Cada área foi enquadrada em uma de quatro categorias de ações prioritárias, definidas em função da insubstituibilidade e da pressão (proporção do conjunto de ameaças<sup>15</sup> consideradas no estudo dentro de cada unidade de planejamento).

Para a ISC foram definidas seis áreas, as quais englobam a grande maioria das cavernas cadastradas quando da realização dos levantamentos (até 2017). Cinco das áreas foram enquadradas na categoria 1, que tem como ações prioritárias: a) criação ou ampliação

<sup>13</sup> <http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/pan-cavernas-do-sao-francisco.html>

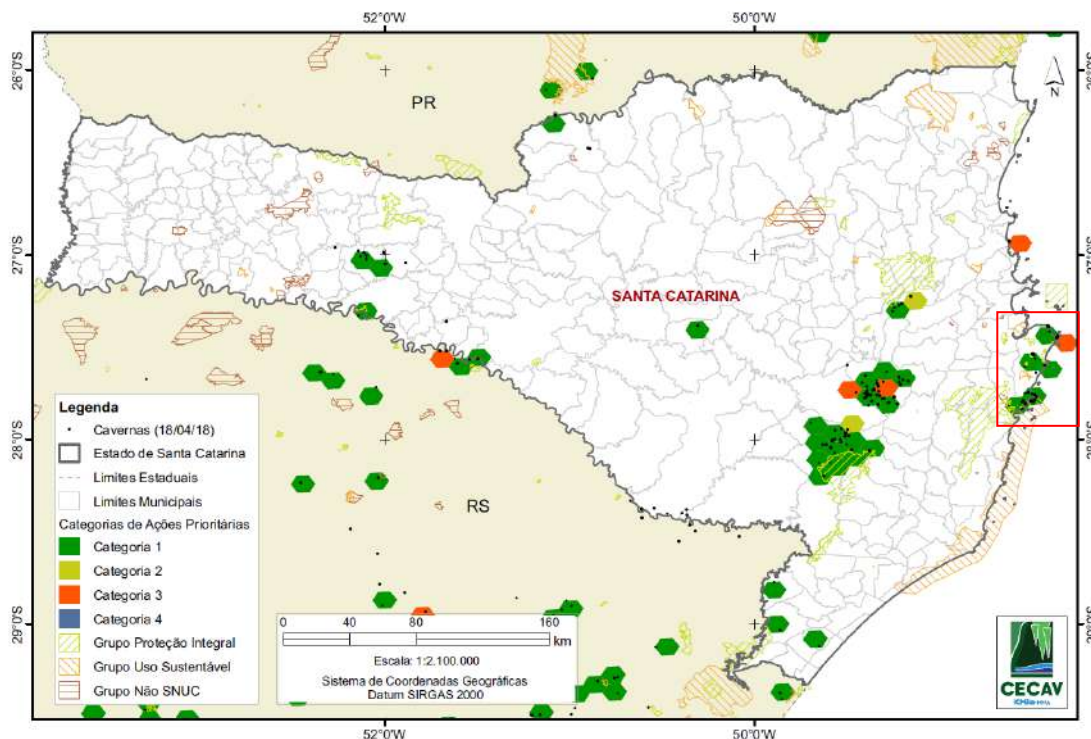
<sup>14</sup> [http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Portaria\\_358\\_2009-MMA\\_PNCPE.pdf](http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Portaria_358_2009-MMA_PNCPE.pdf)

<sup>15</sup> A lista de ameaças pode ser consultada em: [http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/projetos-e-atividades/PAN/relatorio\\_final\\_acao7.2\\_PAN\\_areas\\_prioritarias.pdf](http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/stories/projetos-e-atividades/PAN/relatorio_final_acao7.2_PAN_areas_prioritarias.pdf), página 5.

de Unidades de Conservação; b) fiscalização e monitoramento; c) educação ambiental e patrimonial. A sexta área, localizada no extremo norte da ISC, foi enquadrada na categoria 3, que prevê ações de: a) fiscalização e monitoramento; b) ampliação do conhecimento (pesquisa, prospecção espeleológica, validação de coordenadas); c) educação ambiental e patrimonial (Figura 7.3).

Com revisão prevista para cada quatro anos, o documento sobre as áreas prioritárias para conservação do patrimônio espeleológico visa nortear ações de gestão e conservação em todos os níveis governamentais. O reconhecimento institucional em nível nacional das cavernas presentes na ISC, considerando tanto as cavernas em matacões como as cavernas marinhas, constitui um importante passo na construção de projetos e políticas públicas estaduais e municipais voltados para a compreensão, valorização, divulgação e proteção dessas ocorrências. Adicionalmente, legitima a existência e importância dessas cavernas junto aos órgãos ambientais competentes nessas esferas administrativas e a necessidade de cumprimento dos ritos legais relacionados ao patrimônio espeleológico, a exemplo da solicitação de estudos espeleológicos em processos de licenciamento ambiental.

Figura 7.3 – Mapa das áreas prioritárias para a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro no estado de Santa Catarina. Por um erro na base cartográfica utilizada a ISC aparece conectada ao continente (retângulo vermelho).



Fonte: CECAV-ICMBio (2018)



As demandas geradas pelas questões espeleológicas tanto em Florianópolis como no restante do estado de Santa Catarina fizeram com que técnicos do IMA buscassem orientação e capacitação junto ao CECAV sobre a temática<sup>16</sup>, principalmente sobre o licenciamento ambiental em áreas com cavernas. O V Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental foi realizado em novembro de 2019, em Belo Horizonte (MG), contou com aulas teóricas e práticas com dois módulos: 1 - Introdução à espeleologia (espeleologia enquanto ciência abrangendo prospecção, mapeamento geomorfologia, bioespeleologia e geoespeleologia) e 2 - Espeleologia aplicada ao processo de licenciamento ambiental (impacto e mitigação, manejo de cavernas, monitoramento e legislação aplicada). A cooperação entre os órgãos das esferas estadual e federal, a quem compete cuidar do patrimônio espeleológico é importante para a gestão adequada do mesmo, já que este é um bem da União (BRASIL, 1988) sobre o qual municípios e estados têm corresponsabilidade.

Um mecanismo legal que pode garantir a geoconservação das cavernas da ISC é a manutenção, criação e/ou ampliação de Unidades de Conservação. Das 84 cavidades subterrâneas cadastradas, 49 estão dentro de UCs, todas elas de proteção integral, decretadas principalmente em âmbito municipal. A UC que mais concentra cavernas é o Parque Natural Municipal da Lagoinha do Leste, no sul da ISC, que engloba 21 ocorrências do tipo marinhas. Das cavernas em matacões graníticos, 20 estão dentro dos limites de UCs (Quadro 7.4 e Figura 7.4).

Outro tipo de área protegida que também impõe restrições ao uso do solo e que desta forma colabora na proteção das cavidades é a Área de Preservação Permanente (APP). Todas as 49 cavidades localizadas dentro dos limites de UCs também estão dentro de APPs, relacionadas essencialmente à proteção de topos de morro e encostas. Cavernas englobadas apenas por APPs são 30, sendo a maioria delas do tipo matacões graníticos (Quadro 7.4 e Figura 7.4). Na listagem do Quadro 7.4 ficaram de fora cinco cavernas, as quais não estão englobadas por nenhuma das áreas protegidas consideradas, todas elas do tipo matacões graníticos (Gruta do Lajão, Gruta das Jararacas, SAC, Gruta da Laje e Caverna Central Park).

Atualmente se encontra em debate (fase de audiências públicas) em Florianópolis a criação de uma nova UC na ISC. Trata-se do Refúgio da Vida Silvestre Municipal (REVIS) Meiembipe, uma categoria de proteção integral que uma vez decretada deverá constituir a maior UC do município, com 56 km<sup>2</sup> (12% do território de Florianópolis) no norte da ISC,

---

<sup>16</sup> <http://ima.sc.gov.br/index.php/noticias/1345-tecnicos-do-ima-participam-de-curso-sobre-a-gestao-de-cavernas-no-licenciamento-ambiental>

abrangendo essencialmente APPs com segmentos em 16 bairros (PMF, 2020) (Figura 7.5). Os objetivos de um REVIS estão relacionados à preservação da biodiversidade e dos ambientes ou habitats que lhe sustentam, que são muitas vezes providos pela geodiversidade, como é o caso das cavernas. O REVIS Meieimbipe deve englobar algumas cavernas em matacões graníticos em sua área, a exemplo do SAC, uma notícia auspiciosa para espeleólogos e pesquisadores que atuam pelo reconhecimento e conservação dessas cavidades subterrâneas.

Quadro 7.4 – Cavernas da ISC em áreas protegidas - Unidades de Conservação e/ou Áreas de Preservação Permanente (G – Gruta; Gt – Grotas; F – Fuma; T – Toca).

| <b>Caverna</b>                  | <b>Matacão</b> | <b>Marinha</b> | <b>UC*</b>   | <b>APP</b> |
|---------------------------------|----------------|----------------|--------------|------------|
| F. da Água Escorrida            |                | x              | PNMLL        | x          |
| F. das Andorinhas               |                | x              | PNMLL        | x          |
| F. do Arco                      |                | x              | PNMLL        | x          |
| T. da Baleia                    |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. dos Borbulhos                | X              |                | UCAD         | x          |
| G. das Bromélias                | X              |                | -----        | x          |
| G. dos Buracos                  | X              |                | -----        | x          |
| F. das Cabras                   |                | x              | PNMLJ        | x          |
| G. dos Cactos                   | X              |                | -----        | x          |
| G. da Caieira da Barra do Sul   | X              |                | MNMLP        | x          |
| G. do Caminho da Costa da Lagoa | X              |                | -----        | x          |
| G. do Caminho da Gurita         | X              |                | MNMLP        | x          |
| G. da Casa de Pedra             | X              |                | -----        | x          |
| G. da Casa Velha                | X              |                | UCAD         | x          |
| G. do Descanso                  | X              |                | UCAD         | x          |
| F. da Encantada                 |                | x              | PNMLJ        | x          |
| G. Escondida                    | X              |                | -----        | x          |
| G. do Espinheiro                | X              |                | UCAD         | x          |
| G. das Feiticeiras              | X              |                | -----        | x          |
| F. da Felicidade                |                | x              | PNMLL        | x          |
| F. da Fenda                     |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. da Figueira                  | X              |                | PNMMC        | x          |
| F. das Flores                   |                | x              | PNMLL        | x          |
| F. do Gravata                   |                | x              | PNMLL        | x          |
| Gt. do Riacho I                 | X              |                | -----        | x          |
| Gt. do Riacho II                | X              |                | -----        | x          |
| F. do Inferno                   |                | x              | Limite MNMLP | x          |
| F. dos Ingleses                 |                | x              | PNMLJ        | x          |
| F. da Lagoinha do Leste         |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. das Larvas                   | X              |                | -----        | x          |
| F. do Lui                       |                | x              | -----        | x          |
| G. do Maciço da Costeira        | X              |                | PNMMC        | x          |
| F. do Matadeiro                 |                | x              | -----        | x          |
| F. do Medo                      |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. do Monte Verde               | X              |                | -----        | x          |
| F. do Morcego                   |                | x              | PNMLL        | x          |

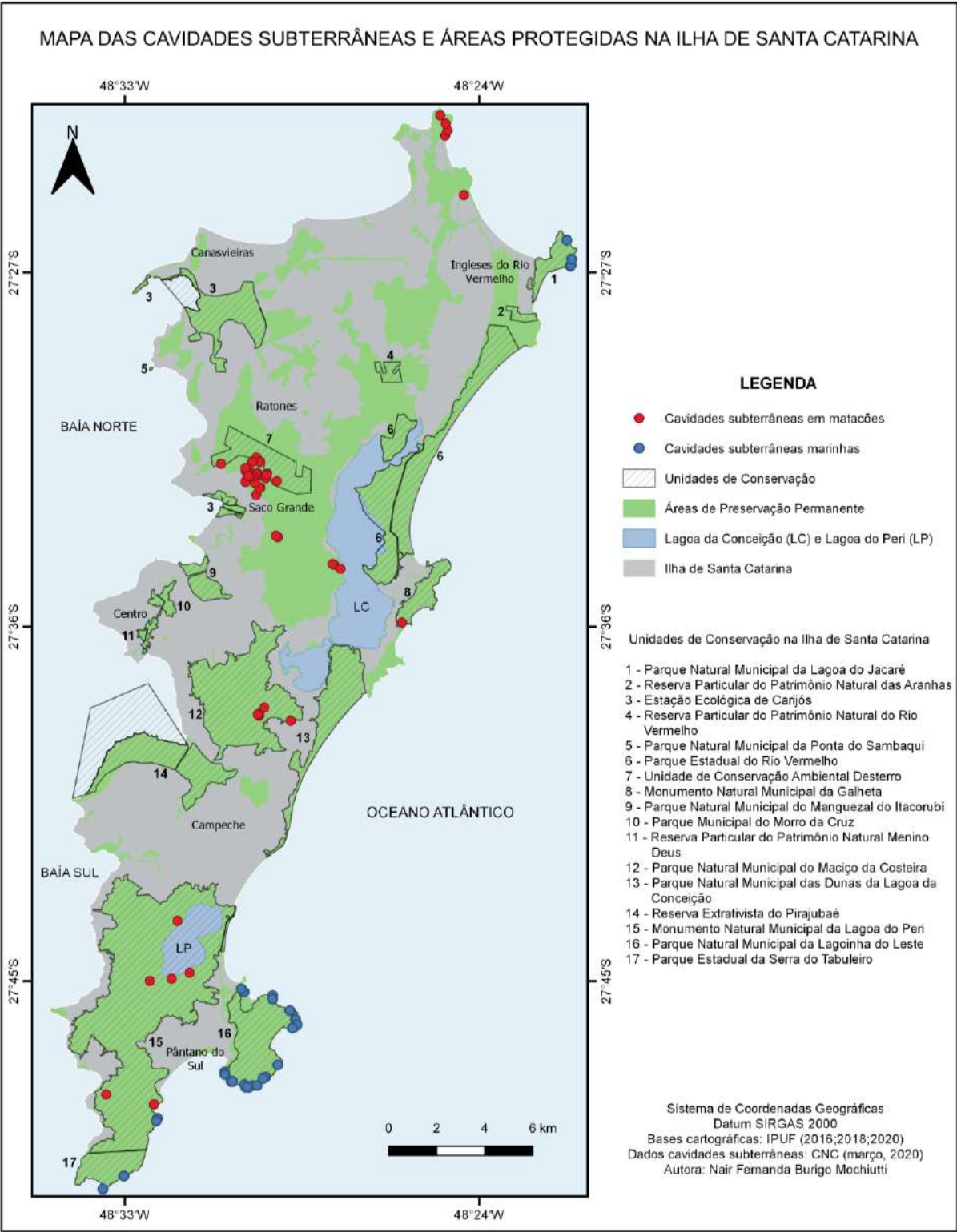
Quadro 7.4 – Cavernas da ISC em áreas protegidas - Unidades de Conservação e/ou Áreas de Preservação Permanente (continuação).

| <b>Caverna</b>                | <b>Matacão</b> | <b>Marinha</b> | <b>UC*</b>   | <b>APP</b> |
|-------------------------------|----------------|----------------|--------------|------------|
| G. do Morro da Costa da Lagoa | X              |                | -----        | x          |
| G. do Morro da Represa        | X              |                | PNMMC        | x          |
| G. do Morro Pedra de Listra   | X              |                | UCAD         | x          |
| G. do Murmúrio                | X              |                | -----        | x          |
| G. do Muro de Pedras          | X              |                | MNMLP        | x          |
| G. dos Musgos                 | X              |                | -----        | x          |
| T. da Nega                    |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. do Oiteiro                 | X              |                | PNMMC        | x          |
| G. dos Palmitos               | X              |                | PNMMC        | x          |
| F. do Pântano do Sul          |                | x              | Limite PNMLL | x          |
| T. do Pântano do Sul          |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. do Paredão                 | X              |                | -----        | x          |
| F. do Pastinho                |                | x              | PEST         | x          |
| F. da Pedra Preta             |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. das Pedras Grandes         | X              |                | -----        | x          |
| G. do Peri                    | X              |                | MNMLP        | x          |
| G. do Pica-Pau                | X              |                | -----        | x          |
| G. das Pinturas               | X              |                | MNMG         | x          |
| F. do Poço                    |                | x              | PNMLL        | x          |
| F. da Ponta do Frade          |                | x              | PEST         | x          |
| F. da Ponta do Fuzil          |                | x              | PNMLL        | x          |
| F. da Ponta do Marisco        |                | x              | PNMLL        | x          |
| F. da Ponta do Quebra-Remo    |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. da Praia Brava             | X              |                | -----        | x          |
| F. Preta                      |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. da Raiz                    | X              |                | UCAD         | x          |
| G. dos Ramais                 | X              |                | -----        | x          |
| G. do Rapa                    | X              |                | -----        | x          |
| G. do Regato                  | X              |                | -----        | x          |
| G. do Rei                     | X              |                | -----        | x          |
| G. do Riacho Subterrâneo      | X              |                | -----        | x          |
| G. da Ribanceira              | X              |                | -----        | x          |
| G. do Rio do Mel              | X              |                | -----        | x          |
| G. do Rio Tavares             | X              |                | PNMMC        | x          |
| G. do Rio Valdik              | X              |                | -----        | x          |
| G. do Saco Grande             | X              |                | -----        | x          |
| F. do Santinho                |                | x              | PNMLJ        | x          |
| F. do Saquinho                |                | x              | MNMLP        | x          |
| G. da Trilha da Ponta da Bota | X              |                | -----        | x          |
| G. da Trilha do Saquinho I    | X              |                | Limite MNMLP | x          |
| G. da Trilha do Saquinho II   | X              |                | MNMLP        | x          |
| F. do Urubu                   |                | x              | PNMLL        | x          |
| G. das Vozes                  | X              |                | MNMLP        | x          |

\* PNMLL - Parque Natural Municipal da Lagoinha do Leste; UCAD - Unidade de Conservação Ambiental Desterro; PNMLJ - Parque Natural Municipal da Lagoa do Jacaré; MNMLP - Monumento Natural Municipal da Lagoa do Peri; PNMMC - Parque Natural Municipal do Maciço da Costeira; PEST - Parque Estadual da Serra do Tabuleiro; MNMG - Monumento Natural Municipal da Galheta.

Fonte: organizada pela autora a partir de dados do CNC e IPUF.

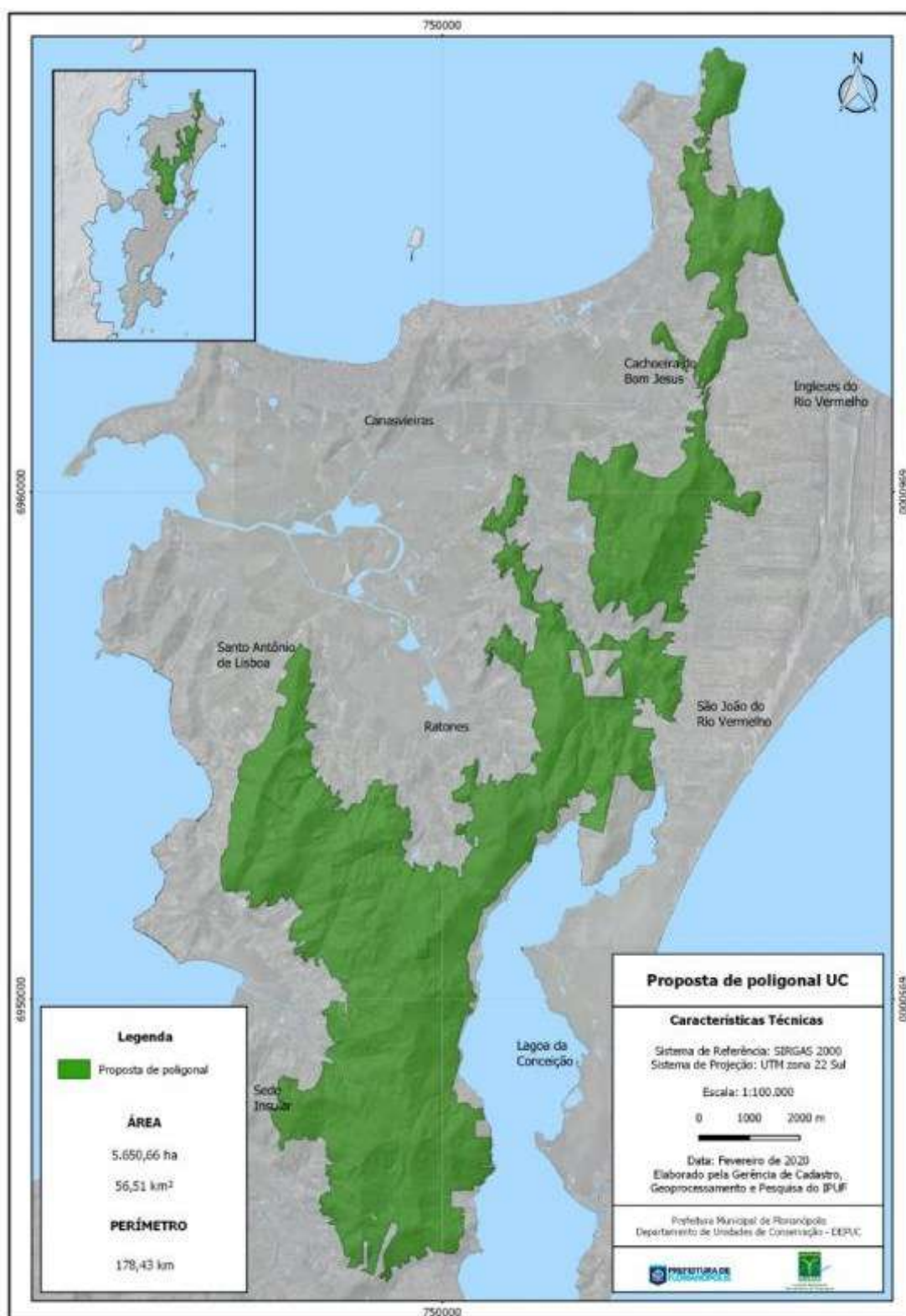
Figura 7.4 – Correlação entre as cavidades subterrâneas e áreas protegidas (Unidades de Conservação e Áreas de Preservação Permanente) na Ilha de Santa Catarina.



Fonte: a autora



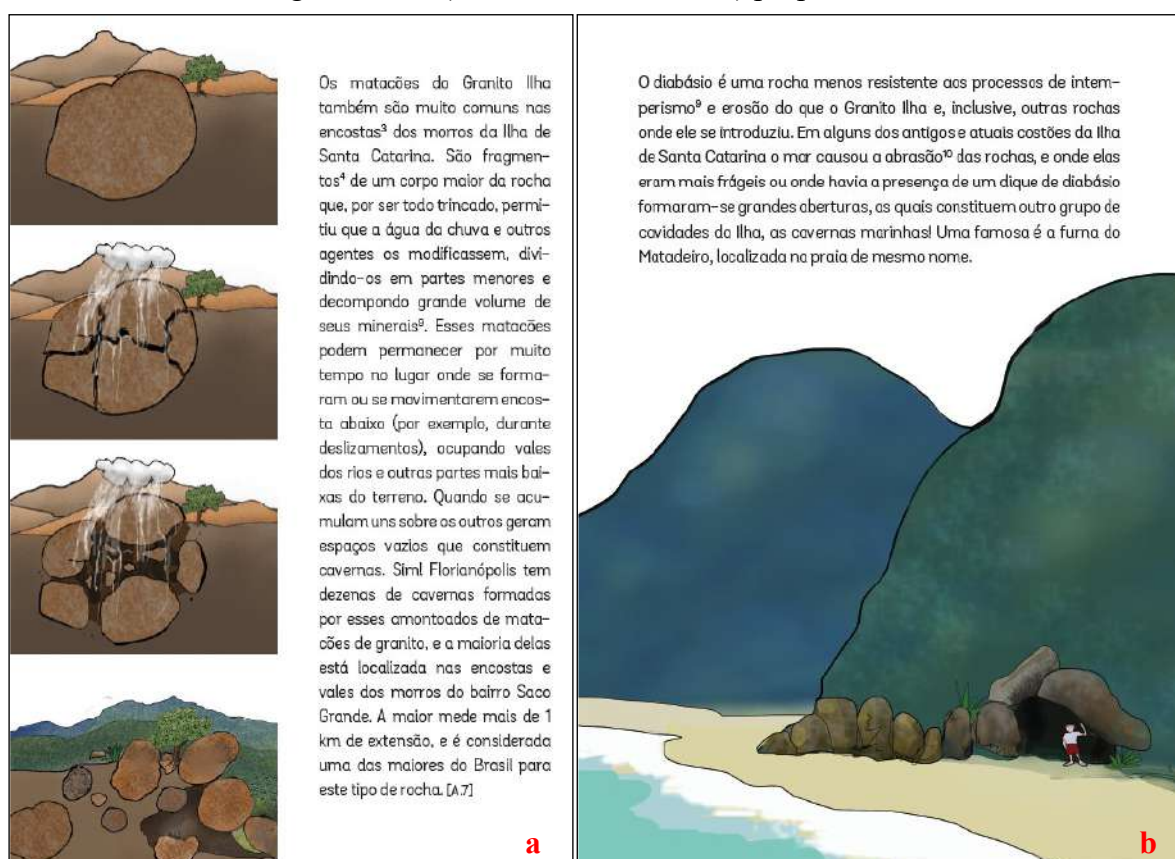
Figura 7.5 – Polígono referente à proposta do Refúgio da Vida Silvestre Municipal Meiembipe em Florianópolis envolvendo essencialmente Áreas de Preservação Permanente relacionadas a encostas e topos de morro no centro norte e norte da ISC.



Fonte: divulgação Notícias do Dia a partir do IPUF

Ações educativas voltadas para a divulgação e popularização das geociências constituem uma das estratégias de geoconservação mais eficazes e duradouras, principalmente quando promovidas desde os primeiros anos escolares e envolvendo os conhecimentos sobre o local onde a criança vive (BONITO, 1999; CARNEIRO *et al.*, 2004). A geodiversidade de Florianópolis foi contemplada recentemente em um livro infantil (ALENCAR *et al.*, 2019), voltado especificamente para alunos de 6º ano, material que foi distribuído em todas as escolas municipais e estaduais de Florianópolis e para muitos profissionais da educação. As cavernas da ISC tiveram um espaço com explicações gerais, dados básicos, ilustrações e sugestão de atividade (Figura 7.6).

Figura 7.6 – Trechos do livro “Um pedacinho de terra e muitas histórias para contar: a geodiversidade de Florianópolis” onde as cavernas da ISC são abordadas: a) cavernas em matacões graníticos; b) cavernas marinhas; c) proposta de atividade.



### Atividade . 7

Para saber um pouco mais sobre as cavernas brasileiras (Qual a maior? Qual a mais profunda? Onde existem mais cavernas no país? Em qual rocha é mais comum existirem cavernas?), inclusive as de Florianópolis, você pode consultar o cadastro nacional de cavernas, da Sociedade Brasileira de Espeleologia, no endereço:

<http://www.cavernas.org.br/cnc/>

Fonte: Alencar *et al.* (2019)

## 8 CONCLUSÕES

Cavernas desenvolvidas em granito têm sido estudadas no Brasil principalmente entre o final da década de 1990 e anos 2000, como mostra o conjunto de trabalhos levantados na fundamentação teórica da pesquisa. No entanto, o volume de publicações ainda é baixo e com abordagens pouco aprofundadas sobre os aspectos geoespeleológicos e espeleogenéticos. Algumas descrições e discussões pinçadas nesses estudos mostram pontos de convergência entre eles, tais como: a classificação de grande parte das cavernas como do tipo em matacões, apontando tanto movimentos de massa na espeleogênese como a aglomeração de núcleos residuais, exumados por processos erosivos laminares; a menção à presença de espeleotemas, indicando eventualmente a composição silicosa; a riqueza biológica; e apontamentos sobre a incipiência do conhecimento a respeito dessas cavernas no país e a necessidade de ampliação e aprofundamento de explorações e pesquisas.

Ao longo do desenvolvimento desta tese, alguns passos foram dados para a ampliação e aprofundamento desse conhecimento em uma área que tem sido muito explorada em termos espeleológicos nos últimos dez anos. A ISC é detentora de um patrimônio espeleológico significativo, com mais de 80 cavidades subterrâneas cadastradas, a maioria delas desenvolvidas em matacões graníticos, predominantemente associadas ao Granito Ilha. Provavelmente, as cavernas marinhas não terão seu número ampliado, dada à investigação de praticamente todas as áreas com potencial para a ocorrência das mesmas. As cavernas em matacões, no entanto, facilmente levarão a ISC a ultrapassar uma centena de registros, já que há alguns setores em morros menos acessíveis onde a exploração não foi realizada e/ou não está esgotada, tanto associados ao Granito Ilha como aos granitos São Pedro de Alcântara e Itacorubi.

O SAC foi uma das cavidades em matacões graníticos que se destacou nos trabalhos exploratórios da pesquisa, por suas dimensões, características morfológicas e geoespeleológicas e aspectos logísticos e operacionais. Estudando-a posteriormente em detalhe e contrastando-a com outras ocorrências do mesmo tipo na ISC, sua escolha como caverna-tipo se mostrou apropriada, uma referência bastante completa para estudos comparativos.

O mapeamento espeleológico foi um dos principais desafios dentre os levantamentos realizados no SAC, principalmente pelas dimensões da cavidade e organização caótica dos matacões, que tem como desdobramento a morfologia complexa, a sobreposição de níveis e a

descontinuidade de paredes internas e externas, dificultando a representação. Neste sentido, o uso do aplicativo *TopoDroid* juntamente com a trena Disto<sup>TM</sup> D810 *touch* da Leica foram imprescindíveis para viabilidade do trabalho, pois agilizaram o processo de aquisição e processamento de dados, com maior grau de precisão dos mesmos, permitiram realizar a correção de distorções ainda em campo e facilitaram a etapa de desenho e refinamento de informações em gabinete. Para trabalhos futuros a indicação é investir em planejamento do mapeamento, com exploração prévia completa das cavidades, demarcação de trajetos de caminhamento prioritários e definição dos métodos de posicionamento de bases, buscando tornar tal etapa mais eficiente.

Dos aspectos geoespeleológicos descritos, a contribuição mais significativa foi em relação aos espeleotemas, que são um dos principais elementos de similaridade entre o SAC e as demais cavernas consideradas para fins de comparação. Dentre os tipos de espeleotemas analisados, os cilíndricos e os coraloides mostraram que, independente da morfologia, dimensões e posição que ocupam dentro das cavernas, são equivalentes em termos composicionais e genéticos, com evidente participação microbiológica em sua formação. A sílica que se precipita como opala-A e, por acreção rítmica, forma os depósitos, é proveniente da dissolução dos silicatos que formam o Granito Ilha, processo inorgânico que é mediado por microrganismos como bactérias e fungos.

Embora as análises microscópicas dos espeleotemas cilíndricos e coraloides não tenham se estendido para as outras cavernas visitadas, a avaliação macroscópica *in loco* possibilitou a constatação de similaridades entre as feições em termos de morfologia, textura, dimensões, coloração, distribuição e posição nas cavidades. Considerando a compatibilidade litológica entre as cavernas estudadas e a equivalência dos espeleotemas quanto às características acima elencadas, é muito provável que apresentem composição silicosa e que compartilhem dos mesmos processos genéticos que as amostras analisadas.

Além das feições de composição opaloide, também foram identificados depósitos de birnessita e alofano, os quais, em conjunto, mostram que nas cavernas estudadas a principal característica dos espeleotemas é serem compostos por materiais amorfos ou de baixa cristalinidade. O contexto geológico, edáfico e fitofisionômico onde essas cavernas se inserem são determinantes para tal característica, associado à composição e forma de circulação das águas que por elas drenam.

Quanto às técnicas aplicadas na análise dos espeleotemas amostrados, avalia-se que, em conjunto, foram satisfatórias para a descrição dos materiais, principalmente de seus



aspectos microscópicos. Embora cada procedimento tenha gerado dados e respostas sobre características específicas das amostras (ex.: textura, composição química, mineralogia), elas se complementaram, dirimindo as inconsistências umas das outras, a exemplo da DRX e EDS. Houve dificuldade na confecção das lâminas delgadas devido à fragilidade e porosidade do material, procedimento que precisa ser aperfeiçoado em trabalhos futuros para garantir um produto de maior qualidade. Outra técnica que não foi aqui utilizada, mas que foi mencionada de forma recorrente na bibliografia consultada é a fluorescência de raios X, para determinação da composição química completa e precisa dos espeleotemas, tanto em termos qualitativos como quantitativos. Este é mais um procedimento indicado para trabalhos futuros.

As correlações geoespeleológicas entre o SAC e as demais cavernas em matacões graníticos visitadas na ISC vão além dos espeleotemas. Embora cada ocorrência tenha suas peculiaridades, há características convergentes que permitem estabelecer padrões entre elas. Todas as cavernas consideradas na pesquisa estão associadas às encostas dos morros que compõem os maciços rochosos sul e centro-norte da ISC ocupando, no entanto, diferentes estratos das vertentes. São formadas por matacões graníticos provenientes do Granito Ilha que, no geral, estão em condição *ex situ*. Os matacões variam de tamanho e grau de arredondamento em cada caverna, assim como na forma como estão distribuídos e organizados, mas não foi observada nenhuma discrepância significativa em relação a estas variações. Os espaços subterrâneos resultantes da aglomeração dessas massas graníticas são similares em termos morfológicos. A presença de galerias e salões labirínticos distribuídos em diferentes cotas e com sobreposições e a existência de muitas aberturas e entradas são fatos constatados em todas as ocorrências.

Outra constante nessas cavernas são as condições amenas de temperatura e atmosfera mais úmida, diferentes do meio epígeo, caracterizando a ocorrência de microclimas. Estas condições, associadas à luminosidade baixa e/ou ausente, à diversidade de abrigos e substratos e à boa disponibilidade de alimento, tornam esses ambientes subterrâneos atraentes para pequenos vertebrados, invertebrados, fungos e uma microbiota diversa, que são observados em todas as cavidades, alguns deles de forma mais frequente, como anuros, opiliões e aranhas.

A provisão de habitat para a macro e microbiota é um dos principais serviços geossistêmicos identificados nas cavidades subterrâneas avaliadas, seguido dos serviços de conhecimento, que indicam o grande potencial científico e educativo a elas associadas, relacionados tanto à geoespeleologia como à bioespeleologia. A valoração dessas cavernas a

partir da identificação de serviços geossistêmicos se mostrou uma abordagem válida e profícua, pois reuniu benefícios que não são imediatamente reconhecidos nesses elementos da geodiversidade, os quais, somados aos serviços mais óbvios e de maior destaque, ajudam a fundamentar ações de geoconservação presentes e futuras envolvendo o patrimônio espeleológico da ISC.

Considera-se que grande parte das cavernas da ISC, somadas as do tipo em matacões e as do tipo marinhas, se encontra relativamente protegida. Do total de 84 ocorrências registradas, 94% estão englobadas em Unidades de Conservação de proteção integral e/ou Áreas de Preservação Permanente, sendo 62% cobertas pelos dois tipos de áreas protegidas e 38% apenas pelas APPs. No entanto, tais mecanismos legais só serão efetivos na proteção do patrimônio espeleológico se as recomendações legais forem observadas com rigor, principalmente em relação às APPs, que estão mais expostas aos usos urbanos e à flexibilização da legislação ambiental. Em relação às UCs, é importante que as cavernas passem a ser consideradas nos planos de manejo, disciplinando principalmente atividades turísticas.

Para todo o conjunto de cavernas, a legislação espeleológica em nível federal exige estudos específicos quando da implantação de empreendimentos que possam causar impactos diretos e/ou indiretos a elas, seguindo a máxima do princípio da precaução. Na ISC, atividades que demandam tais estudos e que representam potenciais ameaças às cavernas são principalmente a expansão urbana e a mineração. É preciso que os órgãos competentes estejam atentos e ao mesmo tempo capacitem seus quadros para que essas demandas sejam devidamente atendidas.

O desenvolvimento desta pesquisa, mesmo restrita a uma área pequena dentro do estado de Santa Catarina e tendo se aprofundado em uma única caverna, permitiu obter um panorama sobre o conjunto de cavidades em matacões graníticos da ISC. Avalia-se que a contribuição não se restringe à espeleologia local e regional, mas que os resultados e discussões apresentados, assim como os procedimentos metodológicos adotados serão úteis para estudos comparativos em outras regiões do país, ampliando assim o (re) conhecimento sobre essas ocorrências no território brasileiro.

Adicionalmente, a pesquisa abriu um leque de possibilidades para trabalhos futuros, como: aprofundamento dos trabalhos sobre os espeleotemas, incluindo amostras de um número maior de cavernas e ampliação das técnicas analíticas, tanto das feições como de elementos do contexto onde elas ocorrem (água, rocha, solo), precisando assim informações

sobre a composição e a gênese das mesmas; estudos de detalhe de outras cavidades citadas no trabalho, incluindo o mapeamento espeleológico, que constitui uma demanda flagrante da espeleologia da ISC; investigação das cavernas desenvolvidas no Granito São Pedro de Alcântara, que foram descobertas no ano de 2019 e acabaram não sendo alcançadas por esta pesquisa, estabelecendo comparações com as cavernas associadas ao Granito Ilha; estudos de microbiologia das cavernas, para identificação dos organismos, compreensão do papel que desempenham nesses ambientes e possíveis aplicações para as indústrias de alimentos, bebidas, fármacos e fertilizantes.

## REFERÊNCIAS

ABOU, R.M.; HARB, F. Synthesis and Characterization of Amorphous Silica Nanoparticles from Aqueous Silicates Using Cationic Surfactants. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, v. 24, n. 1, p. 37-42, 2014.

ALENCAR, R. **A geodiversidade da ilha de Santa Catarina: explorando seu valor didático no 6º ano do ensino fundamental**. 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

ALENCAR, R.; GUIMARÃES, G.B.; MOCHIUTTI, N.F.B. **Um pedacinho de terra e muitas histórias para contar: a geodiversidade de Florianópolis**. Florianópolis: Ed. do autor, 2019. 44 p.

ALEXANDROWICZ, Z.; MARGIELEWSKI, W. Impact of mass movements on geo-and biodiversity in the Polish Outer (Flysch) Carpathians. **Geomorphology**, v. 123, p. 290-304, 2010.

ALMEIDA, E.S. Geologia da Ilha – SC. *In*: BASTOS, M.D.A. (coord.). **Atlas do Município de Florianópolis**. Florianópolis: Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, 2004. p. 18-23.

ALVAREZ, E.U.; ROMANÍ, J.R.V. Some minor features (tafoni, cavernous forms) in the granite terrains of Los Riojanos (Pampa de Achala, Sierra Grande de Córdoba, República Argentina). Geometric and morphologic properties. **Cadernos Lab. Xeológico de Laxe**. v. 33, p. 83-99, 2008.

ANDRADE, F.R.D. de; MCREATH, I.; MADUREIRA FILHO, J.B.; ATENCIO, D. A Terra sólida: mineira e rochas. *In*: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M. de.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 130-151.

AUBRECHT, R.; BREWER-CARÍAS, CH.; ŠMÍDA, B.; AUDY, M.; KOVÁČIK, Ľ. Anatomy of biologically mediated opal speleothems in the World's largest sandstone cave: Cueva Charles Brewer, Chimantá Plateau, Venezuela. **Sedimentary Geology**, v. 203, p. 181-195, 2008.

AULER A.S.; RUBBIOLI E.L.; BRANDI, R. **As Grandes Cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Rona, v.1, 2001. 230 p.

AULER, A. S.; PILÓ, L.B. Geoespeleologia. *In*: CECAV. **III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECAV-ICMBio, 2011. p. 25-44.

AULER, A.S.; PILÓ, L.B. Geologia de cavernas e sua interpretação à luz da legislação ambiental espeleológica. *In*: CRUZ, J.B.; PILÓ, L.B. (orgs.). **Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: ICMBio, 2019. 262 p.



ÁVILA, A.N.; FERNANDES, H.A.; MORITA, T.D.M. Levantamento de cavernas graníticas da Serra dos Cocais - Valinhos (SP). In: ZAMPAULO, R. A. (org.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p.190-200. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe\\_190-200.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_190-200.pdf). Acesso em: 11 mar. 2020.

BARTON, H.A.; JURADO, V. What's up down there? Microbial diversity in caves. *Microbe. American Society for Microbiology*, v. 2, p. 132-138, 2007.

BASEI, M.A.S. **O Cinturão Dom Feliciano em Santa Catarina**. 1985. 186 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

BASTOS, M.D.A. Hidrografia – Bacias Hidrográficas. In: BASTOS, M.D.A. (coord.). **Atlas do Município de Florianópolis**. Florianópolis: Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, 2004. p. 30-33.

BENNETT, P.C. Quartz dissolution in organic-rich aqueous systems. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 55, p. 1781- 1797, 1991.

BENTO, D. M.; CRUZ, J.B.; FREITAS, J.I.M de; CAMPOS, U.P.; OLIVEIRA, A.F. de. A mais de 1000! O patrimônio espeleológico potiguar após a descoberta da milésima caverna. In: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRA-SILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34, 2017, Ouro Preto. **Anais...** Campinas: SBE, 2017. p. 227-237. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe\\_227-237.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_227-237.pdf). Acesso em: 11 mar. 2013.

BERNARDI, L.F. de O.; FERREIRA, R.L.; SILVA, M.S. Aspectos da ecologia de uma população de *Lasiadora* sp. (Araneae: Theraphosidae) em caverna granítica. **Espeleo-Tema**, Campinas, v. 19, p. 65-80, 2007.

BERNARDI, L.F. de O.; PELLEGRINI, T.G.; TAYLOR, E.L.S.; FERREIRA, R.L. Aspectos ecológicos de uma caverna granítica no sul de Minas Gerais. **Espeleo-Tema**, v. 23, n. 1, 2012.

BICHUETTE, M.E.; NASCIMENTO, A.R.; SCHIMONSKY, D.M.V. GALLÃO, J.E; RESENDE, L.P.A.; ZEPON, T. Terrestrial fauna of the largest granitic cave from Southern Hemisphere, southeastern Brazil: A neglected habitat. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 12, n. 2, p.75-90, 2017.

BIGARELLA, J.J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2. ed., 2007. 1436 p.

BONITO, J. Da importância do ensino das geo-ciências: algumas razões para o “ser” professor de geociências. In: TRINDADE, V.; FIALHO, I.; BONITO, J.; CID, M. (orgs.). **Metodologia do ensino das ciências**. Investigação e prática dos professores. Évora: Universidade de Évora, 1999.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília: Presidência da República, 1988. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/ConstituicaoCompilado.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/ConstituicaoCompilado.htm). Acesso em: 13 out. 2014.

BRASIL. **Decreto n. 6.640, de 7 de novembro de 2008**. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto no 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. Brasília: Presidência da República, 2008. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Decreto/D6640.htm). Acesso em: 13 out. 2014.

BRASIL. **Decreto-Lei n. 4.146, de 4 de março de 1942**. Dispõe sobre a proteção dos depósitos fossilíferos. Brasília: Presidência da República, 1942. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Decreto-Lei/1937-1946/Del4146.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/1937-1946/Del4146.htm). Acesso em 18 mar. 2020.

BRITO, A.F.S.; ALMEIDA, L.H.S.; RAMOS, R.R.C. As grutas em rochas cristalinas do Morro do Rangel, Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro. In: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p. 86-90. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe\\_086-090.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_086-090.pdf). Acesso em: 11 mar. 2020.

BROUGHTON, P.L. Origin and distribution of mineral species in limestone caves. **Earth Science Journal**, v. 5, n. 1, p. 36-43, 1971.

CALOR, A.R. Trichoptera. In: Guia *on-line* de Identificação de larvas de Insetos Aquáticos do Estado de São Paulo. 2007. Disponível em: [http://sites.ffclrp.usp.br/aguadoce/index\\_trico](http://sites.ffclrp.usp.br/aguadoce/index_trico). Acesso em: 02 mar. 2020.

CAMPBELL, E.M. Granite landforms. **Journal of the Royal Society of Western Australia**, v. 80, n. 3, p. 101-112, 1997.

CANDIROGLU, B.; GUNGUR, N.D. Cave Ecosystems: Microbiological View. **European Journal of Biology**, v. 76, n. 1, p. 36-42, 2017.

CARNEIRO, C.D.R.; TOLEDO, M.C.M. de; ALMEIDA, F.F.M. de. Dez motivos para a inclusão de temas de geologia na educação básica. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, n. 4, p. 553-560, 2004.

CARUSO, M.M.L. **O Desmatamento da Ilha de Santa Catarina de 1500 aos dias atuais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1983. 158p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1980.

CIOCCALE, M.A.; PASQUINI, A.; DEPETRIS, P.J. Hallazgo de espeleotemas silíceas en rocas graníticas del Batolito de Achala, Sierras Pampeanas de Córdoba. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, v. 63, n. 3, p. 417-420, 2008.

CORRÊA, V.X. **Geoquímica, isotopia e geocronologia das rochas graníticas do Batólito Florianópolis na Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. 2016. 150 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

COVELLO, C. O patrimônio geológico e sítios de geodiversidade do município de Florianópolis/SC: estratégias de geoconservação. 2018. 381 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

COVELLO, C.; HORN FILHO, N.O.; BRILHA, J. A Geodiversidade do Município de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil: Valores e Ameaças. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 104-111, 2017.

CRUZ, J.B.; COELHO, D.C.; SILVA, F.J. da; FREITAS, J.I.; CASTRO, T.J. de; CAMPOS, U.P. Diagnóstico espeleológico do Rio Grande do Norte. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBE, 2007. p. 87-95. Disponível em: [http://www.sbe.com.br/anais29cbe/29cbe\\_087-095.pdf](http://www.sbe.com.br/anais29cbe/29cbe_087-095.pdf). Acesso em: 13 jun. 2019.

CUNHA, S.B.; GUERRA, A.J.T. (orgs.). **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998.

DAMAS, C.; ANTICO, S.S.; PINTO-DA-ROCHA, R.; FIGUEIREDO, L.A.V. Levantamento preliminar da fauna associada às cavernas em tálus da região de Paranapiacaba (Santo André - SP). *In*: RASTEIRO, M.A.; MARTINS, L.R.B. (orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 25, 1999, Vinhedo. **Anais...** Campinas: SBE, 2017. p. 87-90. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais25cbe/25cbe\\_087-090.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais25cbe/25cbe_087-090.pdf). Acesso em: 13 jun. 2019.

DAZA, R.; BUSTILLO, M.A. Allophanic and ferric root-associated stalactites: biomineralization induced by microbial activity (Galeria da Queimada lava tube, Terceira, Azores). **Geological Magazine**, v. 152, n. 3, p. 504–520, 2015.

DAZA, R.; BUSTILLO, M.A.; RECIO, C.; CARVALHO, M.R.; NUNES, J.C. Composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ ) de espeleotemas silíceos en las cuevas volcánicas de Algar do Carvão y Branca Opala (Isla Terceira, Azores, Portugal). **Estudios Geológicos**, v. 70, n. 2, e010, 2014.

DAZA, R.; MILLER, A.Z.; SÁIZ-JIMÉNEZ, C.; GÁZQUEZ, F.; CALAFORRA, J.M.; FORTI, P.; RULL, F.; MEDINA, J. SANZ-ARRANZ, A.; MARTÍNEZ-FRÍAS, J.; TOULKERIDIS, T. Insights into speleothems from lava tubes of the Galapagos Islands (Ecuador): mineralogy and biogenicity, *In*: INTERNATIONAL VULCANSPELEOLOGY SYMPOSIUM, 17, 2016, Havaí. **Anais eletrônicos...** Havaí, 2016. Disponível em: <http://www.cavepics.com/IVS17/CALAFORA.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2017.

DESPAIN, J.D.; STOCK, G.M. Geomorphic history of Crystal Cave, Southern Sierra Nevada, California. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 67, n. 2, p. 92-102, 2005.

DOWLING, R.K. Geotourism's Global Growth. **Geoheritage**, v. 3 p. 1-13, 2011.

DU CHÂTELET, E.A.; BERNARD, N.; DELAINE, M.; POTDEVIN, J-L.; GILBERT, D. The mineral composition of the tests of 'testate amoebae' (Amoebozoa, Arcellinida): The relative importance of grain availability and grain selection. **Revue de micropaleontology**, v. 58, p. 141-154, 2015.

DURY, G.H. Rational descriptive classification of duricrust. **Earth Science Journal**, v. 3, n. 2, p. 77-86, 1969.

EHLEN, J. **The landforms of granitic rocks**. Fort Belvoir: Dtic Selected, 1990. 73 p.

ELZEA, J.M.; RICE, S.B. TEM and X-ray diffraction evidence for cristobalite and tridymite stacking sequences in opal. **Clays and Clay Minerals**, v. 44, n. 4, p. 492-500, 1996.

FABRI, F.; AULER, A.; CALUX, A.; CASSIMIRO, R. AUGUSTIN, C.H.R.R. Geoespeleologia e principais aspectos espeleogenéticos das grutas Baixada das Crioulas I e II, Itambé do Mato Dentro, Minas Gerais. **Geonomos**, v. 21, n. 1, p. 56-62, 2013.

FALASCHI, R.L.; AMARAL, D.T.; SANTOS, I.; DOMINGOS, A.H. R.; JOHNSON, G.A.; MARTINS, A.G.S.; VIROOMAL, I.B.; POMPEIA, S.L.; MIRZA, J.D.; OLIVEIRA, A.G.; BECHARA, E.J.H.; VIVIANI, V.R.; STEVANI, C.V. *Neoceroptatus betaryiensis* nov. sp. (Diptera: Keroplatidae) is the first record of a bioluminescent fungus-gnat in South America. *Scientific Reports*, v. 9, n. 11291, 2019. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-47753-w#citeas>. Acesso em: 29 mar. 2020.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. p. 123-194.

FINLAYSON, B. Caves in granite. **Teto Baixo**, ano 2, n. 2, p. 16-18, 2011.

FINLAYSON, B. Granite caves in Girraween National Park, Southeast Queensland. **Helictite**, v. 20, n. 2, p. 53-59, 1982.

FINLAYSON, B. The formation of caves in granite. In: PATERSON, K.; SWEETING, M. M. (eds.). **New directions in karst**: Proceedings of the Anglo-French Karst Symposium. Norwich: Geobooks, 1986, p. 333-347.

FINLAYSON, B.L.; WEBB, J.A. Amorphous speleothems. **Cave Science**, v. 12, n. 12, p. 3-8, 1985.

FINLAYSON, B.L.; WEBB, J.A. Evolution of ground water in Californian granites: Evidence from speleothems. **Geological Society of America Bulletin**, v. 100, p. 639-64, 1988.

FLORISBAL, L.M.; JANASI, V.A.; BITENCOURT, M.F.; NARDI, L.V.S.; MARTELETO, N.S. Geological, geochemical and isotope diversity of ~134Ma dykes from the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná Magmatic Province: Geodynamic controls on petrogenesis. **Journal of Volcanology and Geothermal Research**, n. 355, p. 181-203, 2018.

FLÖRKE, O.W.; GRAETSCH, H.; MARTIN, B.; RÖLLER, K.; WIRTH, R. Nomenclature of micro- and non-crystalline silica minerals, based on structure and microstructure. **Neues Jahrbuch für Mineralogie - Abhandlungen**, v. 163, p. 19-42, 1991.

FRIERDICH, A.J.; HASENMUELLER, E.A.; CATALANO, J.G. Composition and structure of nanocrystalline Fe and Mn oxide cave deposits: Implications for trace element mobility in karst systems. **Chemical Geology**, v. 284, p. 82-96, 2011.

GALINDO, M.J.L. **Biometeorização de rocas ígneas - espeleotemas silíceos desde uma perspectiva geobiológica**. 2013. 342 f. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade da Coruña, A Coruña, 2013.

GALINDO, M.J.L. The role of mites in the construction and weathering of siliceous biospeleothems. **International Journal of Speleology**, v. 47, n. 3, p. 407-415, 2018.

GARCIA, P.C.A. Nova espécie de *Eleutherodactylus* Duméril e Bibron, 1891 do estado de Santa Catarina, Brasil (Amphibia; Anura; Leptodactylidae). **Biociências**, v. 4, n. 2, p. 57-68, 1996.

GÁZQUEZ, F.; CALAFORRA, J.M.; FORTI, P. Black Mn-Fe crusts as markers of abrupt paleoenvironmental changes in El Soplao Cave (Cantabria, Spain). **International Journal of Speleology**, v. 40, n. 2, p. 163-169, 2011.

GENTILLI, J. Duricrust. Geomorphology. Encyclopedia of Earth Science, 1968.

GERCO. Gerenciamento Costeiro. **Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro**. 2010. Disponível em: <http://www.spg.sc.gov.br/gerco.php>. Acesso em: 28 out. 2014.

GHOSH, S.; KUISIENE, N.; CHEEPHAM, N. The cave microbiome as a source for drug discovery: Reality or pipe dream? **Biochemical Pharmacology**, v. 134, p. 18-34, 2017.

GILBERT, D.; AMBLARD, C.; BOURDIER, G.; FRANCEZ, A.-J.; MITCHELL, E.A.D. Le régime alimentaire des Thécamoebiens (Protista, Sarcodina). **L'Année Biologique**, v. 39, p. 57-68, 2000.

GONÇALVES, F.; RODET, J.; OLIVEIRA, D.C.; MAGALHÃES, A.P. Cavidades em granitos no município de Santa Maria Madalena – RJ (Brasil). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31, 2011, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: SBE, 2011. p. 87-93. Disponível em: [http://www.sbe.com.br/anais31cbe/31cbe\\_087-093.pdf](http://www.sbe.com.br/anais31cbe/31cbe_087-093.pdf). Acesso em: 13 jun. 2019.

GONZALEZ-OLLAURI, A.; MICKOVSKI, S.B. Shallow landslides as drivers for slope ecosystem evolution and biophysical diversity. **Landslides**, v. 14, p. 1699-1714, 2017.

GPME. Grupo Pierre Martin de Espeleologia. Teto Baixo – Informativo eletrônico. Ano 2, n. 2, 2011. 78 p.



GRADZIŃSKI, M.; BANAS, M.; UCHMAN, A. Biogenic origin of manganese flowstones from Jaskinia Czarna Cave, Tatra MTS., Western Carpathians. **Annales Societatis Geologorum Poloniae**, v. 65, p. 19-27, 1995.

GRAY, M. **Geodiversity**: valuing and conserving abiotic nature. Chichester: Wiley, 2004. 434 p.

GRAY, M. Other nature: geodiversity and geosystem services. **Environmental Conservation**, v. 38, n. 3, p. 271-274, 2011.

GRAY, M. Valuing Geodiversity in an 'Ecosystem Services' Context. **Scottish Geographical Journal**, v. 128, n. 3-4, p. 177-194, 2012.

GRAY, M. **Geodiversity**: valuing and conserving abiotic nature. Chichester: Wiley Blackwell, 2 ed., 2013. 495 p.

GRAY, M. The confused position of the geosciences within the "natural capital" and ecosystem services approaches. **Ecosystem Services**, v. 38, p. 106-112, 2018.

GRAY, M. Geodiversity, geoheritage and geoconservation for society. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 7, p. 226-236, 2019.

GRAY, M.; GORDON, J.E.; BROWN, E.J. Geodiversity and the ecosystem approach: the contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 4, p. 659-673, 2013.

GUEDES JR., A. Áreas de Proteção Ambiental para poços de abastecimento público em aquíferos costeiros. Florianópolis. 2005. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (orgs.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (orgs.). **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

GULDEN, B. Other types of caves - talus e boulder e granite caves. 2019. Disponível em: <http://www.caverbob.com/other.htm>. Acesso em: 17 mar. 2020.

HARDT, R. **Da carstificação em arenitos**. Aproximação com o suporte de geotecnologias. 2011. 224 f. (Tese de Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2011.

HARDT, R. **Grutas em rochas cristalinas/metamórficas estudo de casos na Serra do Mar e da Mantiqueira SP/MG**. 2002. 34f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia Licenciatura). Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ouro Fino, Ouro Fino, 2002.

HARDT, R. Cavernas em granito e gnaiss. Aplicação de um sistema de classificação. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 27, 2003, Januária. **Anais...** Januária: SBE, 2003, p. 52-55.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F. BARTORELLI, A. (orgs.). **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca, 2012. 900 p.

HÄUSELMANN, PH. UIS Mapping Grades. **International Journal of Speleology**, v. 40, p. 4-6, 2011.

HENMI, T.; WADA, K. Morphology and composition of allophane. **American Mineralogist**, v. 61, p. 379-390, 1976.

HERRMANN, M.L. de P.; ROSA, R. de O. **Mapeamento temático do município de Florianópolis**: Geomorfologia. Síntese temática. 1991.

HILL, C.A.; FORTI, P. The classification of caves minerals and speleothems. **International Journal of Speleology**. v. 24, 1-4, p. 77-82, 1995.

HJORT, J.; GORDON, J.E.; GRAY, M.; HUNTER JR., M.L. Why geodiversity matters in valuing nature's stage. **Conservation Biology**, v. 29, n. 3, p. 630-639, 2015.

HORN FILHO, N.O. Ilha de Santa Catarina. *In*: MUEHE, D. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: MMA, 2006. p. 413-436.

HORN FILHO, N.O.; SCHMIDT, A.D.; BENEDET, C.; NEVES, J.; PIMENTA, L.H.F.; PAQUETE, M.; ALENCAR, R.; SILVA, W.B.; GENOVEZ, R.; SANTOS, C.G. Estudo geológico dos depósitos clásticos quaternários superficiais da Planície Costeira de Santa Catarina, Brasil. **Gravel**, v. 12, n. 1, p. 47-107, 2014.

HOSE, T.A. European "Geotourism". Geological Interpretation and Geoconservation Promotion for Tourists. *In*: BARRETINO, D; WINBLEDON, W.A.P; GALLEGO, E. (eds.). **Geological Heritage: its conservation and management**. Madrid: Instituto Tecnológico e GeoMinero da España, 2000. p. 127-146.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Biodiversidade. **Áreas Prioritárias para a Conservação do Patrimônio Espeleológico Brasileiro**. Brasília: ICMBio, 2018. 31 p.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Biodiversidade. **Instrução Normativa n. 3, de 1 de setembro de 2014**. Fixa normas para a utilização do Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBio, na forma das diretrizes e condições previstas nesta Instrução Normativa, e regulamenta a disponibilização, o acesso e o uso de dados e informações recebidos pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade por meio do SISBio. (Processo nº 02070.001067/2013-96). Brasília: ICMBio, 2014. Disponível em: [http://www.icmbio.gov.br/sisbio/images/stories/instrucoes\\_normativas/INSTRU%C3%87%C3%83O\\_NORMATIVA\\_ICMBio\\_N%C2%BA\\_3\\_DE\\_2014\\_com\\_retifica%C3%A7%C3%A3o\\_do\\_DOU18062015.pdf](http://www.icmbio.gov.br/sisbio/images/stories/instrucoes_normativas/INSTRU%C3%87%C3%83O_NORMATIVA_ICMBio_N%C2%BA_3_DE_2014_com_retifica%C3%A7%C3%A3o_do_DOU18062015.pdf). Acesso em: 16 nov. 2017.

ICMBIO. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Anuário estatístico do patrimônio espeleológico brasileiro 2019**. Brasília: ICMBio, 2020. 19 p.

IGUAL, E.C. Gruta do Riacho Subterrâneo, Itu-SP (CNC SBE SP 700): a maior caverna em granito do Hemisfério Sul. **Teto Baixo**, ano 2, n. 2, p. 04-06, 2011.

JERRAM, D.; PETFORD, N. **Descrição de rochas ígneas**: guia geológico de campo. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 265 p.

KARMAN, I. Água: ciclo e ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M. de.; TAIOLI, F. (orgs.). **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 186-209.

KASHIMA, N. On the Wad-Minerals from the Cavern Environment. **International Journal of Speleology**, v. 13, p. 67-72, 1983.

KIRKPATRICK, J.D; BRODSKY, E.E Slickenline orientations as a record of fault rock rheology. **Earth and Planetary Science Letters**, n. 408, p. 24-34, 2014.

LAZARIDIS, G.; KYRIAKI, P. Preliminary report on granite caves in Greece. **Cadernos Lab. Xeológico de Laxe**. v. 33, p. 101-113, 2008.

LECH, M.E; TREWIN, C.L. Weathering, **Erosion and Landforms**: Teacher Notes and Student Activities. 2 ed. Geoscience Australia: Canberra, 2013.

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

LIVI, N.S. Geologia, **Geomorfologia e Evolução Paleogeográfica da Planície Costeira da Ilha de Santa Catarina, Litoral Central do Estado de Santa Catarina, Brasil, em Base aos Estudos dos Depósitos Quaternários**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

LOBO, A.S.L.; PERINOTTO, J.A.J.; BOGGIANI, P.C. Espeleoturismo no Brasil: panorama geral e perspectivas de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ecoturismo**, v.1, n.1, p.62-83, 2008.

LOBO, H.A.S.; BOGGIANI, P.C. Cavernas como patrimônio geológico. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 70, p. 190-199, 2013.

LÓPEZ, L.G.; ROMANÍ, J.R.V. GALINDO, M.J.L. Testate amoebae of granite caves. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PSEUDOKARST, 12, 2012, Tui. **Proceedings...** Tui: UIS, 2012. p. 11-14.

LUNDBERG, J.; CARIAS, C.B.; MCFARLANE, D.A. Preliminary results from U–Th dating of glacial–interglacial deposition cycles in asilica speleothem from Venezuela. **Quaternary Research**, v. 74, p. 113-120, 2010.

MARCONI, S.S; FERREIRA, R.L. Cave invertebrates in Espírito Santo state, Brazil: a primary analysis of endemism, threats and conservation priorities. **Subterranean Biology**, v. 16, p. 79-102, 2015.

MARQUES, L.S. **Geoquímica dos diques toleíticos da costa sul-sudeste do Brasil:** contribuição ao conhecimento da Província Magmática do Paraná. 2001. Tese (Livre Docência) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosfera. Universidade São Paulo. São Paulo, 2001.

MARQUES, E.L.S.; CORREIA, D.C.; OLIVEIRA, R.B.F.; SILVA, K.B.; DIAS, J.C.T.; PIROVANI, C.P.; REZENDE, R.P. Potencial biotecnológico de microrganismos isolados de cavernas de Paripiranga, Bahia. *In*: RASTEIRO, M.A; SALLUN-FILHO, W. (orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015, Eldorado. **Anais...** Eldorado: SBE, 2015. p. 161-168.

MARQUES, L. M.; DOMINGOS, K.; PARIZOTO, D. G. V. Análise de relevância segundo critérios da IN MMANº2/2009 da cavidade SC\_019 - Gruta do Saco Grande, Florianópolis/SC. *In*: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRASILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34, 2017, Ouro Preto. **Anais...** Campinas: SBE, 2017. p. 487-492. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe\\_487-492.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_487-492.pdf). Acesso em: 13 jun. 2019.

MARQUES, L.M.; PARIZOTO, D.G.V.; ABREU, H.F. Utilização do laser scanner terrestre como técnica de mapeamento - estudo de caso: SC\_019. *In*: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p. 179-184. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe\\_179-184.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_179-184.pdf). Acesso em: 11 mar. 2020.

MARTINS, C. E. Caracterização fisiográfica do entorno da Gruta do Riacho Subterrâneo, Itu-SP. **Teto Baixo**, Ano 2, n. 2, p. 10-11, 2011.

MASSUQUETO, L.L.; PONTES, H.S.; FERNANDES, L.A. Feições da geodiversidade subterrânea brasileira em diferentes contextos litológicos e a legislação vigente. *In*: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p. 368-374. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe\\_368-374.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais35cbe/35cbe_368-374.pdf). Acesso em: 11 mar. 2020.

MEA. Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington: Island Press, 2005. 156 p.

MELO, M.S. de; SALES, V.C.; PEULVAST, J.P.; SAADI, A.; MELLO, C.L. Processos e produtos morfogenéticos continentais. *In*: SOUZA, C.R. de G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M. dos S.; OLIVEIRA, P.E. de. (orgs.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, 2005. p. 258-275.

MELO, M.S.; GUIMARÃES, G.G.; CHINELATTO, A.L.; GIANNINI, P.C.F.; PONTES, H.P.; CHINELATTO, A.S.; ATENCIO, D. Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Parana Basin, Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, n. 63, p. 20-35, 2015.

MIGÓN, P. Are any granite landscapes distinctive of the humid tropics? Reconsidering multiconvex topographies. **Singapore Journal of Tropical Geography**, v. 30, p. 327-342, 2009.

MILLER, A.Z.; DIONÍSIO, A.; SEQUEIRA BRAGA, M.A.; HERNÁNDEZ-MARINÉ, M.; AFONSO, M.J.; MURALHA, V.S.F.; HERRERA, L.K.; RAABE, J.; FERNANDEZ-CORTES, A.; CUEZVA, S.; HERMOSIN, B.; SANCHEZ-MORAL, S.; CHAMINÉ, H.; SAIZ-JIMENEZ, C. Biogenic Mn oxide minerals coating in a subsurface granite environment. **Chemical Geology**, p. 181-191, 2012.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n. 347, de 10 de setembro de 2004**. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Brasília: MMA, 2004. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452>. Acesso em 15 out. 2014.

MOCHIUTTI, N.F.; GUIMARÃES, G.B.; MOREIRA, J.C.; LIMA, F.F.; FREITAS, F.I. Os Valores da Geodiversidade: Geossítios do Geopark Araripe/CE. **Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ**, v. 35, n. 1, p. 173-189, 2012.

MOCHIUTTI, N.F.; SANTOS, R.D. dos; CARVALHO FILHO, H.; PERDIGÃO, B.L. Além de sol e mar - o patrimônio espeleológico da Ilha de Santa Catarina. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PATRIMÔNIO GEOLÓGICO, 2, 2013, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: UFMG/UFOP, 2013. p. 221-222.

MOCHIUTTI, N.F.; SANTOS, R.D. dos; CARVALHO FILHO, H.; PERDIGÃO, B.L.; FERRARI, G.V.; SILVA, M.; MORALES, A.B. Aspectos geoespeleológicos das cavernas graníticas da Ilha de Santa Catarina, Florianópolis – SC. *In*: SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 9, 2015, Florianópolis. **Anais eletrônicos...** Florianópolis: SBG, 2015.

MOCHIUTTI, N.F.B.; TOMAZZOLI, E.R. Cavernas em granito. Precisamos falar sobre elas. *In*: ZAMPAULO, R. A. (org.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019. p. 18-29.

MOCHIUTTI, N.F.B.; TOMAZZOLI, E.R. Espeleotemas de uma caverna granítica na Ilha de Santa Catarina: uma análise preliminar. *In*: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRA-SILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.). CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 34, 2017, Ouro Preto. **Anais...** Campinas: SBE, 2017. p. 327-333.

MOCHUITTI, N.F.; GUIMARÃES, G.B.; MELO, M.S. de. Os valores da geodiversidade da região de Piraí da Serra, Paraná. **Geociências UNESP**, v. 30, n. 4, p. 651-668, 2011.

MOORE, G.W. Manganese deposition in limestone caves. *In*: BECK, B.F. CONGRESSO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 8, 1981, Kentucky. **Proceedings...** Kentucky: UIS. 1981. p. 642-644.

MOREIRA, J.C. Geoturismo: uma abordagem histórico-conceitual. **Turismo e Paisagens Cársticas**, v. 3, n. 1, p. 5-10, 2010.



NAVARRO, G.R.B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C.C.; LEME, T.G. **Livro de referência de minerais comuns e economicamente relevantes**: filossilicatos – Museu de Minerais, Minérios e Rochas Prof. Dr. Heinz Ebert, 2017. Disponível em: <https://museuhe.com.br/site/wp-content/uploads/2018/02/Museu-HE-ALOFANO.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2020.

NESSE, W.D. **Introduction to optical mineralogy**. New York: Oxford University Press. 3. ed. 2004. 348 p.

NOGUEIRA, J.M.R.; MIGUEL, L.F.S.; Bacteriologia. *In*: MOLINARO, E.; CAPUTO, L.; AMENDOEIRA, R. (orgs.). **Conceitos e métodos para a formação de profissionais em laboratórios de saúde**: volume 4. Rio de Janeiro: EPSJV, IOC, 2009. p. 339-340.

NORTHUP, D.E.; BOSTON, P.J. Microbial Speleology: Opportunities and Challenges. *In*: NATIONAL CAVE AND KARST MANAGEMENT SYMPOSIUM, 17, 2005, Albany. **Anais...** Albany: Northeastern Cave Conservancy, Inc., 2005. p. 27-34.

ONAC, B.P.; FORTI, P. Minerogenetic mechanisms occurring in the cave environment: an overview. **International Journal of Speleology**, v. 40, n. 2, p. 79-98, 2011.

OSBORNE, R.A.L.; WELIANGE, W.S.; JAYASINGHA, P.; DANDENIYA, A.S.; ALGIRIYA, A.K.P.P.; POGSON, R.E. Caves and karst-like features in proterozoic gneiss and cambrian granite, Southern and Central Sri Lanka: an introduction. **Acta Carsologica**, v. 42, n. 1, p. 25-48, 2013.

OSWALD, C.B.; MAGALHÃES, R.F.; SANTOS, F.R.; GARCIA, P.C.A.; NECKEL-OLIVEIRA, S. Model based species delimitation as a tool to identify undescribed anurans in Southern Atlantic Forest. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GENÉTICA, 65, 2019, Águas de Lindóia. **Anais...** Águas de Lindóia: SBG, 2019. p. 75-75.

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

PEREIRA R.G.F. de A. Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia – Brasil). 2010. 295 f. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade do Minho, Braga (Portugal), 2010.

PIAZZA, A.T.D. **Geochemistry and geomicrobiology of black manganese oxide cave deposits in Monroe and Greenbrier Counties, West Virginia**. 2016. 138 f. Thesis (Master of Science). University of Akron, Ohio, 2016.

PILÓ, L.B.; AULER, A. Introdução à Espeleologia. *In*: CECAV. **III Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: CECAV- ICMBio, 2011. p. 7-23.

PMF. Prefeitura Municipal de Florianópolis. **Maior Unidade de Conservação da Capital será criada no Norte da Ilha**. 2020. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/noticias/index.php?pagina=notpagina&noti=22060>. Acesso em: 18 mar. 2020.

PMF. Prefeitura Municipal de Florianópolis. **Plano Municipal Integrado de Saneamento Básico**. Florianópolis – Parte 2 – Diagnóstico da caracterização física. Florianópolis: MPB Engenharia, 2009. 92 p.

POST, J.E. Manganese oxide minerals: Crystal structures and economic and environmental significance. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 96, p. 3447-3454, 1999.

ROCHA, A.D., BICHUETTE, M.E. Influence of abiotic variables on the bat fauna of a granitic cave and its surroundings in the state of São Paulo, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 16, n. 3, 2016.

RODRIGUES, A.A.; CARRIM, A.J.; SADOYMA, G.; VIEIRA, J.D.G. Potencialidades biotecnológicas de *Bacillus Cereus* isolado em uma caverna. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2009, Montes Claros. **Anais...** Montes Claros: SBE, 2009. p. 215-220.

RODRÍGUEZ, J.A.M. **Génesis de cavidades graníticas en ambientes endógenos y exógenos**. 2011. 396 f. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade de Coruña, A Coruña (Espanha), 2011.

RODRÍGUEZ, M.V. Caracterización de cavidades de bloques graníticos y cuevas estructurales de VigoTui, (Galicia, España). Análisis morfoestructural del sistema de O Folón. **Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, v. 28, p. 231-262, 2003.

RODRÍGUEZ, M.V. **Cavidades naturais em rocas magmáticas: las cuevas en rocas plutónicas**. Tese (Doutorado em Geologia). 2017. 487 f. Universidade da Coruña, A Coruña (Espanha), 2017.

RODRÍGUEZ, M.V.; BEM, B.B.; VÁZQUEZ, R.C.; PÉREZ, R.S.; GONZÁLEZ, X.G. Relación entre estructura y morfología en el desarrollo de la cueva granítica de "O Folón" (Vigo, Galicia-España). **Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, v. 31, p. 87-103, 2006.

ROMANÍ, J.R.V.; BOURNE, J.; TWIDALE, C.R.; CAMPBELL, E.M. Siliceous cylindrical speleothems in granitoids in warm semiarid and humid climates. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 47, n. 4, p. 417-437, 2003.

ROMANÍ, J.R.V.; RODRÍGUEZ, M.V. Las cuevas graníticas. **Teto Baixo**, Ano 2, n. 2, p. 12-13, 2011.

ROMANÍ, J.R.V.; RODRÍGUEZ, M.V. SÁNCHEZ, J.S.; LÓPEZ, G. Morphologic types of speleothems in magmatic rock caves. In: REUNIÓN NACIONAL DE GEOMORFOLOGÍA, 13, 2014, Cáceres. **Anais...** Cáceres: Sociedad Española de Geomorfología, 2014. p. 490-493.

ROMANÍ, J.R.V.; RODRÍGUEZ, M.V. Types of granite cavities and associated speleothems: genesis and evolution. **Nature Conservation**, v. 63, p. 41-46, 2007.

ROMANÍ, J.R.V.; TWIDALE, C.R. **Formas y paisagem graníticos**. A Coruña: Universidade da Coruña, 1998. 411 p.

ROMANÍ, J.R.V.; VILAPLANA J.M. Datos preliminares para el estudio de espeleotemas en cavidades graníticas. **Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe**, v. 7, p. 335-323, 1984.

ROMANÍ, J.R.V.; SÁNCHEZ, J.S.; VAQUEIRO, M.; MOSQUERA, D.F. Speleothem development and biological activity in granite cavities. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**, v. 4, p. 337-346, 2010a.

ROMANÍ, J.R.V.; SÁNCHEZ, J.S.; VAQUEIRO, M.; MOSQUERA, D.F. Speleothems of Granite Caves. **Comunicações Geológicas**, v. 97, p. 71-80, 2010b.

ROSA, A.A.S da; GOLDBERG, K. Levantamento preliminar da ocorrência de cavernas no Rio Grande do Sul. **Espeleo-Tema**, v.18, p. 13-22, 1997.

RUBBIOLI, E.; AULER, A.S.; MENIN, D.; BRANDI, R. **Cavernas**: atlas do Brasil subterrâneo. Brasília: ICMBio, 2019. 340 p.

RUBBIOLI, E.; MOURA, V. **Mapeamento de cavernas**: guia prático. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2 ed., 2019. 92 p.

RUCHKYS, U de A.; TRAVASSOS, L.E.P.; RASTEIRO, M.A.; FARIA, L.E. (orgs.). **Patrimônio espeleológico em rochas ferruginosas**: propostas para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Campinas: SBE, 2015. 341 p.

SALLSTEDT T.; IVARSSON M.; LUNDBERG J.; SJÖBERG R.; ROMANÍ J.R.V. Speleothem and biofilm formation in a granite/dolerite cave, Northern Sweden. **International Journal of Speleology**, v. 43, n. 3, p. 305-313, 2014.

SAMPAIO, M.J.A.; ANDRADE, M.C.A.; DUTRA, A.J.B.; PENNA, M.T.M. **Manganês**. 2008. Disponível em:  
<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1117/1/28.%20MANGAN%C3%8AS.pdf>.  
Acesso em: 22 nov. 2019.

SANJURJO, J.; ROMANÍ, J.R.V.; PALLÍ L.; ROQUÉ, C. Espeleotemas de ópalo y pseudocarst granítico. **Revista C & G**, v. 21, n. 1-2, p. 123-134, 2007.

SANTA CATARINA. **Resolução CONSEMA nº 98, de 5 de maio de 2017**. Aprova, nos termos do inciso XIII, do art. 12, da Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009, a listagem das atividades sujeitas ao licenciamento ambiental, define os estudos ambientais necessários e estabelece outras providências. Santa Catarina: Governo do estado, 2017. Disponível em:  
<http://www.sde.sc.gov.br/index.php/biblioteca/consema/legislacao/resolucoes/654--56/file>.  
Acesso em: 18 mar. 2020.

SANTOS, E.R.D. dos. **Material Complementar ao livro Sistemática Vegetal I: Fungos**. Florianópolis: LANTEC – UFSC, 2015. 47 p. Disponível em:  
<https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/1311301/course/section/972329/Drechsler-Santos%202015%20material%20did%C3%A1tico%20fungos%20encarte%20EAD.pdf>.  
Acesso em: 26 nov. 2019.

SANTOS, E.A. dos; SOMMER, C.A.; WAICHEL, B.L.; HAAG, M.B. Ediacaran post-collisional high-silica volcanism associated to the Florianópolis Batholith, Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil: lithofacies analysis and petrology. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 96, p. 102299, 2019.

SATO, R.D.S.; BERTOLINI, D.L.V.B.V.; SIMÃO, P.X.A. **Parecer técnico espeleológico para avaliação de grau de relevância de cavernas** – Loteamento Jardim Recanto da Ilha – Saco Grande – Florianópolis – SC. Florianópolis: MinasHidroGeo, 2018. 242 p.

SAURO, F.; TISATO, N.; WAELE, J. de; BERNASCONI, S.M.; BONTIGNALI, T.R.R.; GALLI, E. Source and genesis of sulphate and phosphate-sulphate minerals in a quartz-sandstone cave environment. **Sedimentology**, v. 61, p.1433-1451, 2014.

SBE. Sociedade Brasileira de Espeleologia. Cadastro Nacional de Cavernas. Campinas: SBE, 2020. Disponível em: <http://www.sbe.com.br/cnc>. Acesso em: 16 mar. 2020.

SCHEUERER, M.; LUNDBERG, J.E.K.; SJÖBERG, R. Gobholo cave: a long granite cave in Swaziland (Southern Africa). In: FILIPPI, M.; BOSÁK, P. (eds.). **INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY**, 16, 2013, Brno. **Proceedings...** Brno: Czech Speleological Society, 2013. v. 3, p. 305-307.

SIEMENSMA, F. **Euglyphida**. 2019. Disponível em: <https://www.arcella.nl/euglyphida/>. Acesso em: 1 nov. 2019.

SILVA, L.C. da; HARTMANN, L.A.; MCNAUGHTON, N.J.; FLETCHER, I. Zircon U-Pb SHRIMP dating of a Neoproterozoic overprint in Paleoproterozoic granitic-gneissic terranes, southern Brazil. **American Mineralogist**, v. 85, p. 649-667, 2000.

SILVA, M. **Gênese e evolução das cavernas marinhas do maciço costeiro do Pântano do Sul, Ilha de Santa Catarina (SC)**. 2018. 238 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SILVA, M.; DUTRA, I.C.R.; BASTOS, T.V.; HORN FILHO, N.O. Técnicas de exploração da Toca da Baleia (SC-31), Ilha de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil. In: RASTEIRO, M.A.; TEIXEIRA-SILVA, C.M.; LACERDA, S.G. (orgs.) **CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA**, 34, 2017, Ouro Preto. **Anais...** Campinas: SBE, 2017. p. 209-216. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe\\_209-216.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais34cbe/34cbe_209-216.pdf). Acesso em: 16 nov. 2017.

SILVA, M.; HORN FILHO, N.O.; BASTOS, T.V. Espeleogênese de cavernas colúvio-marinhas da Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 46, 2016, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre: SBG, 2016.

SILVA, M.; PARIZOTO, D.G.V.; HORN FILHO, N.O. Gruta do Matadeiro (SC\_63): indicador paleoambiental ameaçado. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.). **CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA**, 33, 2015, Eldorado. **Anais eletrônicos...** Campinas: SBE, 2015. p.551-558. Disponível em: [http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe\\_551-558.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_551-558.pdf). Acesso em: 16 nov. 2017.

SILVA, M.LN. da; NASCIMENTO, M.A.L. do. O sistema de valoração da geodiversidade, com enfoque nos serviços ecossistêmicos *sensu* Murray Gray. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, Ciências Naturais, v. 14, n. 1, p. 79-90, 2019.

SILVA, M.LN. da; NASCIMENTO, M.A.L. do. Os Valores da Geodiversidade de Acordo com os Serviços Ecossistêmicos *Sensu* Murray Gray Aplicados a Estudos *In Situ* na Cidade do Natal (RN). **Caderno de Geografia**, v. 26, n. especial 2, p. 338-354, 2016.

SJÖBERG, R. A proposal for a classification system for Granitic Caves. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ESPELEOLOGIA, 9, 1986, Barcelona. **Anais...** Barcelona: UIS, 1986. p. 25-29.

SOUZA, C.R. de G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M. dos S.; OLIVEIRA, P.E. de. (orgs.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto: Holos, 2005.

SOUZA, F.C.R. de, SALGADO, A.A.R. Análise qualitativa da composição química de espeleotemas precipitados em cavidades em rochas siliciclásticas na região sudeste de Diamantina/MG. **Geografias**, v.11, n. 1, p. 60-83, 2015.

SPOLADORE, A.; COTTAS, L.R. Ornamentos de cavernas areníticas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBE, 2007. p. 289-295.

STRECKEISEN, A. To each plutonic rock its proper name. **Earth-Science Reviews**, v. 12, p.1-33, 1976.

STRIEBEL, T. Granite caves in the Fichtelgebirge Mountains, Germany. **Cadernos Lab. Xeológico de Laxe**, v. 33, p.167-174, 2008.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003. 400 p.

SWOPE, R. J. **An X-ray Diffraction Study of Opals**. The Ohio State University, 1983.

SZABÓ, G.A.J.; TEIXEIRA, W.; BABINSKI, M. Magma e seus produtos. *In*: TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M. de.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. p. 152-185.

SZENTES, G. Granite formations and granite cavities in northern Nigeria. **Cadernos Lab. Xeológico de Laxe**, v. 34, p. 13-26, 2009.

TEBO, B.M.; BARGAR, J.R.; CLEMENT, B.G.; DICK, G.J.; MURRAY, K.J.; PARKER, D.; VERITY, R.; WEBB, S.M. Biogenic manganese oxides: properties and mechanisms of formation. **Annual Review Earth Planetary Sciences**, v. 32, p. 287-328, 2004.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T.R.; TOLEDO, M.C.M. de.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009. 623 p.

TIMO, J.; ROMANO, A.W.; TIMO, M.B. Caracterização dos espeleotemas de 2 cavernas em rochas ferríferas na Unidade Geomorfológica Quadrilátero Oeste, Congonhas (MG). **Espeleo-Tema**, v. 26, n. 1, p. 19-37, 2015.



TJIA, H.D. Slickensides and fault movements. **Geological Society of America Bulletin**, v. 75, p. 683-686, 1964.

TOMAZZOLI, E.R. Rochas ácidas associadas ao Enxame de Diques Florianópolis, Província Magmática Paraná. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45, 2010, Belém. **Anais...** Belém: SBG, 2010. PAP003834.

TOMAZZOLI, E.R.; ALMEIDA, L.C. de; SILVA, M. da; MOCHIUTTI, N.F.; ALENCAR, R. Espeleologia na Ilha de Santa Catarina: um estudo preliminar das cavernas da Ilha. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31, 2011, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: GUPE/SBE, 2011. p. 131-139.

TOMAZZOLI, E.R.; ALMEIDA, L.C. de; SILVA, M. da; MOCHIUTTI, N.F.; ALENCAR, R. Espeleologia na Ilha de Santa Catarina: um estudo preliminar das cavernas da Ilha. **Espeleo-tema**, v. 23, n. 2, p. 71-85, 2012.

TOMAZZOLI, E.R.; PELLERIN, J.M. **Mapa geológico da Ilha de Santa Catarina**. Publicação digitalizada (PDF), 2014. Disponível em: [http://lmo.ufsc.br/files/2014/08/Geolog\\_Ilha7.pdf](http://lmo.ufsc.br/files/2014/08/Geolog_Ilha7.pdf). Acesso em 24 out. 2017.

TOMAZZOLI, E.R.; PELLERIN, J.M. Unidades do mapa geológico da Ilha de Santa Catarina: as rochas. **Geosul**, v. 30, n. 60, p. 225-247, 2015.

TOMAZZOLI, E.R.; PELLERIN, J.R.G.M; HORN FILHO, N.O. Geologia da Ilha de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil. **Geociências**, v. 37, n. 4, p. 715-731, 2018.

TWIDALE, C.R.; BOURNE, J.A. Caves in granitic rocks: types, terminology and origins. **Cadernos Lab. Xeológico de Laxe**, v. 33, p. 35-57, 2008.

VEADO, R.W.A. A vegetação do município de Florianópolis. *In*: BASTOS, M.D.A. (Coord.). **Atlas do Município de Florianópolis**. Florianópolis: Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, 2004. p. 35-41.

VERDÍA, F.M.A.; SÁNCHEZ, J.S; ROMANÍ, J.R.V. Génesis de espeleotemas de ópalo a en sistemas cársticos desarrollados en rocas ácidas. **Cadernos Lab. Xeológico de Laxe**, v. 25, p. 353-356, 2000.

VIEIRA, D.A.P.; FERNANDES, N.C.A.Q. **Microbiologia Geral**. Inhumas: IFG, 2012. 100 p.

VITTE, A.C. Relações entre a estratigrafia de rampas de colúvios e a evolução das vertentes na bacia do Ribeirão Juncal, município de Salto de Piraporá (SP). *In*: ENCONTRO DE GEÓGRAFOS DA AMÉRICA LATINA, 10, 2005, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2005. p. 16356-16363.

VODYANITSKII, Y.N. Mineralogy and Geochemistry of Manganese: A Review of Publications. **Eurasian Soil Science**, v. 42, n. 10, p. 1170-1178, 2009.

WAHLBERG, E.; JOHANSON, K.A. The age, ancestral distribution and radiation of *Chimarra* (Trichoptera: Philopotamidae) using molecular methods. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 79, p. 433-442, 2014.

WEBB, J.A.; FINLAYSON, B.L. Allophane and opal speleothems from granite caves in south-east Queensland. **Australian Journal of Earth Science**, v. 31, p. 341-349, 1984.

WENTWORTH, C.K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. **The Journal of Geology**, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.

WHITE, W.B.; VITO, C.; SCHEETZ, B.E. The mineralogy and trace element chemistry of black manganese oxide deposits from caves. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 71, n. 2, p. 136-143, 2009.

WIDDOWSON, M. Laterite and Ferricrete. In: NASH, D.J.; MCLAREN, S.J. (orgs.). **Geochemical Sediments and Landscapes**. Nova Jersey: Wiley-Blackwell, 2007, p. 45-94.

WILLEMS, L.; COMPÈRE, F.; HATERT, A.; POUCLLET, J.P.; VICAT, C.; BOULVAIN, F. Karst in granitic rocks, South Cameroon: cave genesis and silica and taranakite speleothems. **Terra Nova**, v. 14, p. 355-362, 2002.

WILLIAMS, L.A.; PARKS, G.A.; CRERAR, D.A. Silica Diagenesis, I. solubility controls. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 55, n. 3, p. 301-311, 1985.

WRAY, R.A.L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. **Earth-Science Reviews**, v. 42, p.137-160, 1997.

WRAY, R.A.L. Opal and chalcedony speleothems on quartz sandstones in the Sydney region, southeastern Australia. **Australian Journal of Earth Sciences**, v. 46, p. 623-632, 1999.

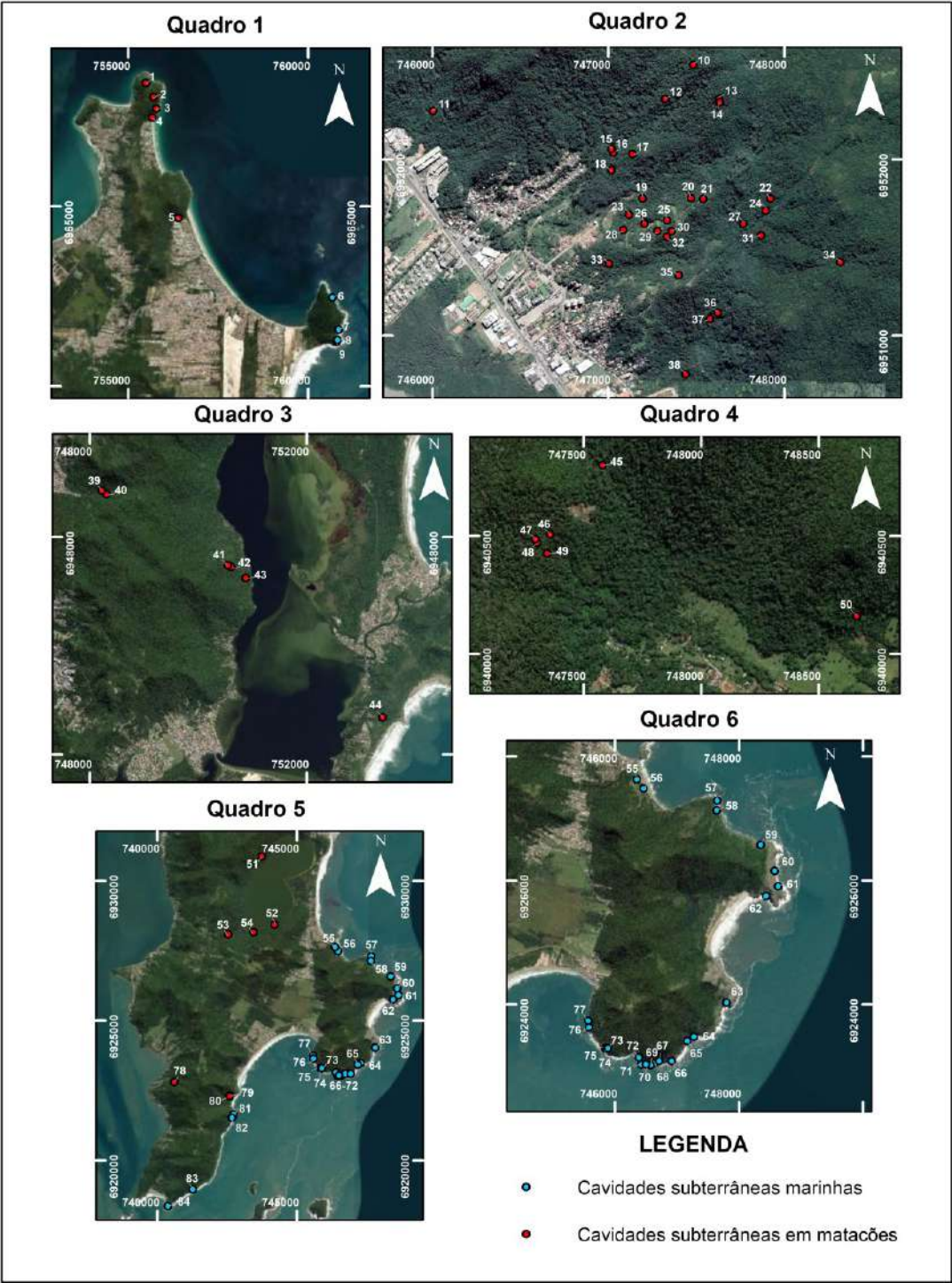
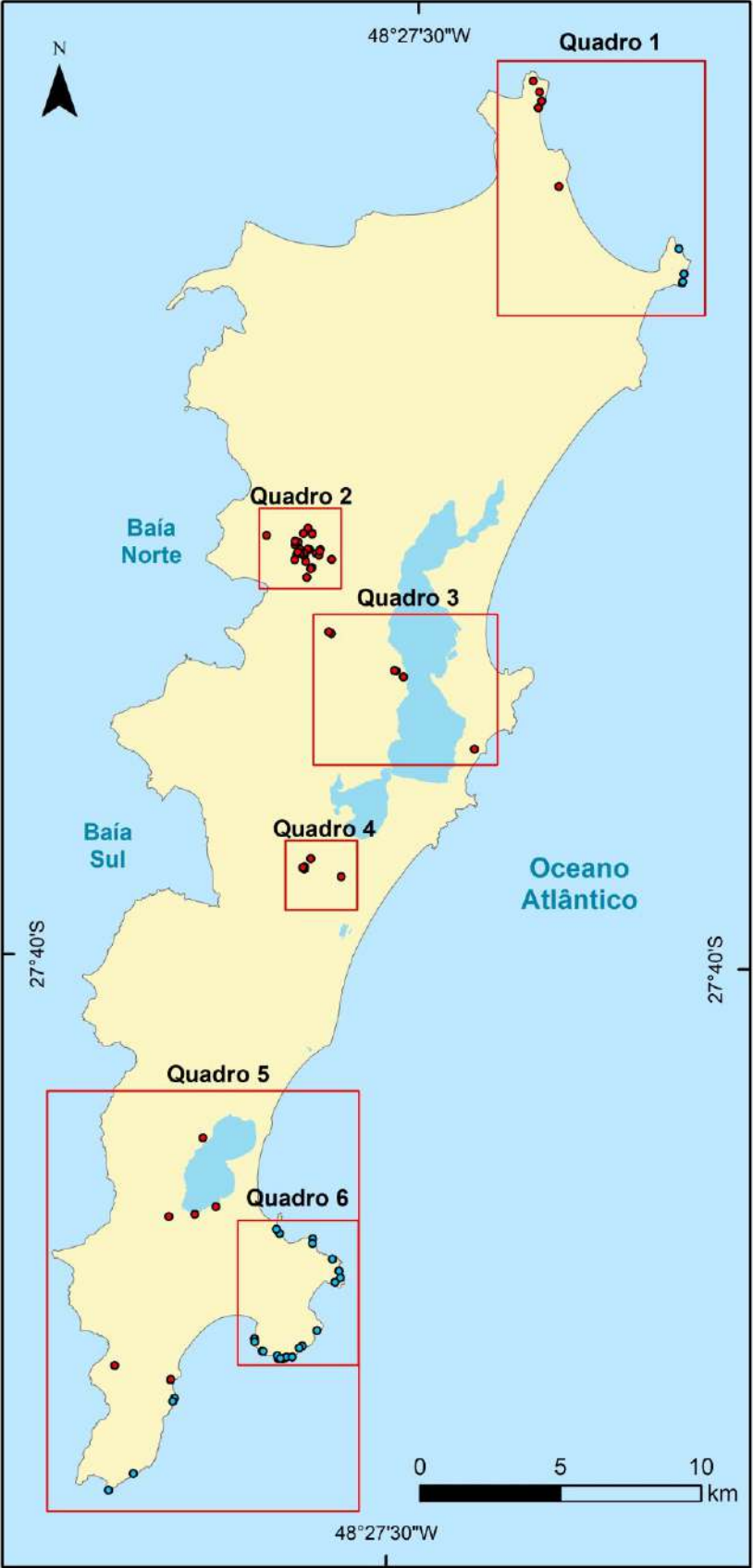
ZAMPAULO, R. de A.; FERREIRA, J. de S.; LIMA, M. E. de L.; PEREIRA, M. H. Prospecção e topografia da Gruta Granítica T 47 (Bertioga-SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 28, 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: SBE, 2005. p. 153-159.

ZAMPAULO, R. de A.; SOUZA, J.F. de; PEREIRA, M.H.; LUZ, C.S. Impactos em grutas graníticas na Serra dos Cocais (Valinhos-SP): patrimônio espeleológico desconhecido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBE, 2007a. p. 335-340.

ZAMPAULO, R. de A.; LIMA, M.E.L.; SILVA, M.S.; FERREIRA, R.L. Ecologia populacional de duas espécies de opiliões (arachnida, opiliones) em grutas graníticas na Serra do Mar (Bertioga-SP). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 29, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: SBE, 2007b. p. 325-334.

ZANINI, L.F.P.; BRANCO, P.M.; CAMOZZATO, E.; RAMGRAB, G.E. (orgs.). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. Florianópolis (Folha SH.22-Z-D-V) e Lagoa (Folha SH.22-Z-D-VI). Mapas. Escala 1:100.000. Brasília: CPRM, 1997. 252 p.

ANEXO A – Mapa de distribuição das cavidades naturais subterrâneas da Ilha de Santa Catarina



CAVIDADES SUBTERRÂNEAS EM MATAÇÕES

- 1 - Gruta do Rapa
- 2 - Gruta da Trilha da Ponta da Bota
- 3 - Gruta do Rei
- 4 - Gruta da Praia Brava
- 5 - Gruta das Feiticeiras
- 10 - Gruta do Descanso
- 11 - Gruta do Riacho Subterrâneo
- 12 - Gruta da Ribanceira
- 13 - Gruta da Casa Velha
- 14 - Gruta da Raiz
- 15 - Gruta do Rio do Mel
- 16 - Gruta do Pica-pau
- 17 - Gruta do Espinheiro
- 18 - Gruta do Lajão
- 19 - Gruta das Jararacas
- 20 - Gruta do Paredão
- 21 - Gruta das Bromélias
- 22 - Gruta dos Borbulhos
- 23 - Sistema de Cavernas da Água Corrente
- 24 - Gruta do Regato
- 25 - Gruta dos Ramais
- 26 - Gruta do Saco Grande
- 27 - Gruta do Murmúrio
- 28 - Gruta da Laje
- 29 - Gruta dos Buracos
- 30 - Gruta Escondida
- 31 - Gruta dos Musgos
- 32 - Gruta da Casa de Pedra
- 33 - Gruta das Pedras Grandes
- 34 - Gruta do Morro Pedra de Listra
- 35 - Gruta das Larvas
- 36 - Grota do Riacho I
- 37 - Grota do Riacho II
- 38 - Caverna Central Park
- 39 - Gruta do Rio Valdik
- 40 - Gruta do Monte Verde
- 41 - Gruta do Morro da Costa da Lagoa
- 42 - Gruta dos Cactos
- 43 - Gruta do Caminho da Costa da Lagoa
- 44 - Gruta das Pinturas
- 45 - Gruta do Rio Tavares
- 46 - Gruta do Morro da Represa
- 47 - Gruta dos Palmitos
- 48 - Gruta da Figueira
- 49 - Gruta do Maciço da Costeira
- 50 - Gruta do Oliteiro
- 51 - Gruta das Vozes
- 52 - Gruta do Muro de Pedras
- 53 - Gruta do Peri
- 54 - Gruta Caminho da Gurita
- 78 - Gruta da Caieira da Barra do Sul
- 79 - Gruta da Trilha do Saquinho II
- 80 - Gruta da Trilha do Saquinho I

CAVIDADES SUBTERRÂNEAS MARINHAS

- 6 - Furna dos Ingleses
- 7 - Furna do Santinho
- 8 - Furna da Encantada
- 9 - Furna das Cabras
- 55 - Furna do Matadeiro
- 56 - Furna do Lui
- 57 - Furna da Ponta do Quebra-remo
- 58 - Furna Preta
- 59 - Furna do Gravatá
- 60 - Furna da Água Escorrida
- 61 - Toca da Baleia
- 62 - Furna da Lagoinha do Leste
- 63 - Furna da Felicidade
- 64 - Furna da Fenda
- 65 - Furna da Ponta do Fuzil
- 66 - Furna do Poço
- 67 - Furna da Pedra Preta
- 68 - Furna das Andorinhas
- 69 - Furna do Medo
- 70 - Furna do Urubu
- 71 - Furna do Pântano do Sul
- 72 - Toca do Pântano do Sul
- 73 - Furna da Ponta do Marisco
- 74 - Furna das Flores
- 75 - Furna do Arco
- 76 - Toca da Nega
- 77 - Furna dos Morcegos
- 81 - Furna do Inferno
- 82 - Furna do Saquinho
- 83 - Furna do Pastinho
- 84 - Furna da Ponta do Frade

Sistema de projeção: Universal Transversa de Mercator  
Datum horizontal: SIRGAS 2000 Zona 22S  
Datum vertical: Imbituba/SC

Fonte: Cadastro Nacional de Cavernas - Sociedade Brasileira de Espeleologia (março, 2020)

Organização: Rodrigo Aguiar Guimarães



ANEXO B – Mapa espeleológico do Sistema de Cavernas da Água Corrente

