

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

Projeto Geoespeleologia do Carste Siliciclástico da Formação Tombador: Subsídios à  
Conservação do Patrimônio Espeleológico na Chapada Diamantina

TCCE ICMBio/Vale III: Compensação Espeleológica

## RELATÓRIO TÉCNICO FINAL

Raphael Parra

Submissão revisada e aprovada por Ricardo G. Fraga de A. Pereira  
Coordenador do Projeto

Salvador – BA

19 de dezembro de 2025

## 1. INTRODUÇÃO

O projeto “Geoespeleologia do Carste Siliciclástico da Formação Tombador: Subsídios à Conservação do Patrimônio Espeleológico na Chapada Diamantina”, foi desenvolvido mediante parceria entre NEHMA / IGeo – Universidade Federal da Bahia - UFBA e Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECAV, sendo financiado através do TCCE ICMBio/Vale N°. 01/2022 – Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica firmado entre a Vale S.A. e o Instituto Chico Mendes de Conservação para a Biodiversidade (ICMBio), com gestão operacional realizada pelo Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade – IABS.

Tendo iniciado no mês de outubro de 2022, o tempo de duração previsto para o projeto era, inicialmente, de dois anos. Entretanto, com o avanço das atividades e a geração de uma série de dados diversa e robusta, viu-se a oportunidade de ampliar o projeto em um ano adicional, conferindo tempo hábil para a confecção de produtos à altura dos resultados encontrados. Dessa maneira, a conclusão do projeto se deu no mês de outubro de 2025.

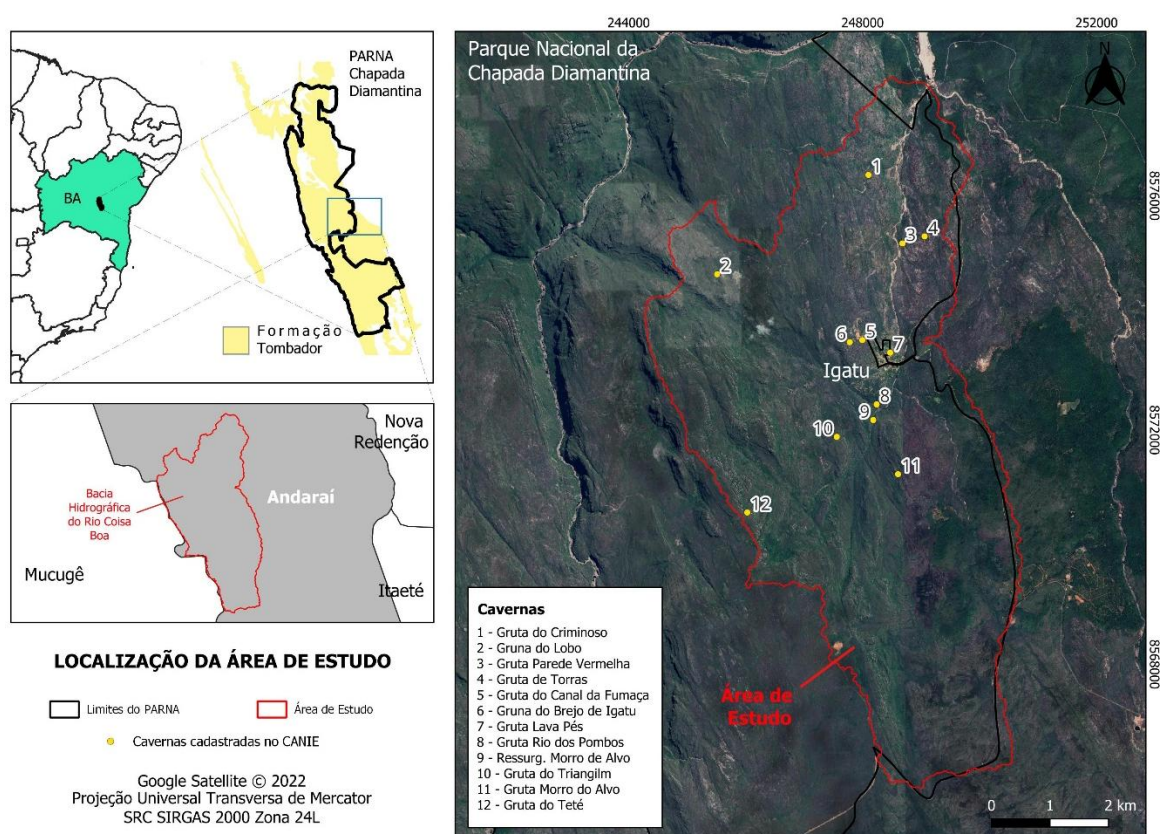
Como objetivos principais, destacam-se a compreensão dos fatores geológicos, bem como dos processos de formação e evolução dos sistemas de cavernas e do relevo cárstico, desenvolvido em rochas siliciclásticas, na Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa, região da Vila de Igatu, município de Andaraí, na Chapada Diamantina – Bahia, Brasil (Fig. 1). Para além disso, previa-se também a avaliação de potenciais de uso para esses sítios, acompanhada de estratégias de manejo e valorização, que garantissem sua conservação efetiva e inseridas dentro do Projeto Geoparque Serra do Sincorá.

Até o início do projeto em questão, eram reconhecidas, através do banco de dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE), nove cavidades na área de estudo, grande parte sem topografia completa e com informações geográficas incorretas. Ao longo do projeto, foram identificados outros três importantes sistemas, totalizando doze cavidades, tendo se avançado consideravelmente com as topografias, para além das correções de coordenadas geográficas incoerentes.

Dentre o universo de doze cavidades reconhecidas, foram selecionados seis sistemas para um estudo mais detalhado, sob a óptica das geociências. Considera-se que, antes do projeto, o conhecimento acerca da geologia e geomorfologia dessas cavidades e do relevo cárstico local era limitado ou, em alguns casos, inexistente. Assim, através de descrições

e registros em campo, cartografia básica, além de caracterizações petrográficas, mineralógicas e químicas obtidas através de análises laboratoriais, o projeto permitiu um avanço expressivo na compreensão dos fatores e processos responsáveis pela formação e evolução das feições cársticas presentes na área de estudo, podendo se apresentar como um importante modelo para o estudo do carste em rochas siliciclásticas em outras regiões no Brasil e no mundo.

Dessa forma, o presente relatório visa descrever as etapas de trabalho e apresentar os principais resultados obtidos ao longo dos três anos de projeto.



**Fig. 1** – Mapa de localização da área de estudo, com destaque para as cavidades registradas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE.

### 1.1. Equipe

**Prof. Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira**  
 COORDENADOR

Geólogo pela USP (1996), Mestre em Geociências (Geoquímica e Geotectônica) pela USP (1998) e Doutor pelo Programa de Patrimônio Geológico e Geoconservação da Universidade do Minho (Braga/Portugal). É Professor Associado do Instituto de

Geociências (IGEO) da Universidade Federal da Bahia, tendo exercido a Chefia do Departamento de Oceanografia entre Outubro/2018 e Março/2022 e a Coordenação do Programa de Pós Graduação em Geologia entre Março/2022 e Janeiro/2024. Com cerca de 15 anos de atuação no mercado de consultoria ambiental, tem ampla experiência na área de Geologia Ambiental. Tem também atuação nas áreas de Geoconservação, Hidrogeologia, Geomorfologia, Geoespeleologia e Educação em Geociências. Coordenou também o projeto “Caracterização e Regionalização dos Terrenos Cársticos, em Rochas Carbonáticas, no Estado da Bahia”, TCCE ICMBIO/Vale II.

**Raphael Parra**  
PESQUISADOR

Geólogo graduado pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Campus Rio Claro (2021) e mestre em Geologia pela Universidade Federal da Bahia, com ênfase em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos. Integrou o Projeto Geoparque Corumbataí, com atuação nas áreas de geoconservação e divulgação científica e foi membro do Espele Grupo Rio Claro, onde trabalhou com exploração e pesquisa de cavernas. Atualmente desenvolve o doutorado na Universidade Federal da Bahia com projeto de pesquisa sobre carste em rochas siliciclásticas e geoconservação na Chapada Diamantina, compondo o Conselho Científico da Associação Geoparque Serra do Sincorá.

**Sophia Alejandra Pontes Bezares**  
PESQUISADORA

Graduada em Geofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), com experiência em fotogrametria e problemas geofísicos inversos, com aplicação em análogos de sistemas petrolíferos e no uso de modelos digitais de afloramento para interpretação estrutural, como no estudo de caso da Gruta Cristal, Chapada Diamantina - Bahia. Domínio de programação na linguagem Python, pacote Office, e experiência prática em trabalhos de campo realizados com o Laboratório de Geofísica e Geologia Marinha (GEMMA), sediado na UFRN, além da atuação em projetos de pesquisa conduzidos no LABSIS (Laboratório de Sismologia). Trabalha com a integração de métodos geofísicos e geológicos nas áreas de hidrogeologia, geoconservação e física do meio ambiente. Atualmente, desenvolve mestrado em Geologia na Universidade Federal da Bahia com o desenvolvimento de modelos de fotogrametria em cavernas.

**Leonardo Fortes Vieira**  
INICIAÇÃO CIENTÍFICA

Possui graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal da Bahia (2018) e em Geologia pela Universidade Federal da Bahia (2025). Atuou em projeto de mapeamento espeleológico e na análise espeleométrica de cavidades siliciclásticas na Chapada Diamantina. Atualmente, é Geólogo de Mina em mineração de Ouro. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geologia Estrutural, Espeleologia, Geologia Econômica e Pesquisa Mineral.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

Dentre as etapas de trabalho que constituíram esse projeto, pode-se citar: pesquisa e levantamento bibliográfico, campanhas de atividade de campo para coleta de dados e amostras, preparação e análises de amostras em laboratório, interpretação dos dados e elaboração de produtos.

O levantamento bibliográfico teve como objetivo embasar o desenvolvimento do projeto com literatura científica sobre geologia e geomorfologia da Chapada Diamantina, sobre cavernas e relevos cársticos desenvolvidos em rochas siliciclásticas, sobre as técnicas e métodos aplicados, bem como sobre a história da Vila de Igatu e região. Entre as publicações, foram encontrados artigos científicos, livros e capítulos, monografias, dissertações e teses, depositadas em repositórios institucionais e universitários, além de coleções acadêmicas como Web of Science, SciELO, Scopus, Scholar Google, entre outras.

As atividades de campo foram desenvolvidas em quatro etapas:

### **1. Reconhecimento e Topografia**

Durante a primeira campanha de campo, desenvolvida entre os dias 16 e 25 de março de 2023, foi necessário realizar um reconhecimento da área de estudo, buscando pelas cavidades já registradas e também aquelas sem cadastro, mas reconhecidas pela comunidade local. Muitas das trilhas que levam às cavidades se encontravam fechadas pela vegetação, indicando pouco uso recente. Um dos fatores que pode ter levado a esse cenário foi a pandemia de Covid-19.

Em alguns casos, foi necessário contar com apoio de guias da comunidade local para localizar as cavidades, o que também enriqueceu as atividades, devido ao grande conhecimento das grutas, da paisagem e das antigas técnicas de garimpo utilizadas por longo tempo na área.

Nessa ocasião, também teve início os trabalhos de mapeamento espeleológico, que contou com a participação de espeleólogos experientes: Leda Zogbi, Renata Andrade e Rodrigo Severo. Dentro da equipe do projeto, estiveram presentes o coordenador Ricardo Fraga, o pesquisador Raphael Parra e o bolsista de iniciação científica Leonador Fortes. Por fim, esteve presente também Oli Miranda, geocientista que contribuiu com o registro áudio-visual da expedição (vide: [https://www.instagram.com/reel/CsD9Q6Tu4tL/?utm\\_source=ig\\_web\\_copy\\_link&igsh=MzRIODBiNWFIZA==](https://www.instagram.com/reel/CsD9Q6Tu4tL/?utm_source=ig_web_copy_link&igsh=MzRIODBiNWFIZA==)).

## 2. Geoespeleologia e Topografia

Na segunda campanha, entre os dias 21 e 28 de agosto de 2023, foi desenvolvida a caracterização geoespeleológica das grutas estudadas e do seu entorno. Realizou-se a descrição de fácies litológicas das rochas encaixantes, mapeamento estrutural (descrito em detalhe no Anexo 4), descrição e registro de morfologias, entre outras. Além disso, também foi realizada a coleta de amostras de rocha e espeleotemas, levados para análises laboratoriais.

Nessa campanha também foi feita a topografia da Gruta do Teté, bem como diversos registros fotográficos do interior das cavidades, parte deles com o auxílio dos espeleólogos Cristina Macedo e Fabio Dal Gallo. Também estiveram presentes os alunos de graduação Fabiano Pereira e Leo Linke, auxiliando na topografia, coletas e descrições, para além do coordenador Ricardo Fraga e do pesquisador Raphael Parra.

## 3. Mapeamento da Gruta do Canal da Fumaça

A terceira campanha contou com uma atividade mais expedita, no dia 17 de agosto de 2024, focada em atender, especificamente, à uma demanda levantada por um membro da banca na defesa de mestrado do pesquisador Raphael Parra, que sugeriu a elaboração de um mapa de modificações antrópicas do interior da Gruta do Canal da Fumaça. Essa cartografia foi realizada sobre a topografia existente à época, tendo sido desenvolvida pelo pesquisador em supracitado, com auxílio de ajudante de campo.

#### 4. Hidroquímica, Microbiologia e Topografia

Por fim, a quarta e última campanha de campo, entre os dias 08 e 16 de setembro de 2025, teve como foco principal a coleta de amostras de água e microrganismos, durante a estação seca. A atividade contou com a participação do Geólogo *M.Sc.* Tom Morita, auxiliando nas descrições e coletas. Além disso, deu-se continuidade aos mapeamentos espeleológicos, com a presença dos espeleólogos Leda Zogbi, Rodrigo Severo, Cristina Macedo e Fábio Dal Gallo. Por fim, a mestranda Sophia Bezares esteve presente para coletar dados de fotogrametria do interior de cavidades para a sua pesquisa de mestrado. O coordenador Ricardo Fraga e o pesquisador Raphael Parra também estiveram presentes, encabeçando as atividades.

Já as etapas de preparação e análises de amostras foram realizadas em diversos laboratórios, sobretudo na Universidade Federal da Bahia (UFBA) e na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), mas também na Universidade Provincial de Kyoto (UPK), no Japão. Amostras de rocha e espeleotema foram analisadas através de microscopia óptica, difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura na UNESP. Já a fluorescência de raios-X foi realizada no laboratório de Catálise e Materiais do Instituto de Química – UFBA. Os procedimentos dessas análises estão descritos em detalhes no Anexo 5.

Por sua vez, amostras de água foram analisadas por ICP-OES e cromatografia iônica que, junto com a extração de DNA das amostras de microbiologia, foram realizadas nos laboratórios do LEPETRO – UFBA. Essas etapas são descritas em detalhe no Anexo 6.

Por fim, todos os dados coletados foram e continuam sendo tratados em *softwares* específicos (ex. QGIS, Stereonet, Qualigraf, CorelDraw, etc.), para elaboração de diagramas e figuras que sintetizem e ilustrem os principais resultados encontrados e compõem os produtos elaborados.

### 3. ATIVIDADES PLANEJADAS X ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Ao início do projeto, foi desenvolvido um “marco lógico”, constituindo as atividades, junto aos resultados esperados e os produtos associados. Durante o desenvolvimento do projeto, algumas modificações foram adicionadas, adequando o mesmo à realidade e aos desafios e oportunidades que surgiram ao longo do período de trabalho (Tabela 1).

**Tabela 1** – Marco Lógico com atividades, resultados e produtos previstos ao início do projeto, com modificações adicionadas durante as alterações do Plano de Trabalho.

RESULTADOS ESPERADOS	ATIVIDADES	PRODUTOS/ENTREGAS	PRAZO	RESPONSÁVEL
<b>Levantamento bibliográfico sistemático</b>	Levantamento de publicações sobre cavernas em rochas siliciclásticas, cavernas nos arenitos da Fm. Tombador e sobre a geologia e geomorfologia local/regional	Dossiê com compilação da literatura	30/11/2022	Leonardo
<b>Cartografia básica da área de estudo, topografia e espeleometria das cavernas areníticas da Fm. Tombador na região de Igatu, Bahia</b>	Criação de banco de dados (SIG)	Banco de dados Sistemas de Informações Geográficas (SIG)	31/12/2022	Leonardo
	Cartografia básica da área de estudo	Acervo de mapas com informações do meio físico da área	31/01/2023	Leonardo
	Delimitação de bacias hidrográficas	Mapa geral e de detalhe das bacias hidrográficas com cavernas	31/01/2023	Raphael
	Capacitação da equipe em topografia espeleológica	Relatório do treinamento em topografia espeleológica	28/02/2023	Leonardo
	Planejamento do campo de topografia e espeleometria	Plano de atividades do campo de topografia e espeleometria	28/02/2023	Raphael
	Campanha de campo de topografia e espeleometria	Relatório de atividades do campo de topografia e espeleometria	30/04/2023	Raphael
	Digitalização dos mapas	Acervo de mapas espeleológicos digitalizados da área	31/04/2023	Leonardo
	Aplicação da análise morfométrica	Relatório de caracterização morfométrica das cavernas	31/06/2023	Leonardo
	Planejamento do campo de geoespeleologia	Plano de atividades do campo de geoespeleologia	31/05/2023	Raphael

<b>Caracterização geoespeleológica das cavernas areníticas da Fm. Tombador na região de Igatu, Bahia</b>	Campanha de campo de geoespeleologia	Relatório de atividades do campo de geoespeleologia	30/07/2023	Raphael
	DRX	Relatório de descrição mineralógica	31/01/2023	Raphael
	Tratamento dos dados estratigráficos e estruturais	Inventário de dados estratigráficos e estruturais	29/02/2024	Raphael
	Microscopia Óptica	Relatório de descrição petrográfica	31/03/2024	Raphael
	FRX	Relatório de descrição química	30/04/2024	Raphael
	Microscopia Eletrônica de Varredura	Relatório de descrição petrográfica de detalhe	31/05/2024	Raphael
	Elaboração do artigo de caracterização geoespeleológica	Artigo a ser publicado em periódico internacional	30/06/2024	Raphael
	Revisão da dissertação e incorporação de sugestões e melhorias propostas pela banca examinadora	Volume final da dissertação de mestrado	31/07/2024	Raphael
<b>Caracterização hidroquímica, sedimentológica e microbiológica das cavernas areníticas da Fm. Tombador na região de Igatu, Bahia</b>	Elaboração de artigo científico sobre a formação e evolução do carste siliciclástico de Igatu com abordagem multidisciplinar	Artigo a ser publicado em periódico internacional	31/12/2026	Raphael
<b>Valoração e Geoconservação das cavernas areníticas da Fm. Tombador na região de Igatu, Bahia</b>	Elaboração de conteúdo informativo sobre uso e gestão do patrimônio espeleológico da área, junto a profissional de comunicação	Cartilha de uso e gestão das cavernas	30/06/2027	Raphael
	Elaboração de material interpretativo e educativo sobre aspectos geológicos e geomorfológicos das cavernas da área, junto a profissional de comunicação	Materiais interpretativos e educativos	31/08/2027	Raphael

Destaca-se que todas as atividades referentes ao levantamento bibliográfico, à cartografia, topografia e espeleometria, e à caracterização geoespeleológica foram desenvolvidas com êxito, conforme havia sido previsto desde o início.

Já a caracterização hidroquímica, microbiológica e sedimentológica foram incluídas como objeto de investigação do doutorado do pesquisador Raphael Parra, que se iniciou no mês de setembro de 2024. Dessa maneira, as atividades foram parcialmente desenvolvidas, tendo sido realizada a primeira campanha de campo na estação seca, com coleta de amostras, cujas análises de água já estão disponíveis, e análises microbiológicas - ainda em andamento, ambas descritas no Anexo 6. Um segundo campo de coleta, relativa à estação chuvosa, está sendo planejado para o início de 2026, com novas análises de água e sedimentos previstas. Destaca-se que todas as análises já foram custeadas, junto aos laboratórios, com os recursos desse subprojeto. Por fim, os dados gerados ainda serão interpretados e deverão compor um artigo científica a ser elaborado até o mês de dezembro de 2026 e publicado em revista de alto impacto, tal qual a *Geomorphology Journal - Elsevier*.

Por fim, o desenvolvimento das etapas de geoconservação demandam, preferencialmente, que os dados de levantamentos básicos (cartografia, geoespeleologia, hidroquímica, etc.) estejam processados e disponíveis. É importante salientar que, cada avanço no conhecimento a respeito do patrimônio espeleológico agrega valor aos sítios locais, contribuindo com mais informações para o inventário e aos materiais produzidos.

Dessa forma, apesar de avanços pontuais na geoconservação, com apresentações para a comunidade da vila de Igatu – realizada em agosto de 2023, postagens em redes sociais e o desenvolvimento de material de divulgação científica para a Gruta do Canal da Fumaça (Anexo 7), que será disponibilizado para a comunidade local, optou-se por postergar atividades mais sistemáticas, de maneira que os produtos finais tenham a melhor qualidade possível.

#### **4. RESULTADOS PLANEJADOS X RESULTADOS ALCANÇADOS**

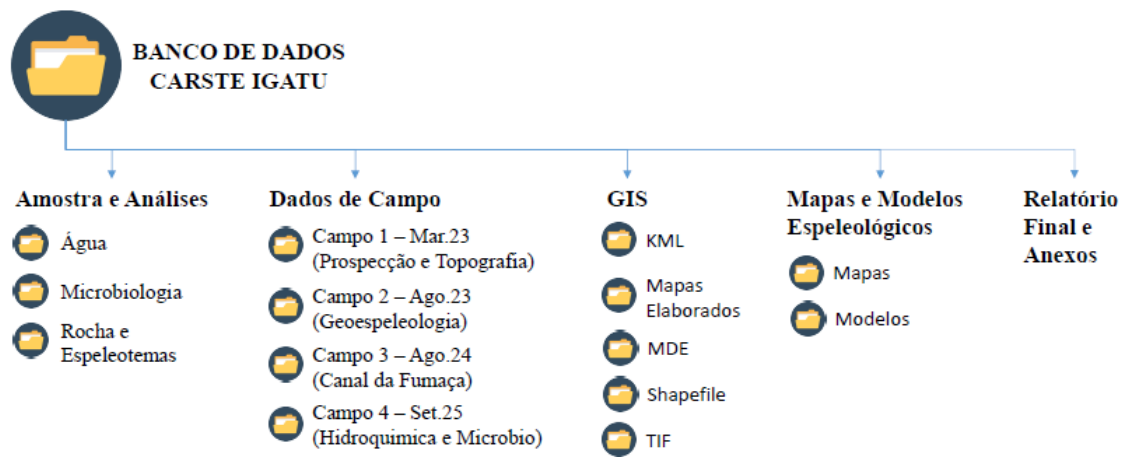
Os resultados alcançados nesse projeto acompanharam as atividades desenvolvidas, conforme descrito no Marco Lógico da Tabela 1. Destaca-se que todos os produtos previstos referentes às atividades de 1. Levantamento Bibliográfico, 2. Cartografia e

Topografia Espeleológica, e 3. Geoespeleologia foram entregues.

O levantamento bibliográfico reuniu cerca de 300 publicações, tais como artigos científicos, livros e capítulos de livros, teses, dissertações e monografias, dados de órgãos públicos nacionais, entre outros. Esses materiais estão agrupados na pasta “Referências Bibliográficas” que será disponibilizada junto ao banco de dados desse subprojeto.

Já a cartografia básica da área de estudo, desenvolvida através de *software* específico de geoprocessamento, tal como QGIS, gerou uma série de mapas que auxiliaram os trabalhos de campo e compõem também os produtos gerados, contribuindo na espacialização dos dados levantados.

Os principais mapas gerados foram agrupados e apresentados no Anexo 1 desse relatório. Ademais, toda a cartografia produzida está sendo disponibilizada dentro do banco de dados desse subprojeto, na pasta GIS > Mapas Elaborados > Cartografia. Para além dos mapas prontos, todo o banco de dados de geoprocessamento, abrangendo shapefiles, raster, kml e outros formatos, está sendo disponibilizado através da pasta GIS, sendo organizado por tipo de arquivo (shp, kml, tiff, etc.), conforme organograma da Fig. 2.



**Fig. 2** – Organograma do Banco de Dados do subprojeto, disponibilizado em nuvem por meio da plataforma virtual Google Drive, com acesso através do link: <https://drive.google.com/drive/folders/1zc6ospB6O0XCMgHEd58o23rVcHlPIQt9?usp=sharing>

Já a cartografia espeleológica está sendo apresentada em formato de mapas, disponibilizados no Anexo 2, para as cavidades topografadas no âmbito desse subprojeto, sendo elas: Gruta da Parede Vermelha, Gruta do Canal da Fumaça, Gruta do Trianglim, Gruta do Teté. Estão sendo disponibilizados também os arquivos em pdf, dentro do banco

de dados, junto aos modelos conceituais para cada cavidade estudada, seguindo a pasta Mapas e Modelos Espeleológicos > Mapas. Além disso, foram elaborados modelos conceituais para cada sistema estudada, sendo disponibilizado na pasta Mapas e Modelos Espeleológicos > Modelos

Ao longo do projeto, foram realizados diversos registros fotográficos e de vídeo, através de câmeras manuais, celulares e drones. Esses registros estão sendo disponibilizados, na íntegra, através do banco de dados, sendo organizados em pastas referentes às campanhas de campo em que foram capturados (ex. Dados de Campo > Campo 4 – Set.25 (Hidroquímica e Microbio) > Fotos\_Igatu\_Set.25). Dentro dessa última pasta, as fotografias estão organizadas de acordo com os autores. Além disso, parte desses registros foram selecionadas e agrupadas no Anexo 3, onde constam com legendas de algumas dessas imagens do acervo. Dados de GPS, como tracks e pontos registrados também estão incluídos nas pastas de cada campo (ex. Dados de Campo > Campo 2 – Ago.23 (Geoespeleologia) > GPS\_Igatu\_Ago.23. Esses estão organizados de acordo com o responsável pelo GPS de registro.

Com relação aos resultados da Geoespeleologia, estes estão divididos em dois anexos: o Anexo 4, que trata dos resultados do mapeamento estrutural da área e das cavidades estudadas, enquanto o Anexo 5 reúne os dados de petrografia, obtidos através de análises de microscopia óptica e eletrônica de varredura (MEV), fluorescência e difração de raios-X (FRX e DRX), aplicadas em amostras de rocha e espeleotemas. O banco de dados de amostras de rocha e espeleotemas coletadas e análises realizadas está disponibilizado na pasta Amostra e Análises > Rocha e Espeleotemas, organizados por método de análise.

Por sua vez, os resultados referentes às atividades de 4. Hidroquímica e Microbiologia e 5. Valoração e Geoconservação foram parcialmente alcançados, até o presente momento, conforme explicado no capítulo anterior. Destaca-se que essas atividades ainda estão em fase de execução, dentro do projeto de doutorado do pesquisador Raphael Parra.

Dentro da hidroquímica, já estão disponíveis as análises da primeira coleta, em estação seca, sendo disponibilizados em Amostras e Análises > Água. Já para a microbiologia, os resultados referentes ao sequenciamento genético ainda estão sendo produzidos, sendo parcialmente apresentados na pasta Amostras e Análises > Microbiologia. Todos os resultados prontos, para os dois temas, estão sendo apresentados no Anexo 6.

Com relação às atividades de geoconservação, avançou-se na colaboração com agentes locais para o estabelecimento de um projeto de valorização da Gruta do Canal da Fumaça, um dos principais garimpos da Vila de Igatu, com um importante arcabouço do patrimônio mineiro. Para tal, foi desenvolvido um painel de divulgação científica (Anexo 7), reunindo as informações contidas no artigo que foi gerado ao longo da execução do projeto e publicado no *International Journal of Speleology*.

## **5. RESULTADOS DERIVADOS**

Como resultados derivados, pode-se citar a formação de recursos humanos no âmbito universitário, tanto no nível de graduação como pós-graduação, com a atuação de um bolsista de iniciação científica, dois bolsistas de mestrado, um dos quais acabou dando origem a um projeto de doutorado, que se encontra em curso no Programa de Pós-graduação em Geologia, na Universidade Federal da Bahia – PPGGeo/UFBA. Para além dos bolsistas, o projeto oportunizou a participação em trabalhos de campo para alunos de graduação e mestrado. Considera-se, também, como pontos fortes, a colaboração com diversos laboratórios e universidades, tais como os laboratórios do Instituto de Química (UFBA), os laboratórios do Departamento de Geologia da UNESP e da USP. Por fim, destaca-se também uma colaboração internacional, que está sendo construída com a Universidade de Pádova, na Itália, através do Prof. Francesco Sauro, com o qual se instaurou uma parceria para atividades de campo e a possível realização de doutorado sanduíche do pesquisador Raphael Parra, na instituição italiana, que deverá ocorrer no ano de 2026.

Também pode se considerar como resultado derivado, a comunicação e sensibilização da comunidade local de Igatu para com o patrimônio espeleológico. De certo que muitos dos moradores, sobretudo os mais antigos, já conheciam diversas cavidades, muitas delas utilizadas como minas de diamantes (as “grunas”). Entretanto, esse conhecimento vem se perdendo entre os jovens. Assim, as ações desse projeto foram importantes para trazer à luz novamente esse tema, mobilizando a comunidade local nas saídas de campo e em momentos específicos. Reitera-se, por exemplo, a realização de um encontro, no centro da Vila de Igatu, aberto para a comunidade local, no dia 25 de agosto de 2023, onde foram expostos mapas e fotografias referentes às cavidades. Essa atividade também foi realizada com alunos da rede pública na Escola Estadual de Andaraí, no mesmo dia.

## 6. PRODUTOS

A grande parte dos resultados alcançados foi entregue no formato de relatórios, referentes à cada uma das atividades previstas, conforme estabelecido no marco lógico. Destaca-se que muitos desses produtos não estiveram amarrados a bolsas previstas no subprojeto, mas foram entregues como forma de acompanhamento do avanço das atividades realizadas, bem como de organização e sistematização dos dados levantados.

Todos os produtos previstos referentes às atividades de 1. Levantamento Bibliográfico, 2. Cartografia e Topografia Espeleológica, e 3. Geoespeleologia foram entregues.

Além dos mapas, fotografias, análises e relatórios, destaca-se também um artigo científico publicado no *International Journal of Speleology*, no ano de 2025, versando a respeito dos processos de formação da Gruta do Canal da Fumaça, bem como das modificações antrópicas que essa sofreu durante o período de exploração de diamante (Anexo 8). O periódico é o principal veículo de comunicação em ciências espeleológicas no mundo, com fator de impacto de 1.3 no ano de 2024, de acordo com o *Journal Citation Reports* (JCR). O artigo conta, até o fechamento desse relatório, com 337 *downloads* em diversos países no mundo, o que representa um alcance relevante.

Além disso, destacam-se as apresentações do projeto em eventos científicos, tais como o 37º Congresso Brasileiro de Espeleologia, o 19º Congresso Internacional / 38º Congresso Brasileiro de Espeleologia, bem como o 29º Simpósio de Geologia do Nordeste, onde foram apresentados os avanços e principais resultados encontrados. Os resumos publicados nos Anais dos eventos se encontram nos Anexos 9, 10 e 11, respectivamente.

Com relação aos produtos referentes a caracterização hidroquímicas e microbiológica, bem como da geoconservação, destaca-se: conforme solicitado em formulário de alteração do plano de trabalho datado do dia 25 de novembro de 2024 – encaminhado por e-mail no dia 02 de dezembro de 2024 e cuja aprovação pelo Comitê Gestor foi comunicada por e-mail no dia 17 de dezembro de 2024 – tanto o artigo científico supracitado, quanto os materiais de valoração e geoconservação serão entregues posteriormente à conclusão do prazo desse subprojeto, contudo, dentro do prazo de vigência do TCCE ICMBio/Vale III, válido até setembro de 2027. Os prazos de entrega estão listados na Tabela 1.

## **7. PRINCIPAIS DESAFIOS ENCONTRADOS**

Um dos grandes desafios encontrados foi o volume de dados gerados. Antes da execução desse projeto, praticamente não haviam publicados trabalhos sobre os aspectos abióticos do patrimônio espeleológico e cárstico na área de estudo. Dessa forma, a pesquisa foi conduzida desde os quesitos mais básicos (topografia, descrições morfológicas, registros fotográficos, etc.) até os avançados e mais específicos (petrografia, análises hidroquímicas e microbiológicas, etc.). Assim, a quantidade de informação produzida foi ampla, colocando-se como um desafio nas etapas de discussão, interpretação e sistematização para publicar em forma de artigos, relatórios e outros produtos.

Além disso, destaca-se também como um desafio o atraso para a liberação dos recursos no início do projeto, fato que dessincronizou os prazos do curso de mestrado do pesquisador Raphael Parra, com o andamento do projeto, por um prazo de 10 meses. Considerando que o projeto de mestrado estava previsto para ser realizado em 24 meses, esse atraso comprometeu severamente o cronograma do projeto de mestrado junto ao Programa de Pós-Graduação em Geologia - PPGGeo/UFBa.

Por outro lado, mediante esse cenário, vislumbrou-se uma boa oportunidade de o pesquisador defender o mestrado com parte dos dados gerados e, com a parte restante, desenvolver também uma pesquisa de doutorado, dando continuidade ao trabalho que vinha sendo realizado e agregando novas abordagens científicas ao projeto, o que vem sendo feito desde setembro de 2024, e deverá se estender até o mês de agosto de 2028, o que resultará na entrega de alguns dos produtos previstos no projeto ao longo desse período.

Com relação aos desafios encontrados em campo, pode-se citar a dificuldade em localizar algumas das cavidades estudadas, ora por não estarem registradas nos bancos oficiais, ora pelo cadastro com coordenadas incorretas. Em alguns casos, foi necessário o auxílio de moradores locais, experientes no terreno e conhecedores das cavidades em questão. Essa também foi uma oportunidade interessante de trocas de conhecimento científico e popular, a respeito das cavidades e dos depósitos diamantíferos e técnicas de garimpo.

## **8. CONCLUSÃO**

Entende-se que, considerando os objetivos propostos e os resultados alcançados, o subprojeto “Goespeleologia do Carste Siliciclástico da Formação Tombador: Subsídios

à Conservação do Patrimônio Espeleológico na Chapada Diamantina” obteve êxito e contribuiu para avanços relevantes no estudo dos terrenos cársticos em rochas siliciclásticas.

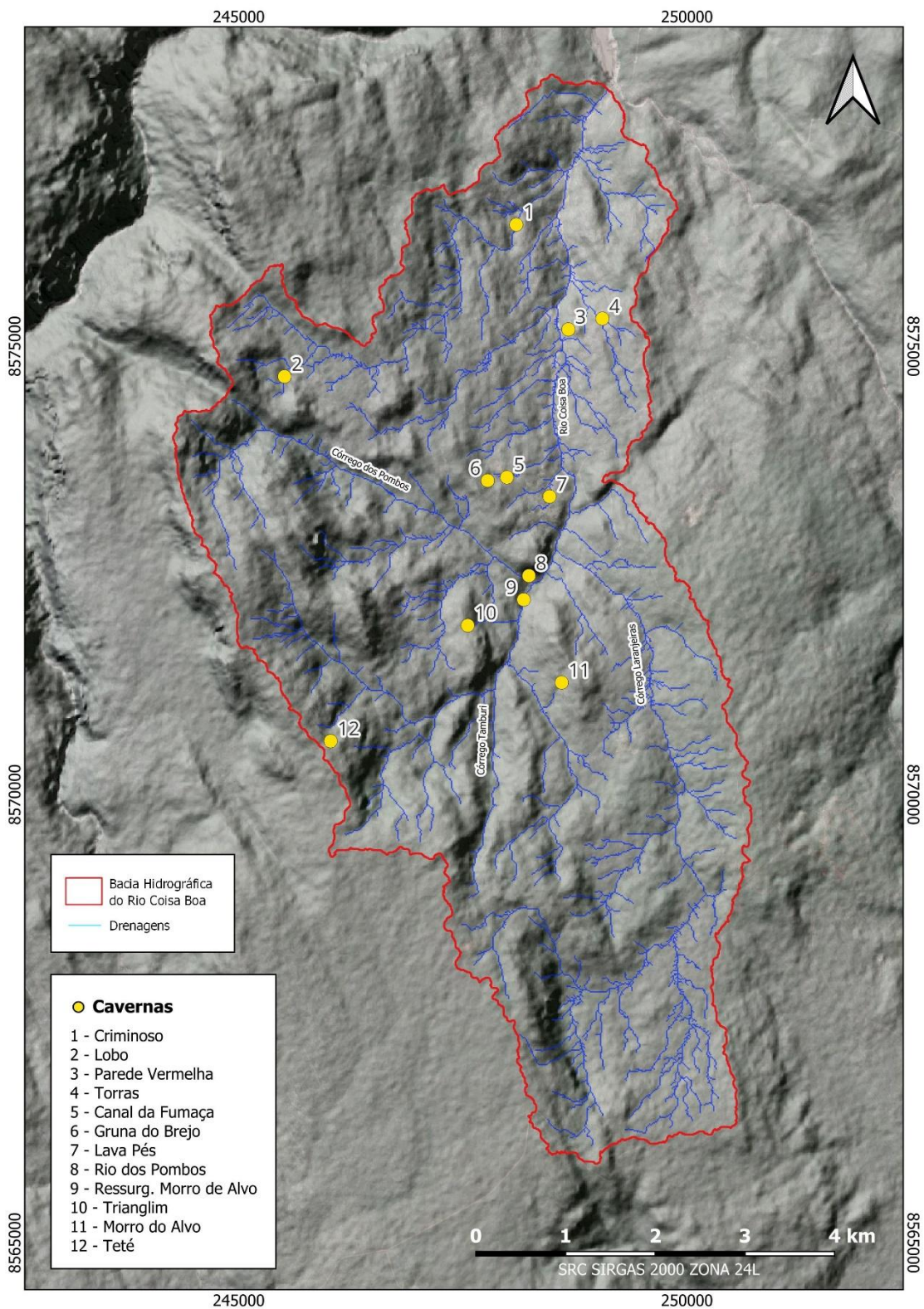
O projeto se destaca como o primeiro trabalho sistemático de pesquisa sobre os aspectos geológicos e geomorfológicos das cavernas e do relevo cárstico na região da Vila de Igatu e, até mesmo, para a Chapada Diamantina, em termos de rochas siliciclásticas. Esse patrimônio, singular e extremamente rico, acaba sendo negligenciado, por diversas vezes, em detrimento das grandes províncias calcárias que o circundam. Esse projeto encerra por revelar essas riquezas, dentro de uma pesquisa que vai desde o nível mais básico de prospecção espeleológica e levantamento topográfico, até a valorização e conservação desses sistemas cársticos não convencionais.

Destaca-se que, com o grande volume de dados produzidos, em campo, laboratório e escritório, mesmo depois de concluído, o projeto continuará a gerar produtos relevantes, a exemplo de projetos anteriores. Espera-se, ainda, a publicação de artigos científicos, cartilhas e materiais interpretativos, que serão trabalhados dentro de projeto de mestrado e doutorado - atualmente - em curso no PPGGeo/UFBA.

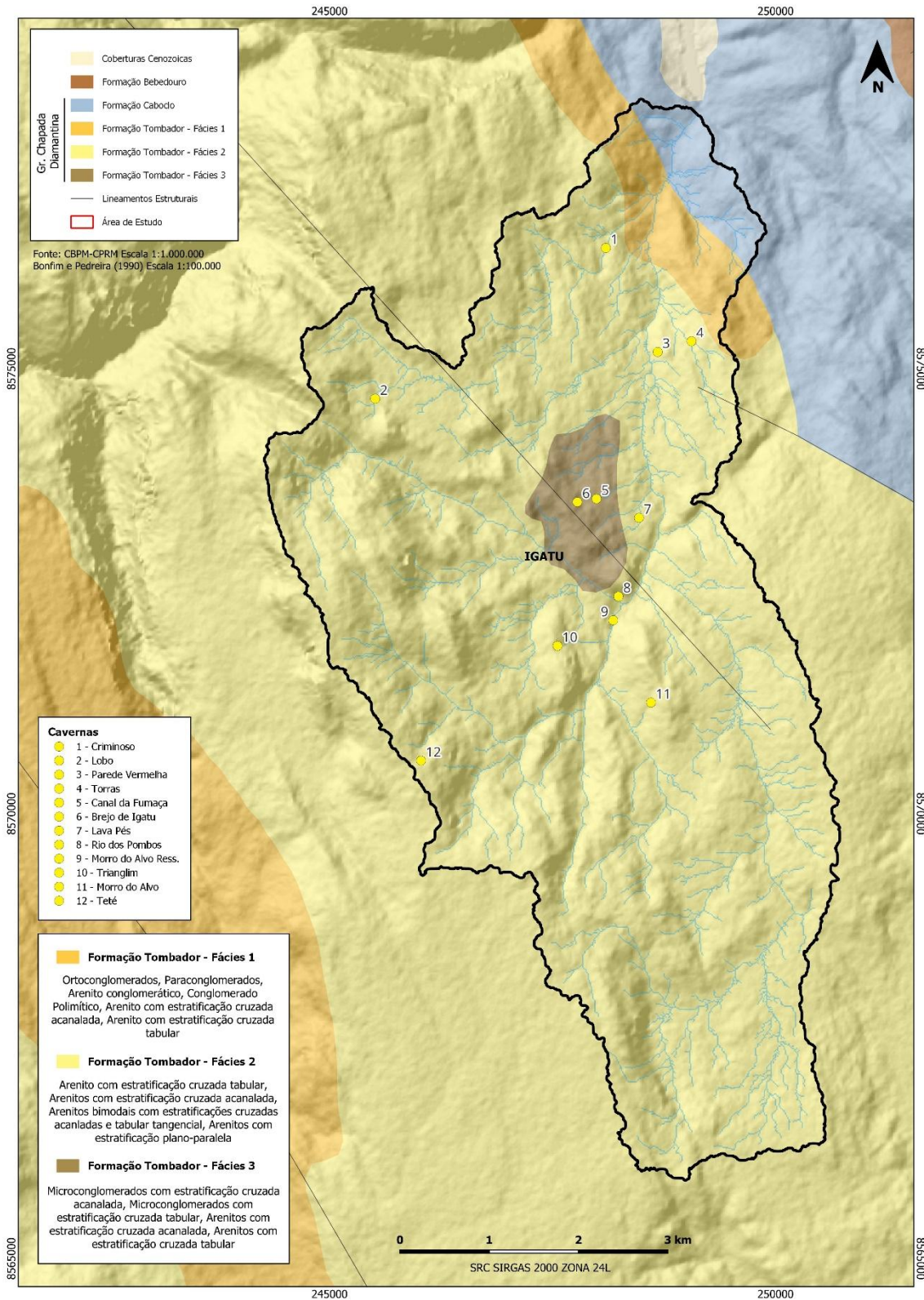
## **9. ANEXOS**

**ANEXO I**

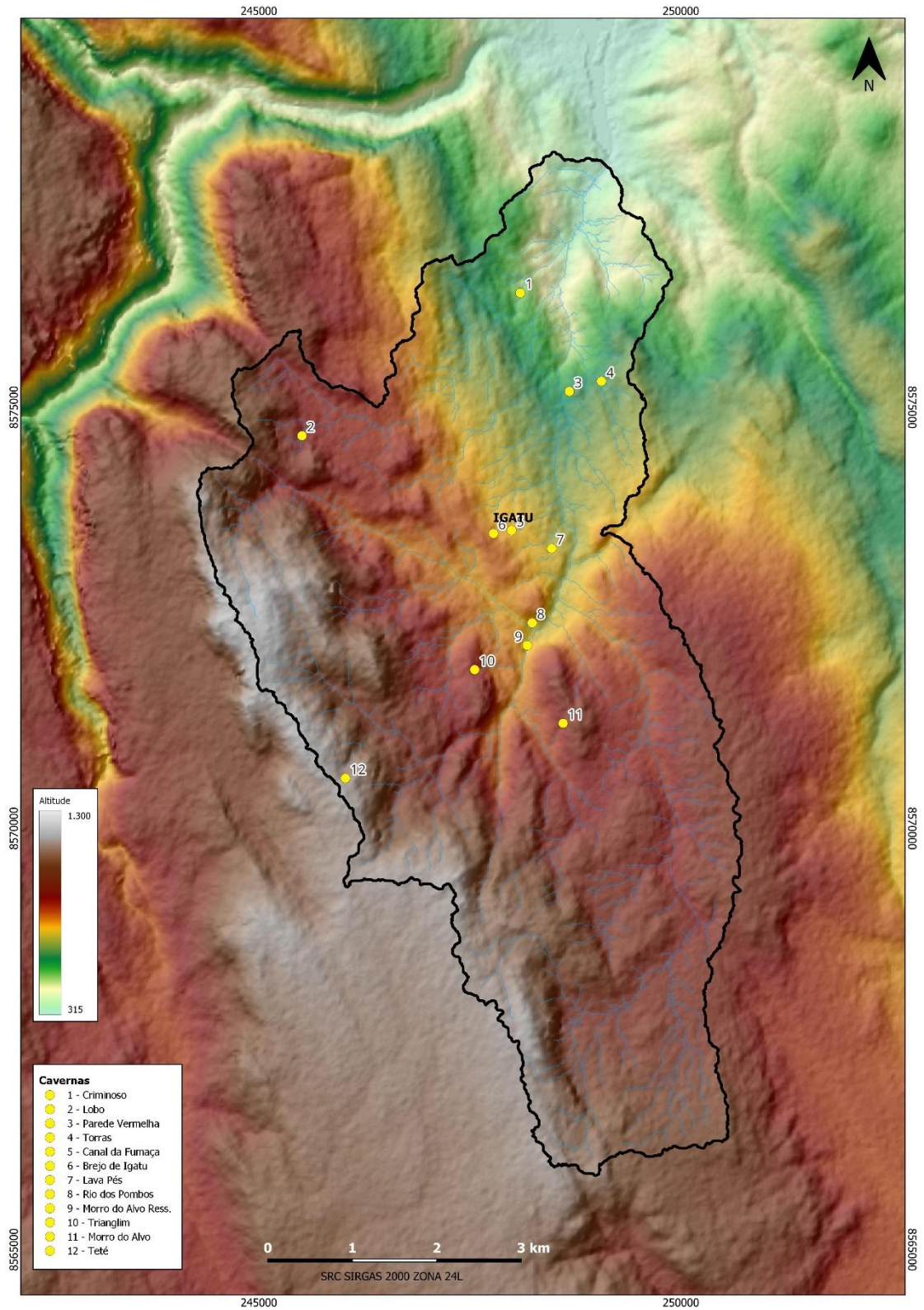
**CARTOGRAFIA**



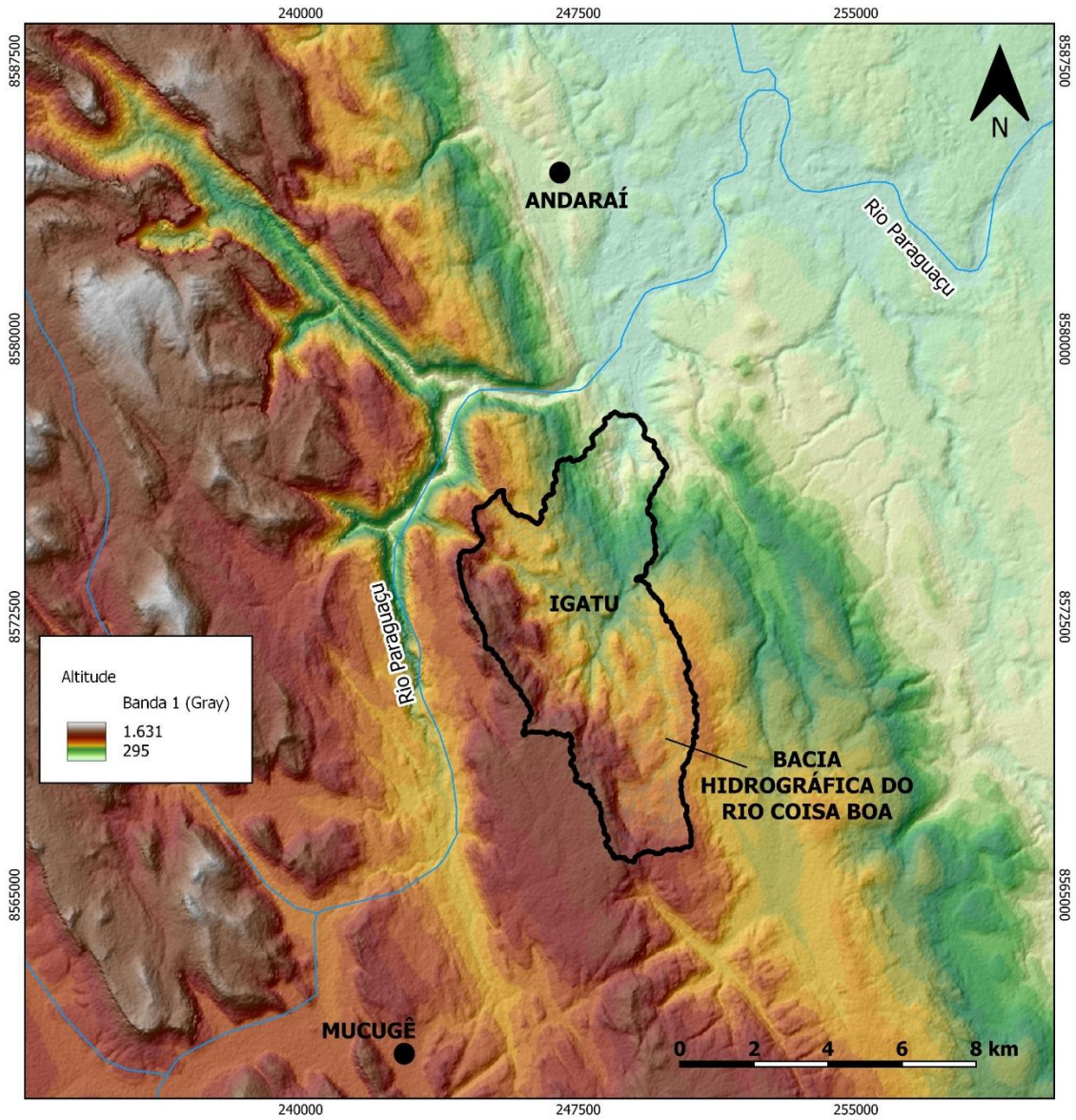
**Fig. 1** – Mapa hidrográfico da Bacia do Rio Coisa Boa, com destaque para as principais redes de drenagem e as cavidades registradas na área.



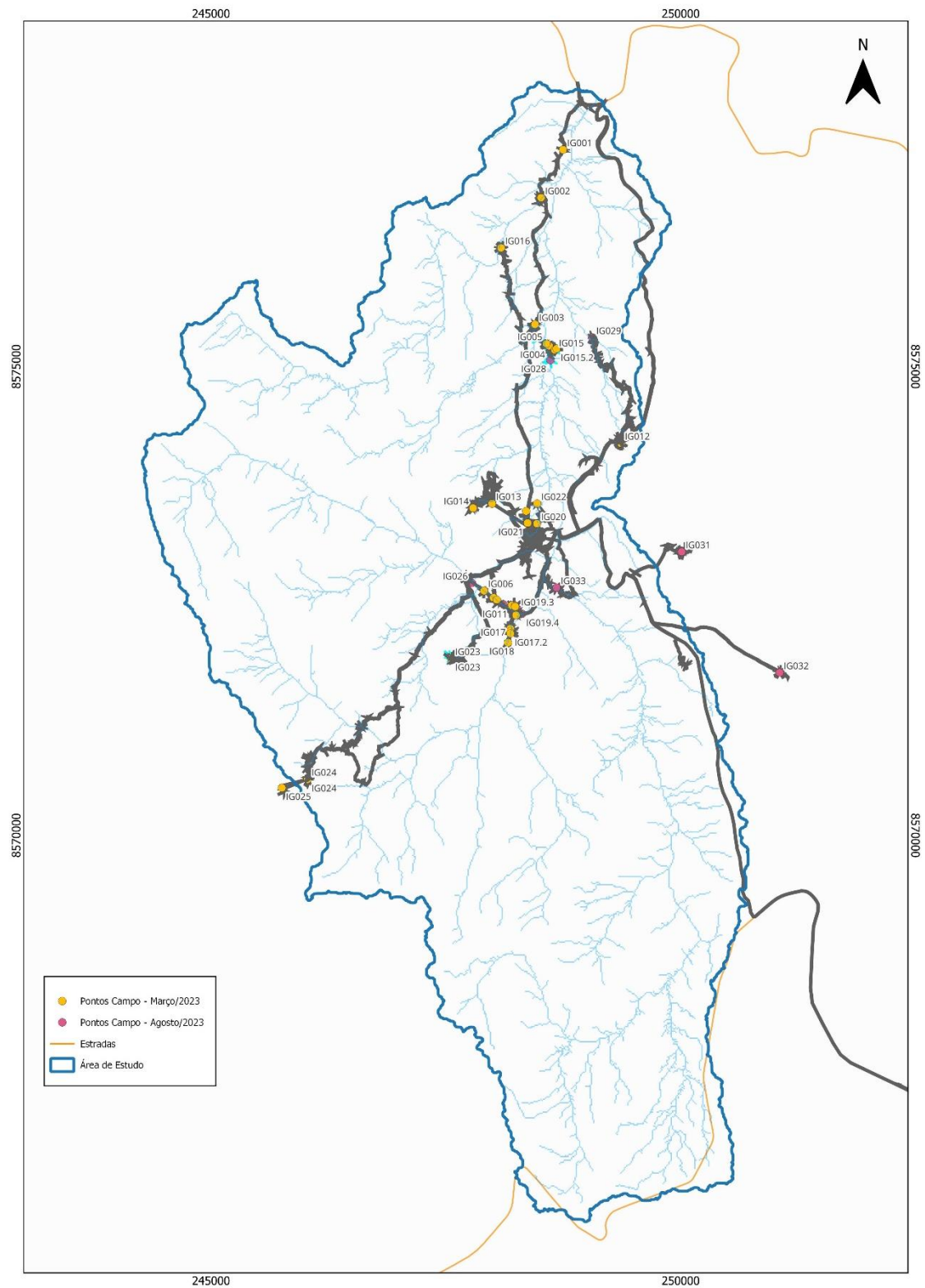
**Fig. 2** – Mapa geológico da Bacia do Rio Coisa Boa, com destaque para os principais litotipos identificados e as cavidades registradas na área.



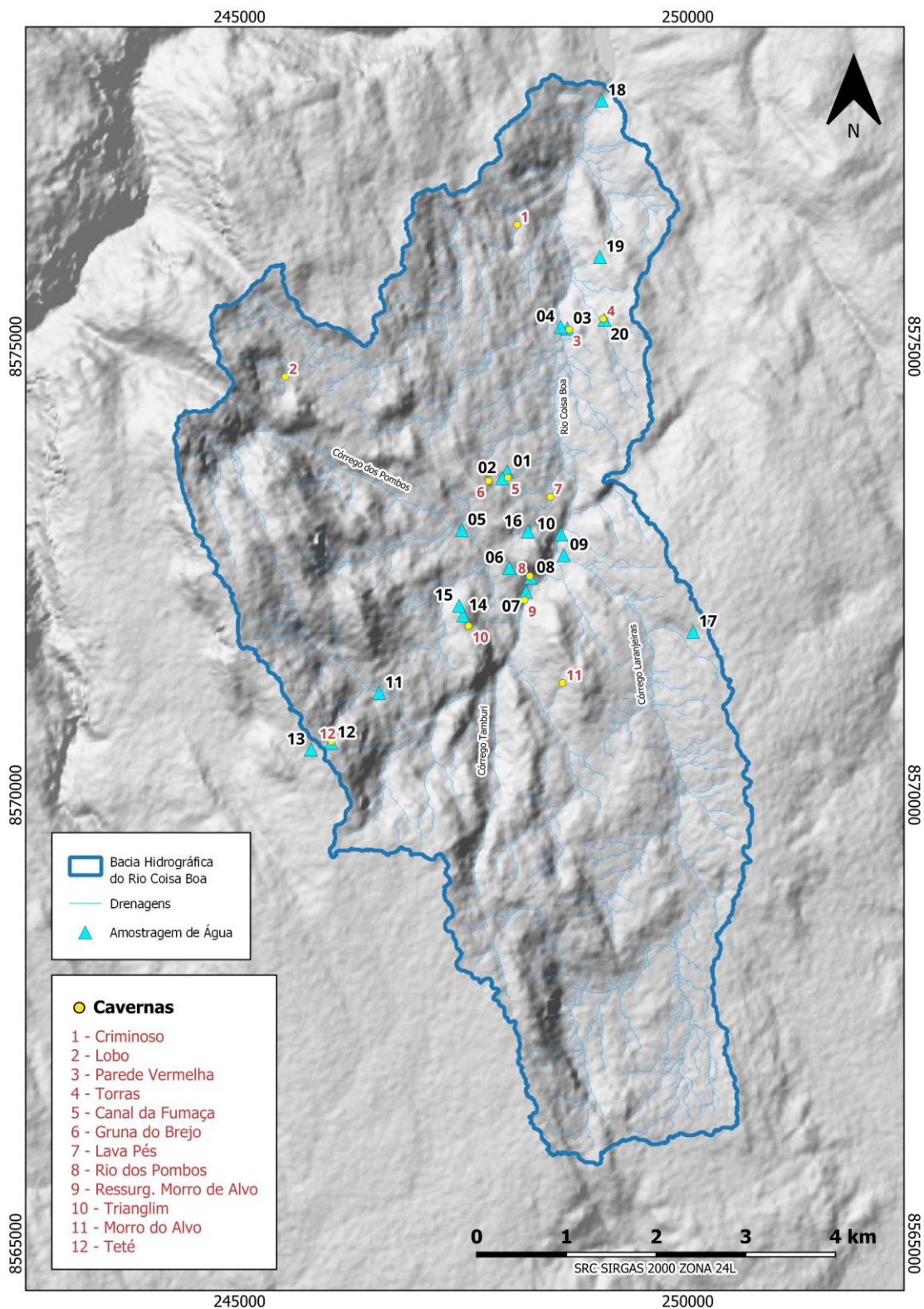
**Fig. 3** – Mapa hipsométrico da Bacia do Rio Coisa Boa, com destaque para a declividade e as cavidades registradas na área.



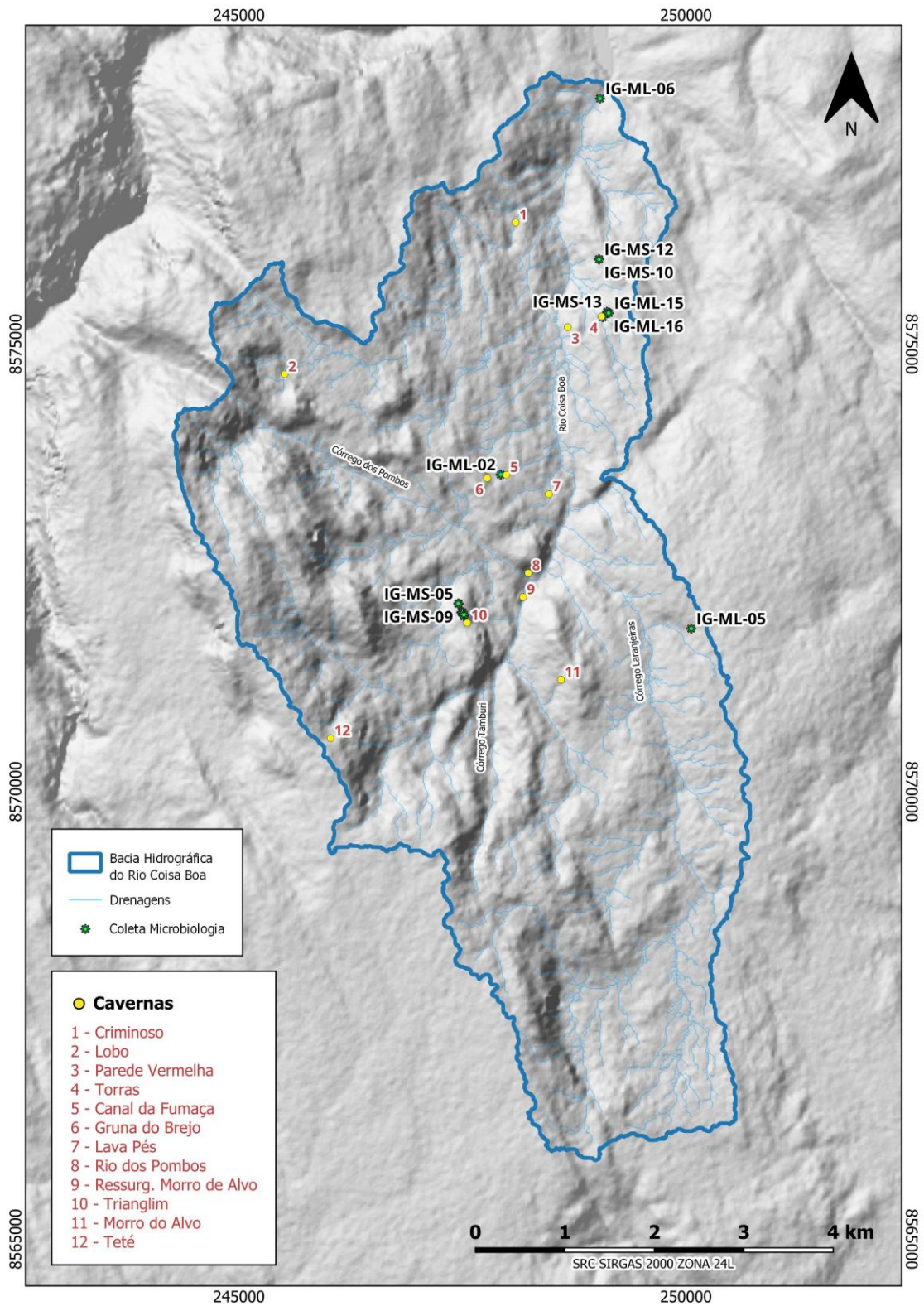
**Fig. 4** – Mapa hipsométrico regional, destacando os relevos acentuados da Serra do Sincorá em contraste com as planícies da Bacia do Una-Utinga.



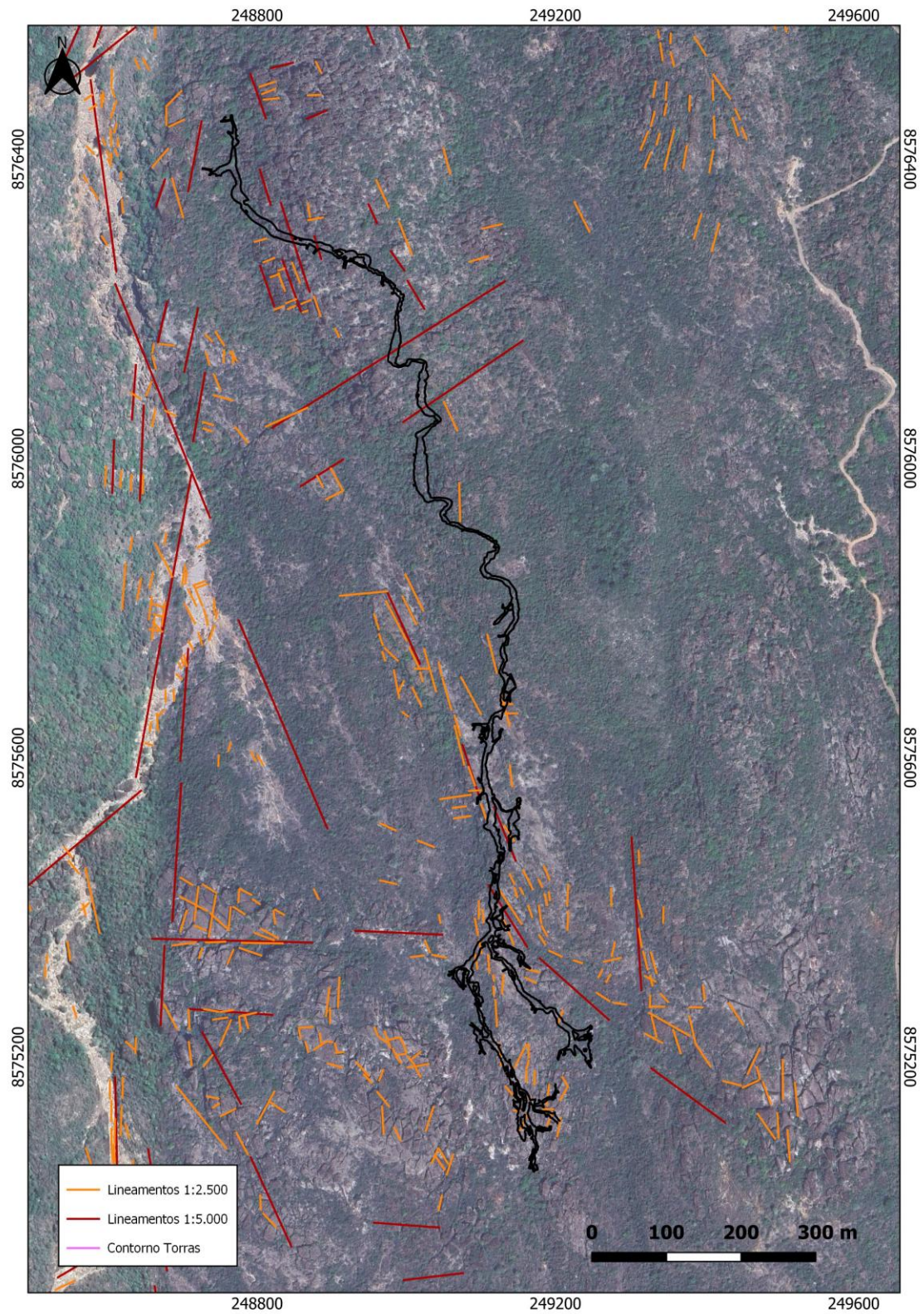
**Fig. 5** – Mapa de caminhamentos e pontos registrados ao longo das quatro campanhas de de campo do projeto.



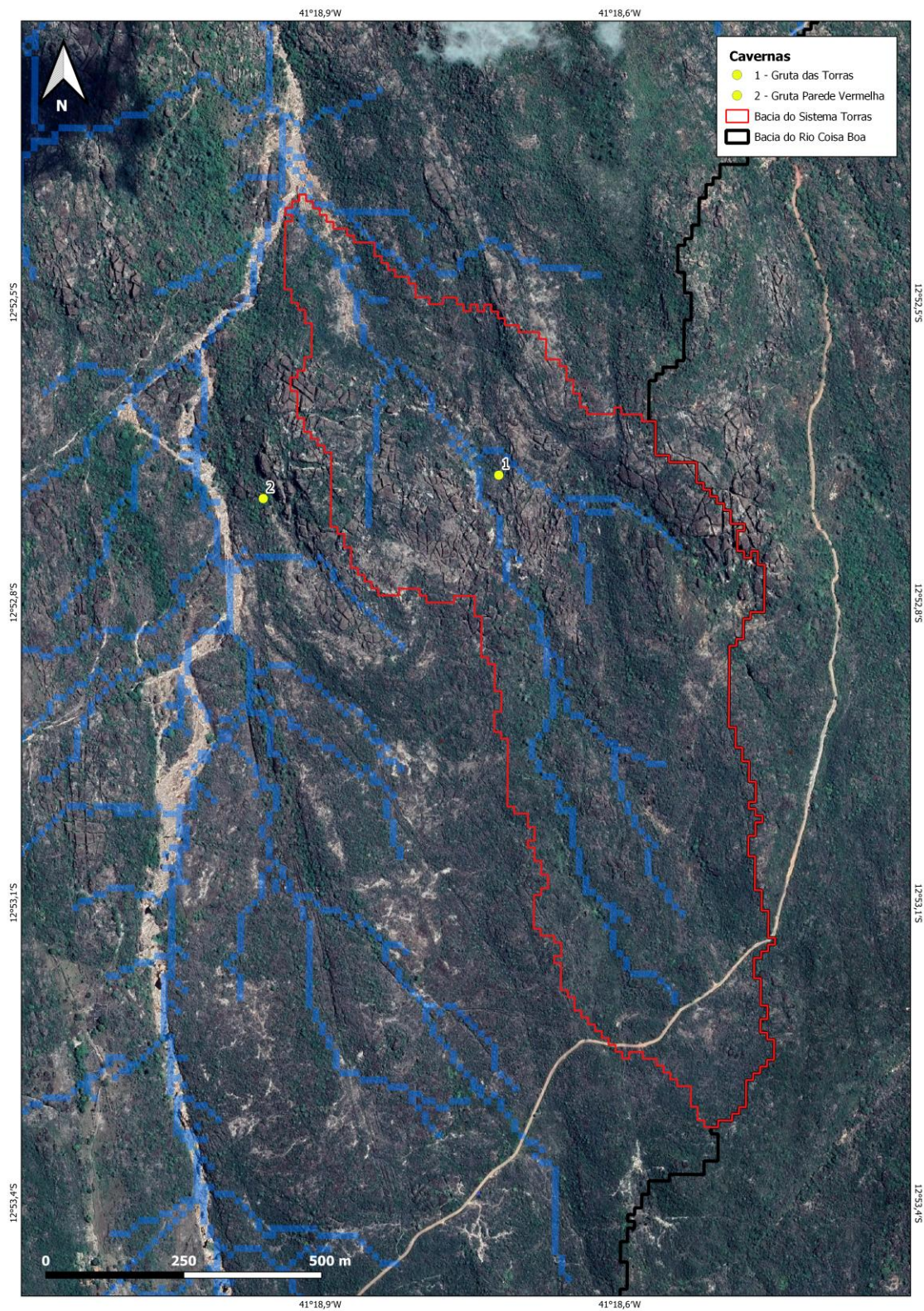
**Fig. 6** – Mapa de localização dos pontos de coleta de amostras de água para medição de parâmetros in-situ e análises laboratoriais.



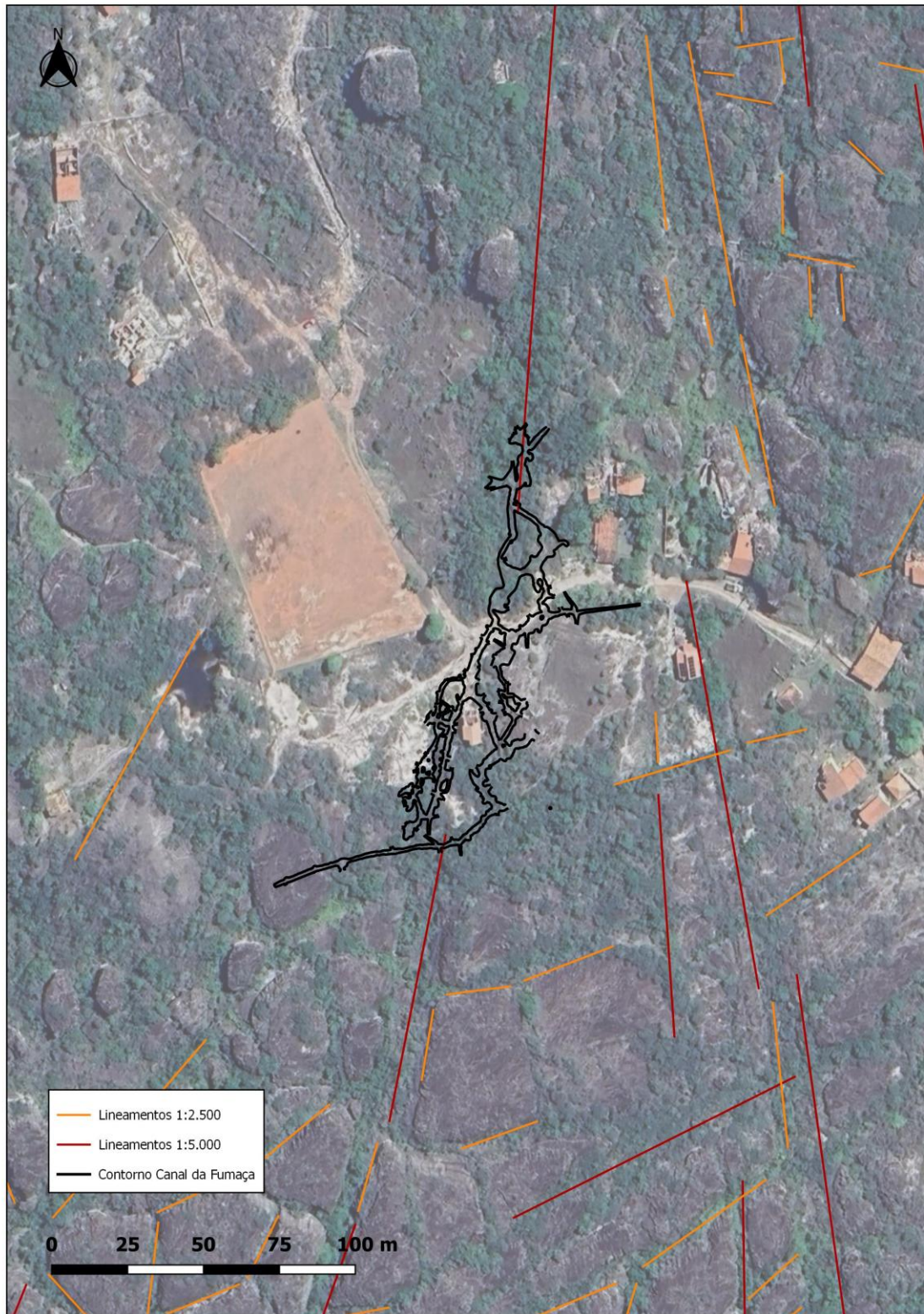
**Fig. 7** – Mapa de localização dos pontos de coleta de amostras de microbiologia para extração e sequenciamento genético.



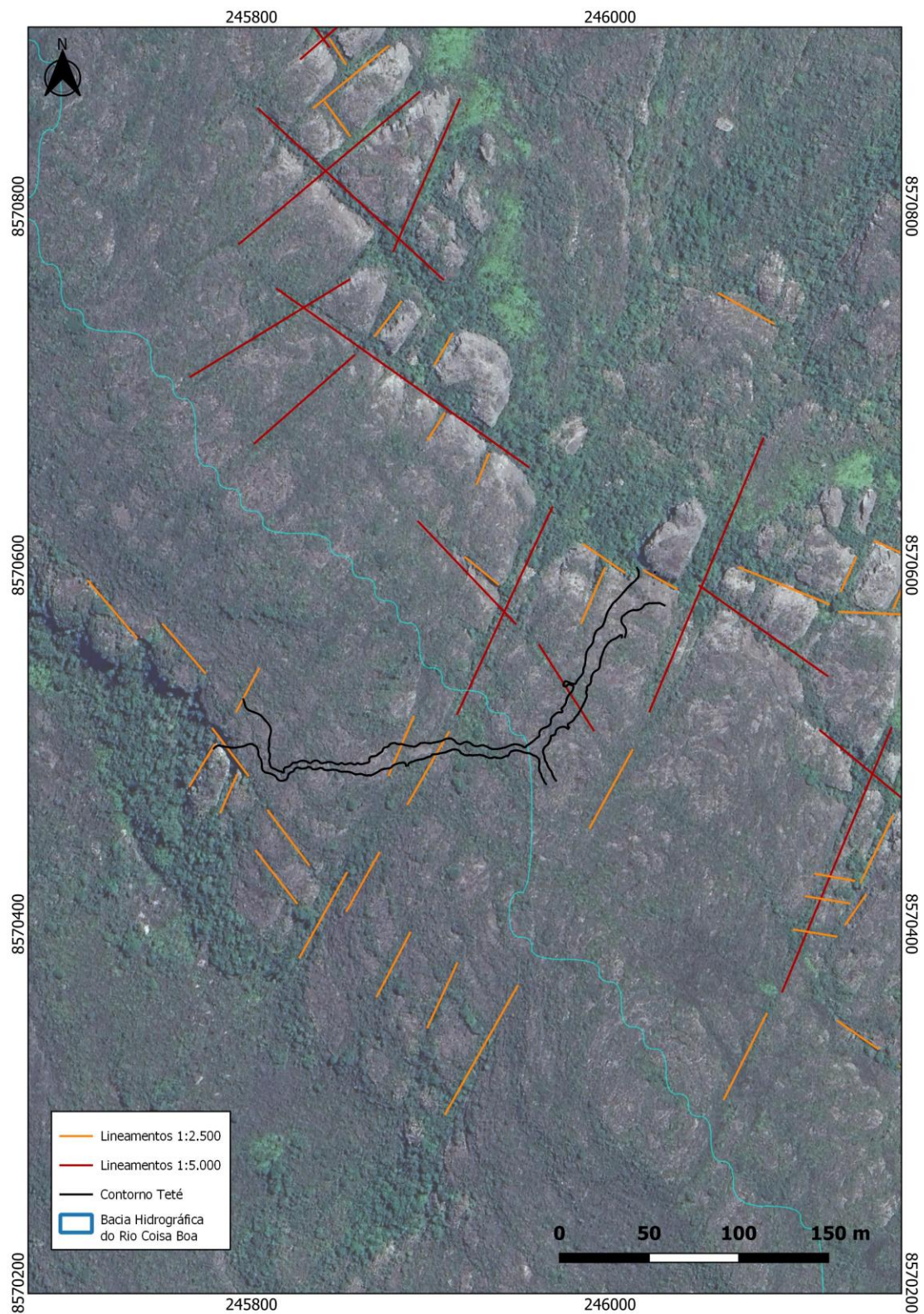
**Fig. 8** – Imagem de satélite com o contorno da Gruta de Torras, destacando os principais lineamentos estruturais do entorno da cavidade.



**Fig. 9** – Imagem de satélite com a bacia hidrográfica na qual se insere a Gruta de Torras, extraída por meio de ferramentas de geoprocessamento.



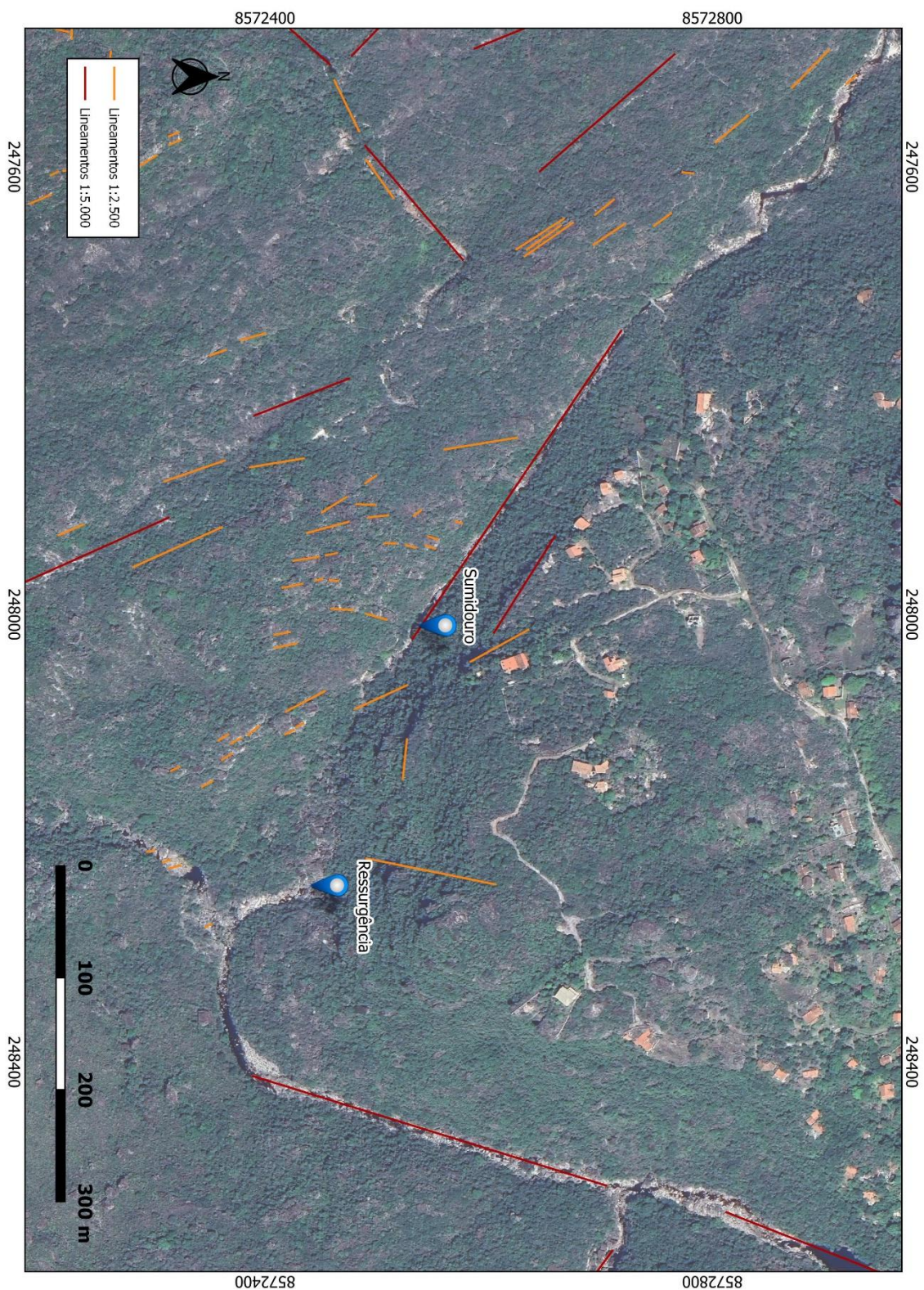
**Fig. 10** – Imagem de satélite com o contorno da Gruta do Canal da Fumaça, destacando os principais lineamentos estruturais do entorno da cavidade.



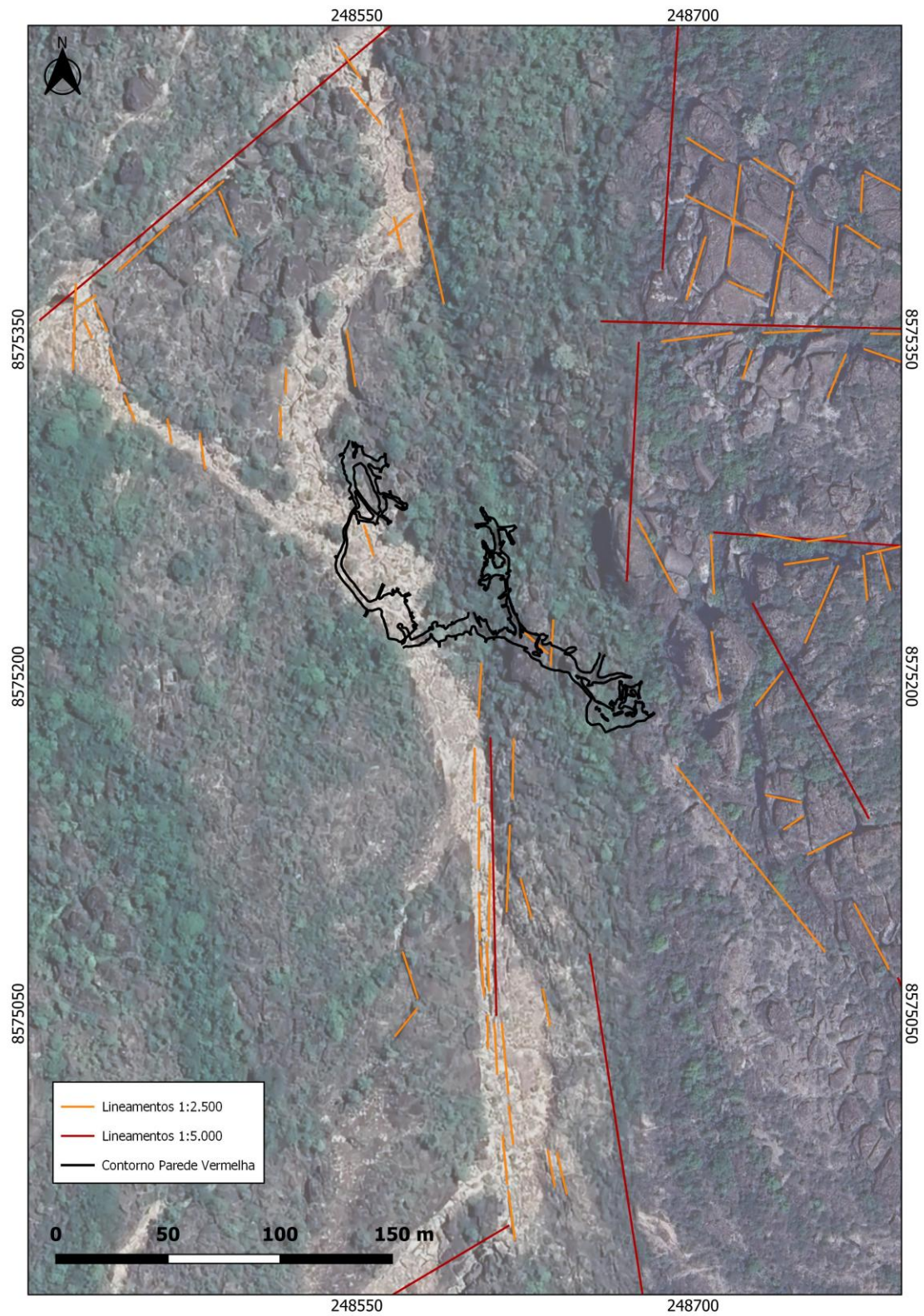
**Fig. 11** – Imagem de satélite com o contorno da Gruta do Teté, destacando os principais lineamentos estruturais do entorno da cavidade.



**Fig. 12** – Imagem de satélite com o contorno da Gruta do Trianglim, destacando os principais lineamentos estruturais do entorno da cavidade.



**Fig. 13** – Imagem de satélite com os pontos de sumidouro e ressurgência do Sistema Rio dos Pombos, destacando os principais lineamentos estruturais do entorno.



**Fig. 14** – Imagem de satélite com o contorno da Gruta da Parede Vermelha, destacando os principais lineamentos estruturais do entorno da cavidade.

**ANEXO 2**

**TOPOGRAFIA**

**ESPELEOLÓGICA**

## **INTRODUÇÃO**

O mapeamento de cavidades consiste em um alicerce para todos os tipos de estudo e pesquisa espeleológica que se almeje desenvolver, seja com relação aos aspectos da geodiversidade, da biodiversidade, paleontologia, arqueologia ou outros. No caso dos estudos do meio abiótico (ex. geologia e geomorfologia), é possível localizar no mapa feições de interesse, amostras coletadas, estruturas medidas, para além de interpretações possíveis acerca da morfologia, em planta-baixa, perfil e seções, trazendo informações importantes sobre a gênese e evolução desses ambientes.

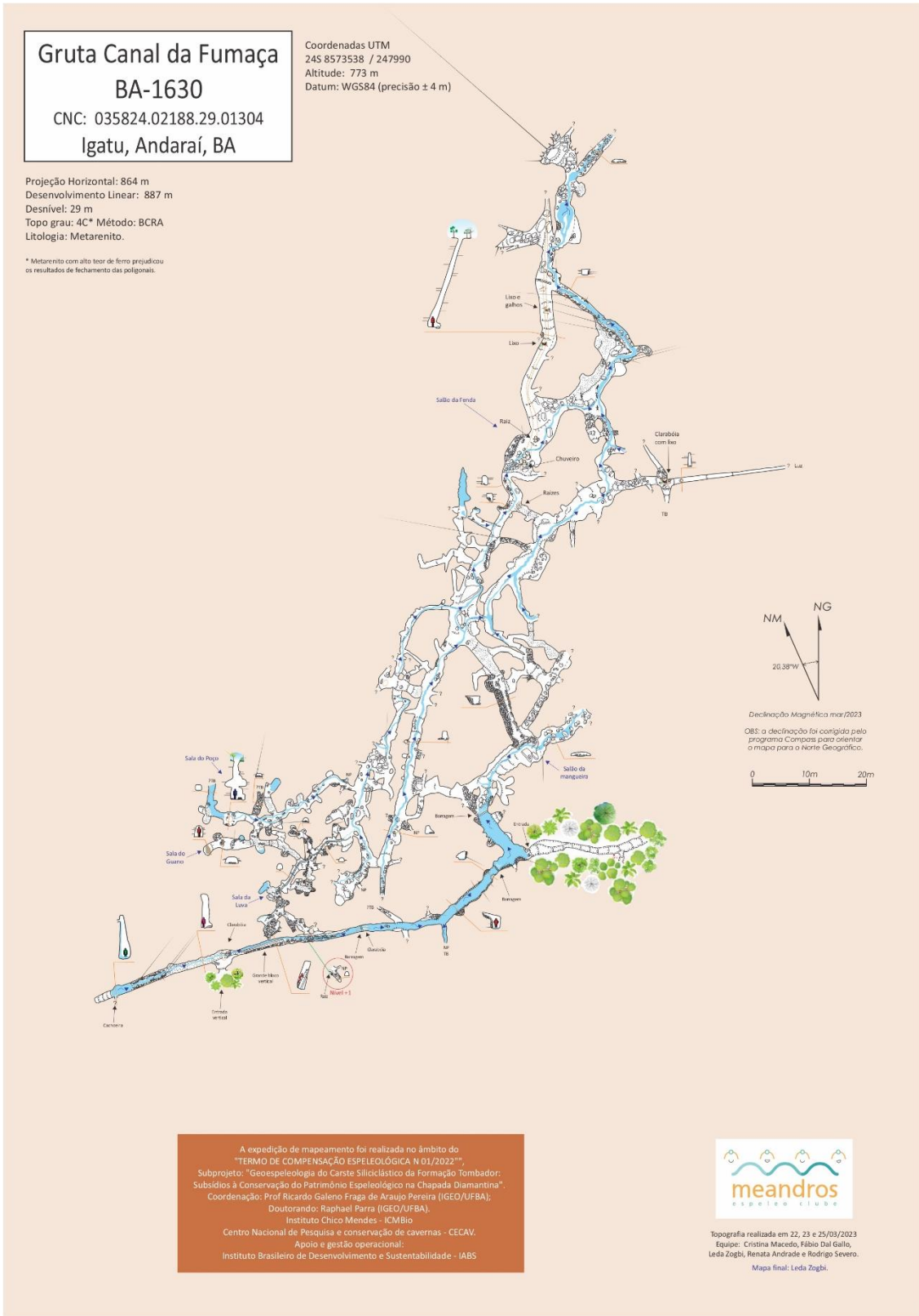
Sendo assim, a primeira etapa de campo do presente projeto consistiu no mapeamento das cavidades na área de estudo. Destaca-se que parte das cavernas reconhecidas na área já possuíam topografia completa, tal como a Gruta de Torras, cujo mapa foi cedido pelos grupos autores. Outras cavidades, como a Gruta do Lobo, Criminoso e Morro do Alvo, tiveram o mapeamento iniciado em expedições prévias, mas não foram finalizadas. Por não terem sido alvo de estudos mais aprofundados, não foram alvo de mapeamento no âmbito desse projeto.

Por sua vez, as cavidades Gruta do Canal da Fumaça, Gruta do Trianglim, Gruta da Parede Vermelha e Gruta do Teté, que compõem, junto com a Gruta de Torras e a Gruta do Rio dos Pombos, o grupo de cavidades estudadas em detalhe nesse projeto, foram mapeadas, sendo aqui apresentados os mapas espeleológicos.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

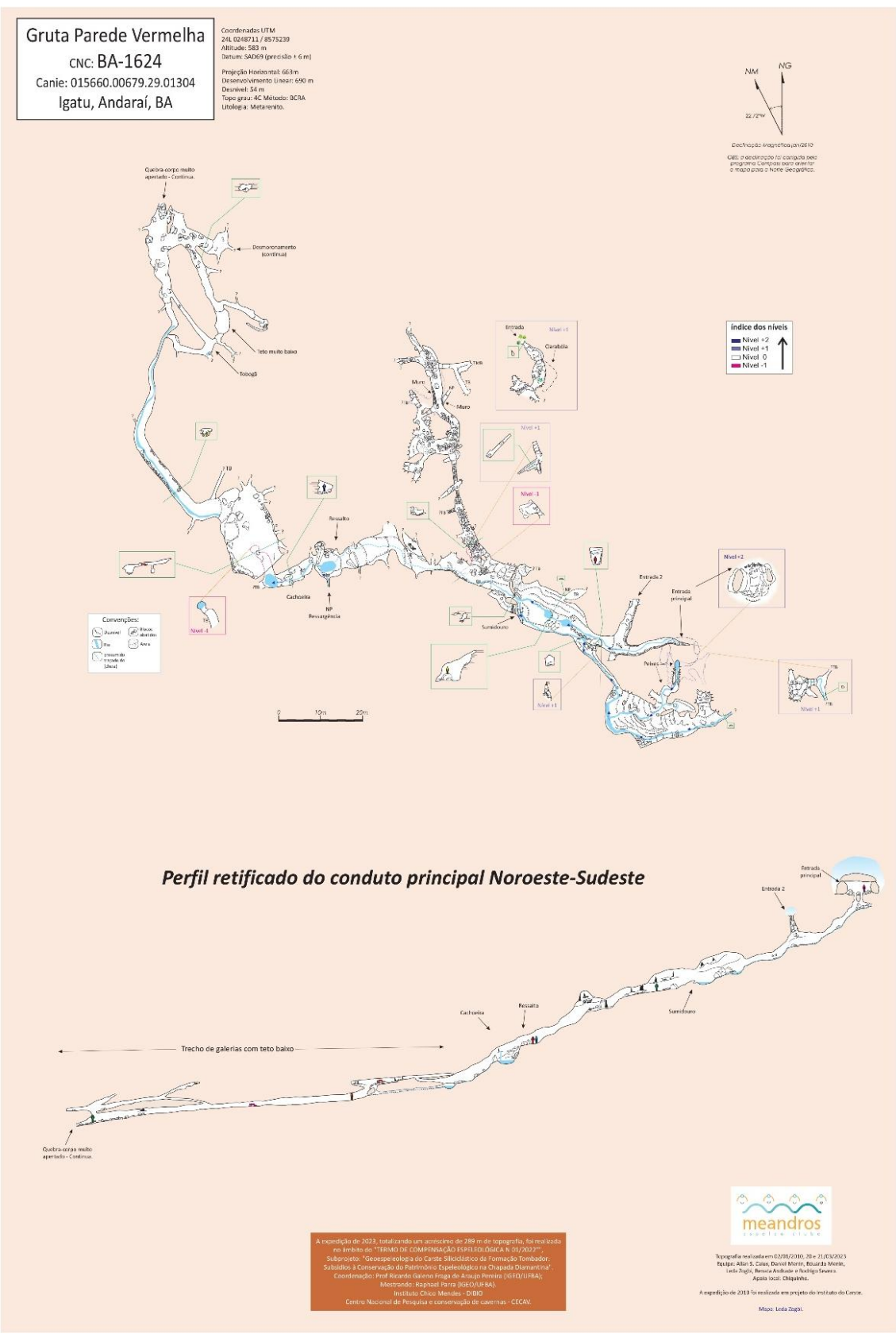
Para o mapeamento das cavidades foram utilizados os métodos tradicionais de topografia espeleológica com bases fixas, descritos em Rubioli (2005). Utilizaram-se equipamentos modernos como DISTO-X e BRIC4/BRIC5, com croquis desenhados em papel milimetrado ou em celular/tablet com o *software* Topodroid, com precisão BCRA 4C. Apenas a Gruta do Teté foi topografada com uso de bússola, clinômetro e trena laser, resultando em uma precisão BCRA 3C. Para digitalização dos croquis e cálculos espeleométricos, foram utilizados os *softwares* Compass, Sexy Topo e CorelDraw.

# RESULTADOS



**Fig. 1** – Mapa espeleológico da Gruta do Canal da Fumaça.





**Fig. 3 – Mapa espeleológico da Gruta da Parede Vermelha.**



**ANEXO III**  
**REGISTRO FOTOGRÁFICO**  
**E AEROFOTOGRÁFICO**

## 1. PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO E CÁRSTICO



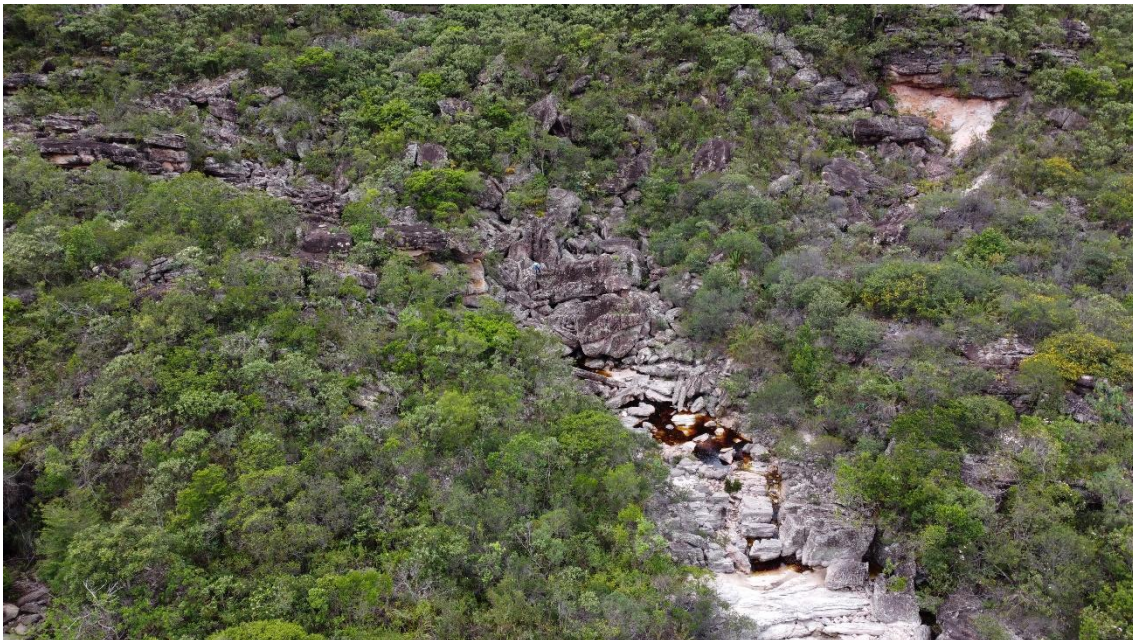
**Fig. 1** – Ressurgência cárstica de afluente do Córrego dos Pombos



**Fig. 2** – Local onde o Córrego dos Pombos penetra por fraturas para o interior do maciço (sumidouro), deixando o leito seco.



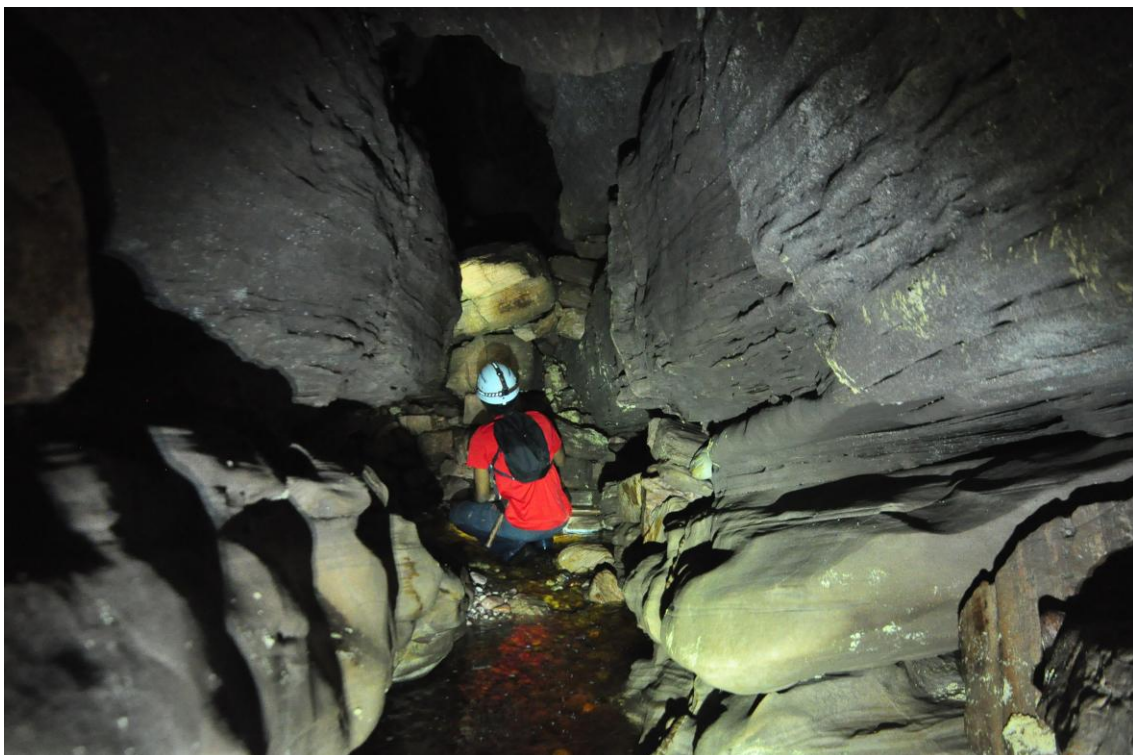
**Fig. 3** – Ressurgência cárstica do Córrego dos Pombos, que flui subterrâneo por cerca de 300m após entrar em um sistema de sumidouros.



**Fig. 4** – Registro aéreo da ressurgência do Córrego dos Pombos.



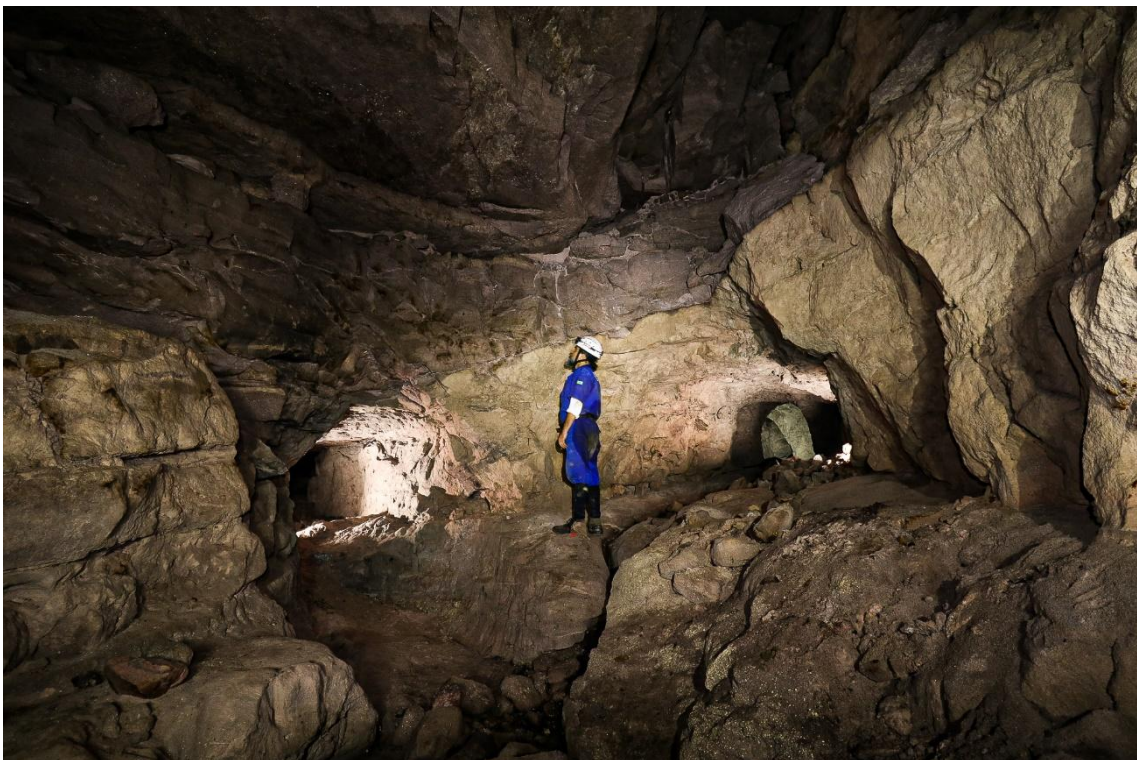
**Fig. 5** – Córrego dos Pombos no interior da Gruta Rio dos Pombos, nas proximidades de sua ressurgência.



**Fig. 6** – Condutos retificados e verticalizados, controlados por planos de fratura aproximadamente ortogonais, no interior da Gruta Rio dos Pombos.



**Fig. 7** – Relevo ruiforme, formado pelo truncamento de famílias de fratura subverticais, na região da Gruta do Canal da Fumaça. Essa feição é típica de áreas cársticas em rochas siliciclásticas.



**Fig. 8** – Salão principal na Gruta do Canal da Fumaça, com a presença de estruturas geológicas condicionando a evolução. Foto: Cristina Macedo.



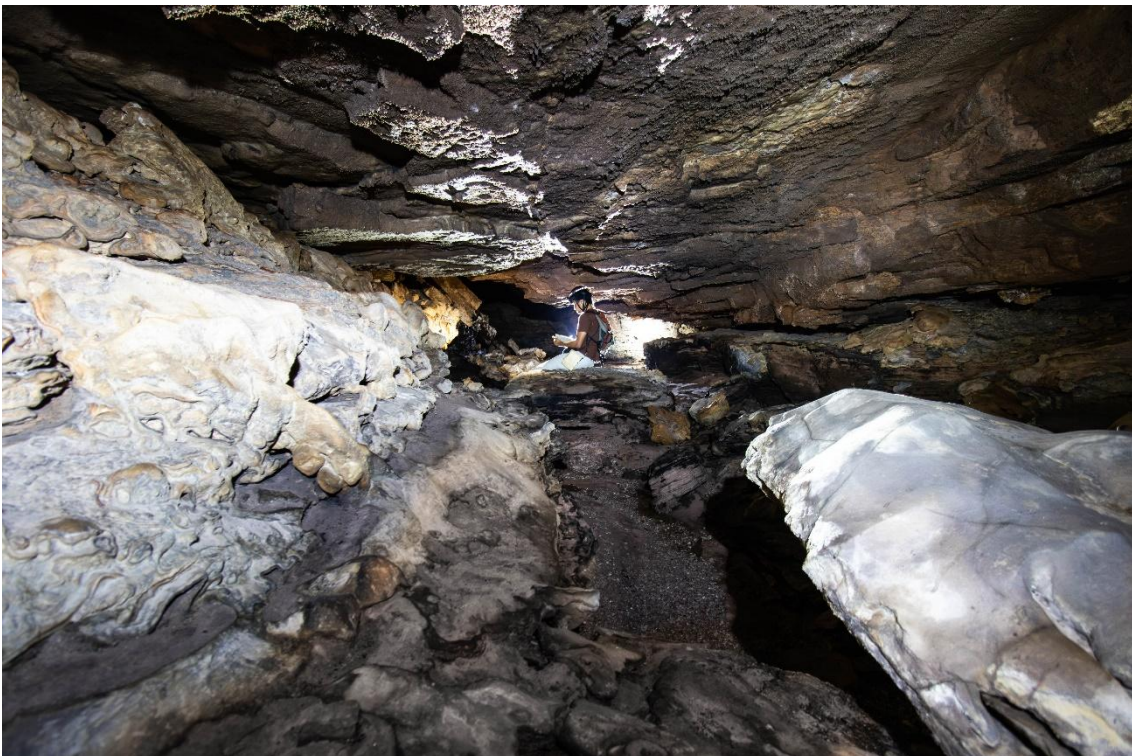
**Fig. 9** – Conduto principal da Gruta do Teté. Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 10** – Sedimentos clásticos na Gruta do Teté revelam uma fase de preenchimento do sistema. Esses depósitos eram buscados pelos garimpeiros como fonte de diamantes, o que pode ter levado ao esvaziamento artificial da cavidade. Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 11** – Sedimentos clásticos na Gruta do Teté revelam uma fase de preenchimento do sistema. Esses depósitos eram buscados pelos garimpeiros como fonte de diamantes, o que pode ter levado ao esvaziamento artificial da cavidade.



**Fig. 12** – Salão com espeleotemas do tipo “stromatolite-like” na Gruta do Trianglim. Foto: Cristina Macedo.



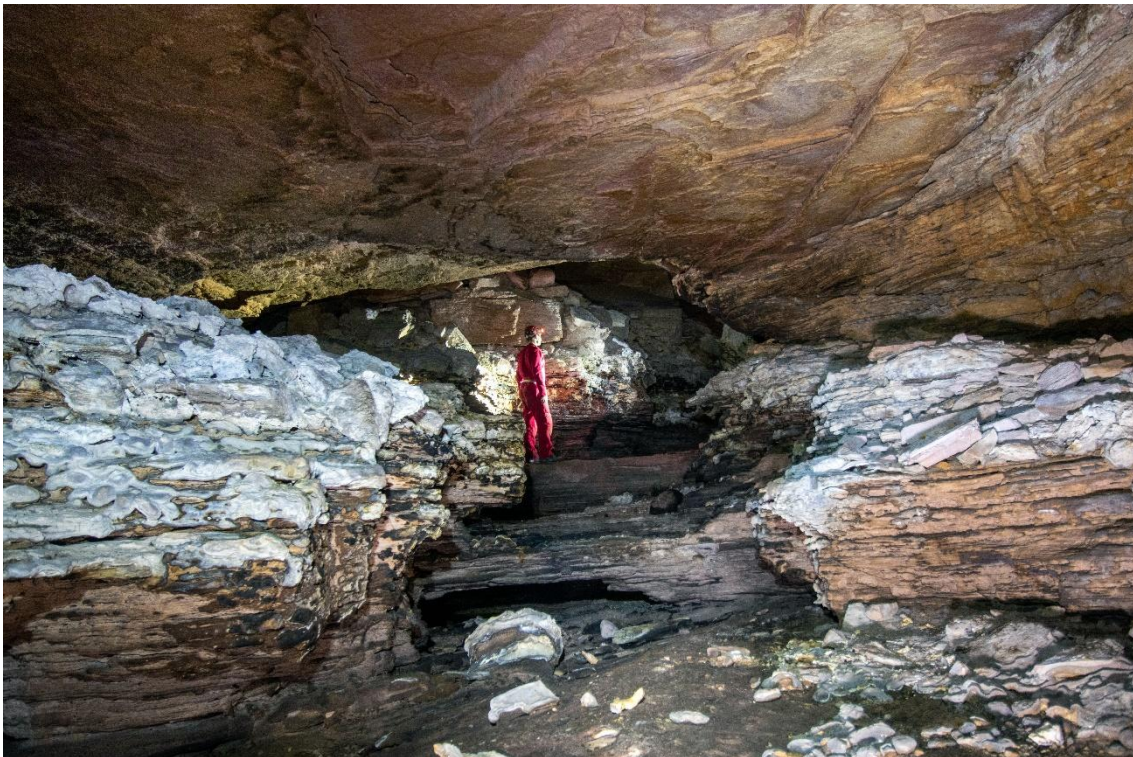
**Fig. 13** – Espeleotema do tipo “*barro-rojo*”, constituído por argilas ferrosas, no interior da Gruta do Trianglim. Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 14** – Salão com blocos abatidos na Gruta do Trianglim. Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 15** – Salão com espeleotemas do tipo “*stromatolite-like*” na Gruta do Trianglim.  
Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 16** – Salão com espeleotemas do tipo “*stromatolite-like*” na Gruta do Trianglim.  
Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 17** – Panela ou marmitta de erosão em leito fluvial no interior da Gruta da Parede Vermelha. Essas feições eram alvos dos garimpeiros por acumular cascalhos e, junto, os diamantes.



**Fig. 18** – Espeleotema do tipo “barro-rojo”, constituído por argilas ferrosas, no interior da Gruta de Torras.



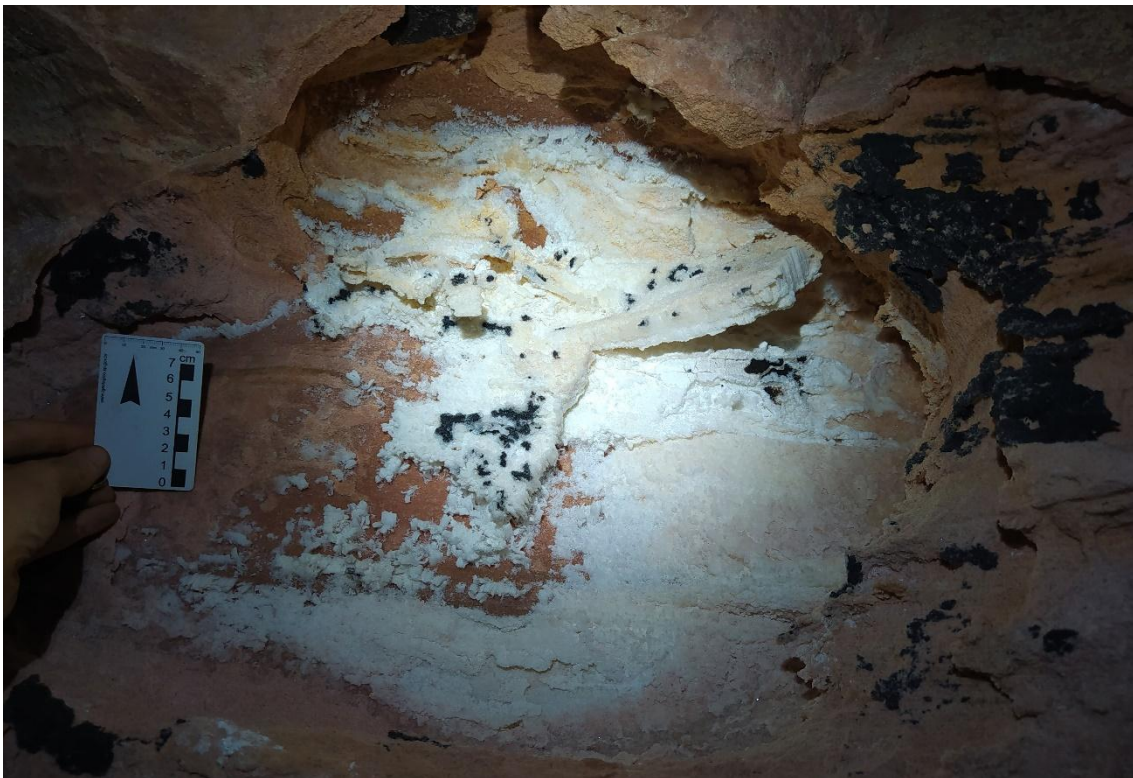
**Fig. 19** – Fendas verticais que dão acesso aos condutos da Gruta do Canal da Fumaça.



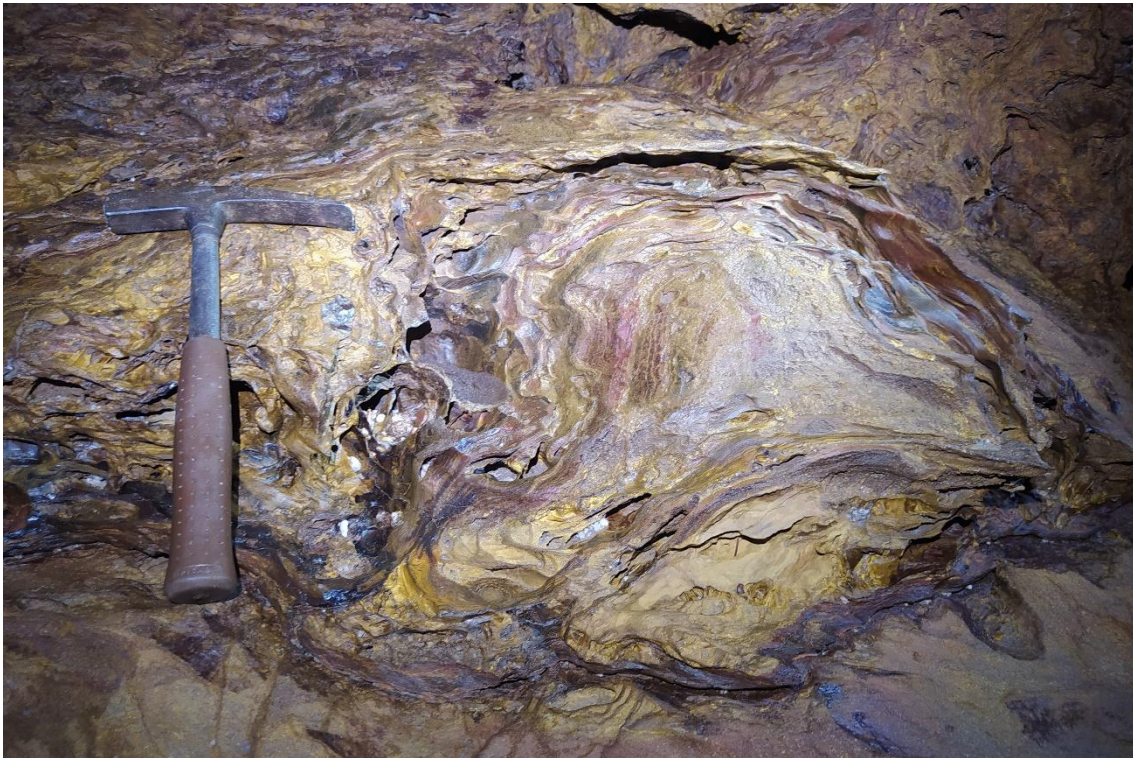
**Fig. 20** – Espeleotemas do tipo “stromatolite-like” na Gruta do Trianglim.



**Fig. 21** – Espeleotemas esféricos na Gruta do Trianglim.



**Fig. 22** – Espeleotemas de gipsita na Gruta do Trianglim.



**Fig. 23** – Espeleotemas de ferro na Gruta de Torras.



**Fig. 24** – Relevo ruiniforme no entorno da Gruta do Teté, região do divisor de águas entre as bacias hidrográficas do Rio Coisa Boa e Paraguaçu.



**Fig. 25** – Registro aéreo do entorno da Gruta do Trianglim.

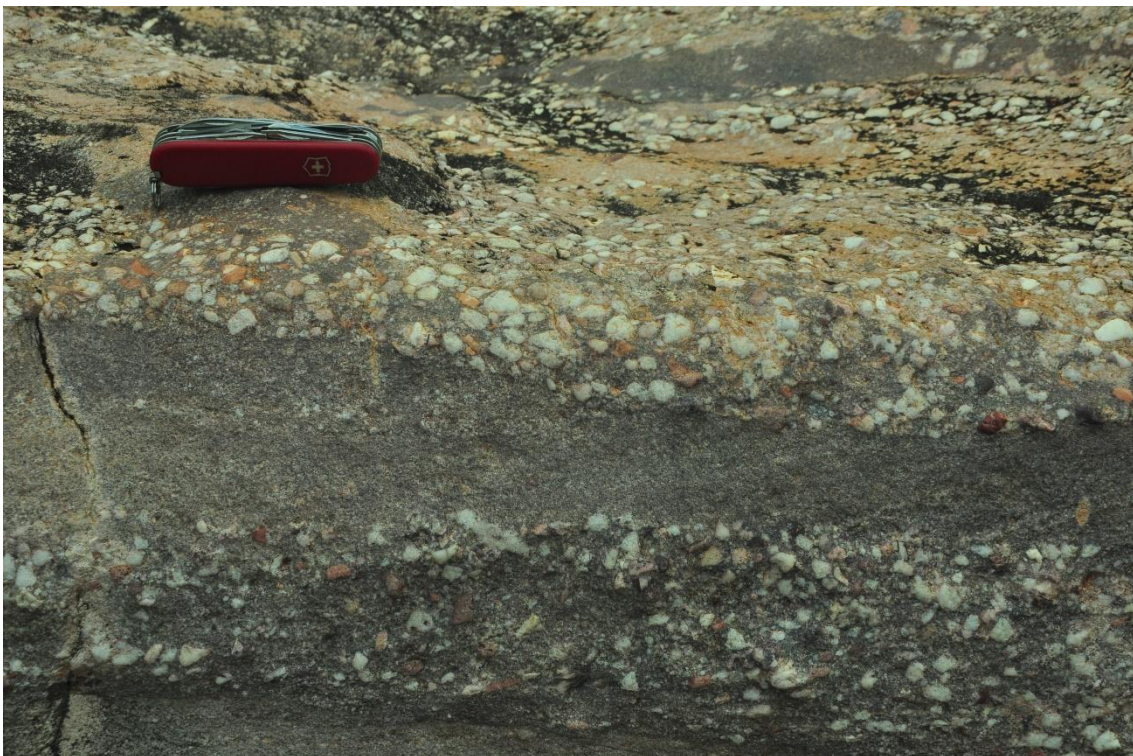


**Fig. 26** – Registro aéreo do relevo ruíniforme no entorno da Gruta do Criminoso. Ao fundo, bancos de areia depositados pelo Rio Coisa Boa, assoreado devido ao garimpo.

## 2. SÍTIOS DE INTERESSE GEOLÓGICO



**Fig. 27** – Coloração avermelhada devido a presença de metarenitos de matriz argilosa com conteúdo de ferro e alumínio, que dá o nome à Gruta da Parede Vermelha. Relevo corroído por processos físico-químicos no topo do maciço.



**Fig. 28** – Litotipo comum na área de estudo, definido por metarenitos granulados (ou, informalmente, “microconglomerados”), de coloração arroxeada devido ao ferro.



**Fig. 29** – Litotipo de ocorrência comum na área, composto por metarenitos médios a grossos, com grânulos e estratificações cruzadas acanaladas. Notar a presença de feições de iniciação e canalículos condicionada pelos planos de acamamento.



**Fig. 30** – Grande bloco de metaconglomerados polimíticos, litotipo comum na área de estudo. Configura-se como rocha-fonte dos diamantes, que se acumularam nos depósitos aluvionares e coluvionares após o intemperismo e erosão dessas rochas.



**Fig. 31** – Bloco grande de metaconglomerados polimítico intemperizado, conhecido pelos garimpeiros como “mundumbim”. Esses metaconglomerados, de idade mesoproterozoica são as rochas-fonte dos diamantes na área de estudo.



**Fig. 32** – Feições do tipo *tafoni*, formadas pelo intemperismo e erosão diferencial dos metarenitos na superfície de um grande bloco de rocha.



**Fig. 33** – Falha normal no leito do Córrego dos Pombos, que trunca metaconglomerados, na margem esquerda, com metarenitos na margem direita. O córrego é retificado e condicionado por essa estrutura.



**Fig. 34** – Estrias e degraus em quartzo no plano de falha indicando movimento vertical normal (esquerda) e rochas básicas intrusivas com foliação e milonitização no plano de falha (direita).



**Fig. 35** – Estrias e degraus em plano de cisalhamento com movimento horizontal e cinemática dextral, marcado em veio de quartzo e minerais aluminossilicatos, condicionando conduto retificado no interior da Gruta do Canal da Fumaça.



**Fig. 36** – Registro aéreo do exutório do Rio Coisa Boa (direita) e do Rio Piabas (esquerda).



**Fig. 37** – Registro aéreo dos extensos bancos de areia que se acumulam na base da serra, onde o rio perde energia e depositam os sedimentos remanescentes da atividade de garimpo.



**Fig. 38** – Feições do tipo *kamenitza*, observadas na trilha para a Gruta do Teté.

### 3. PATRIMÔNIO MINEIRO



**Fig. 39** – Construção do período do garimpo constituído por grandes blocos de rocha, sobre os quais passa a “Estrada do Garimpo”, um antigo acesso para a Vila de Igatu.



**Fig. 40** – Preenchimento e cobertura de fendas para passagem de estrada, construção comum na área de estudo.



**Fig. 41** – Pilhas de blocos de rocha deixados pela atividade garimpeira no interior da Gruta do Canal da Fumaça.



**Fig. 42** – Grandes pilhas de blocos, conhecidas como “casalheiras”, remanescentes do período do garimpo de diamante.



**Fig. 43** – Grandes depósitos de blocos removidos do interior da Gruta do Canal da Fumaça e da Gruna do Brejo, empilhados na superfície. Casa como escala.



**Fig. 44** – Pilar para contenção de blocos de rocha do teto, técnica frequentemente empregada pelos garimpeiros para garantir a estabilidade do local, no interior da Gruta do Canal da Fumaça. Presença de mangueiras para captação de água. Foto: Leda Zogbi.



**Fig. 45** – Pilha de blocos no interior da Gruta do Teté. Poças de água em chamados “caldeirões”, um dos principais alvos do garimpo de diamante, devido ao acúmulo de sedimentos arenosos e granulosos. Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 46** – Galeria totalmente escavada, em rocha alterada e friável, na Gruta do Canal da Fumaça. Notar marcas de talhadeira nas paredes e teto. Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 47** – Salão com marcas de escavação nas parede e teto (galeria ao fundo), junto a evidências de evolução natural como piso suavizado e escavado pela água. Foto: Cristina Macedo.



**Fig. 48** – Empilhamento de blocos no interior da Gruta da Parede Vermelha, remanescente da atividade garimpeira.



**Fig. 49** – Depósitos antrópicos de diferentes granulometrias, registrando as técnicas de separação de frações (“lavagem de cascalho”) do garimpo de diamante, no interior da Gruta do Trianglim.



**Fig. 50** – Galeria escavada e sedimentos remobilizados no interior da Gruta de Torras.



**Fig. 51** – Muro construído no interior da Gruta do Canal da Fumaça.



**Fig. 52** – Muro construído na margem do Córrego dos Pombos.



**Fig. 53** – Ruínas do antigo Bairro Luís dos Santos, tombado pelo IPHAN como patrimônio material.



**Fig. 54** – Registro aéreo do centro da Vila de Igatu.

**ANEXO I**

**MAPEAMENTO ESTRUTURAL**

## INTRODUÇÃO

A Geologia Estrutural é a área das geociências que se dedica ao estudo dos corpos rochosos e suas deformações ao longo do tempo, registradas em estruturas como, entre outras, as dobras e falhas (Fossen, 2017). Através da leitura e compreensão dessas feições, é possível reconstituir antigos movimentos e esforços da litosfera terrestre que construíram ou modificaram a porção mais superficial do planeta.

No presente relatório, serão apresentados os principais aspectos da Geologia Estrutural na área de estudo, através de análises de sensoriamento remoto e geoprocessamento, bem como de observações e medidas obtidas durante as atividades de campo. Deve-se compreender com clareza a ocorrência das estruturas que afetam o arcabouço litológico na área (ex. planos de fraturas subverticais e mergulho de camadas sub-horizontais), uma vez que são um dos principais fatores condicionantes da carstificação e da formação de cavidades no local.

## MATERIAL E MÉTODOS

Iniciou-se com a pesquisa e revisão de literatura, através de publicações científicas que tratassem do mapeamento tectono-estratigráfico da região da Chapada Diamantina, visando uma compreensão dos aspectos estruturais regionais.

Em seguida, a extração de lineamentos foi desenvolvida de forma manual em ambiente virtual, utilizando o *software* QGIS 3.28, com auxílio de modelo digital de elevação ALOS PALSAR, com resolução de 12m, obtido através do site Alaska Satellite Facility, Earth Data, NASA (<https://search.asf.alaska.edu/#/>). Também fora utilizada imagem Google Sattelite ©, obtida através do plugin “HCMGIS”. Por fim, também se utilizou o *software* PCI Geomatics, versão de teste, para a extração automatizada de lineamentos. Para a elaboração das rosetas de orientação dos lineamentos estruturais, utilizou-se do plugin “Line Direction Histogram” no QGIS.

O levantamento de dados estruturais em campo foi realizado com auxílio de bússola geológica tipo BRUNTON, com medidas obtidas na notação *strike-dip* (“regra da mão direita”). Foram coletadas medidas de planos de falha, fraturas e acamamento sedimentar (So), de forma geral para a área de estudo e também de maneira localizada em cada uma das cavidades estudadas. Para as cavernas, utilizou-se dos mapas espeleológicos obtidos

em etapas anteriores do projeto para localizar e posicionar as estruturas, visando compreender a sua relação com o desenvolvimento de salões e condutos.

Por fim, o tratamento dos dados de estruturas medidas em campo e a elaboração de modelos do tipo diagramas de roseta e estereogramas foi realizado com uso do *software* Stereonet.

## **GEOLOGIA ESTRUTURAL REGIONAL**

A Chapada Diamantina está inserida no contexto das coberturas cratônicas pré-cambrianas do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977). Estas se dividem entre o Supergrupo Espinhaço, de idade mesoproterozoica e o Supergrupo São Francisco, de idade neoproterozoica (Fig.1, Guimarães et al., 2012). Dentro do primeiro, posicionam-se as rochas da Formação Tombador, datadas do Mesoproterozoico (Babinski et al., 1999; Guimarães et al., 2005; Loureiro et al., 2008), que compõem a área de estudo.

Estas unidades repousam sobre o Aulacógeno do Paramirim, uma sucessão de dois riftes superpostos e parcialmente invertidos (Schobbenhaus, 1996; Cruz e Alkmim, 2006). A inversão do aulacógeno se deu durante o ciclo tectônico Brasileiro, no Neoproterozoico, tendo deformado as coberturas através de dobras, falhas reversas, de empurrão e transcorrentes (Alkmim et al., 1996; Cruz e Alkmim, 2007).

Em termos tectônicos, a Chapada Diamantina é compartimentada em duas: oriental e ocidental, sendo limitadas pelo lineamento Barra do Mendes – João Correia (Jardim de Sá et al., 1976). De acordo com esses autores, a porção oriental, na qual está inserida a Serra do Sincorá e, portanto, também a área de estudo desse trabalho, é estruturalmente mais simples, sendo caracterizada por dobras abertas geradas por mecanismo de deslizamento flexural que deformaram os estratos menos competentes.

Para a porção oriental, autores como Danderfer (1990), Santos (2011), Moitinho (2011), Santana (2011) e Maia (2011) apontam a ação duas fases de deformação (Fig. 2). A primeira delas ( $D_1$ ), com campo de tensão regional de direção WSW-ENE a E-W, responsável pela formação de dobras abertas e suaves, formadas pelo mecanismo de deslizamento flexural interestratal, com eixos de direção NNW-SSE e N-S. Importantes exemplos dessas estruturas são a Anticlinal do Pai Inácio, Anticlinal de Seabra e Sinclinal de Ituaçu (Fig. 2a e 2b).

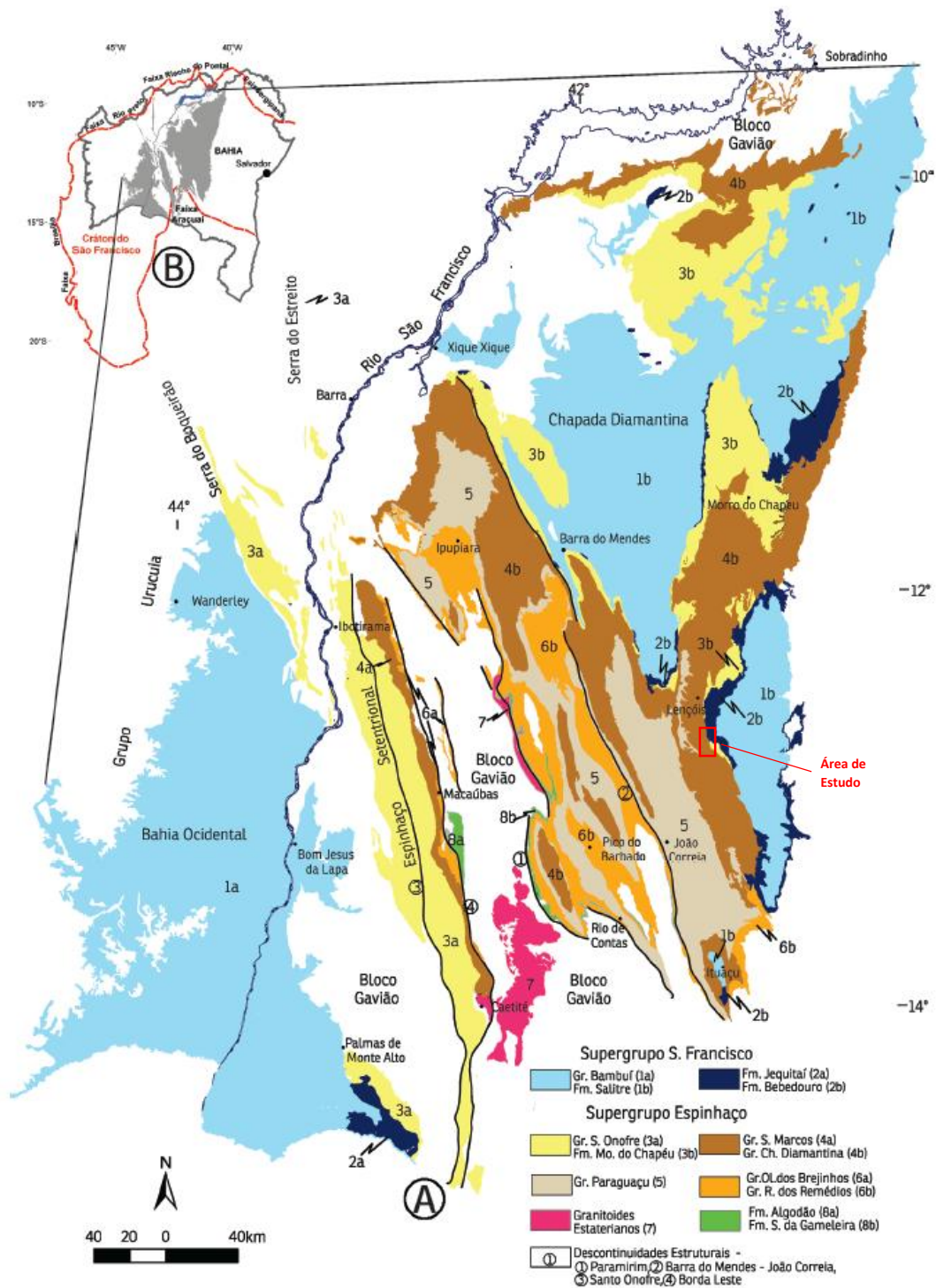


Figura 1. Mapa geológico simplificado dos Supergrupos Espinhaço e São Francisco na Chapada Diamantina (Modificado de Guimarães et al., 2012).

Em um estágio avançado, esta fase também resultou na nucleação de rampas de empurrão, falhas reversas e dobras em *kink* subsidiárias. Relacionam-se a esta fase também planos de fratura paralelos ao eixo das dobras ou inflexionados na direção NNE-SSW e NNW-SSE (Santana, 2011).

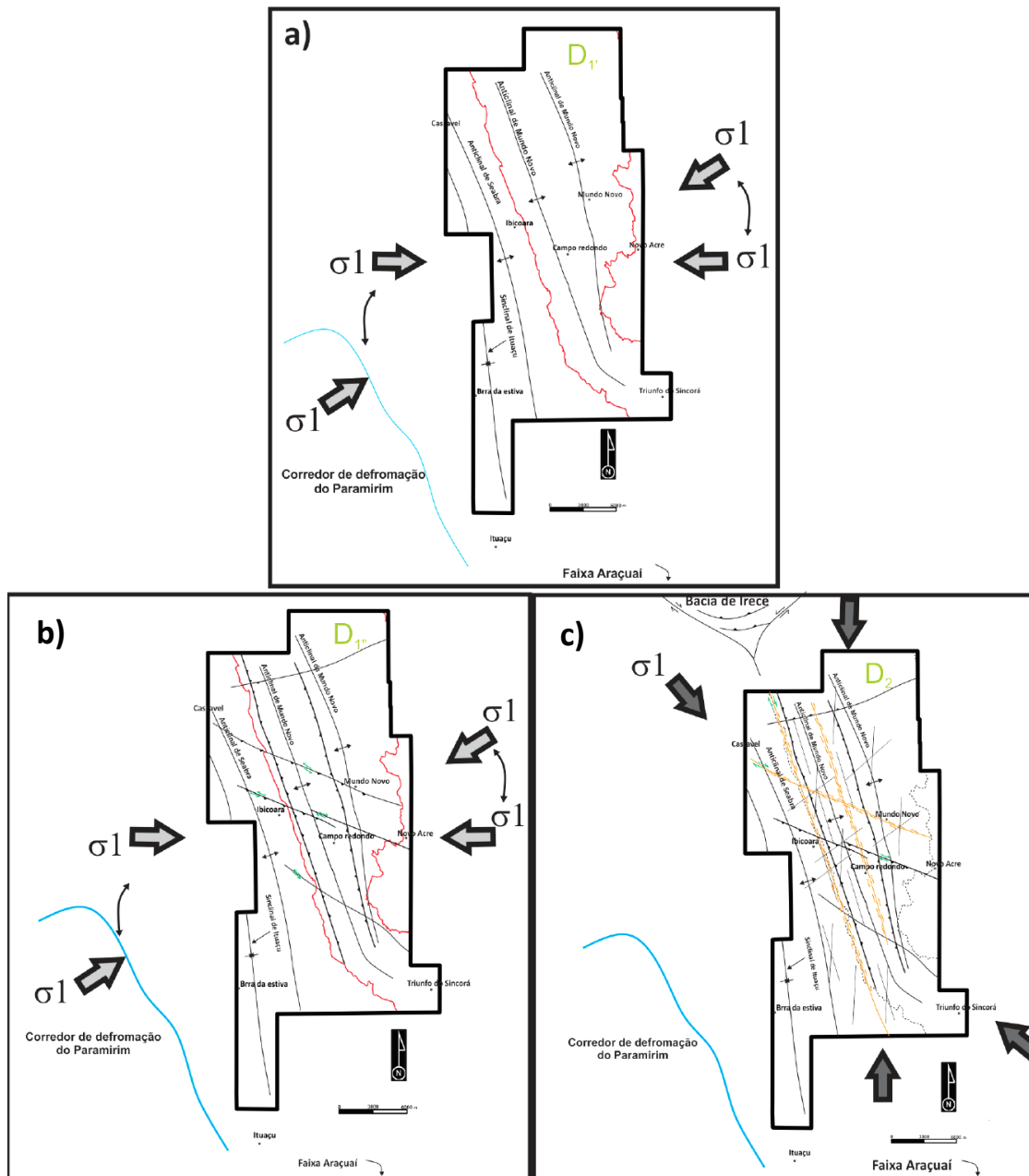


Figura 2. Modelos esquemáticos para a evolução dos campos de tensão sugeridos e estruturas associadas da porção oriental da Chapada Diamantina (Santos, 2011).

Já a segunda fase de deformação ( $D_2$ ) corresponde a uma transcorrência regional de natureza transpressiva e cinemática sinistral, resultante da migração do campo tensão para a direção N-S a NW-SE (Fig. 2c). Esta deformação é de caráter rúptil e configurou um padrão de estruturação do tipo Riedel, com plano de fluxo N-S de cinemática sinistral (Pedreira e Margalho, 1990). Esse estágio registrou a reativação de estruturas da fase  $D_1$ , sendo responsável pela estruturação da Serra do Sincorá, com o desenvolvimento de falhamentos com movimentação sinistral de direção NNW-SSE e com movimentação dextral de direção E-W (Santos, 2011; Maia, 2011). A Fig. 3 traz uma síntese dos estágios de deformação descritos e estruturas associadas a eles.

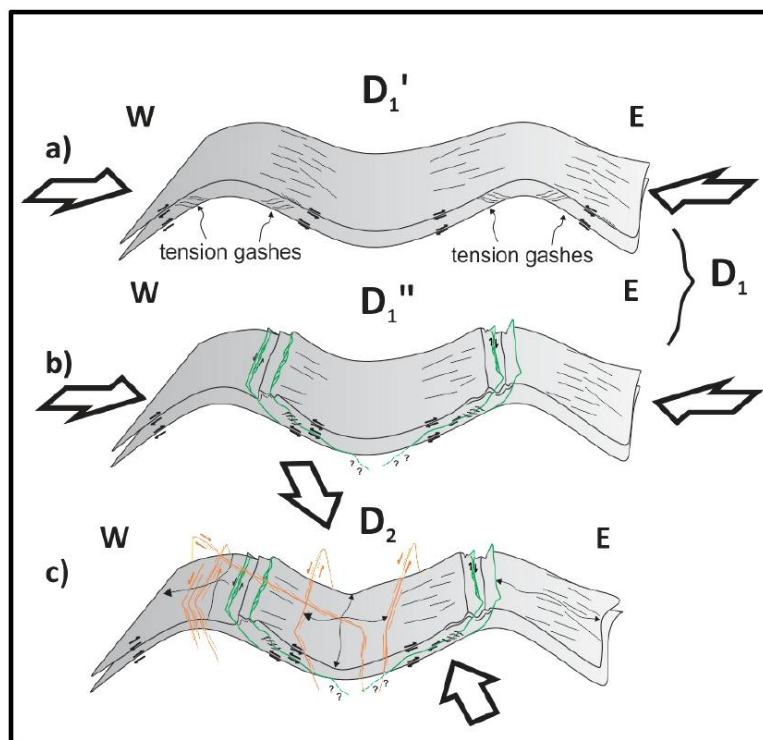


Figura 3. Modelos esquemáticos para as fases deformacionais e estruturas associadas da porção oriental da Chapada Diamantina (Santos, 2011).

No mapeamento do Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – Folha Lençóis (Bonfim e Pedreira, 1990, p. 76), identificam-se diversas falhas e fraturas no domínio das rochas da Formação Tombador na Serra do Sincorá, entre a região de Lençóis, Andaraí e Mucugê. Apontada como a principal delas, a leste da área de estudo desse trabalho, encontra-se a Falha de Igatu, com caráter transtraccional e cinemática sinistral, deslocamento lateral da ordem de 7 km e direção NW-SE, sendo acompanhada por fraturas paralelas e perpendiculares a ela. Segundo os autores, estas estruturas resultam de esforço compressivo de direção aproximada WNW-ESE, gerando um arranjo de zona rúptil por cisalhamento simples do tipo Riedel.

Moitinho (2011), trabalhando na região de Igatu, indica um predomínio no mergulho do acamamento (So) para NE. Além disso, o autor classifica as estruturas transpressionais segundo o modelo de Riedel, no qual o cisalhamento de cinemática principal sinistral (Y) tem orientação N-S (Fig. 4). Nesse, as falhas identificadas na área de estudo com movimento sinistral e orientação NNW-SSE representariam as falhas sintéticas (R), enquanto as falhas com movimento dextral, de orientação WNW-ESSE, representariam o padrão antitético (R').

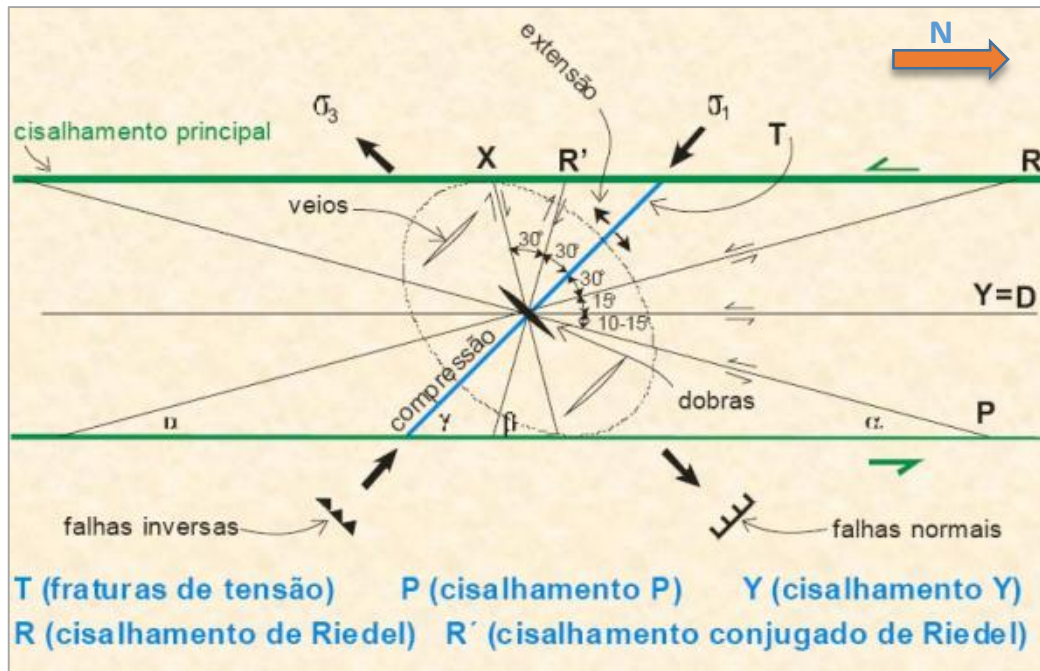


Figura 4. Modelo teórico de Riedel para zonas de cisalhamento sinistral aplicado à região da Serra do Sincorá (Adaptado de Salamuni, 2007).

Análises de cristalinidade em ilita (Índice de Kubler e Índice Esquevin), para além da presença do mineral pirofilita em metarenitos da Formação Tombador, demonstraram a existência de um anquimetamorfismo (Fig. 5), indicativo da transição entre fácies prehnita-pumpelita superior e xisto verde inferior, com condições de soterramento de profundidade da ordem de 10-12 km e temperaturas da ordem de 300 °C (Souza, 2017).

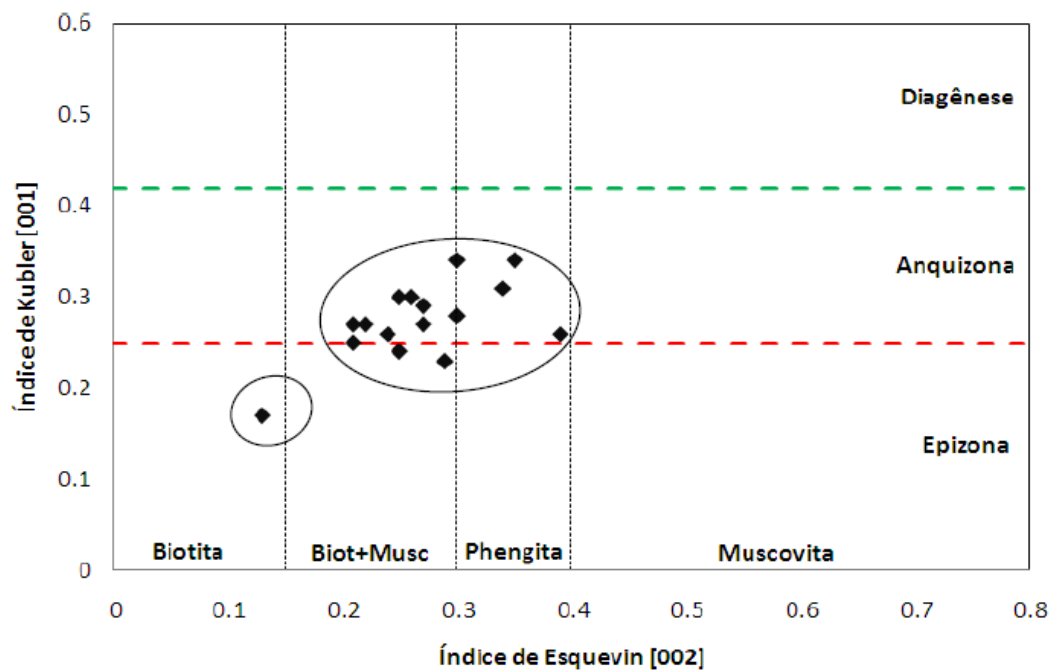


Figura 5. Correlação entre o Índice de Kubler e Índice de Esquevin mostrnado a predominância de amostras analisas no campo do anquimetamorfismo (Souza, 2017).

## ANÁLISE DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS

A observação dos padrões de lineamentos estruturais regionais (Fig. 6), extraídos de forma automatizada, permite a distinção de três diferentes domínios. O primeiro, à leste, na área das rochas carbonáticas da Formação Salitre (Supergrupo São Francisco), na Bacia Una-Utinga, apresenta baixa densidade de lineamentos. Quando existentes, tendem a se desenvolver nas direções NNW-SSE, NW-SE e ENE-WSW, marcando vales discretos, abertos e de vertentes convexas suavizadas, geralmente secos.

À oeste, o segundo domínio se situa onde ocorrem as rochas do Grupo Paraguaçu, a densidade de lineamentos é muito baixa, ocorrendo apenas em vales mais largos com vertentes convexas, geralmente de afluentes do rio homônimo, de direção NE-SW, perpendiculares à direção da linha de escarpa da Serra.

O terceiro domínio, sobre o qual está inserida a área de estudo, corresponde ao terreno onde afloram as rochas da Formação Tombador (Grupo Chapada Diamantina, Supergrupo Espinhaço) constituindo os planaltos que formam a Serra do Sincorá. A densidade de lineamentos nesse domínio é alta. Esses predominam nas direções NNW-SSE, NNE-SSW, NE-SW, NW-SE e, mais raramente, WNW-ESSE. Marcam vales muito encaixados, fechados e de vertentes escarpadas (cânions), além de cristas alongadas e linhas de escarpas.

Por sua vez, a extração de lineamentos dentro do perímetro da Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa foi realizada de forma manual, através do auxílio de imagem de satélite. A extração automática não foi aplicada nesta situação devido a resolução limitada do MDE ALOS PALSAR (12m), impedindo a identificação de lineamentos menores. Sendo assim, optou-se pela extração manual nas escalas 1:20.000 (Fig. 7) e 1:5.000 (Fig. 8).

A elaboração dos diagramas de roseta revelou, para ambas as escalas, resultados semelhantes. O predomínio de lineamentos na direção é NNW-SSE é muito marcante. Posteriormente, são visíveis também na direção NW-SE e N-S, sobretudo na escala 1:5.000. Por fim, a direção NE-SW ocorre do modo mais incipiente, principalmente na escala 1:20.000. Os lineamentos ocorrem marcando a direção de vales muito encaixados, tal como o do Rio dos Pombos. Também ocorrem como planos de fraturas subverticais nos topos e encostas dos morros, individualizando blocos e formando um padrão ruiforme, para além de fendas nos leitos secos dos rios maiores.

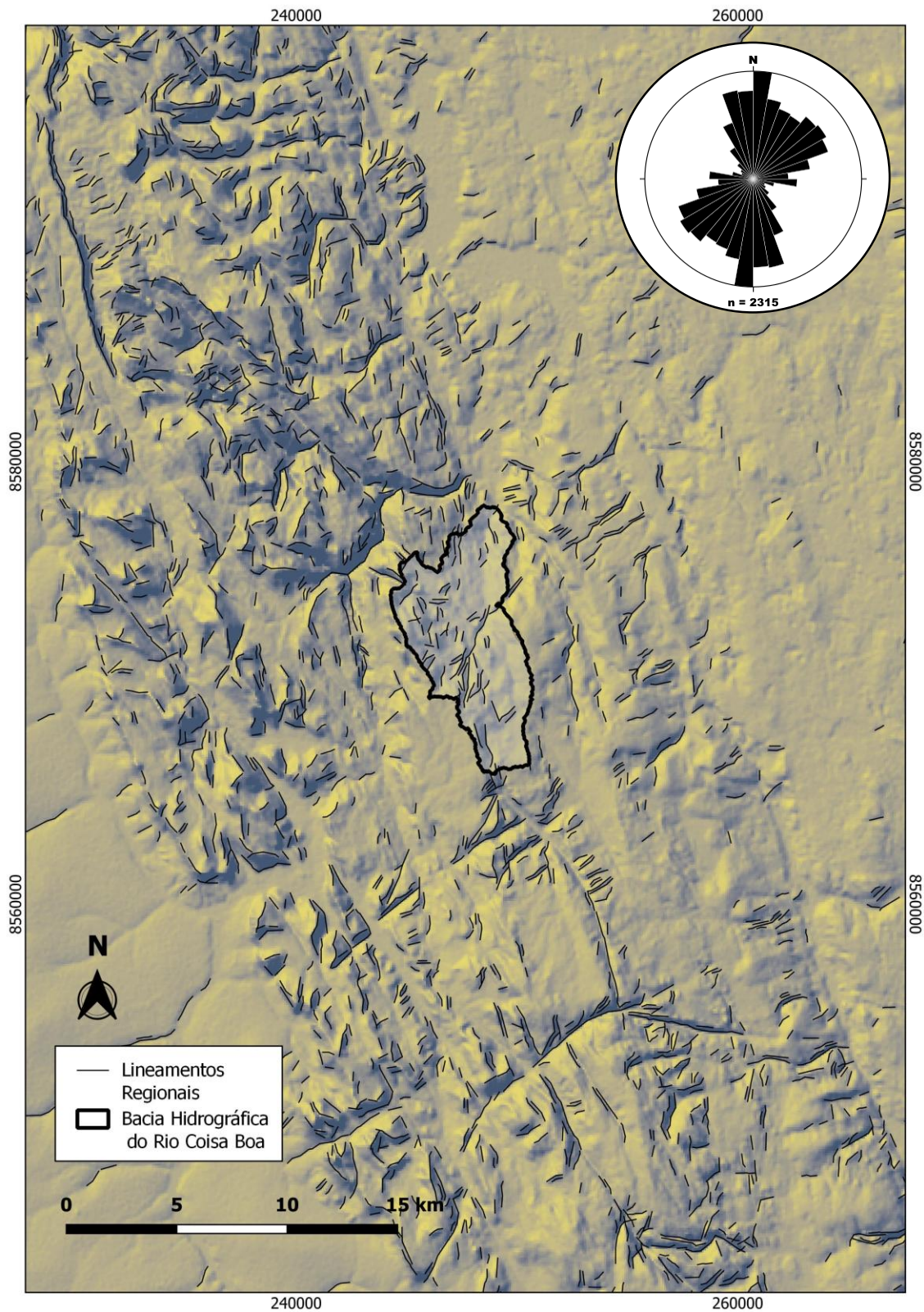


Figura 6. Mapa de lineamentos estruturais da região da Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa, extraídos de forma automatizada por meio do *software* PCI Geomatics.

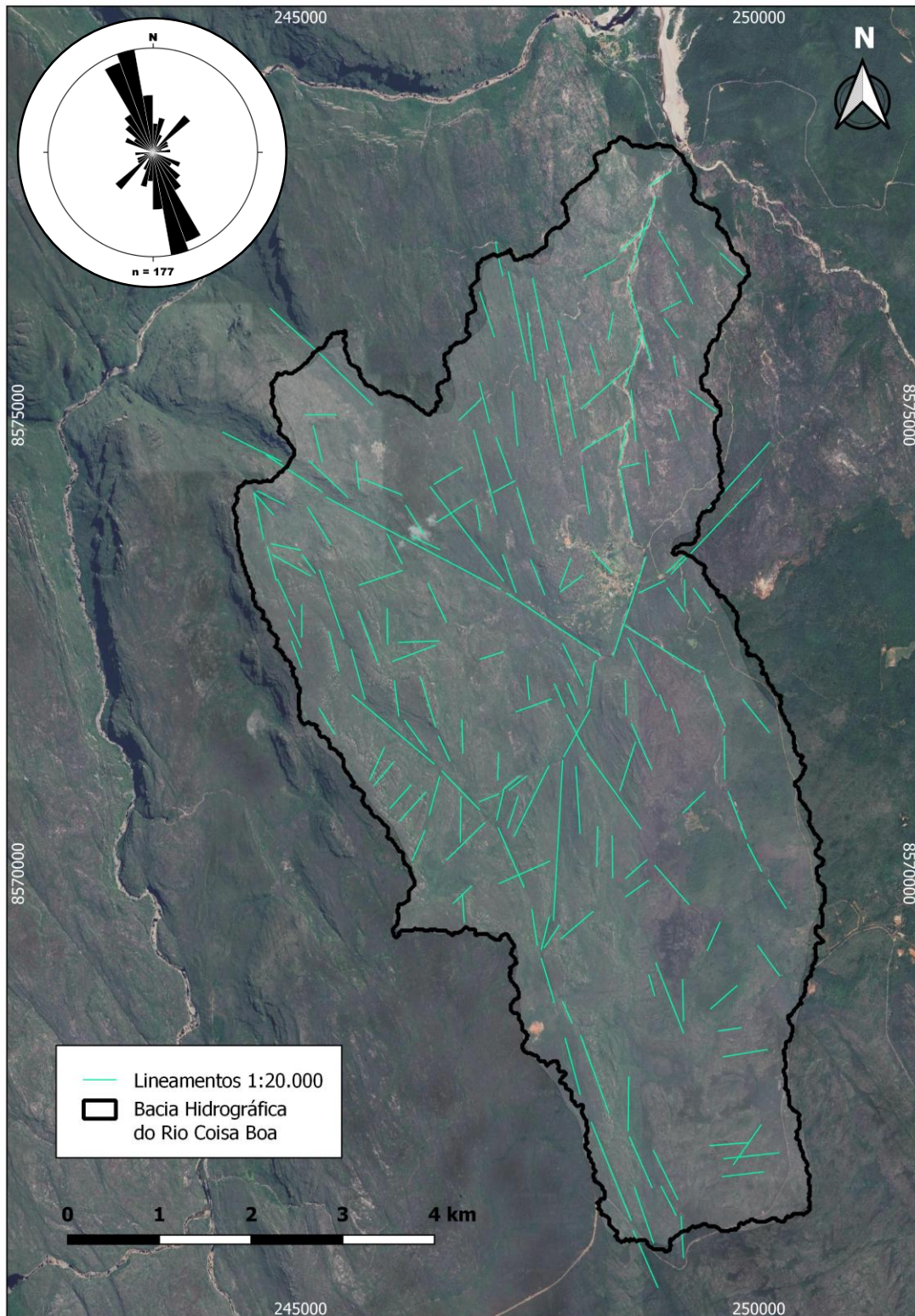


Figura 7. Mapa de lineamentos estruturais – em escala 1:20.000 - da Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa, extraídos de maneira manual no software QGIS, a partir de MDE e imagem de satélite.

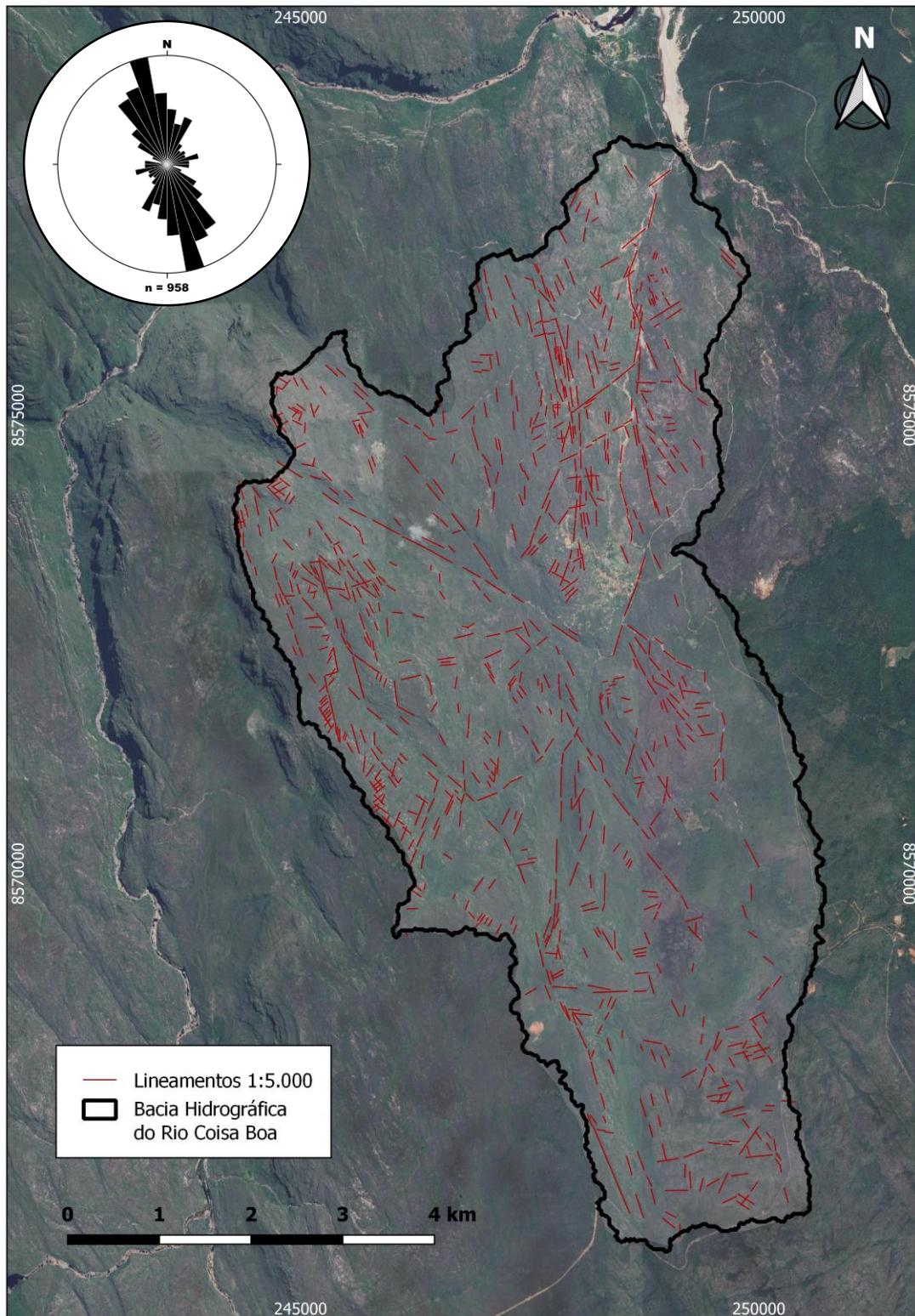


Figura 8. Mapa de lineamentos estruturais – em escala 1:5.000 - da Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa, extraídos de maneira manual no software QGIS, a partir de MDE e imagem de satélite.

Destaca-se a alta densidade de lineamentos nos quadrantes norte e oeste da área, cujas direções ortogonais ou oblíquas resultam em terrenos de relevo ruiforme. Por sua vez, o setor sudeste possui baixa densidade de lineamentos e, conseqüentemente, relevo mais suavizado, o que sugere, junto com observações de campo, que esta região pode ser recoberta por uma superfície pedogênica em rochas da Formação Caboclo.

Levando em consideração as discussões em trabalhos anteriores, pôde-se interpretar os lineamentos extraídos sob a óptica do modelo de Riedel, associando as direções preferenciais reconhecidas na análise com as estruturas previstas. Mantém-se, para esse trabalho, a existência de um campo de tensão ( $\sigma_1$ ) de direção NW-SE, criando um plano de fluxo N-S de cinemática sinistral, conforme proposto por Santos (2011), Moitinho (2011), Santana (2011) e Maia (2011).

Neste modelo, a família de lineamentos predominante de direção NNW-SSE corresponde aos planos de fraturas sintéticas primárias (R), enquanto a família de direção NNE-SSW corresponde aos planos de fratura sintética secundárias (P) e a de direção ENE-WSW aos de fratura antitética secundária (X). Fraturas de tensão (T) também representam uma direção de lineamentos relevantes, paralelos à direção do esforço ( $\sigma_1$ ), assim como falhas normais, tais como as reconhecidas no leito do Rio dos Pombos, de orientação N140. A Fig. 9 traz os diagramas de roseta interpretados com as estruturas no modelo de Riedel para cada uma das escalas analisadas.

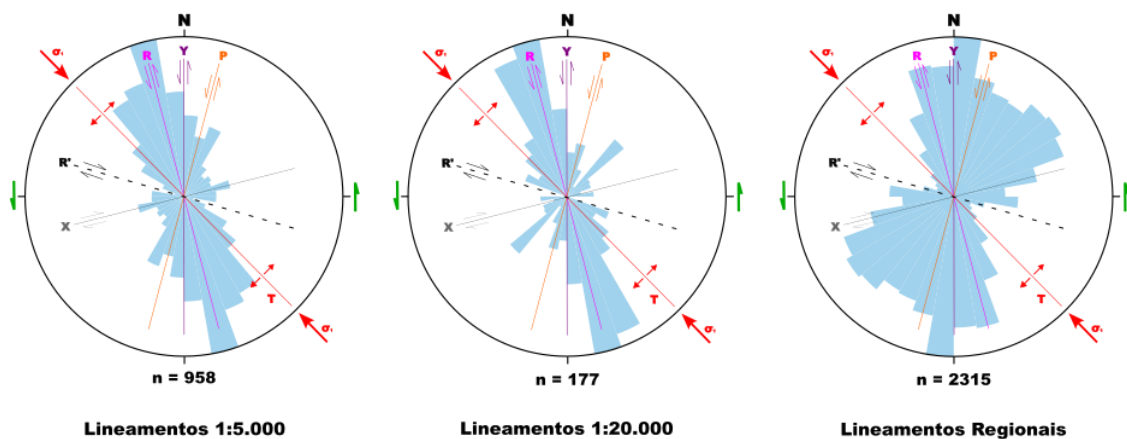


Figura 9. Diagramas de roseta para os lineamentos estruturais extraídos e analisados, com interpretação das estruturas previstas no modelo de Riedel.

## GEOLOGIA ESTRUTURAL LOCAL

As principais estruturas identificadas em campo foram do tipo rúpteis, sobretudo planos de fratura subverticais, de orientação N-S a NNE-SSW, direção concordante aos lineamentos estruturais regionais obtidos por sensoriamento remoto. As famílias de fratura secundárias possuem orientação ENE-WSW, NNW-SSE e NW-SE (Fig. 10). Estas fraturas ocorrem, por vezes, preenchidas por veios de quartzo e, em algumas ocasiões, associadas a zonas de rocha cataclasadas. Nas áreas das cavernas, ocorrem condicionando a evolução de condutos e salões, como será visto adiante.

De modo geral, a área de estudo tem caimento das camadas para N a NE, variando pontualmente para NNW em alguns locais. A inclinação predominante é por volta de  $10^\circ$ , alcançando um máximo de  $25^\circ$ . Há um espalhamento dos polos de concentração entorno de um máximo principal de  $79^\circ$  p/  $193^\circ$  (Fig. 10). Este mergulho do acamamento condiciona o fluxo hídrico e é concordante com o sentido de maior alongação da bacia hidrográfica, ou seja, N a NNE.

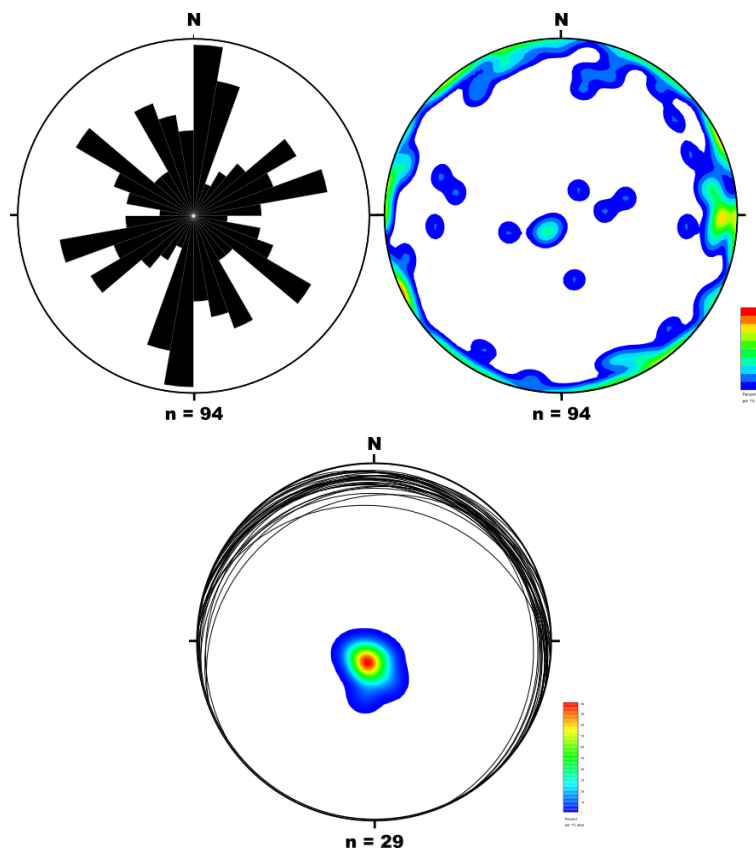


Figura 10. Diagrama de roseta e estereograma para planos de fratura (acima) e estereograma com planos de acamamento (abaixo), medidos em campo, para a área de estudo.

## **IG013 - Canal da Fumaça**

A Gruta do Canal da Fumaça conta, até o momento, com 644m de desenvolvimento linear, 624m de projeção horizontal e 29m de desnível. A distância entre extremos foi calculada em 172m, apontando para uma inclinação geral de 17% ou 9,6 graus, com mergulho de SSW para NNE. Com alta conectividade (cerca de 90 conexões entre condutos), a cavidade possui um padrão planimétrico do tipo *network*/labiríntico, de acordo com a classificação de Palmer (2012). Seus condutos são retificados, sugerindo um controle estrutural. Cabe pontuar que essa análise morfológica deve ser considerada com ressalvas, devido às profundas modificações antrópicas na cavidade.

A análise de lineamentos estruturais realizada corrobora com esta hipótese. A Fig. 11 traz um mapa dos lineamentos, nas escalas 1:2.500 e 1:5.000, evidenciando que a Gruta do Canal da Fumaça está inserida em um corredor de deformação, com alta densidade de lineamentos, de orientação NNE-SSW, na região sul – nas proximidades da cavidade – e que inflexiona para NNW-SSE na sua porção norte. Essa deformação pode estar associada a uma zona de falha transcorrente, necessitando de maior investigação.

Em maior detalhe, o mapa da Fig. 12 evidencia que o conduto principal da cavidade é paralelo a este lineamento de orientação NNE-SSW – que secciona longitudinalmente a caverna – o qual é marcado pela presença de fraturas verticais que alcançam até 10m de largura e 15m de profundidade. Estas fraturas são mais penetrativas a sul e a norte da cavidade, onde o relevo é ruiforme. Na superfície imediatamente superior à caverna, onde o relevo é mais suave e aplainado, as fraturas são mais discretas. Por sua vez, condutos secundários da caverna são paralelos aos lineamentos de orientação ENE-WSW, NE-SW e NNW-SSE. Todas estas direções se refletem no terreno na forma de uma rede de fendas que, por vezes, transpõem a caverna.

Medidas estruturais tomadas em campo também estão em consonância com esses dados. Planos de fratura, em sua maioria subverticais, sobretudo de direção NNE-SSW (ex. N016/80 e N190/75) aparecem condicionando condutos e a direção principal de desenvolvimento da caverna. Fraturas de baixo ângulo também estão presentes e também parecem influenciar na dinâmica de arenização e remobilização de elementos. As direções apresentadas no mapa, bem como nos diagramas de roseta para as galerias e fraturas evidenciam uma correlação entre ambas (Fig. 13)

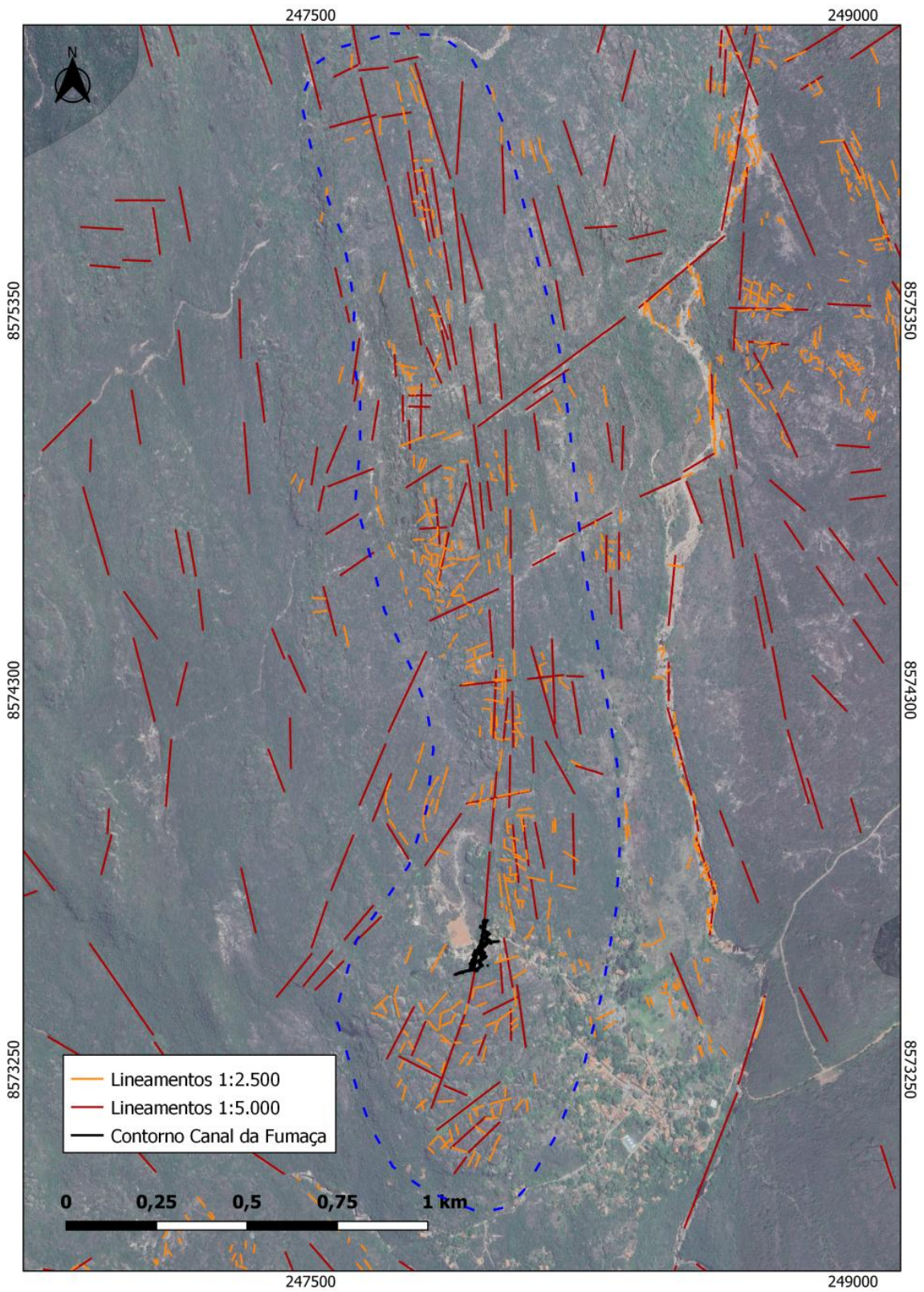


Figura 11. Mapa de lineamentos estruturais evidenciando corredor de deformação aproximadamente N-S (azul) que afeta o desenvolvimento do Canal da Fumaça.

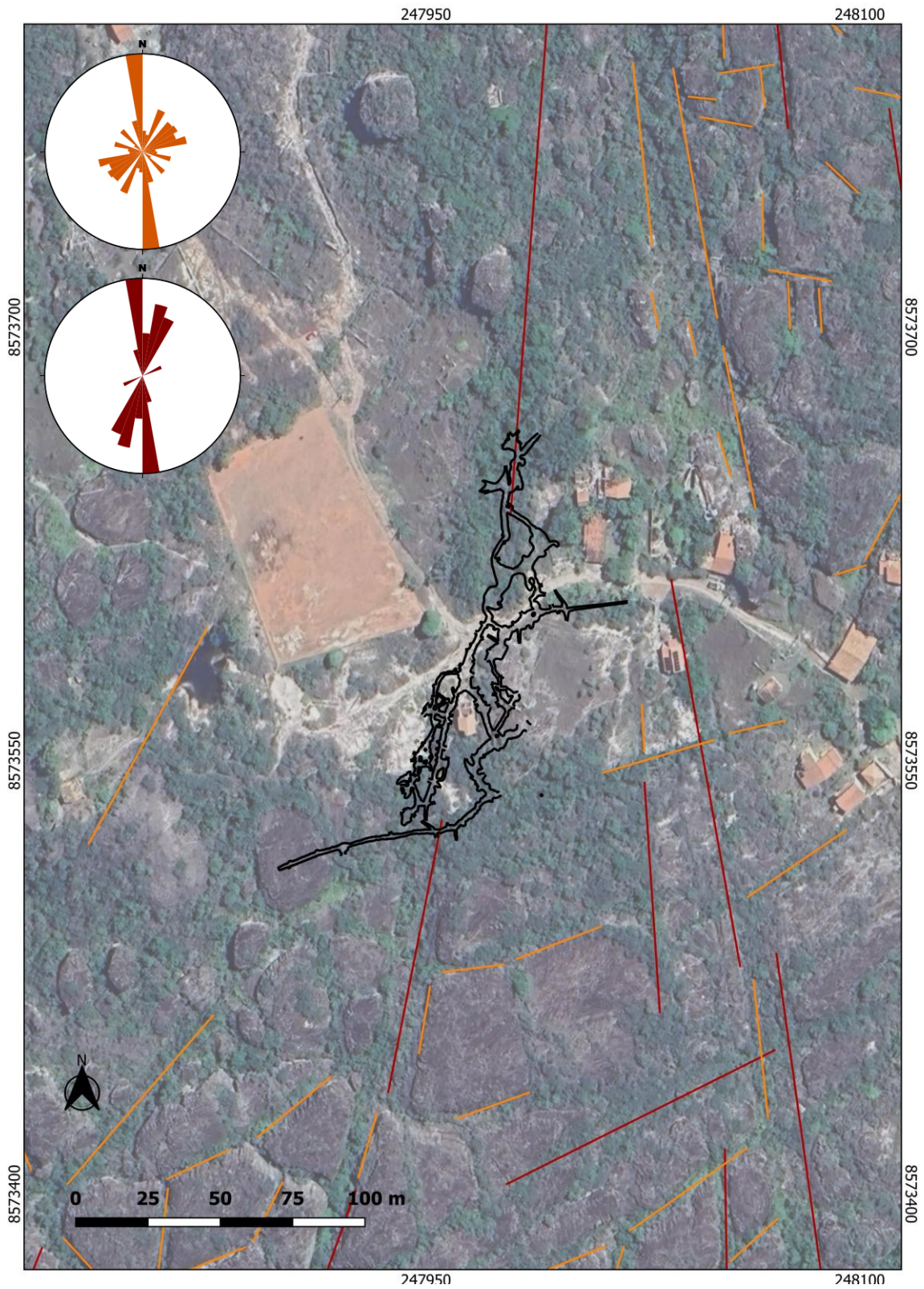


Figura 12. Mapa da Gruta do Canal da Fumaça projetado no terreno, com diagramas de roseta de lineamentos estruturais na escala 1:5.000 (vermelho) e 1:2.500 (laranja) do entorno da caverna.

Por sua vez, o caimento das camadas para N a NE condiciona o fluxo hídrico nesse sentido, influenciando também o desenvolvimento da gruta nesta orientação. Esta correlação é corroborada pela proximidade entre o ângulo de mergulho das camadas (~10°) e o ângulo de inclinação da caverna (9,6°), ambas com sentido de mergulho semelhantes. Reitera-se as ressalvas impostas a esse tipo de análise devido as modificações antrópicas aplicas à cavidade pela atividade garimpeira.

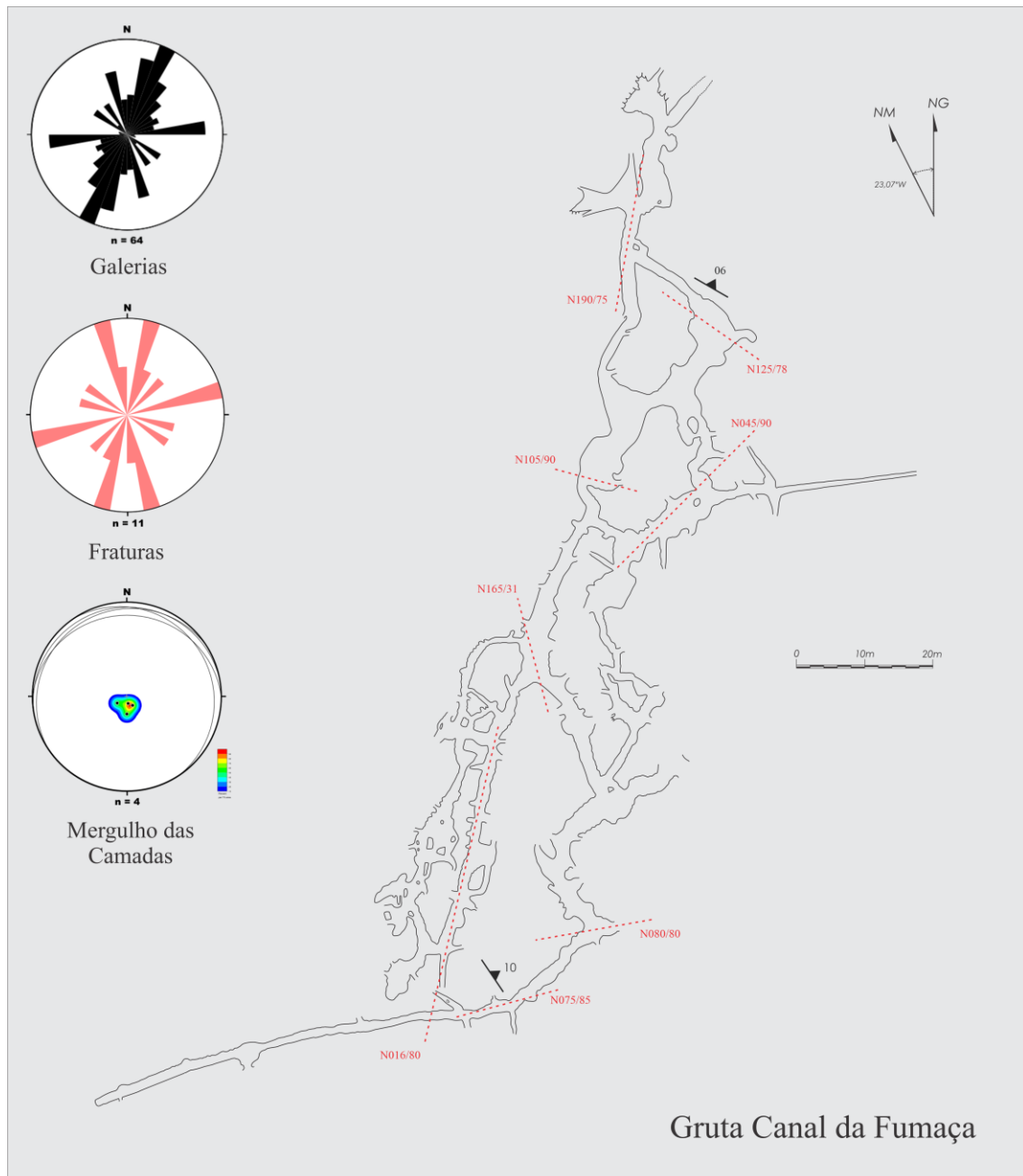


Figura 13. Mapa simplificado da Gruta Canal da Fumaça e planos de fratura, medidos em campo, controlando o desenvolvimento de condutos. Diagramas de roseta apresentam orientação das galerias da gruta e síntese dos planos de fratura, enquanto estereograma apresenta medidas de mergulho das camadas.

A Fig. 14 evidencia a importância das estruturas (planos de fratura de alto e baixo ângulo, bem como acamamento) como frentes de alteração da rocha e geradora de porosidade



Figura 14. Fendas, condutos e salões da Gruta do Canal da Fumaça afetados por planos de fraturas de direção N-S (em vermelho) e acamamento com mergulho variando entre N e NE (em branco), condicionando a direção de desenvolvimento da cavidade.

## IG015 - Gruta Parede Vermelha

A Gruta Parede Vermelha, cuja topografia ainda não foi finalizada, já alcança um desenvolvimento linear de 690m, com projeção horizontal de 663m e desnível total de 54m. Com distância entre extremos de aproximadamente 182m, a inclinação geral da gruta foi calculada em 30% ou 16,6 graus, de SE para NW. O padrão planimétrico pode ser classificado como ramificado curvilíneo a retificado, de acordo com a classificação de Palmer (2012), contando com uma conectividade média, com 57 conexões entre condutos.

A análise de lineamentos estruturais revela que a gruta está situada em uma região de alto fraturamento, sobretudo no leito do Rio Coisa Boa e à leste desse, onde o relevo é ruiforme. À oeste, o terreno é mais suavizado e a presença de estruturas é incipiente. A gruta é atravessada por lineamento de orientação aproximada N-S a NNE-SSW, que se refletem em uma série de fendas paralelas no leito seco do rio. Além disso, observa-se a presença de família de orientação NNW-SSE, NW-SE, WNW-ESE e NE-SW, conforme demonstra o mapa e os diagramas de roseta na Fig. 15.

De modo geral, observa-se que a gruta se desenvolve na direção NW-SE. Galerias de direção NNW-SSE e NE-SW também são marcantes, conforme mapa e diagrama da Fig. 16. Famílias de fraturas de orientação N100/80 e N250/90 condicionam o conduto principal e conduzem a água do pequeno córrego em direção ao leito do rio Coisa Boa (Fig. 17). Por sua vez, fraturas de orientação N185/85 e N155/90 condicionam os condutos secundários, os quais se desenvolvem de modo paralelo ao leito do rio.

Em relação ao acamamento, com mergulho para N-S a NNE-SSW (N285/08), tem-se que o conduto principal se desenvolve subparalelo a direção das camadas (*strike*), enquanto os condutos secundários ocorrem orientados com o mergulho (*dip*). De todo modo, permanece a característica geral da bacia, em que o mergulho das camadas condiciona o fluxo hídrico na direção N a NNE. Os planos de acamamento também condicionam o deslocamento de blocos do teto, sobretudo no truncamento com os planos de fratura, alargando os salões da cavidade (Fig. 17). Cabe destacar que a pequena quantidade de medidas para So (n=2) impõe ressalvas à estatística estrutural para o acamamento.

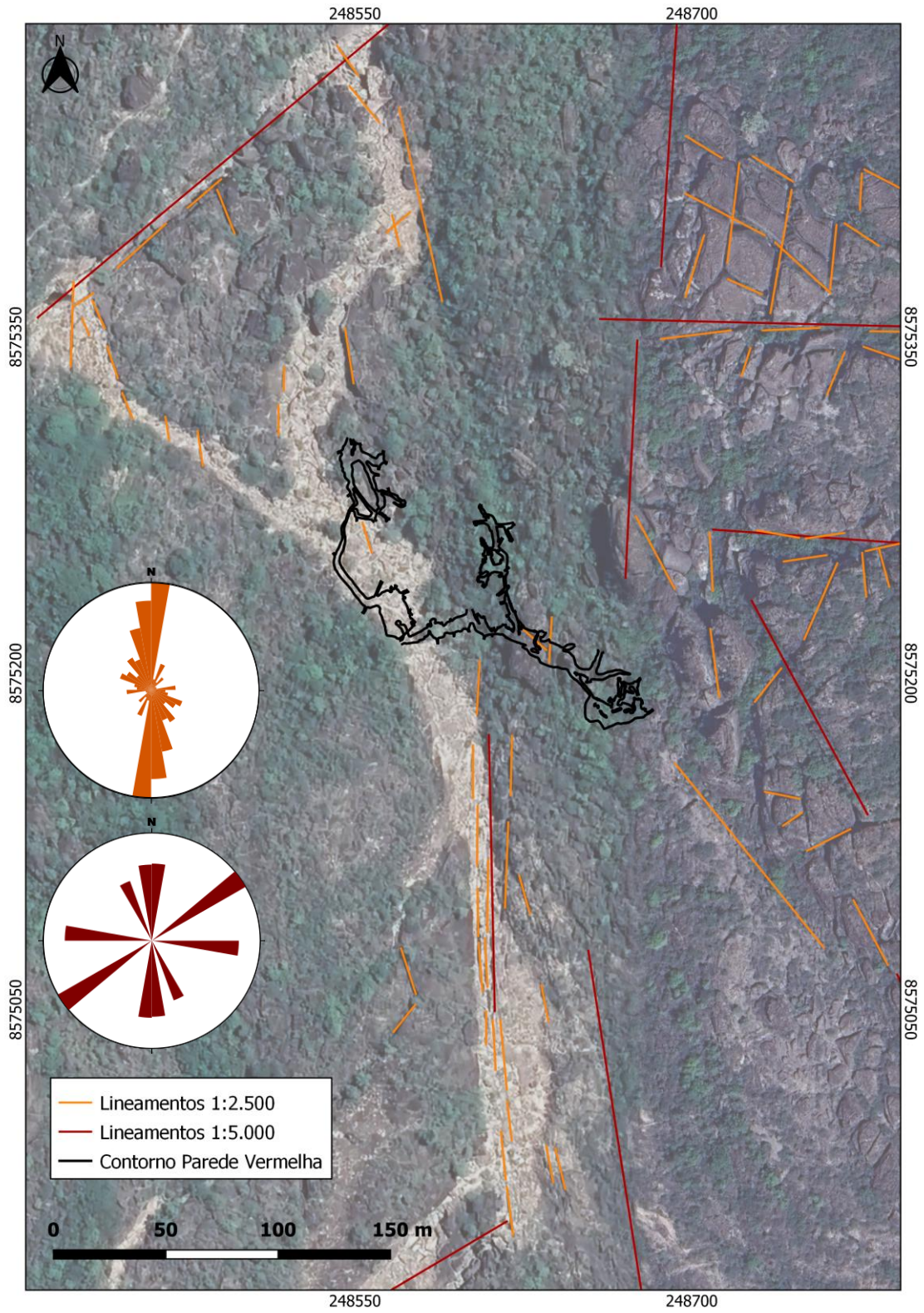


Figura 15. Mapa da Gruta Parede Vermelha e diagramas de roseta de lineamentos estruturais na escala 1:5.000 (vermelho) e 1:2.500 (laranja) do entorno da caverna.

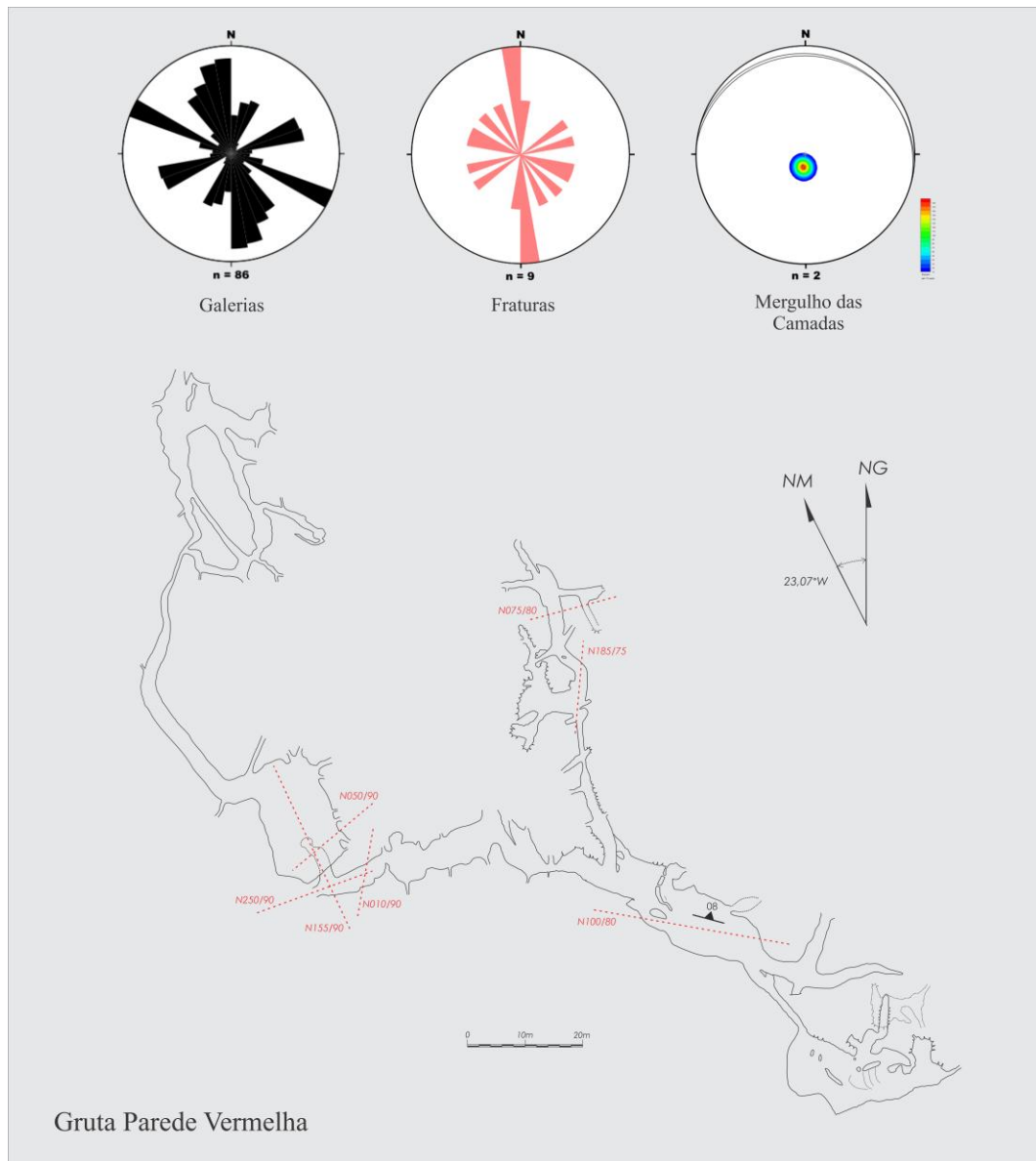


Figura 16. Mapa simplificado da Gruta Parede Vermelha e planos de fratura, medidos em campo, controlando o desenvolvimento de condutos. Diagramas de roseta apresentam orientação das galerias da gruta e síntese dos planos de fratura, enquanto estereograma apresenta medidas de mergulho das camadas.



Figura 17. Planos de acamamento e fratura condicionando desenvolvimento de conduto (esquerda). Plano de fratura condicionando frente de intemperismo e arenização da rocha (direita).

## **IG023 - Gruta do Trianglim**

A Gruta do Trianglim não foi totalmente topografada. Até o momento, o mapeamento soma 300m de desenvolvimento linear, 290m de projeção horizontal e 39m de desnível. Com distância entre extremos, por ora, de aproximadamente 142m, possui inclinação parcial de 27% ou 15,4 graus, de SSE para NNW. Segundo a classificação de Palmer (2012), a cavidade pode ser considerada como de padrão planimétrico ramiforme.

O mapa da Fig. 18 revela que a Gruta do Trianglim está inserida em uma região de média densidade de lineamentos estruturais. Para a escala de 1:2.500 predominam estruturas de orientação NW-SE e NNE-SSW, enquanto para a escala de 1:5.000 predominam as direções NW-SE, NNW-SSE e NE-SW. As estruturas estão marcadas, principalmente, nas faces escarpadas e algumas fraturas no topo do morro onde a gruta se desenvolve. Sua entrada está posicionada em uma dessas vertentes escarpadas, cuja face está orientada na direção NNW-SSE.

O desenvolvimento geral da gruta se dá nessa mesma direção (NNW-SSE). O primeiro salão tem uma orientação mais clara, com laterais paralelas a esta direção, além de paredes orientadas na direção NE-SW. Por outro lado, o restante da gruta é marcado por um conduto meandrante e de laterais arredondadas, sem condicionamento estrutural bem marcado.

Uma vez que, ao longo da segunda campanha de campo, a digitalização do mapa da Gruta do Trianglim não havia sido concluída, não foi possível plotar as estruturas reconhecidas nos condutos e salões da cavidade. Entretanto, foi possível gerar os diagramas de roseta para as galerias da caverna e os planos de fratura, bem como estereogramas para os planos de acamamento medidos *in loco* (Fig. 19). Vê-se uma correspondência direta entre as direções de galerias e planos de fraturas. Apesar da família de fraturas de direção NNE-SSW ser a mais numerosa, as galerias se desenvolvem principalmente paralelas à família de direção NNW-SSE.

Por sua vez, o mergulho das camadas, com ângulos entre 5 e 12°, tem caimento variando entre N e NE. Sendo assim, a caverna se desenvolve ora subparalela ao mergulho e ora subparalela à direção das camadas. O truncamento desses planos com as fraturas subverticais controla o deslocamento de blocos e o alargamento dos salões (Fig. 20).

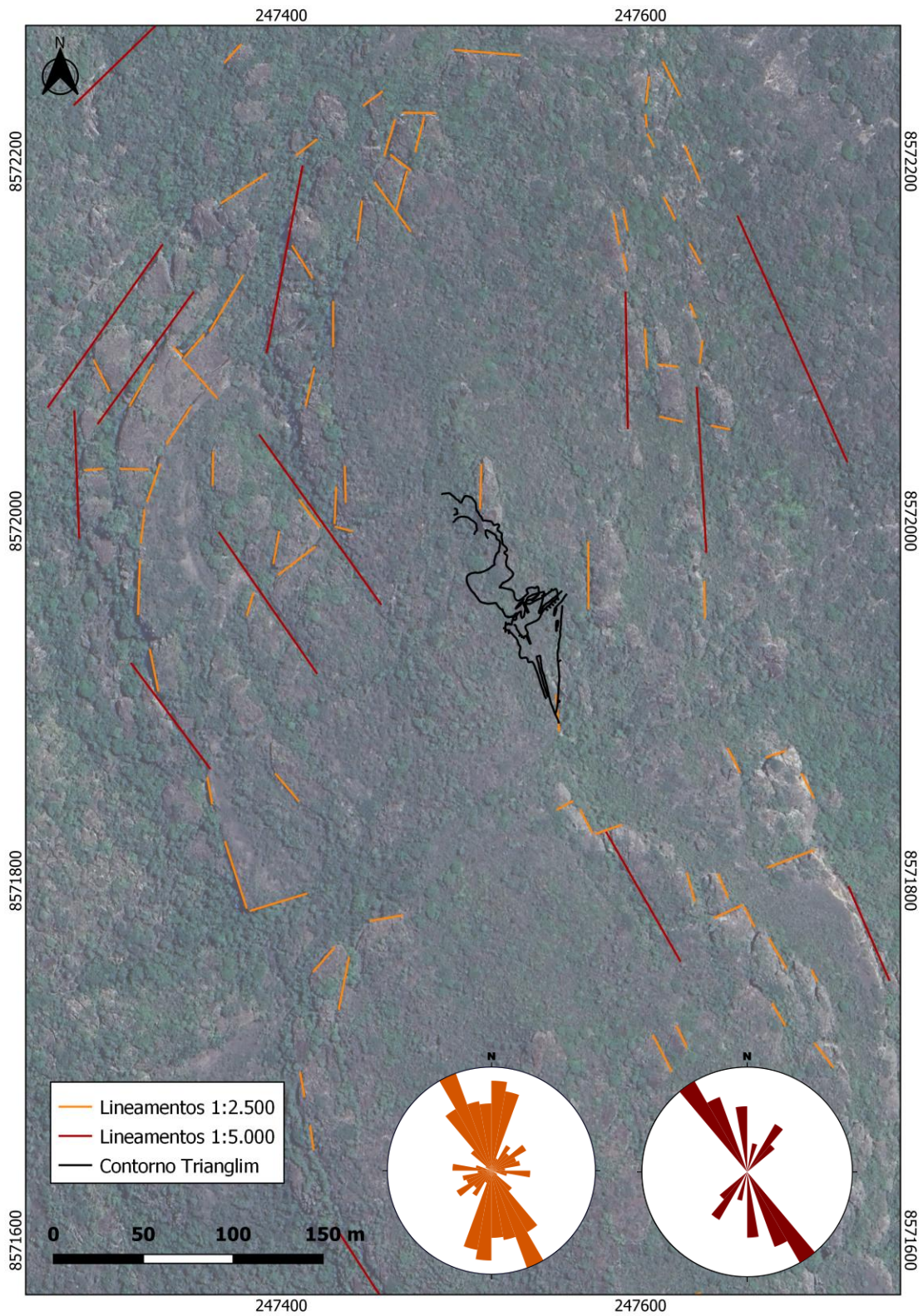


Figura 18. Mapa da Gruta do Trianglim e diagramas de roseta de lineamentos estruturais na escala 1:5.000 (vermelho) e 1:2.500 (laranja) do entorno da caverna.

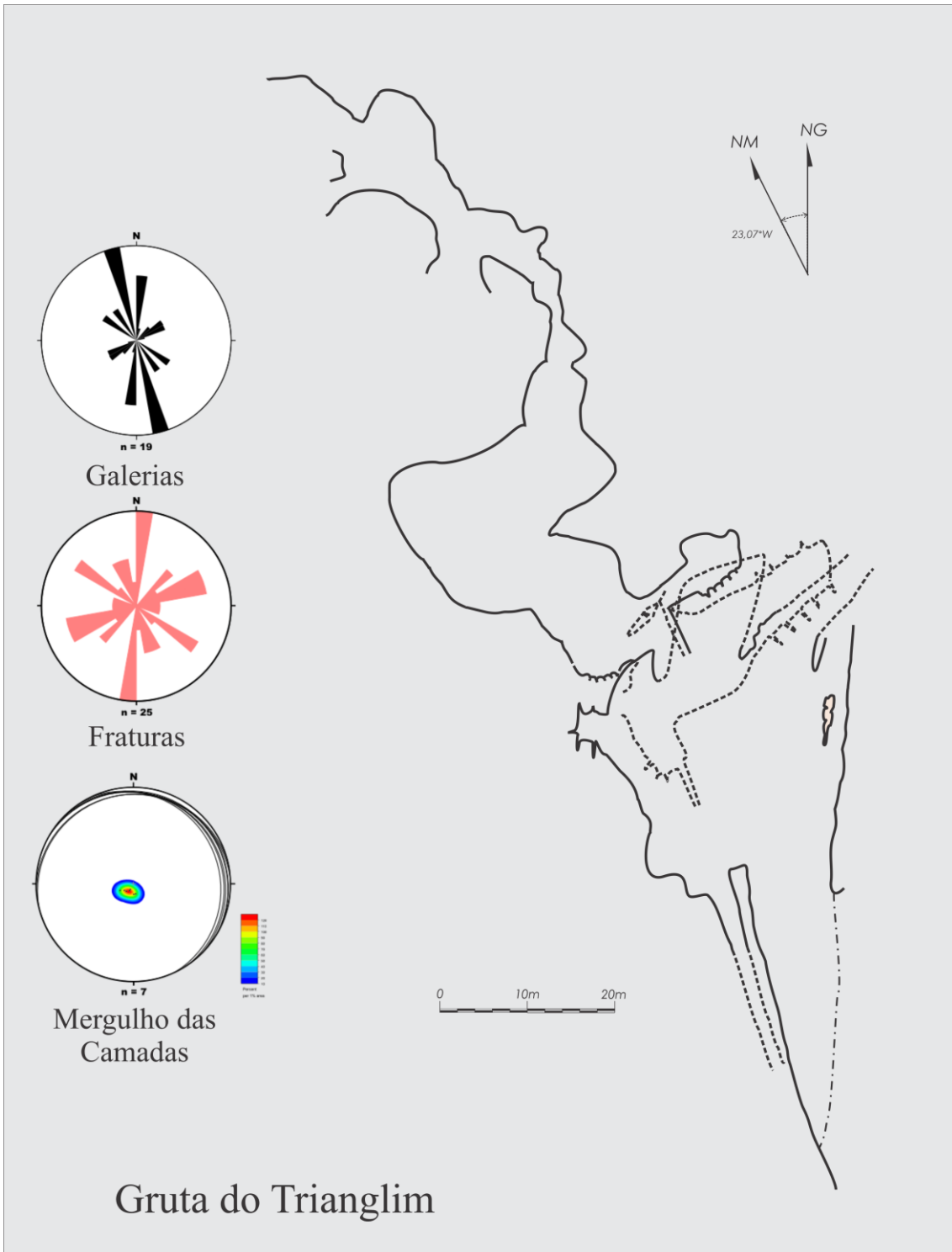


Figura 19. Mapa simplificado da Gruta do Trianglim. Diagramas de roseta apresentam orientação das galerias da gruta e síntese dos planos de fratura, enquanto estereograma apresenta medidas de mergulho das camadas.

Na Gruta do Trianglim é possível se observar, também, como as estruturas (planos de fratura e de acamamento) influenciam na formação de depósitos químicos secundários (espeleotemas), uma vez que estes planos funcionam como meios de maior percolação de água - enriquecida em sílica e outros elementos. Ao auxiliarem na remobilização da sílica, essas estruturas também estão cooperando com o desenvolvimento do carste.



Figura 20. Acima: deslocamento de blocos controlado pelo truncamento de planos de fratura e planos de acamamento, alargando salão. Abaixo: influência das estruturas na precipitação de espeleotemas de grande diversidade na Gruta do Trianglim.

## IG024 - Gruta do Teté

A topografia da Gruta do Teté foi iniciada na última campanha de campo, somando 408m de desenvolvimento linear, 404m de projeção horizontal e 12m de desnível. Com distância entre extremos de aproximadamente 254m, a inclinação total da gruta é de 4,7% ou 2,7 graus de SW para NE. Seu padrão planimétrico pode ser classificado como linear meandrante a retificado. A conectividade da caverna é muito baixa, visto que se trata de um conduto principal com um único conduto secundário ortogonal.

A Gruta do Teté está situada no divisor de águas entre a Bacia do Rio Coisa Boa (NE) e a Bacia do Rio Paraguaçu (SW), em uma zona de alta densidade de lineamentos estruturais. Essas estruturas são marcadas no relevo como planos de fraturas praticamente ortogonais, seccionando os topos e as bordas do morro, individualizando blocos e formando vertentes escarpadas, em um relevo ruiforme. O mapa e os diagramas de roseta da Fig. 21 demonstram que as principais famílias de lineamentos que afetam o entorno da Gruta são de orientação NNE-SSW e NE-SW, além de famílias NW-SE, de forma secundária.

Essas direções se refletem no desenvolvimento da cavidade sobretudo no setor leste, onde o conduto principal é orientado segundo a direção NNE-SSW, paralelo aos planos de fratura que mais afetam a área de gruta (N024/90). Por outro lado, o setor oeste do conduto principal se desenvolve com orientação aproximada E-W, direção essa que praticamente não é visualizada entre as famílias de lineamentos no relevo. Por fim, os planos de direção NW-SE orientam as faces das vertentes escarpadas do morro, onde a caverna se conecta com a superfície.

Já o mapa da Fig. 22 mostra que, apesar da direção E-W não se refletir nos lineamentos no relevo, foi identificado plano de fratura de orientação N080, no teto, controlando a evolução do conduto principal no setor oeste da gruta. Além disso, estes condutos são subparalelos a direção das camadas (*strike*), de orientação ENE-WSW e mergulho de 15° para NNW (Fig. 23). Destaca-se que mais medições de planos de fratura e acamamento são necessárias para aumentar o rigor estatístico das análises.

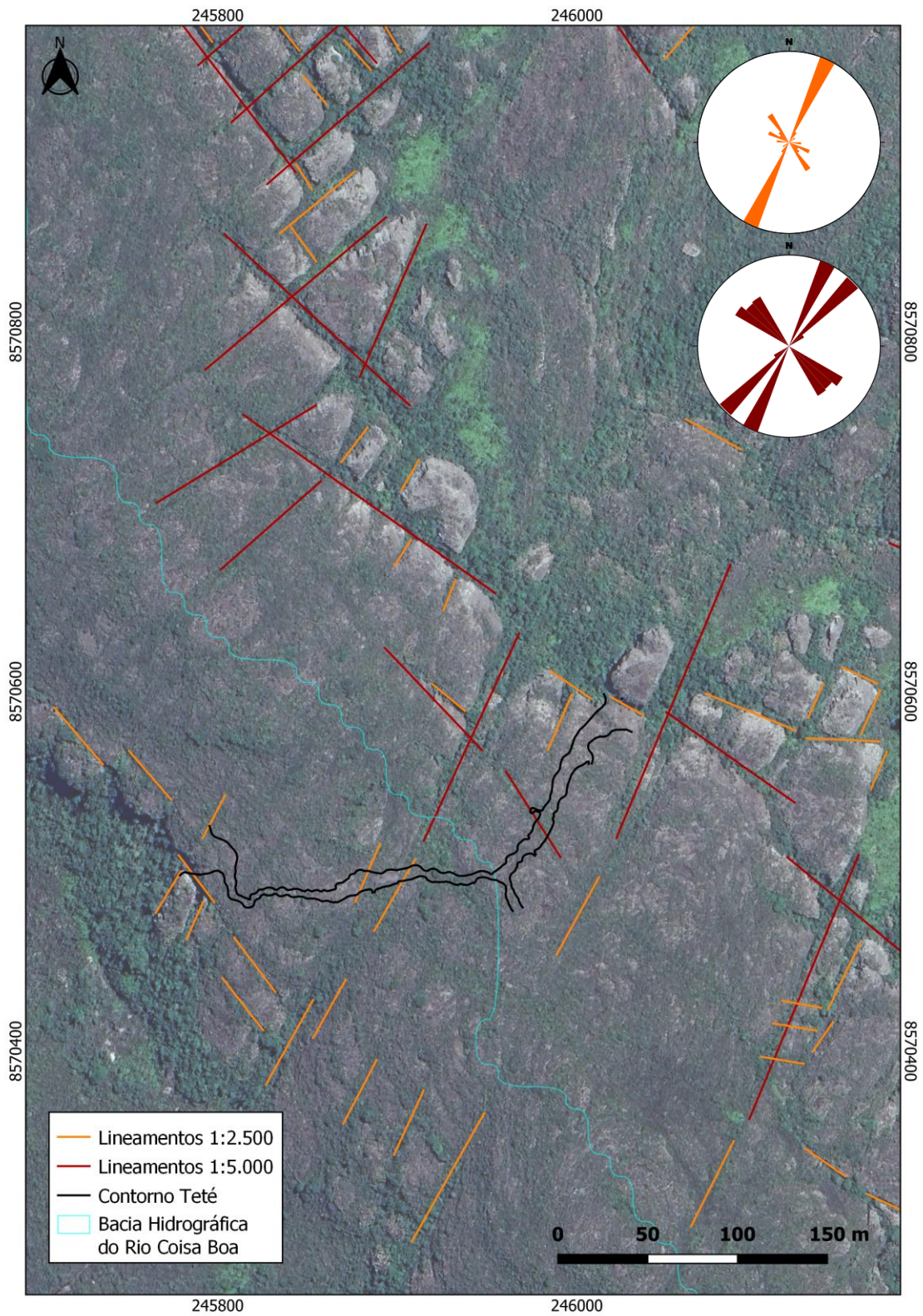


Figura 21. Mapa da Gruta do Teté e diagramas de roseta de lineamentos estruturais na escala 1:5.000 (vermelho) e 1:2.500 (laranja) do entorno da caverna.

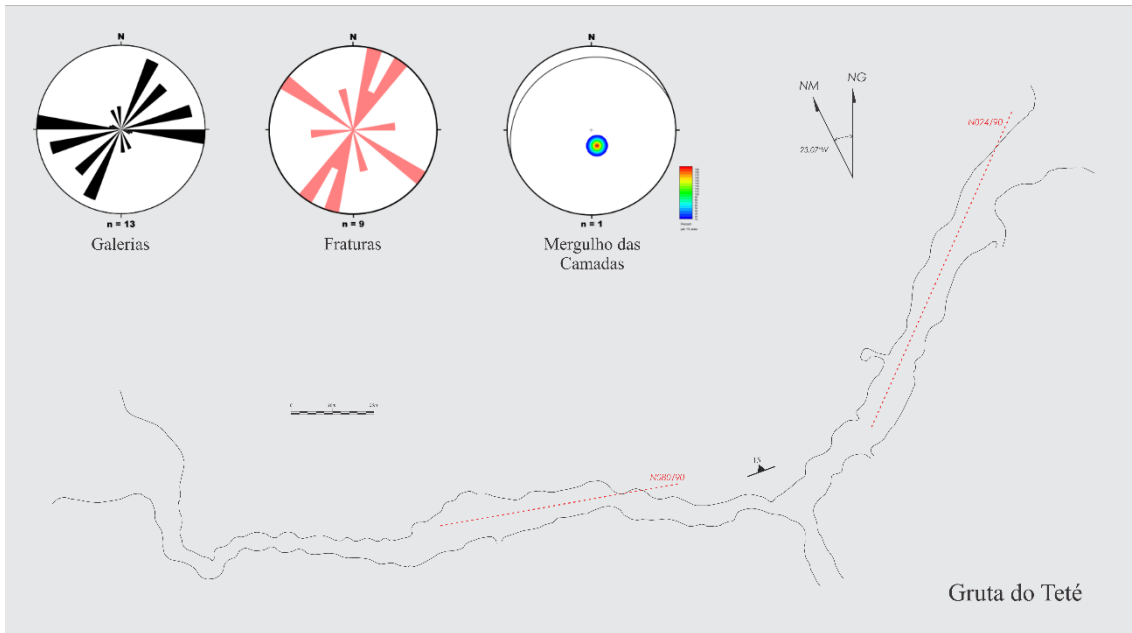


Figura 22. Mapa simplificado da Gruta do Teté e planos de fratura, medidos em campo, controlando o desenvolvimento de condutos. Diagramas de roseta apresentam orientação das galerias da gruta e síntese dos planos de fratura, enquanto estereograma apresenta medidas de mergulho das camadas.



Figura 23. Galeria principal da Gruta do Teté mostrando plano de fratura de direção N080 condicionando conduto e planos de acamamento N250/15.

## **IG029 - Gruta de Torras**

A Gruta de Torras, a cavidade mais expressiva em dimensões na área de estudo, tem o mapeamento completo, alcançando 3.607m de desenvolvimento linear, 3558m de projeção horizontal e 213m de desnível. A distância entre seus extremos é de cerca de 1.400m, sendo sua inclinação geral calculada em 15% ou 8,6 graus de SSE para NNW. O padrão planimétrico da gruta pode ser descrito como linear meandrante a retilíneo, ou ramificado curvilíneo, de acordo com a classificação de Palmer (2012). O número de conexões entre condutos é de 105, o que pode ser considerado baixo para as dimensões da cavidade. Além disso, muitos dos condutos laterais parecem ser artificiais, visto que a gruta também sofreu forte impacto do garimpo.

Observando os lineamentos estruturais, no mapa e diagramas de roseta da Fig. 24, vê-se que a gruta está inserida em uma área com alta densidade de lineamentos em suas porções sul e norte. Nessas áreas, os maciços rochosos muito fraturados formam relevos de padrão ruiforme. Na sua região central, a quantidade de estruturas é menor, onde o relevo é mais suavizado. Nota-se um predomínio de famílias de lineamentos com orientação NNW-SSE e N-S, para além de NE-SW e NNE-SSW de forma secundária e, por fim, estruturas próximas a direção E-W, de modo mais incipiente.

Esta predominância de lineamentos de direção NNW-SSE e N-S coincide com a direção de desenvolvimento principal da caverna e com a orientação da maior parte de seus condutos, conforme se vê no mapa e diagrama de roseta de galerias da Fig. 25. Medidas de planos de fratura também evidenciaram as direções NNW-SSE e NW-SE, para além da direção NE-SW, condicionando o desenvolvimento de condutos. O mergulho das camadas para N é concordante com o padrão da bacia, e conduz o fluxo hídrico para esta direção (Fig. 26). Entretanto, número de medidas, tanto de fraturas quanto de acamamento é baixo para uma estatística confiável.

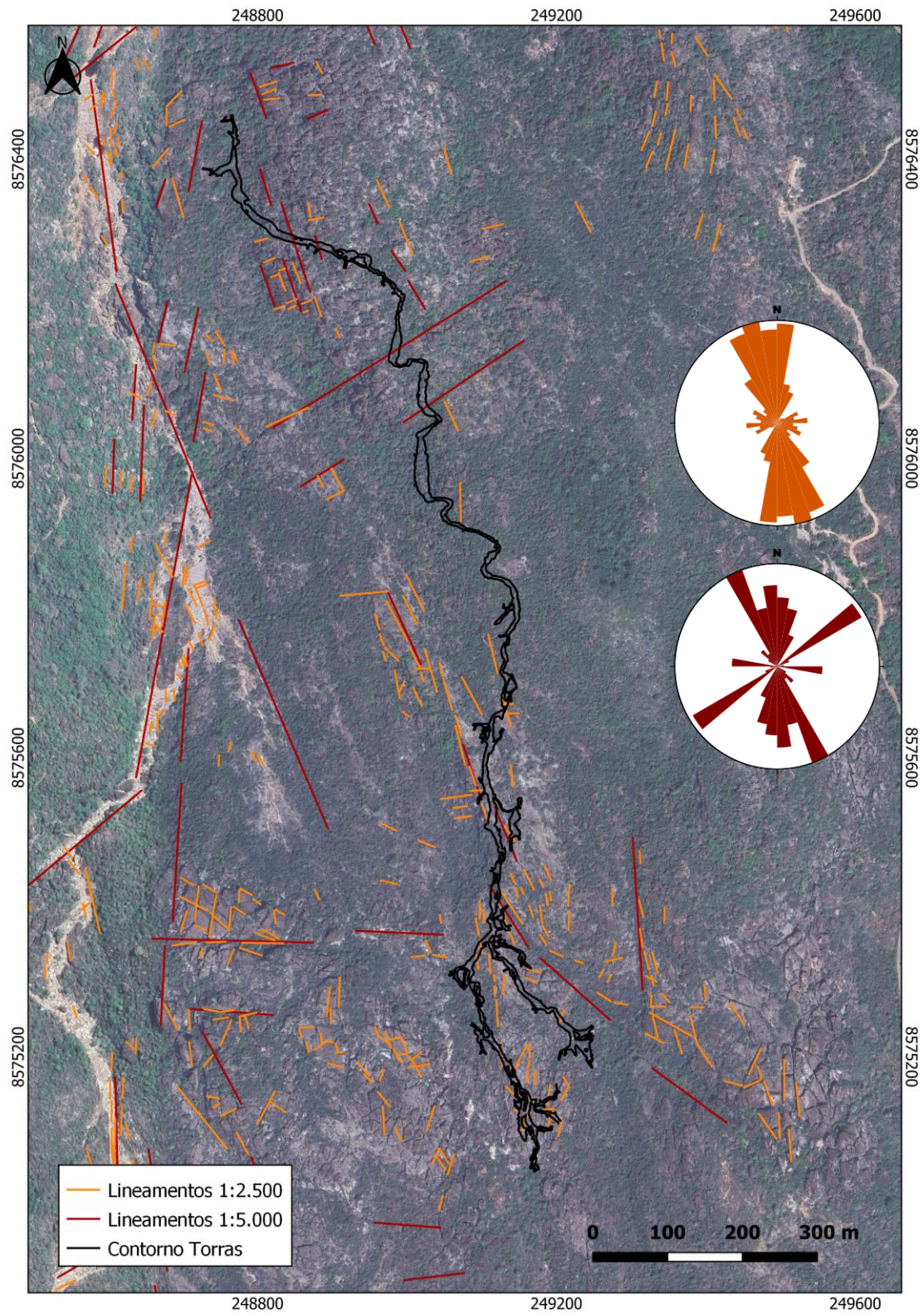


Figura 24. Mapa da Gruta de Torras e diagramas de roseta de lineamentos estruturais na escala 1:5.000 (vermelho) e 1:2.500 (laranja) do entorno da caverna.

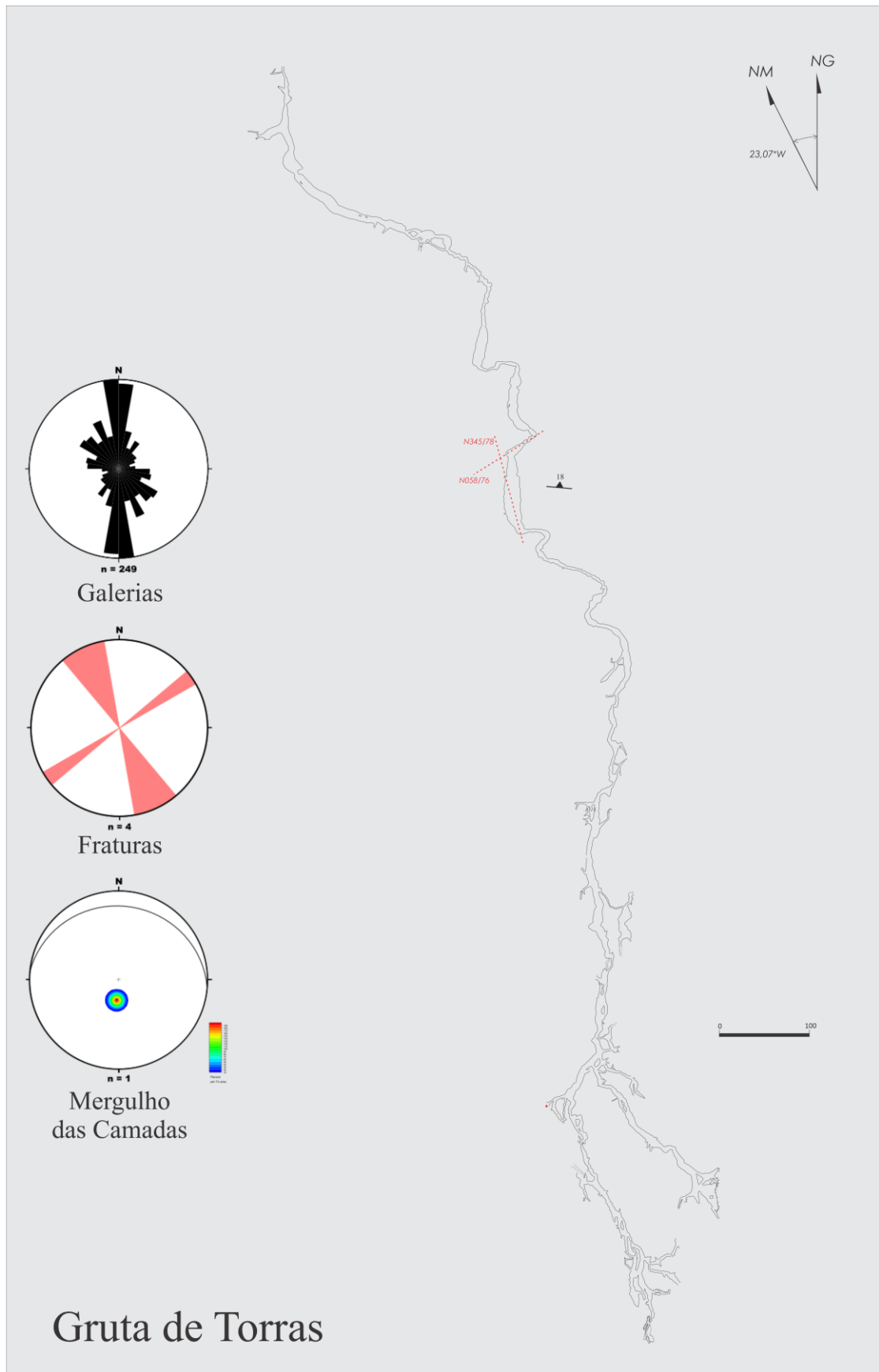


Figura 25. Mapa simplificado da Gruta de Torras e planos de fratura, medidos em campo, controlando o desenvolvimento de condutos. Diagramas de roseta apresentam orientação das galerias da gruta e síntese dos planos de fratura, enquanto estereograma apresenta medidas de mergulho das camadas.

Cabe destacar também que, na Gruta das Torras, tanto os planos de fratura como planos de acamamento auxiliam na remobilização do ferro, que é solubilizado da rocha e então precipitado acompanhando esses planos (Fig. 26). A mobilidade desse elemento pode influenciar, também, no processo de alteração da rocha e, conseqüentemente, com a carstificação e espelogênese.

Autores como Auler et al. (2022) têm se debruçado sobre o papel da remobilização do ferro na formação de cavernas, sobretudo em rochas ferruginosas. Sabe-se que a solubilidade do Fe aumenta em pH baixo (Mason, 1952), condição que é observada na água da área de estudo (Auler et al., 2018). Além disso, quartzo/sílica e ferro intensificam a solubilidade um do outro, quando ocorrem juntos (Reardon, 1979; Sasowsky et al., 2000; Kinsela et al., 2016). Por fim, tem-se também que a precipitação do ferro tem relação com reações de oxidação e redução, que são influenciadas por diversos fatores, como pH e oxigenação do ambiente (Morris e Fletcher, 1987). Maiores estudos são necessários para compreender o papel da remobilização do Fe na formação e/ou evolução da Gruta de Torras.



Figura 26. Plano de fratura N345/78 que condiciona o desenvolvimento de conduto, favorece a percolação de fluídos e a precipitação de óxidos de ferro. Planos de acamamento N275/78 favorece o deslocamento do teto e conseqüente, alargamento dos salões.

## Sistema Rio dos Pombos

O Sistema Rio dos Pombos é caracterizado por uma série de feições cársticas situadas no rio homônimo, tal como vale cego, sumidouros e ressurgências. As cavidades pertencentes a esse sistema ainda não foram topografadas, apesar de já terem sido exploradas e avaliadas através de medidas estruturais.

O vale desse rio ocorre de modo encaixado e retificado, segundo lineamento expressivo de orientação NW-SE, observado em campo se tratar de uma zona de falha normal, subvertical, de direção N140. O escoamento superficial se dá por fraturas e planos de falha paralelos a esse lineamento. De forma praticamente ortogonal, lineamentos menores orientados nas direções NNE-SSW e NE-SW seccionam o rio, formando ressurgências em sua margem direita e sumidouros na margem esquerda (Fig. 27).

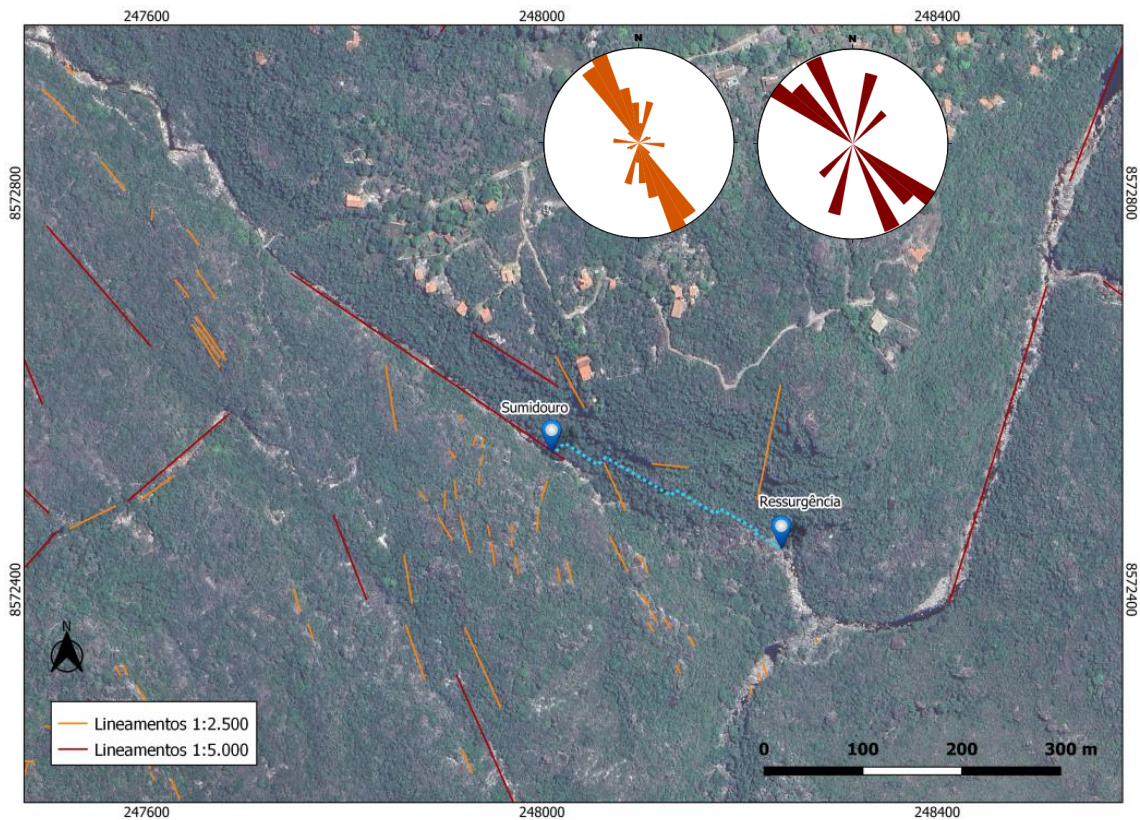


Figura 27. Mapa do Sistema Rio dos Pombos e diagramas de roseta de lineamentos estruturais na escala 1:5.000 (vermelho) e 1:2.500 (laranja) do entorno da caverna.

O principal sumidouro do rio é condicionado por planos de fratura de direção N040 e N060. À jusante desse ponto, o leito do rio em superfície se torna seco, com acúmulo de bancos de areias e grandes blocos de rocha. O fluxo hídrico passa a ser subterrâneo, por cerca de 250m, ressurgindo por entre matacões de metaconglomerados já quase na

confluência com o Rio Coisa Boa. Na zona de ressurgência do rio é onde ocorre a cavidade mais expressiva associada a este sistema, na qual a água corre por condutos ortogonais em padrão ramificado retilíneo (Palmer, 2012), orientados nas direções N050 e N140.

O diagrama de roseta com a síntese dos planos de fratura (Fig. 28) evidencia o predomínio de orientação dessas estruturas nas direções NE-SW e NW-SE, praticamente ortogonais e concordantes com as direções dos lineamentos no relevo e dos condutos no sumidouro e ressurgência do sistema (N050 e N140). Já o estereograma com os acamamentos medidos aponta para um mergulho que varia entre NNW-SSE e NNE-SSW, que auxiliam no direcionamento do fluxo no sentido de SW para NE.

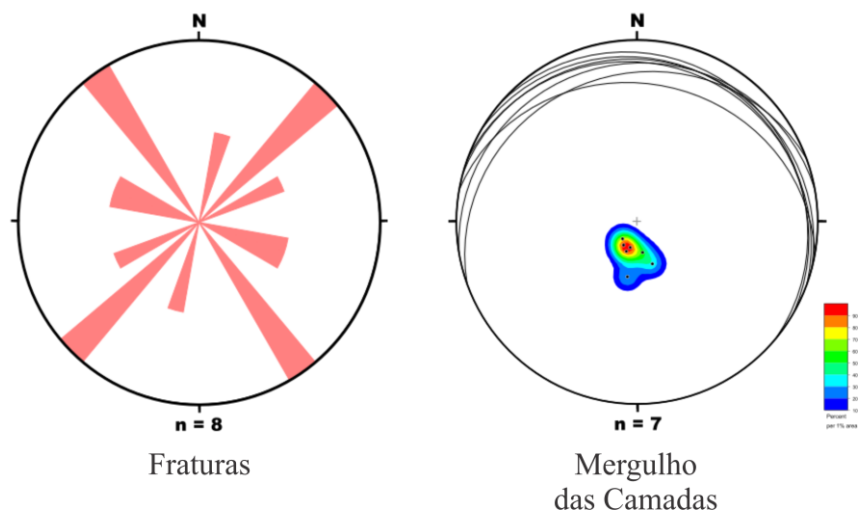


Figura 28. Diagrama de roseta para planos de fratura e estereograma com planos de acamamento, medidos em campo, para o Sistema Rio dos Pombos.

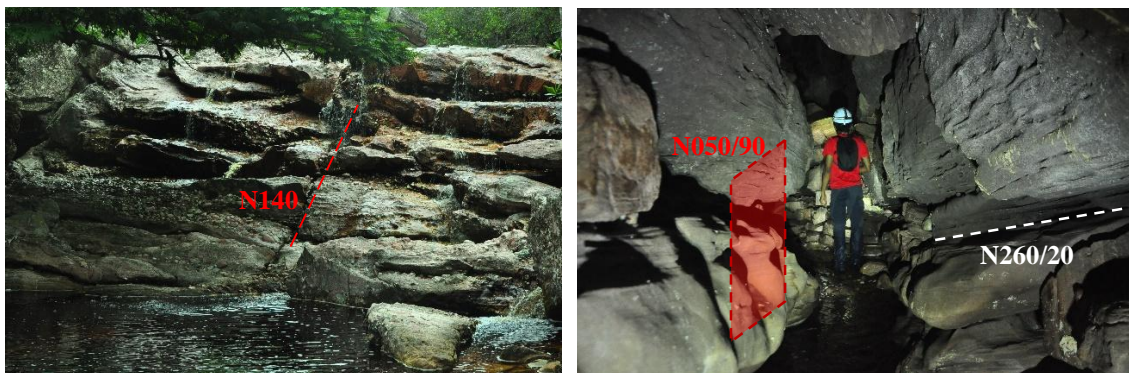


Figura 29. Planos de fratura N050 e N140 condicionando fluxo hídrico e condutos de caverna no Sistema Rio dos Pombos. O mergulho das camadas atua conduzindo o fluxo para N a NE.

Observações e medidas em campo evidenciam que o lineamento sobre o qual corre o Rio dos Pombos corresponde a uma zona de falha de orientação N140, na qual se identificam planos de falha de alto ângulo (subverticais), com deslocamento marcado em veios de quartzo estriado, com alto *reike*. Também é possível observar rochas de granulação fina com foliação milonítica verticalizada. Encaixados nestes planos, também ocorrem intrusões de diques básicos. Interpreta-se essa estrutura como uma falha de tensão (T), paralela à direção de esforço na fase D<sub>2</sub>, sugerindo para o  $\sigma_1$  uma orientação NW-SE.

## CONCLUSÕES

Através da análise de lineamentos e das medidas obtidas ao longo das duas campanhas de campo, foram identificadas uma série de estruturas que afetam os metarenitos e metaconglomerados da Formação Tombador na área de estudo. Buscou-se estabelecer uma correlação entre as estruturas identificadas com aquelas previstas e consagradas na literatura científica.

Apesar do mapeamento estrutural não ser o foco desse trabalho, a observação das estruturas é extremamente importante para a compreensão da dinâmica hídrica e cárstica. Observou-se uma forte correlação entre o desenvolvimento das cavernas com estruturas locais, tais como planos de fratura (falhas e juntas), de alto e baixo ângulo, bem como no mergulho das camadas.

Cabe destacar que essas estruturas são, por si só, um fator inicial de geração de porosidade (porosidade secundária). Para além disso, atuam como planos preferenciais de percolação de água, servindo como frentes de intemperismo da rocha, onde processos de arenização vão agir com maior intensidade, criando condições para o desenvolvimento de condutos (porosidade terciária ou cárstica).

Portanto, pode-se dizer que a geologia estrutural foi estudada e caracterizada em escala macro (através da extração de lineamentos regionais) e meso (através das medidas e observações de campo). Recomenda-se, agora, que se avance também para a descrição de estruturas em escala micro, que poderão ser identificadas na petrografia (microscopia óptica e MEV), auxiliando também na compreensão da geração da porosidade.

## REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F.; CHEMALE JÚNIOR, F.; ENDO, I. A deformação das coberturas proterozoicas do Cráton do São Francisco e o seu significado tectônico. **Revista da Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 49, n. 1, p. 22-37, 1996.
- ALMEIDA, F.F. 1977. O Cráton do São Francisco. **Rev. Brasil. Geociên.** 4, 349–364.
- AULER, A. S.; MEUS, P.; PESSOA, P. F. P. Water Tracing Experiments in Low-pH Quartzite Karst Water, Chapada Diamantina, Northeastern Brazil. **Eurokarst 2018**, p. 183-191, 2018.
- A. S. AULER, H. A. BARTON, B. ZAMBELLI, J. SENKO, CETH W. PARKER, IRA D. SASOWSKY, T.A.R. SOUZA, D. PUJONI, J. PEÑARANDA, R. DAVIS, Silica and iron mobilization, cave development and landscape evolution in iron formations in Brazil, **Geomorphology**, Volume 398, 108068, 2022.
- BABINSKI, M. Contribuição à geocronologia da Chapada Diamantina. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 7; Simpósio Internacional de Tectônica da SBG, 1999, Lençóis. **Anais...** Salvador: SBG, 1999. P. 118-120.
- BOMFIM, L.F.; PEDREIRA, A.J. **Geologia da Chapada Diamantina Oriental, Bahia (Folha Lençóis)**. In: BOMFIM, L.F. & PEDREIRA, A.J., Orgs, - Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Lençóis (Folha SD.24-V-A-V) Estado da Bahia, Texto Explicativo. Brasília, DNPM/CPRM, p.25-73. 1990.
- CRUZ, S. C. P.; ALKMIM, F. F. A história de inversão do aulacógeno do Paramirim contada pela sinclinal de Ituaçu, extremo sul da Chapada Diamantina (BA). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37 (n. 4 – suplemento), p. 92-110, 2007.
- CRUZ, S. C. P.; ALKMIM, F. F. The Tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí Belt, São Francisco craton region, Eastern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n.1, p. 151-173, 2006.
- DANDERFER, A. F. **Análise estrutural descritiva e cinemática do supergrupo Espinhaço na região da Chapada Diamantina (BA)**. 1990. 119 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1990.

FOSSEN, H. **Geologia Estrutural**. Tradução Fábio R. D. de Andrade. São Paulo: Oficina de Textos, 2ª ed. atualizada e ampliada, 2017. ISBN 978-85-7975-283-4.

GUIMARÃES, J. T. **Projeto Ibitiara – Rio de Contas: Estado da Bahia**. Salvador: CPRM, 2005. Inclui 3 mapas. Escala 1:200.000. Programa Recursos Minerais do Brasil.

Guimarães, J.T.; Alkmim, F.F.; Cruz, S.C.P. In: Barbosa, J.S.F. et. al. (Coords.) **Geologia da Bahia**, Pesquisa e Atualização, Salvador: CBPM, Série Publicações Especiais, 13, 2012. 33 – 85.

JARDIM DE SÁ, E. F.; BARTELS, R. L.; BRITO NEVES, B.B.; MCREATH, I. Geocronologia e o modelo tectonomagmático da Chapada Diamantina e do Espinhaço Setentrional, Bahia. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 29, **Anais**, p. 205-227, 1976.

KINSELLA, A.S., JONES, A.M., BLIGH, M.W., PHAM, A.N., COLLINS, R.N., HARRISON, J.J., WILSHER, K.L., PAYNE, T.E., WAITE, T.D., 2016. Influence of dissolved silicate on rates of Fe(II) oxidation. **Environ. Sci. Technol.** 50, 11663–11671.

LOUREIRO, H. S. C. et al. (Org.) **Projeto Barra – Oliveira dos Brejinhos: Estado da Bahia**. Salvador: CPRM, 2008. Relatório interno.

MAIA, C.M. **Caracterização estrutural, geométrica e cinemática, das formações Tombador e Açuruá na região Sul do Município de Lençóis, Chapada Diamantina - Bahia**. 2011, 103p. Trabalho Final de Graduação, Curso de Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MOITINHO, A.O. **Análise estrutural geométrica e cinemática das Formações Açuruá, Tombador e Caboclo no entorno da cidade de Andaraí, região da Chapada Diamantina - Ba**. 2011, 88p. Trabalho Final de Graduação, Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MASON, B. **Principles of Geochemistry**, 2nd ed., New York, 1962, 310p.

MORRIS, R.C., FLETCHER, A.B. Increased solubility of quartz following ferrous-ferric iron reactions. **Nature**, 330, 558–56, 1987.

PALMER, A. N. Passage growth and development. In: WHITE, W. B.; CULVER, D. C. (Eds) **Encyclopedia of Caves**, 2nd edn.1259 Elsevier/Academic Press, Amsterdam, p. 598–603, 2012.

REARDON, E.J. Complexing of silica by iron(III) in natural waters. **Chem. Geol.** 25, 339–345, 1979.

SALAMUNI, E. **Power Point de aula sobre regimes tectônicos.** Curso de Graduação sobre Geologia Estrutural. UFPR- Curitiba-PR. 2007.

SANTANA, A.S. **Análise geométrica e cinemática dos elementos litoestruturais das formações Açuruá, Tombador e Caboclo na região Norte de Lençóis – Chapada Diamantina – Bahia.** 2011, 79p. Trabalho Final de Graduação, Curso de Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

SANTOS, J.S. **Análise cinemática e dinâmica das estruturas das formações Tombador e Açuruá na porção Sul da Serra do Sincorá, nos arredores das cidades de Barra da Estiva e Ibicoara/Chapada Diamantina, Bahia.** 2011, 143p. Trabalho Final de Graduação, Curso de Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SASOWSKY, I.D., FOOS, A., MILLER, C.M. Lithic controls on the removal of iron and remediation of acidic mine drainage. **Water Research.** 34, 2742–2746, 2000.

SCHOBENHAUS, C. As tafrogêneses superpostas Espinhaço e Santo Onofre, Estado da Bahia: revisão e Novas propostas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 26, n. 4, p. 265-276, 1996.

SOUZA, A. S. **Estudo Petrográfico e Petrológico da Formação Tombador, Mesoproterozóico da Chapada Diamantina, Bahia.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2017. 73p.

**ANEXO 5**

**PETROGRAFIA DE ROCHAS**

**E ESPELEOTEMAS**

# **MICROSCOPIA ÓPTICA**

## **INTRODUÇÃO**

O presente anexo é referente a caracterização petrográfica através da descrição de lâminas delgadas de rocha e espeleotemas, através de microscópio óptico, no âmbito do subprojeto “Geoespeleologia do Carste Siliciclástico da Formação Tombador: Subsídios à Conservação do Patrimônio Espeleológico na Chapada Diamantina”. A área de estudo desse projeto contempla a Bacia do Rio Coisa Boa, área que abrange a Vila de Igatu (antiga Xique-Xique de Igatu), distrito do município de Andaraí, na Chapada Diamantina, Bahia.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Amostras de rocha e espeleotemas, coletadas nos sistemas de cavernas da área de estudo, foram submetidos à preparação e descrição de lâminas delgadas e polidas. As lâminas foram preparadas, no Laboratório de Laminação da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. A descrição petrográfica foi realizada através de microscópio óptico OPTON e a captura das microfotografias foi feita no *software* OptView, em laboratório da mesma universidade.

## **ESTADO DA ARTE**

Trabalhos de caracterização petrográfica já foram desenvolvidos para a Formação Tombador na Serra do Sincorá, região da área de estudo. Varajão e Gomes (1997) e Battilani *et al.* (1999) identificam, através de estudos de cristalinidade (DRX) e morfologia (MEV) de argilominerais (ilita e caulinita), para além da presença da pirofilita, um grau de diagênese avançada a baixo metamorfismo para os metarenitos da Formação Tombador. Segundo esses autores, o grau aumenta em direção a sul. Santos (2011) apresentam algumas descrições petrográficas voltadas para o estudo de deformação tectônica. Segundo o autor, a matriz fina da rocha, que por vezes marca uma foliação, sobretudo em zonas miloníticas, é constituída por sericita. Além disso identifica grãos de quartzo com extinção ondulante. Mais recentemente, Souza (2017) desenvolve o trabalho mais completo, descrevendo a presença de argilas de infiltração preenchendo poros e como cutículas de grãos, de compactação mecânica e química, além da dissolução de grãos do arcabouço, sobretudo o FK, gerando porosidade intergranular e móldica, além de analisar a cristalinidade da ilita e discutir o grau de diagênese/metamorfismo.

## RESULTADOS

### Sistema Rio dos Pombos – IG007 e IG019

O Sistema Rio dos Pombos foi caracterizado através de dois pontos distintos: nos entornos do seu sumidouro (IG007) e de sua ressurgência (IG019). Para o sumidouro, foram analisadas as amostras IG007-A01 e IG007-A03, enquanto para a ressurgência, as amostras são IG019-A06 e IG019-A08, coletadas conforme a Fig. 1.

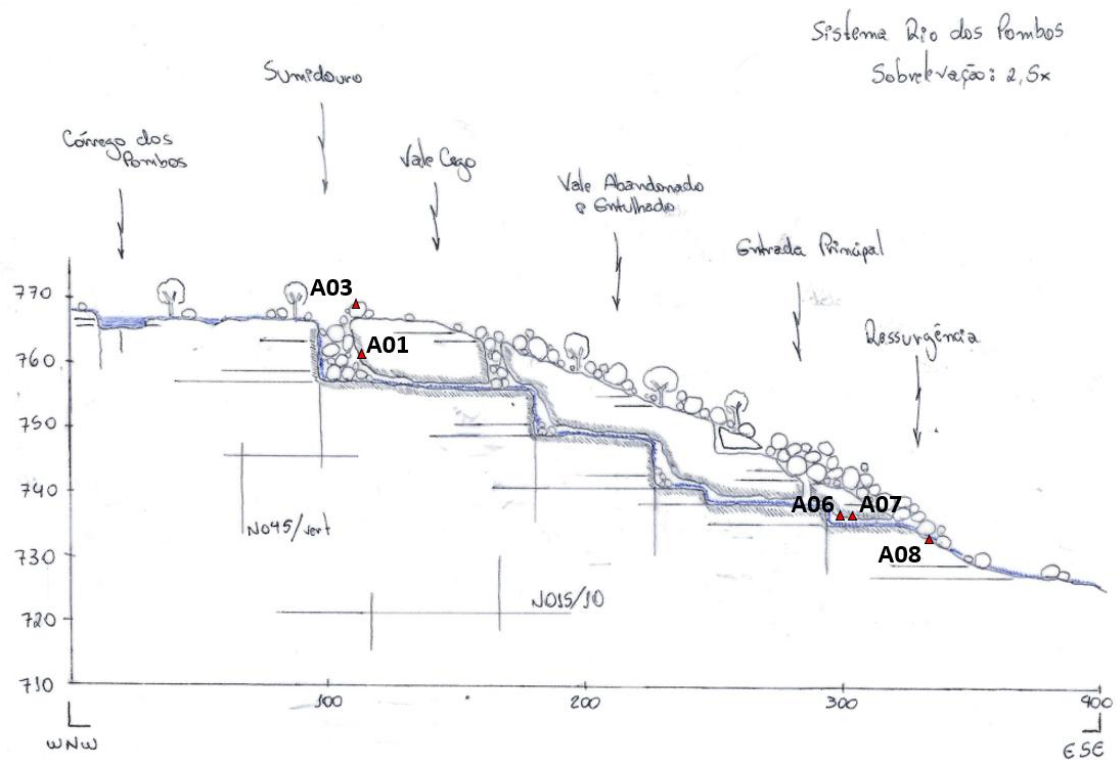


Fig. 1 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para o Sistema Rio dos Pombos.

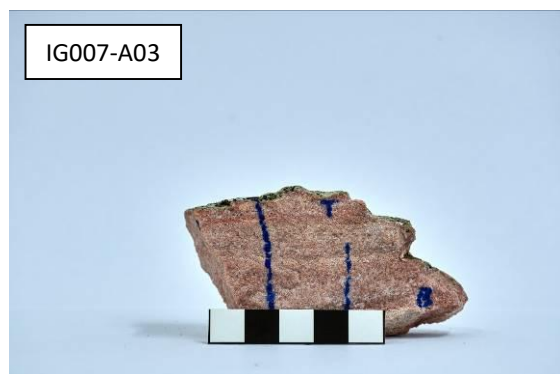




Fig. 2 – Amostras de metarenitos analisadas no Sistema Rio dos Pombos.

### IG007-A01

O arcabouço da rocha é composto majoritariamente por grãos de quartzo, de granulação média a grossa, ocorrendo também raros feldspatos com grau de alteração avançado. Os grãos são arredondados, com esfericidade média e grau de seleção moderado. O contato entre os grãos é planar a côncavo-convexo, criando um empacotamento fechado. A matriz está presente em pequenas proporções, se apresentando como uma massa amarronzada, argilosa, com baixa recristalização (protomatriz). Já o cimento da rocha ocorre principalmente na forma de sobrecrecimento sintaxial dos grãos de quartzo. Também está presente em forma de películas de minerais finos e opacos envolvendo os grãos.

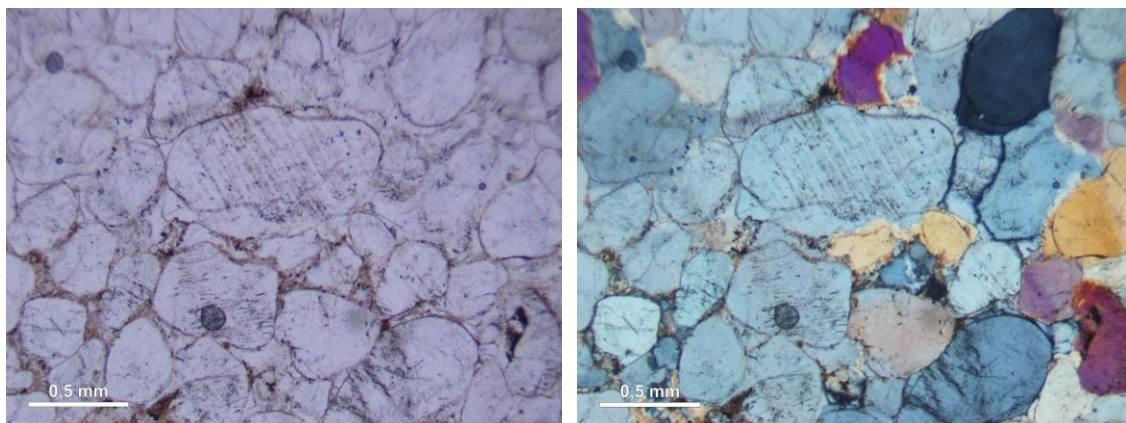


Fig. 3 – Microfotografias da amostra IG007-A01, exibindo grãos de quartzo com crescimento sintaxial. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

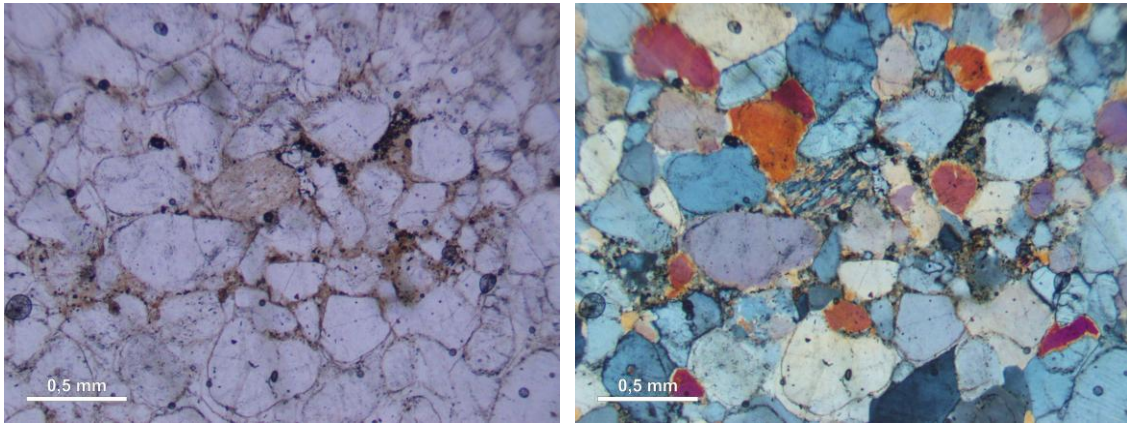


Fig. 4 – Microfotografias da amostra IG007-A01, exibindo grão de feldspato alterado (no centro) e matriz argilosa de cor amarronzada. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

### IG007-A03

Rocha composta por grãos de quartzo de granulação média e raros grãos de feldspato em avançado grau de alteração. Os grãos do arcabouço são bem selecionados, arredondados a bem arredondados e tem esfericidade média a alta. O contato entre os grãos é pontual a planar, onde o empacotamento normal. Por vezes o contato é côncavo-convexo, em porções onde a compactação é mais intensa e o empacotamento é fechado. A matriz é praticamente ausente na rocha, sendo os grãos do arcabouço envoltos por cimento silicoso, sobretudo de sobrecrecimento sintaxial. Por vezes o cimento se apresenta com tons amarronzados.

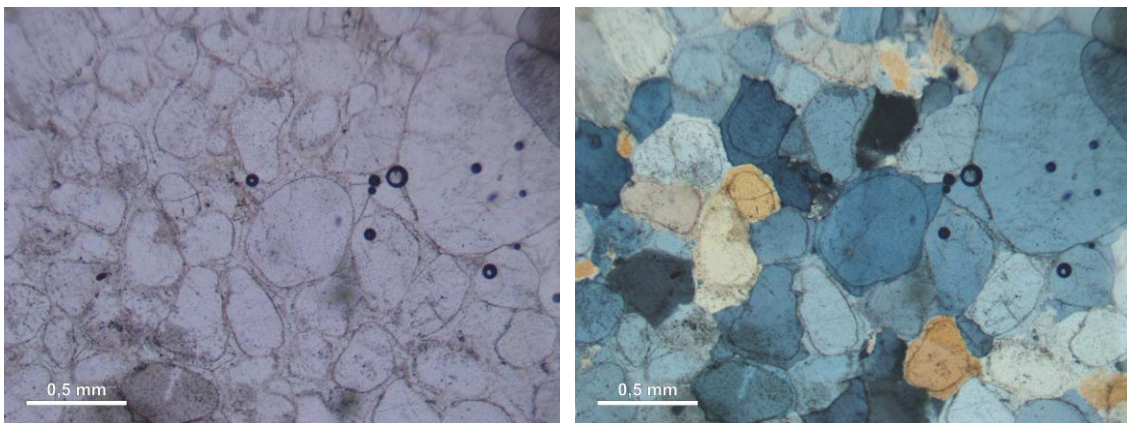


Fig. 5 – Microfotografias da amostra IG007-A03, exibindo cimentação por sobrecrecimento sintaxial de quartzo. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

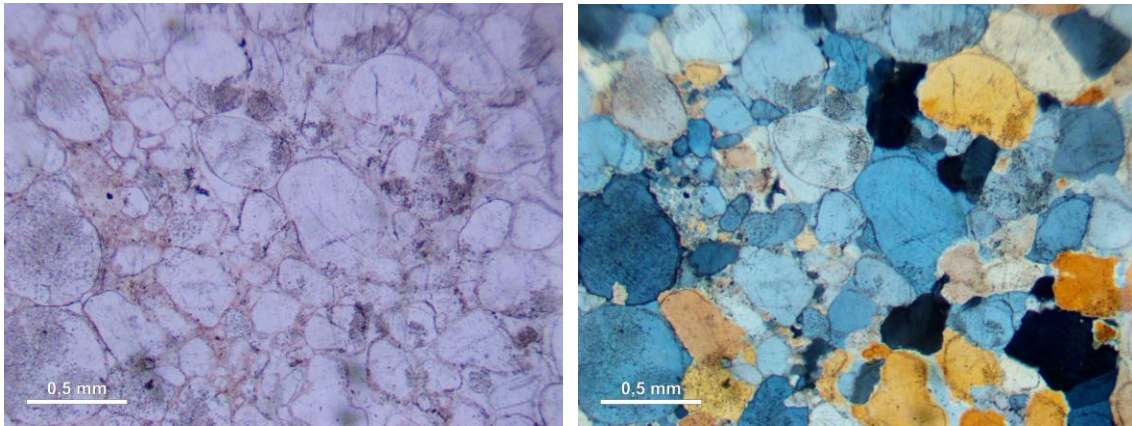


Fig. 6 – Microfotografias da amostra IG007-A03, exibindo segregação granular, com cimento tendendo a tons amarronzados onde a granulação é mais fina. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

### IG019-A06

Rocha composta essencialmente por grãos de quartzo de granulação média. Os grãos do arcabouço são bem selecionados, subangulosos a subarredondados e de esfericidade média. O contato entre os grãos é pontual a planar, predominando o empacotamento normal. Raramente, o contato é côncavo-convexo, com empacotamento fechado. A matriz é praticamente ausente na rocha, sendo os grãos envoltos por cimento silicoso, comumente na forma de sobrecrescimento sintaxial do quartzo. Por vezes os grãos são envolvidos também por películas de material fino amarronzado e minerais opacos. A rocha apresenta planos de fraturamento responsáveis pela geração de porosidade secundária intra e intergranular.

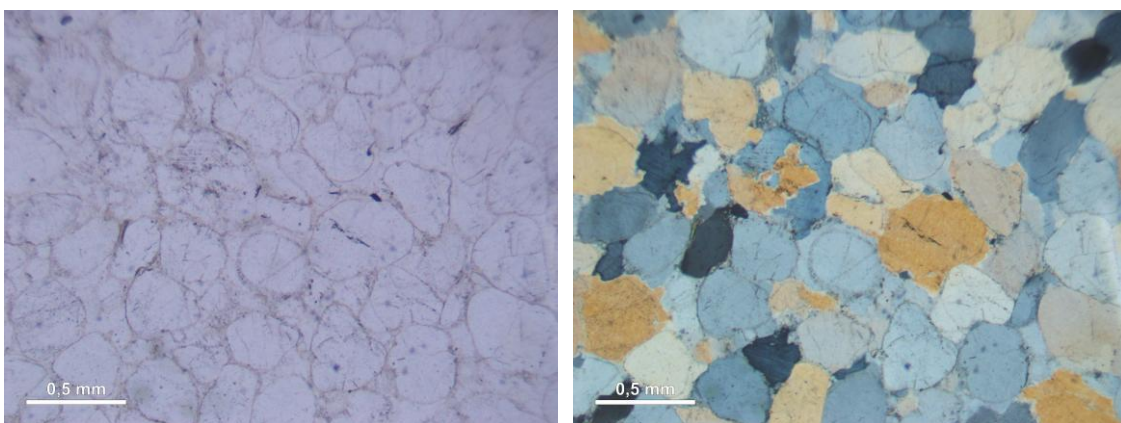


Fig. 7 – Microfotografias da amostra IG019-A06, exibindo mineralogia monocristalina de quartzo, com empacotamento fechado e cimentação por sobrecrescimento sintaxial. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

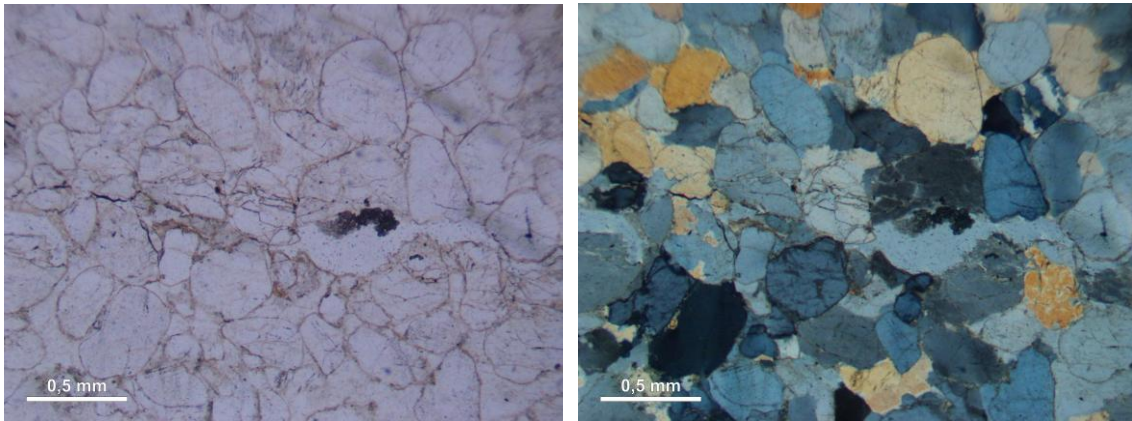


Fig. 8 – Microfotografias da amostra IG019-A06, com porosidade aumentada por deformação/fraturamento dos grãos. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

### IG019-A08

Rocha composta por granulação bimodal, com fração de areia fina intercalada com areia média. A composição do arcabouço é predominantemente quartzosa, estando presente também grãos de feldspato alterados. O grau de esfericidade é médio e os grãos são subangulosos a subarredondados. A presença de matriz é incipiente, ocorrendo de forma discreta junto às lâminas de granulação mais fina. O cimento da rocha é silicoso, na forma de sobrecrecimento sintaxial de quartzo. Os grãos são envoltos por películas de material fino amarronzado a opaco. Algumas porções apresentam um grau de deformação rúptil, evidenciado no fraturamento dos grãos do arcabouço em direções preferenciais, gerando porosidade sobretudo intragranular.

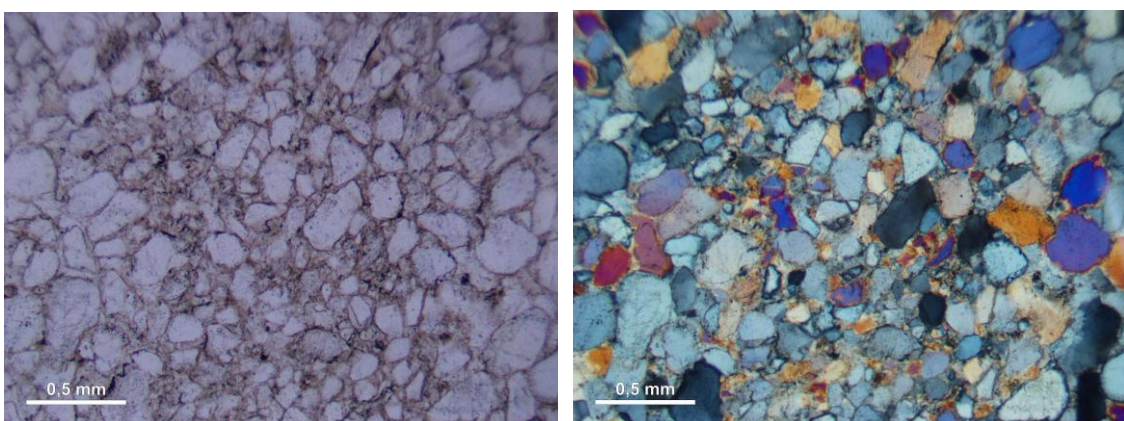


Fig. 9 – Microfotografias da amostra IG019-A08, exibindo segregação granulométrica, com maior taxa de matriz na banda de grãos mais finos. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

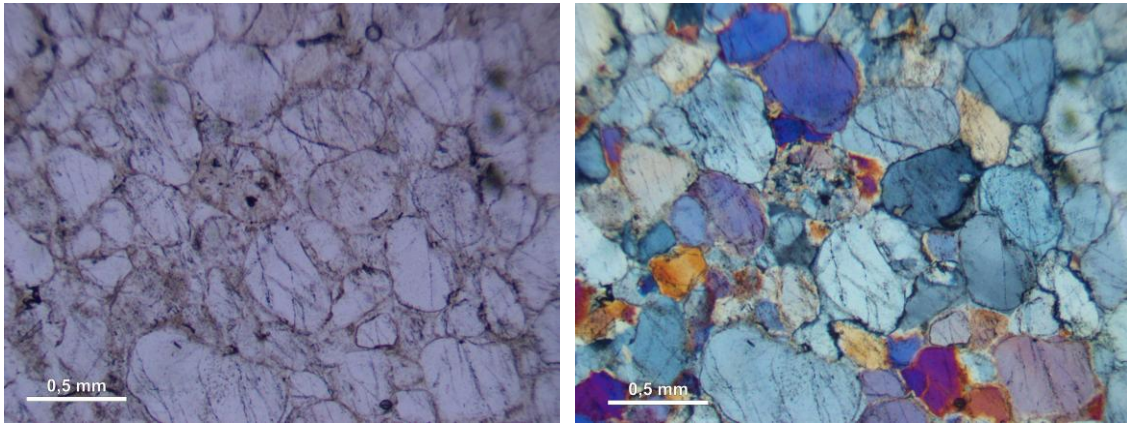


Fig. 10 – Microfotografias da amostra IG019-A08, exibindo grão de feldspato alterado no centro e alto grau de deformação/ fraturamento dos grãos. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

### Gruta do Canal da Fumaça – IG013

Para a Gruta do Canal da Fumaça (IG013), foram analisadas amostras de metarenito fresco coletadas no interior (IG013-A34) e no estrato superior à cavidade (IG013-A40).

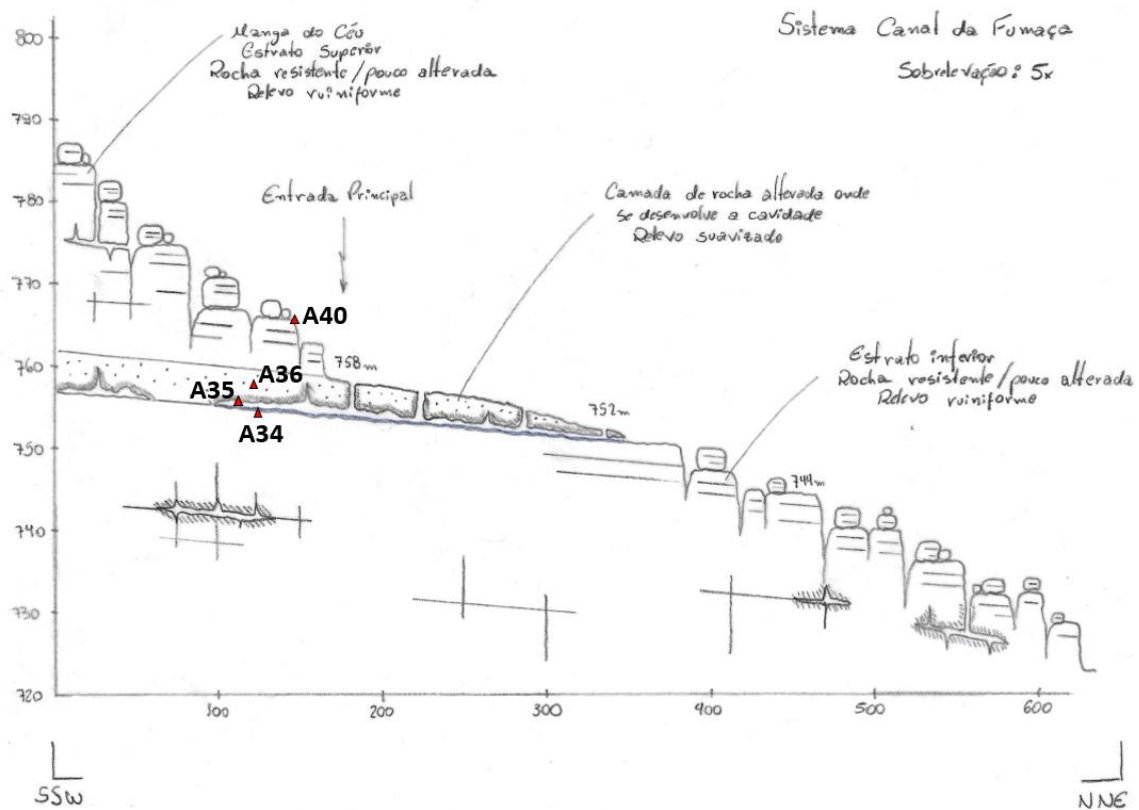


Fig. 11 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para a Gruta do Canal da Fumaça.



Fig. 12 – Amostras de metarenitos analisadas na Gruta do Canal da Fumaça.

### IG013-A34

A rocha é constituída, em seu arcabouço, majoritariamente por grãos de quartzo de granulação média a grossa, mal selecionados, angulosos a subangulosos e de esfericidade baixa. Também estão presentes alguns grãos de feldspato em nível avançado de alteração. O contato entre os grãos se dá de forma côncavo-convexa, indicando a ocorrência de compactação química durante a diagênese. A matriz é abundante e constituída por pirofilita de granulação fina. É do tipo ortomatriz, ou seja, representa recristalização de uma protomatriz deposicional, possivelmente argilosa (caulinita). Os grãos de quartzo apresentam bordas com avançado grau de corrosão devido a reação metamórfica de formação da pirofilita (caulinita + quartzo = pirofilita). Também se identifica algum sobrecrecimento sintaxial de quartzo como cimento.

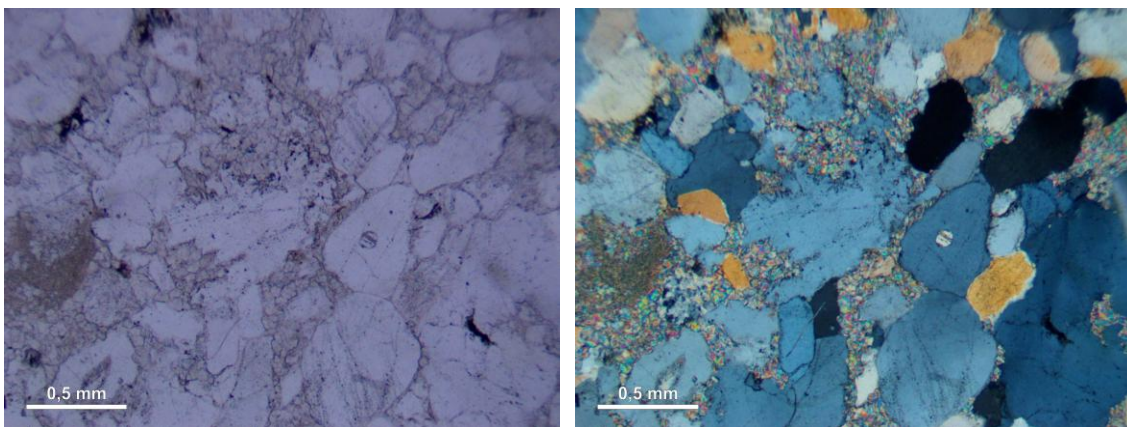


Fig. 13 – Microfotografias da amostra IG013-A34, exibindo ortomatriz de pirofilita e corrosão metamórfica de grão de quartzo (centro). Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

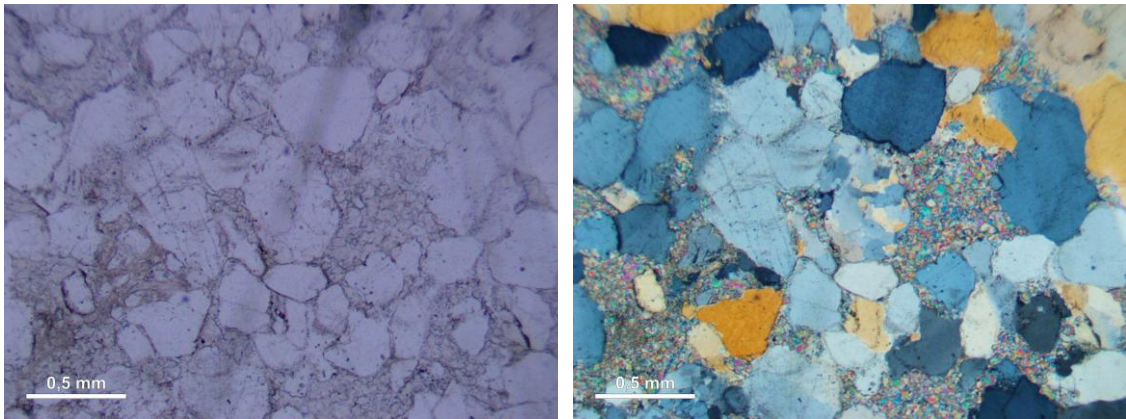


Fig. 14 – Microfotografias da amostra IG013-A34, exibindo quartzo policristalino (centro) e abundante ortomatrix de pirofilita. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

### IG013-A40

O arcabouço da amostra é constituído principalmente por grãos de quartzo e, de forma secundária, de feldspatos com nível de alteração avançado. Seus grãos são de esfericidade baixa, angulosos a subangulosos e mal selecionados, com granulação variando entre areia fina e grossa, com alguns grãos muito grossos dispersos. O contato entre os grãos é côncavo-convexo, indicando compactação mecânica durante a diagênese. A matriz é constituída por pirofilita euédrica de coloração amarronzada, com hábito acicular a lamelar, disposta em agregados por vezes radiais. Pode ser considerada como ortomatrix, derivada da recristalização de argilas aluminosas (caulinita) deposicionais (protomatrix). Grãos de quartzo apresentam as bordas corroídas pela reação metamórfica de formação da pirofilita (caulinita + quartzo = pirofilita). Cimentação por sobrecrecimento sintaxial do quartzo também ocorre de forma incipiente.

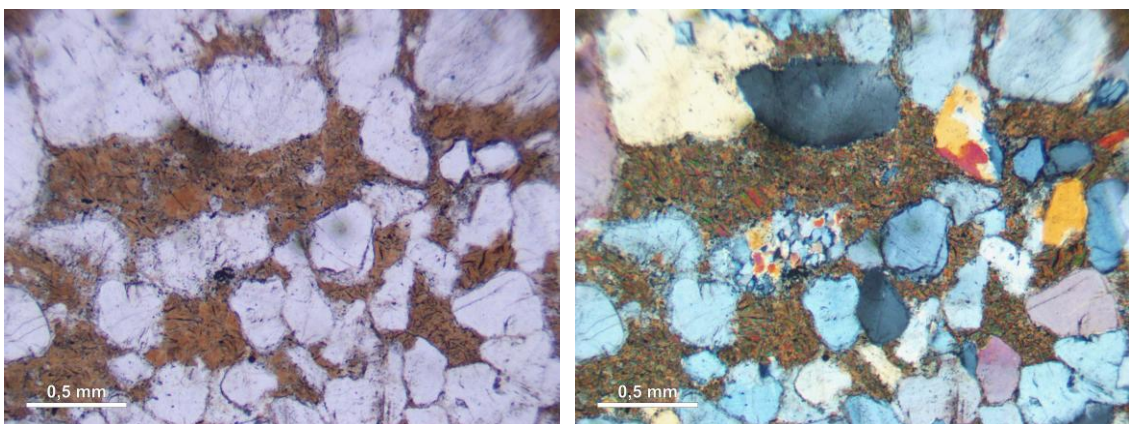


Fig. 15 – Microfotografias da amostra IG013-A40, exibindo ortomatrix de pirofilita bem formada (marrom). Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

## Gruta Parede Vermelha – IG015

A Gruta do Canal da Fumaça foi registrada no ponto IG015, para qual foi analisada a amostra IG015-A09. Além disso, foi coletada e analisada amostra do leito do Rio Coisa Boa (IG028), estrato superior à cavidade, registrada com o código IG028-A13.

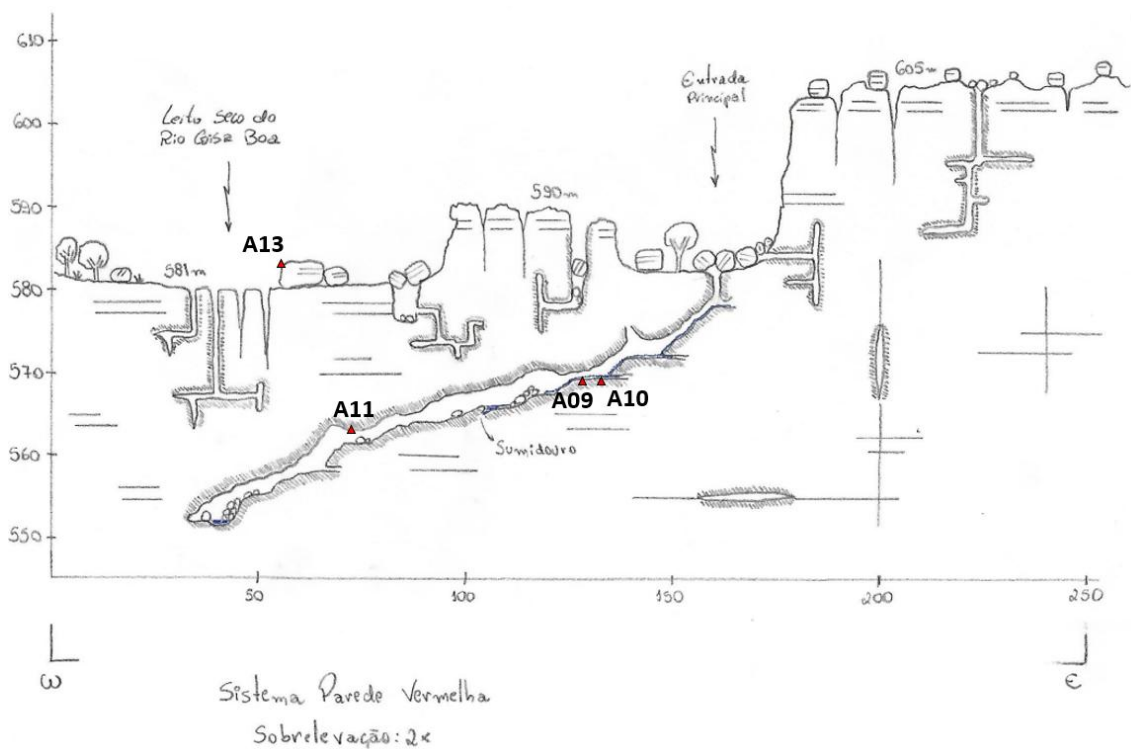


Fig. 16 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para a Gruta Parede Vermelha.



Fig. 17 – Amostras de metarenitos analisadas na Gruta Parede Vermelha.

### IG015-A09

O arcabouço da rocha é constituído majoritariamente por grãos de quartzo, mal seleccionados, variando entre a fração areia fina e areia grossa, com grãos muito grossos dispersos. Também estão presentes alguns grãos de feldspatos com grau avançado de

alteração. Os grãos têm esfericidade baixa a média, são angulosos a subangulosos e, quando se tocam, os contatos são côncavo-convexos a levemente suturados, indicando compactação química durante a diagênese. O empacotamento é aberto. A matriz é abundante, onde predomina uma massa microcristalina de pirofilita. É comum ver também cristais euédricos desse mineral, com hábito lamelar e, por vezes, radial. Grãos de quartzo apresentam as bordas corroídas pela reação metamórfica de formação da pirofilita (caulinita + quartzo = pirofilita). A cimentação por quartzo syntaxial ocorre de forma muito pontual.

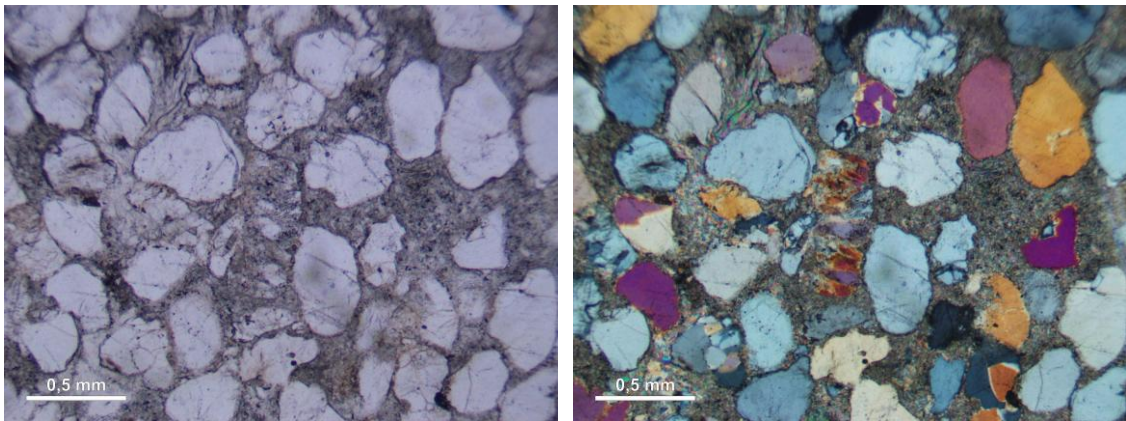


Fig. 18 – Microfotografias da amostra IG015-A09, exibindo empacotamento aberto, matriz abundante e cristal de quartzo com alto grau de corrosão. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

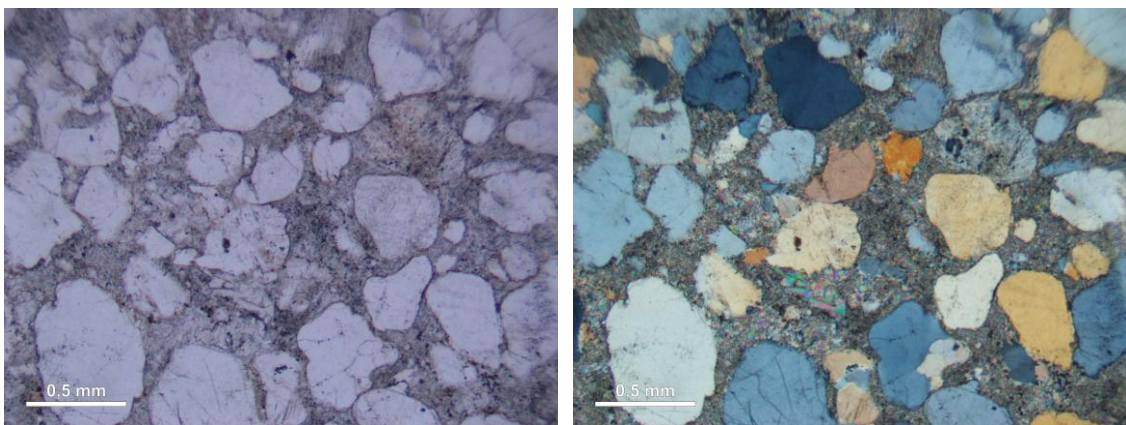


Fig. 19 – Microfotografias da amostra IG015-A09, exibindo arcabouço mal selecionado e cristal de pirofilita euédrico com hábito lamelar. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

### IG028-A13

O arcabouço da rocha é constituído essencialmente por grãos de quartzo, mal selecionados, com granulação variando entre areia média a muito grossa. Os grãos são angulosos e o grau de esfericidade é muito baixo a baixo. O empacotamento é fechado, sendo os contatos entre os grãos côncavo-convexos a levemente suturados, indicando

compactação química. A matriz é abundante e constituída por pirofilita com moderado grau de recristalização. Pode ser considerada como ortomatriz, derivada de argilominerais da protomatriz. A corrosão do quartzo é profunda, consumindo bordas e, por vezes, todo o cristal, através da reação da formação da pirofilita (caulinita + quartzo = pirofilita). Cimentação por sobrecrescimento de quartzo sintaxial ocorre de forma subordinada.

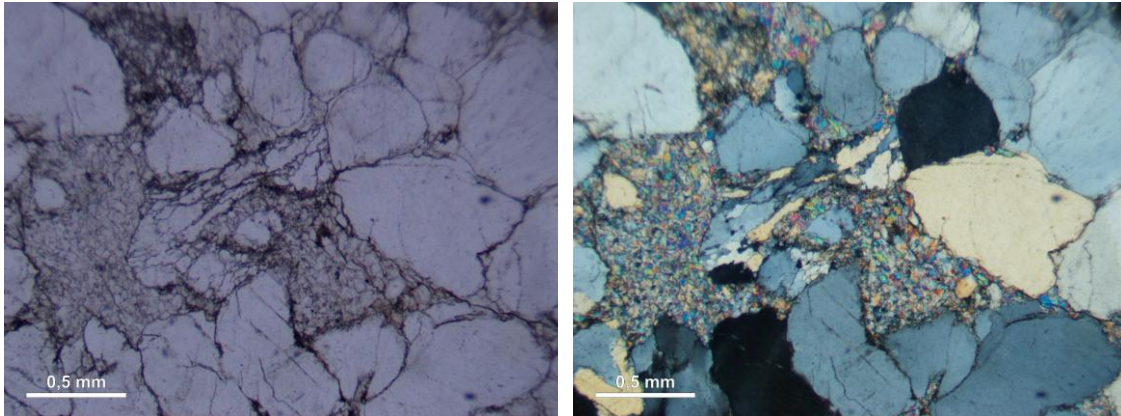


Fig. 20 – Microfotografias da amostra IG028-A13, evidenciando reação metamórfica do quartzo para pirofilita onde a matriz é abundante. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

### Gruta do Trianglim – IG023

Para a Gruta do Trianglim, foram coletadas amostras de metarenito (IG023-A17) e espeleotemas - do tipo estalactite (IG023-A14), microtravertino (IG023-A16) e crosta (IG023-A25). Não foi possível posicionar a distribuição das amostras coletadas no modelo, uma vez que o mapa da cavidade não foi concluído até o momento da coleta.

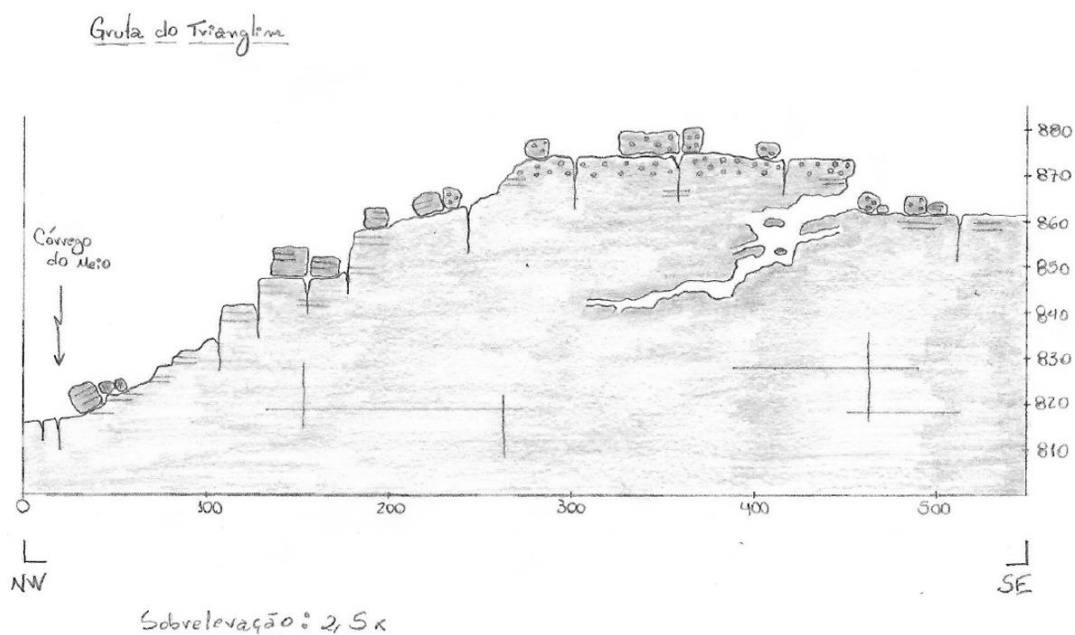


Fig. 21 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para a Gruta do Trianglim.

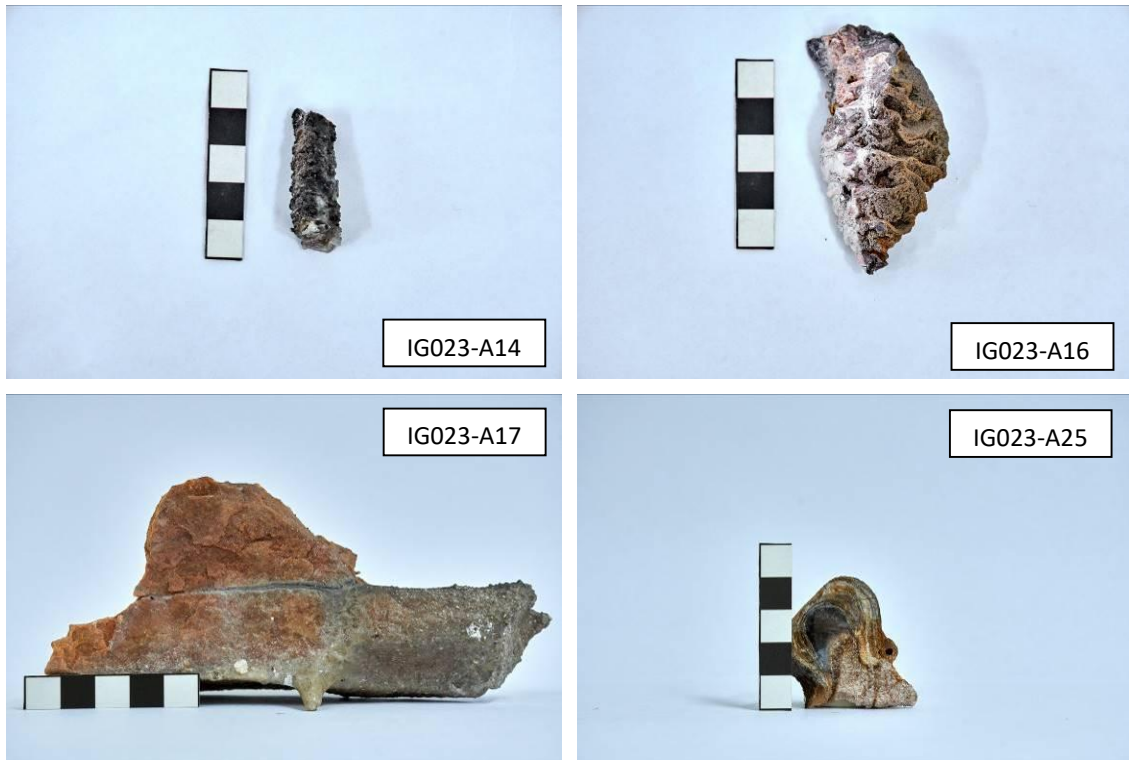


Fig. 22 – Amostras de espeleotemas e metarenito analisadas na Gruta do Trianglim.

### IG023-A14

Amostra de estalactite exibe uma estrutura colunar, com laminações finas marcadas por linhas de crescimento que por vezes são plano-paralelas, mas, em sua maioria, são curvilíneas, arredondadas e suavizadas. O bandamento é visível devido a variação de coloração entre as lâminas, que ora são incolores, ora assumem coloração amarronzada e tons de preto. Material detrítico também ocorre, sendo englobados pela precipitação.

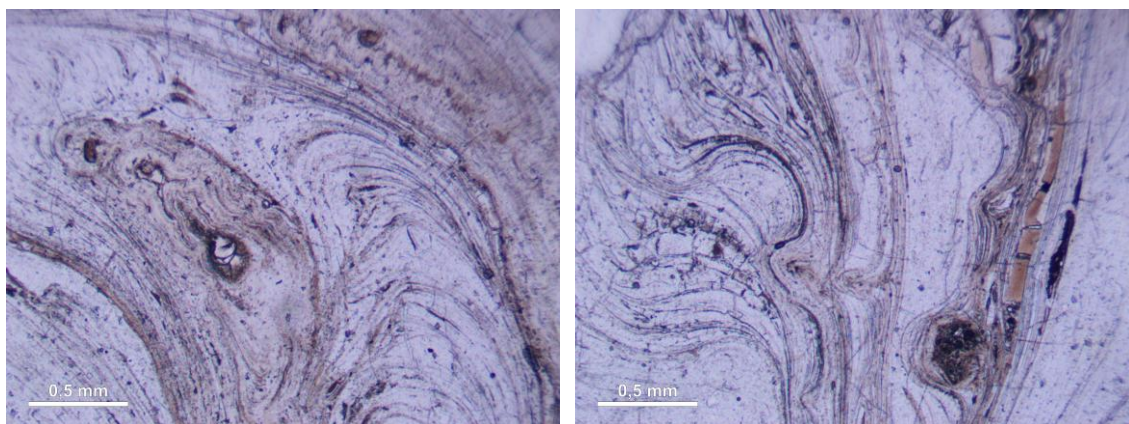


Fig. 23 – Microfotografias da amostra de estalactite IG023-A14, exibindo crescimento em laminação paralelo a ondulado, com alternância de coloração branca a marrom. Microscópio sob nicóis paralelos.

## IG023-A16

A amostra apresenta precipitação de microtravertinos sobre metarenitos, sendo assim, observam-se grãos de quartzo envoltos e cimentados por sílica de coloração amarronzada. As precipitações se apresentam com textura rugosa, por vezes botroidal e irregular. É possível observar linhas de crescimento que variam em coloração (marrom claro a escuro) e em forma. Grãos de quartzo detríticos também estão dispersos no material precipitado.

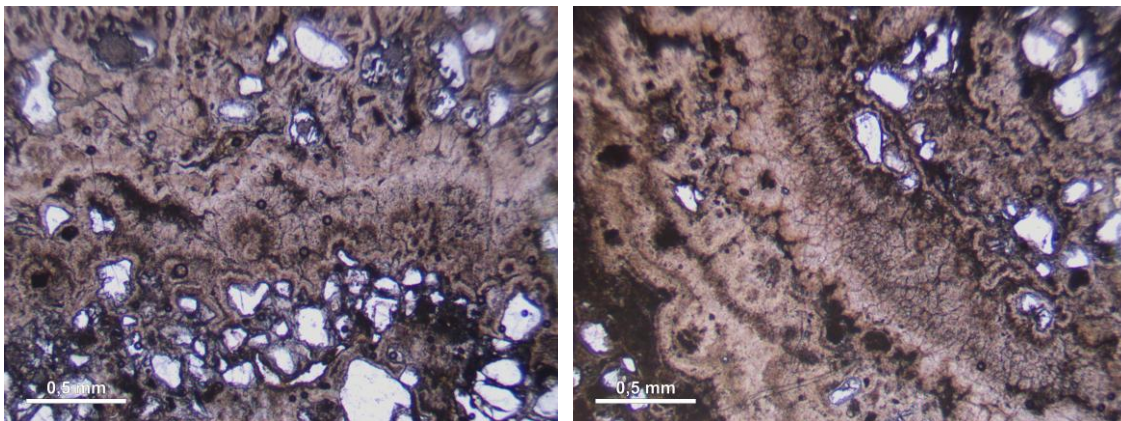


Fig. 24 – Microfotografias da amostra de microtravertino IG023-A16, exibindo crescimento botroidal, com alternância de coloração amarronzada sobre grãos de quartzo. Microscópio sob nicóis paralelos.

## IG023-A017

A rocha possui arcabouço mal selecionado, constituído de grãos que variam da fração areia muito fina até areia grossa. A segregação granulométrica gradual a abrupta marca os planos de acamamento sedimentar. Os grãos são, em sua maioria, subangulosos a subarredondados, ocorrendo também os angulosos, sobretudo dentre as porções finas. A esfericidade é baixa. O empacotamento é normal a fechado, sendo o contato entre os grãos do tipo côncavo-convexo a levemente suturado, indicando compactação química durante a diagênese. A matriz ocorre de forma discreta como agregados de finos de pirofilita microcristalina. Cimento silicoso também parece ocorrer junto a matriz. Grãos de quartzo ocorrem corroídos pela reação metamórfica de formação da pirofilita (caulinita + quartzo = pirofilita). Planos de deformação rúptil também afetam os grãos.

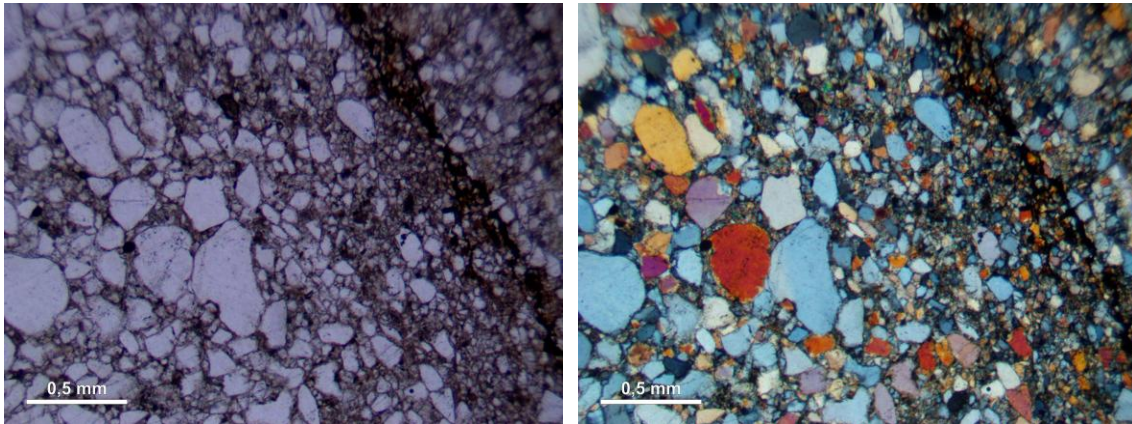


Fig. 25 – Microfotografias da amostra IG023-A17, evidenciado gradação granulométrica e aumento de porosidade no plano de acamamento. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

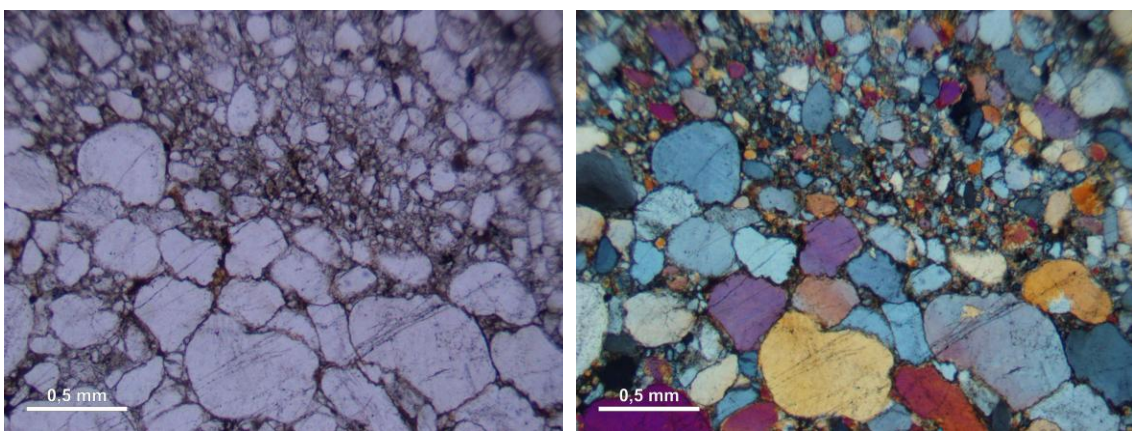


Fig. 26 – Microfotografias da amostra IG023-A17, evidenciado segregação granulométrica abrupta e planos de deformação rúptil afetando os grãos. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

### IG023-A25

Crosta precipitada sobre metarenitos. É possível ver os grãos de rocha, em sua estrutura original, cimentados pela sílica amorfa de cor amarronzada. A precipitação tem lâminas irregulares, que alternam em coloração esbranquiçada a tons de marrom.

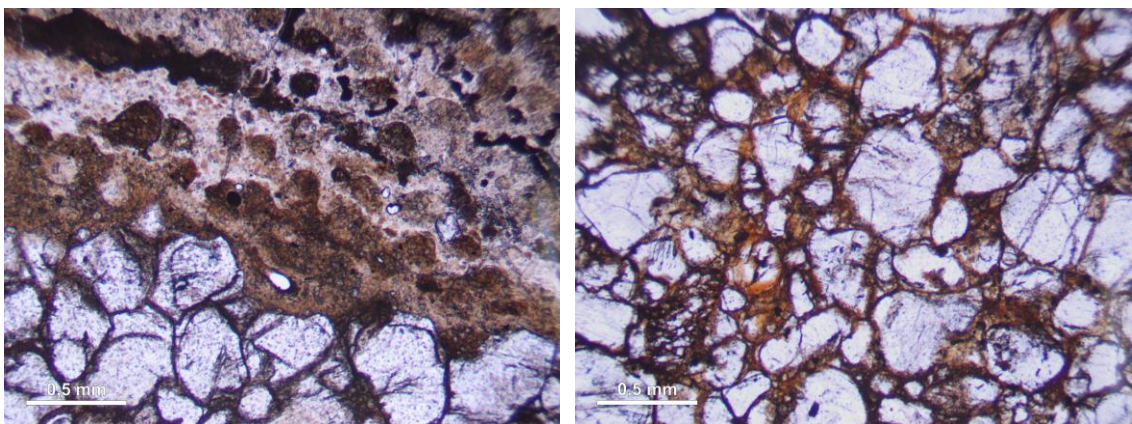


Fig. 27 – Microfotografias da amostra do espeleotema IG023-A25, exibindo crescimento irregular e precipitação de sílica amorfa entre os grãos de quartzo. Microscópio sob nicóis paralelos.

## Gruta de Torras – IG029

A amostra descrita para a Gruta de Torras corresponde a um metarenito seixoso (ou microconglomerado), coletado do teto da cavidade (IG029-A32). Mais coletas são necessárias para aumentar a cobertura amostral da caverna.

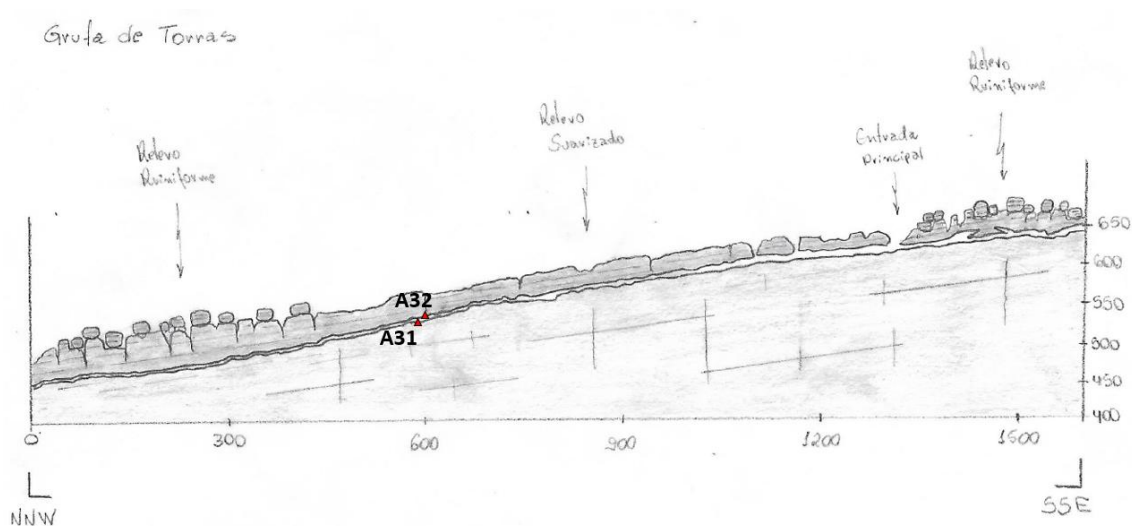


Fig. 28 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para a Gruta de Torras.



Fig. 29 – Amostras de metarenito granuloso analisada na Gruta de Torras.

### IG029-A32

O arcabouço da amostra é diversificado, sendo constituído sobretudo por grãos de quartzo monocristalino, mas também se encontram quartzo policristalino e grãos de feldspato em estágio de alteração avançada. É muito mal selecionada, com granulação variando de areia muito fina até areia muito grossa, com grânulos dispersos. Encontram-se grãos de esfericidade alta e muito arredondados, mas a maior parte são angulosos a subangulosos e de esfericidade baixa. O empacotamento é normal, sendo o contato entre grãos planar a

côncavo-convexo. A rocha não aparenta possuir matriz. Já o cimento é constituído por pirofilita cristalina fina a média, além de massas de opacos, interpretados como óxidos de ferro, que ocorrem como películas dos grãos ou preenchendo interstícios. É possível que ambos sejam produto da dissolução do feldspato e precipitação como cimento durante a diagênese. Há grãos de quartzo com corrosão avançada devido a reação metamórfica de formação da pirofilita.

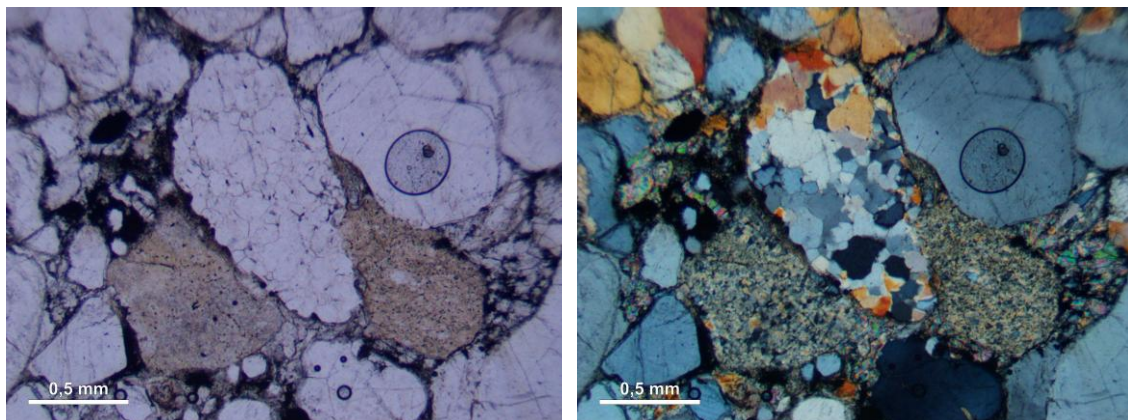


Fig. 30 – Microfotografias da amostra IG029-A32, exibindo arcabouço diversificado e mal seleccionado, com grão de quartzo mono e policristalino, feldspatos alterados e óxidos de ferro (preto). Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

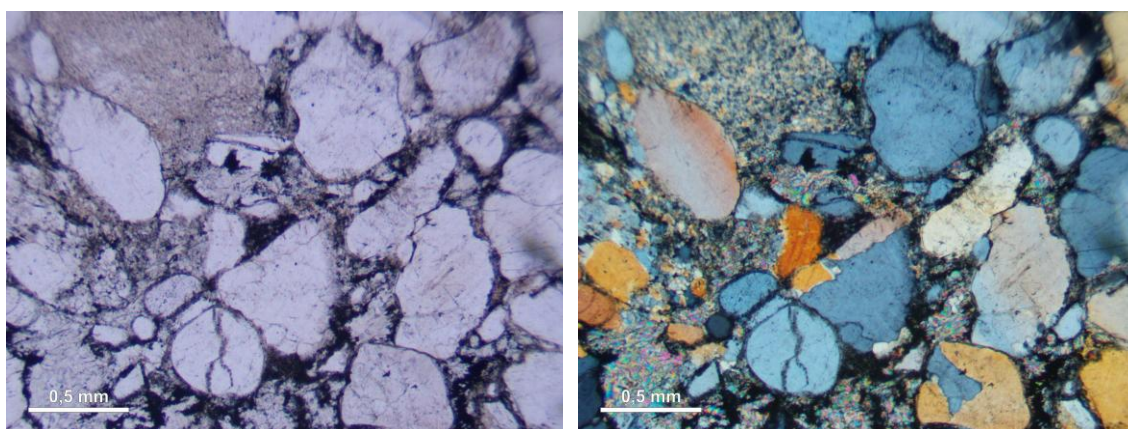


Fig. 31 – Microfotografias da amostra IG029-A32, exibindo grão de feldspato alterado, cimentação por pirofilita, óxidos de ferro e fraturamento de grãos. Nicóis paralelos (esquerda) e nicóis cruzados (direita).

## DISCUSSÃO

As amostras de rocha na qual se desenvolvem as cavernas e demais feições cársticas na Vila de Igatu podem ser classificadas, de acordo com a classificação de Pettijohn, Potter e Siever (1972), como quartzo-arenitos a quartzo-grauvacas, de acordo com a proporção de matriz. Ainda, é preciso considerar o metamorfismo de baixo grau ao qual foram

submetidas as rochas da região, conforme relatado na literatura. Nas amostras da área, esse postulado é corroborado pela presença do mineral pirofilita, micro a macrocristalina, associado ao consumo de grãos de quartzo, através da reação metamórfica *caulinita + pirofilita = quartzo*. Dessa forma, propõe-se utilizar a nomenclatura quartzo-metarenito e quartzo-metagrauvaca para classificar a litologia local.

Observa-se que as rochas do Sistema Rio dos Pombos (IG007 e IG019) são aquelas com grau mais avançado de maturidade textural dentro da área de estudo, com arcabouço bem selecionado, arredondado e esférico, pobre em matriz. Nessas amostras, predomina a cimentação por quartzo sintaxial. O grau de fraturamento dos grãos também é alto em alguns casos, o que contribui para o aumento da porosidade secundária, criando caminhos preferenciais de circulação de fluídos e, conseqüentemente, frentes de intemperismo e arenização. Variações na reologia das camadas pode influenciar no grau de fraturamento e condicionar a abertura de condutos em níveis específicos. Sauro (2014) demonstram que a dissolução do quartzo é significativa e contribui para os processos de carstificação em rochas siliciclásticas.

Já as amostras das Grutas do Canal da Fumaça (IG013) e da Parede Vermelha (IG015) apresentam menor maturidade textural, com uma quantidade maior de matriz, resultando em um empacotamento aberto dos grãos do arcabouço. Na matriz predomina a pirofilita, filossilicato aluminoso. De acordo com Mason (1966) *apud* Dutra (2015), a alumina é extremamente solúvel entre pH 4 e 5. Dessa forma, as águas ácidas da área de estudo poderiam atacar quimicamente esse mineral, criando porosidade e iniciando o processo de carstificação. Esse modelo seria coerente com a proposta de De Melo *et al.* (2015), em que a dissolução se dá na matriz de caulinita dos arenitos.

A Gruta de Torras possui a litologia com menor maturidade textural entre as rochas da área de estudo, com arcabouço diversificado, com elevada quantidade de feldspatos. Pode ser classificada como metarenito granuloso (ou informalmente de microconglomerado). Da mesma forma, a matriz da rocha possui as mais altas quantidades de óxidos de ferro identificada na área. De acordo com Mason (1966), a solubilidade do ferro é inversamente proporcional ao pH da solução. Ou seja, quanto mais ácido o meio, maior a quantidade de ferro dissolvido, o que pode ter também contribuído para o processo de arenização e carstificação na Gruta de Torras, influenciando no expressivo desenvolvimento dessa cavidade.

Já os espeleotemas na Gruta do Trianglim (IG023), formados pela precipitação cíclica de sílica na sua forma amorfa (ex. Opala), indicam que a remobilização da própria sílica, seja do quartzo, dos feldspatos ou da pirofilita, também é atuante nesses sistemas. Se a dissolução desse elemento não se der em escala tal que influencie na abertura dos condutos (uma vez que a sílica é pouco solúvel em águas ácidas), ao menos se dá em nível local e atua na gênese de espeleotemas.

## REFERÊNCIAS

- BATTILANI, G. A., VARAJÃO, A. D. & GOMES, N. S. (1999) Metamorphic degree variation in proterozoic sandstones of the Tombador Formation, Bahia State, Brazil. **Zbl. Geol. PalAont.** Teil I, 7–8, 917–926.
- DE MELO, M. S.; GUIMARÃES, G. B.; CHINELATTO, A. L.; GIANNINI, P. C. F.; PONTES, H. S.; CHINELATTO, A. S. A.; ATENCIO, D. (2015) Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Paraná basin, Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 63, 20-35.
- DUTRA, G. (2015) Gênese e desenvolvimento de cavernas em formações ferríferas. In: AZEVEDO, U. R.; TRAVASSOS, L. E. P.; RASTEIRO, M. A.; FARIA, L. E. (Orgs.) **Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas: proposta para sua conservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. Sociedade Brasileira de Espeleologia, Campinas (SP), p. 158-173.
- MASON, B. (1966) Principles of Geochemistry. 3 Ed. New York: Wiley.
- PETIJOHN, F. J.; POTTER, P. E.; SIEVER, R. (1972) **Sand and Sandstone**. Springer-Verlag, Berlin, pp. 566-577.
- SANTOS, J.S. (2011) **Análise cinemática e dinâmica das estruturas das formações Tombador e Açuruá na porção Sul da Serra do Sincorá, nos arredores das cidades de Barra da Estiva e Ibicoara/Chapada Diamantina, Bahia**. 143p. Trabalho Final de Graduação, Curso de Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador (BA).
- SAURO, F. (2014) Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone: Evidence of the arenisation process. **Geomorphology**, 226, 106-123.
- SOUZA, A. S. de (2017) **Estudo Petrográfico e Petrológico da Formação Tombador, Mesoproterozoico da Chapada Diamantina, Bahia**. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN).
- VARAJÃO, A.D. & GOMES, N.S. (1997) Petrological significance of illitic clays in Proterozoic sandstones of the Tombador Formation, Chapada Diamantina. Brazil. **Zbl. Geol. PalAont.** Teil I, 3–6, 767–778.

**FLUORESCÊNCIA  
DE RAIOS-X**

## **INTRODUÇÃO**

O presente anexo é referente a caracterização química através de análises de fluorescência de raios-x de amostras de rocha e espeleotemas, no âmbito do subprojeto “Geoespeleologia do Carste Siliciclástico da Formação Tombador: Subsídios à Conservação do Patrimônio Espeleológico na Chapada Diamantina”. A área de estudo desse projeto contempla a Bacia do Rio Coisa Boa, área que abrange a Vila de Igatu (antiga Xique-Xique de Igatu), distrito do município de Andaraí, na Chapada Diamantina, Bahia.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

Amostras de rocha e espeleotemas, coletadas nos sistemas de cavernas da área de estudo, foram moídas, no Laboratório de Preparação Sedimentológica/Geoquímica (LPSGq) do UNESPetro (Rio Claro), em Moinho Almofariz Pistilo MA-590 da marca Marconi, com rotatividade de 55.74 rpm durante 7 minutos (3 a 4 vezes por amostra). No laboratório do Instituto de Química da Universidade Federal da Bahia, foram moídas novamente em cadinho de ágata, para garantir um tamanho de partícula menor que 177 µm (Mesh No. 80). Então, foram misturadas com cera (Hoechst Wax C Micropowder) na proporção 9:1, cujo produto foi usado para preparar pastilhas em um suporte plástico, dispostas sobre ácido bórico e comprimidas em prensa hidráulica com 5 toneladas por 3 minutos. No laboratório de Catálise e Materiais do IQ/UFBA, foram analisadas em FRX S8 Tiger da marca Bruker.

## **ESTADO DA ARTE**

Trabalhos de caracterização química já foram desenvolvidos para a Formação Tombador na Serra do Sincorá, região da área de estudo. Souza (2017) encontrou, com análises semiquantitativas em 18 amostras de metarenitos, valores acima de 90% para o Silício (Si) e, secundariamente, Alumínio (Al), Potássio (K), Ferro (Fe) e Magnésio (Mg), que juntas somam 9,7%. Essa proporção sugere alta maturidade mineralógica. Elementos como Al, K e Fe são os principais cátions constituintes dos K-Feldspatos e argilominerais. Também foi identificada uma relação inversa entre as razões de Si e Al, que é explicada pelas reações de substituição mineralógica para a formação dos argilominerais. Elementos traços (Titânio (Ti), Zircônio (Zr), Estrôncio (Sr) e Ítrio (Y)) também ocorrem.

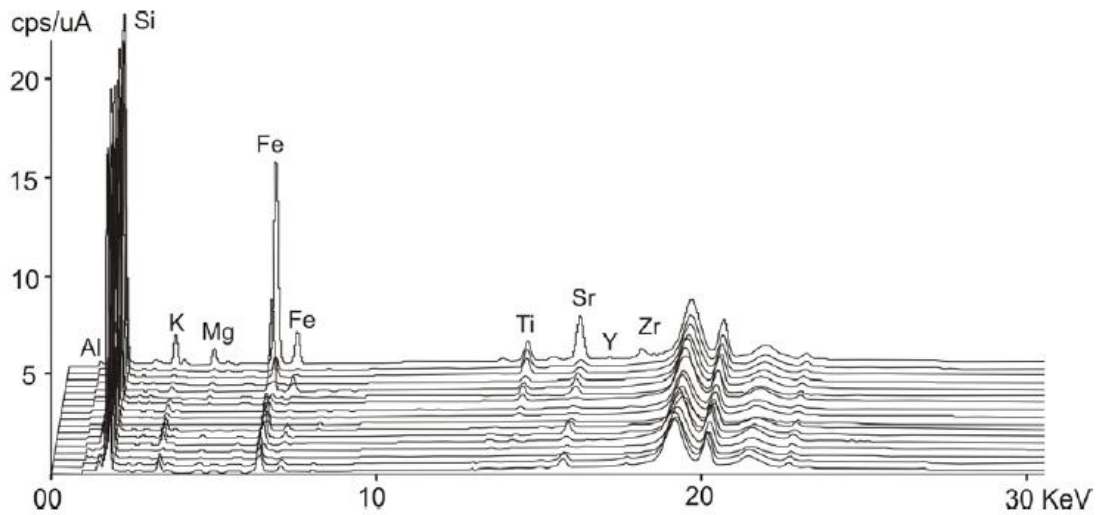


Fig. 1 – Difratoograma de FRX das 18 amostras de metarenito da Fm. Tombador (Souza, 2017).

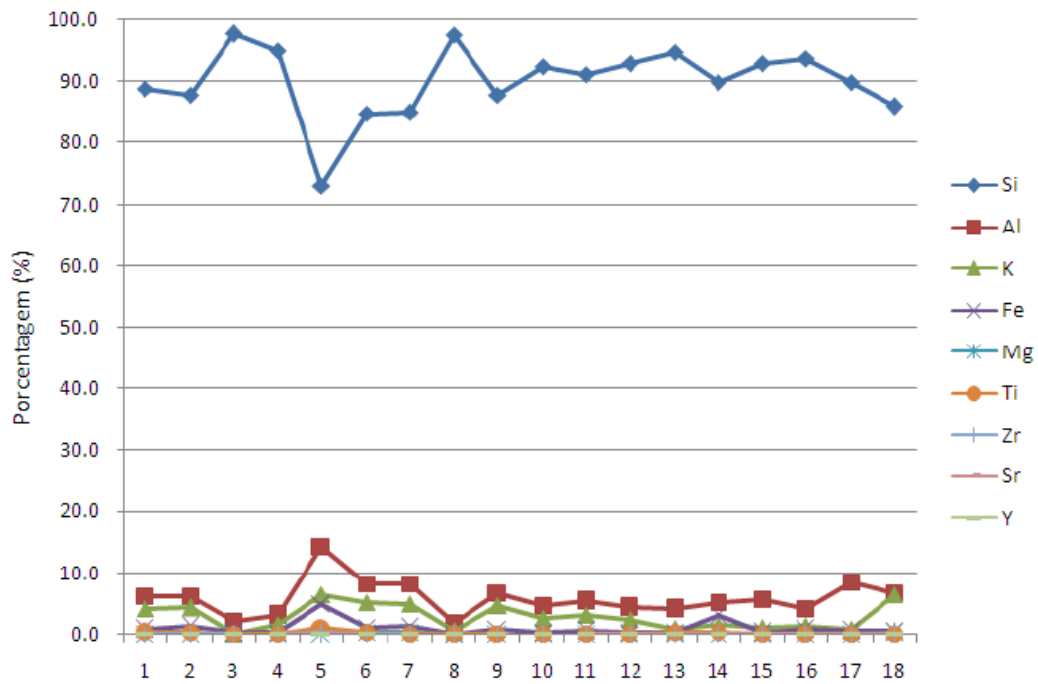


Fig. 2 – Composição química semiquantitativa de elementos maiores em rocha total dos metarenitos da Formação Tombador (Souza, 2017).

## RESULTADOS

### Sistema Rio dos Pombos – IG007 e IG019

O Sistema Rio dos Pombos foi caracterizado através de dois pontos distintos: nos entornos do seu sumidouro (IG007) e de sua ressurgência (IG019). Análises de FRX foram aplicadas nas amostras IG019-A06 e IG019-A07, coletadas na ressurgência (Fig. 1).

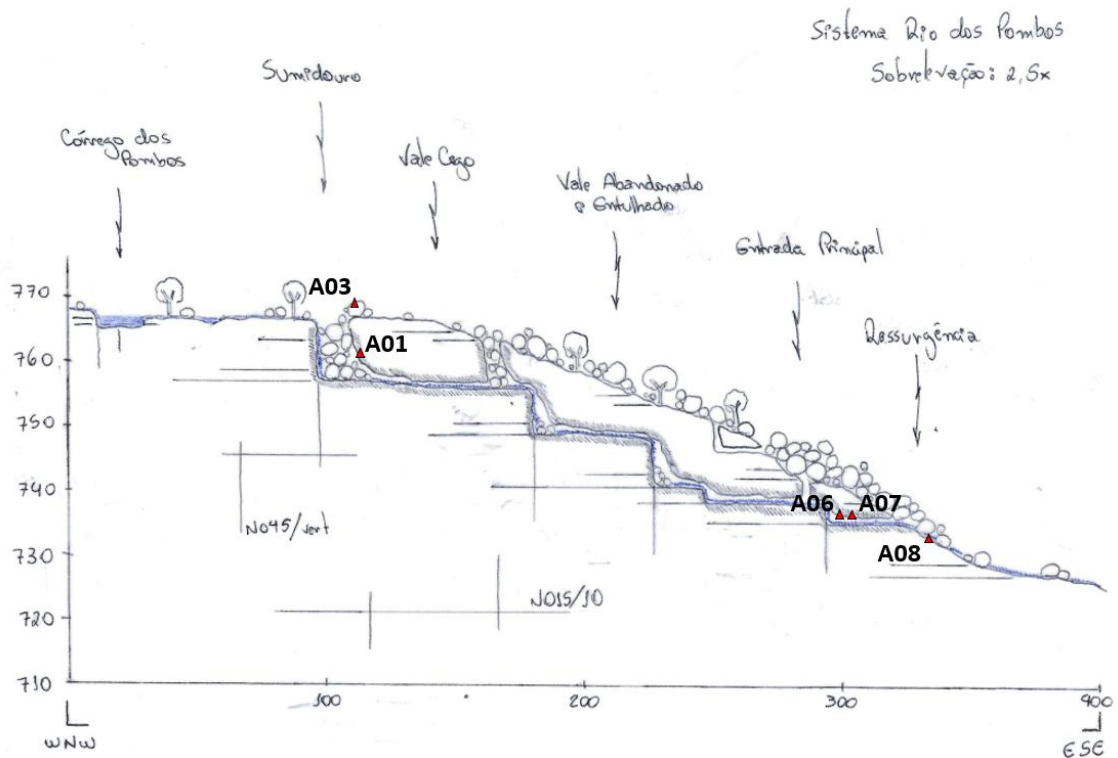


Fig. 3 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para o Sistema Rio dos Pombos.



Fig. 4 – Amostras de metarenitos analisadas no Sistema Rio dos Pombos.

## IG019-A06

A amostra IG019-A06 corresponde a um quartzo-metarenito, de alta maturidade textural. Sendo assim, a análise de FRX apontou uma composição química quase essencialmente de sílica (98,58%), com outros elementos menores como Al, K e Fe somando pouco menos de 1,5%.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	98,58%	0,18%	549,6 PPM	19,6 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,99%	1,80%	163,0 PPM	12,9 um
K <sub>2</sub> O	0,19%	2,73%		35 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,18%	1,16%	33,7 PPM	220 um
TiO <sub>2</sub>	0,04%	7,51%	73,2 PPM	81 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02%	23,00%	128,8 PPM	9,2 um
ZrO <sub>2</sub>	56 PPM	4,21%	12,2 PPM	3,2 mm
SrO	17 PPM	11,90%	9,4 PPM	2,30 mm

Tabela 1. Composição química total para a amostra IG019-A06.

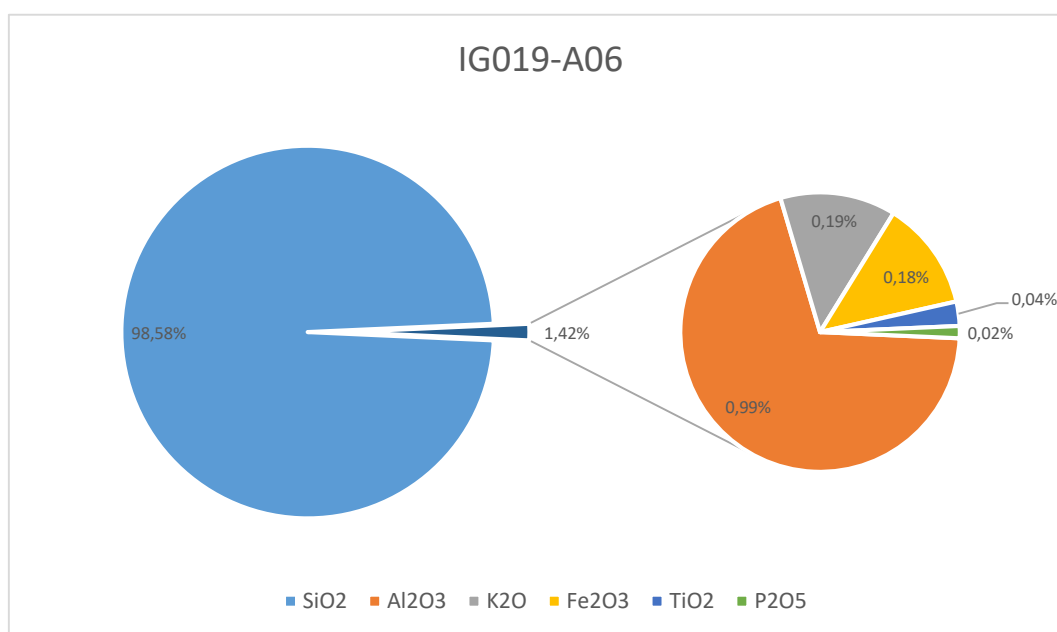


Fig. 5 – Gráfico de composição química total para a amostra IG019-A06.

## IG019-A07

A amostra IG019-A07 também corresponde a um quartzo-metarenito, de alta maturidade textural. Sendo assim, a análise de FRX apontou uma composição química quase essencialmente de sílica (99,53%), com outros elementos menores como Al, Ti e Fe somando menos de 0,5%.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO2	99,53%	0,18%	499,4 PPM	20,0 um
Al2O3	0,33%	3,25%	154,8 PPM	13,0 um
TiO2	0,06%	5,17%	71,7 PPM	81 um
Fe2O3	0,03%	4,12%	33,9 PPM	221 um
P2O5	0,02%	17,90%	119,6 PPM	9,2 um
Cl	0,01%	20,50%	73,5 PPM	18,0 um
ZrO2	91 PPM	2,84%	10,5 PPM	3,3 mm
K2O	79 PPM	18,50%	42,8 PPM	35 um

Tabela 2. Composição química total para a amostra IG019-A07.

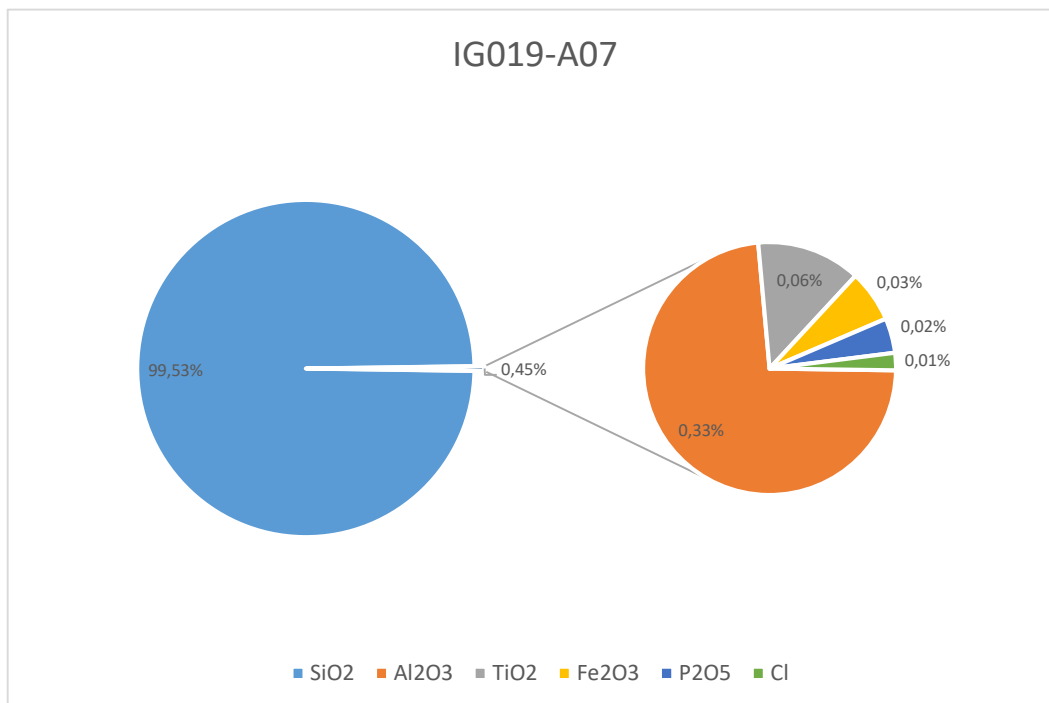


Fig. 6 – Gráfico de composição química total para a amostra IG019-A07.

## Gruta do Canal da Fumaça – IG013

Para a Gruta do Canal da Fumaça (IG013), foram analisadas amostras de rocha alterada coletadas no interior da caverna, sendo uma representativa do pacote argiloso (IG013-A35), e as outras de metarenito (IG013-A36 e IG013-A37).

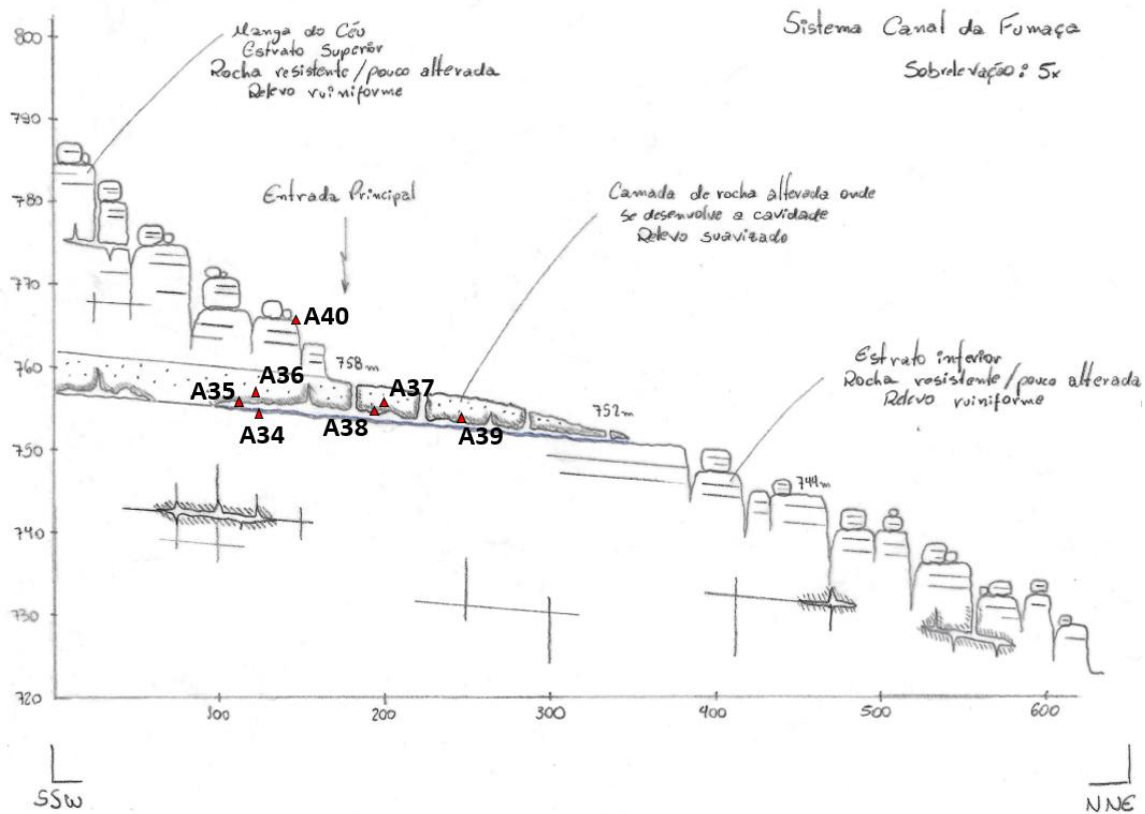


Fig. 7 – Modelo conceitual com distribuição de amostras coletadas Gruta do Canal da Fumaça.

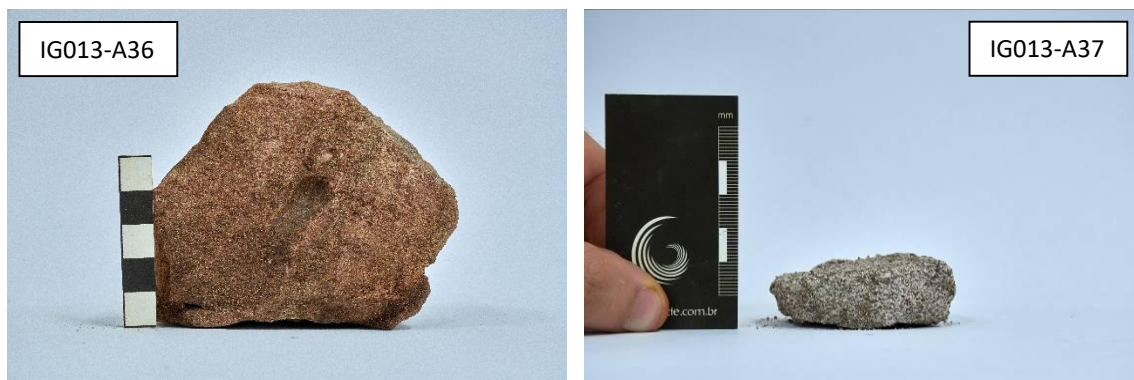


Fig. 8 – Amostras de metarenitos analisadas na Gruta do Canal da Fumaça.

## IG013-A35

A amostra IG013-A35 corresponde a um pacote argiloso de cerca de 30 cm encontrado entre camadas de metarenitos no interior da Gruta do Canal da Fumaça. Sendo assim, a análise apontou para uma relação menor entre a sílica (70,01%) e o Al, que ocorre em grande quantidade (24,75%), devido a presença de argilas, possivelmente do tipo caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) e também ilita ( $\text{KAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$ ), evidenciada pela presença de K (3,73%).

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO2	70,01%	0,23%	570,9 PPM	12,6 um
Al2O3	24,75%	0,35%	274,2 PPM	12,2 um
K2O	3,73%	0,59%	72,3 PPM	34 um
TiO2	0,68%	1,37%	83,3 PPM	72 um
Fe2O3	0,40%	0,76%	36,1 PPM	192 um
Na2O	0,12%	9,82%	391,7 PPM	4,7 um
P2O5	0,10%	6,88%	118,2 PPM	9,0 um
MgO	0,06%	17,60%	403,2 PPM	7,7 um
ZrO2	0,05%	0,75%	18,4 PPM	2,72 mm
SO3	0,05%	8,79%	101,6 PPM	12,5 um
SrO	0,03%	1,03%	10,1 PPM	1,96 mm
BaO	0,02%	18,10%	259,2 PPM	70 um
Rb2O	41 PPM	5,20%	10,6 PPM	1,66 mm
Ga2O3	27 PPM	13,90%	16,9 PPM	0,55 mm

Tabela 3. Composição química total para a amostra IG013-A35.

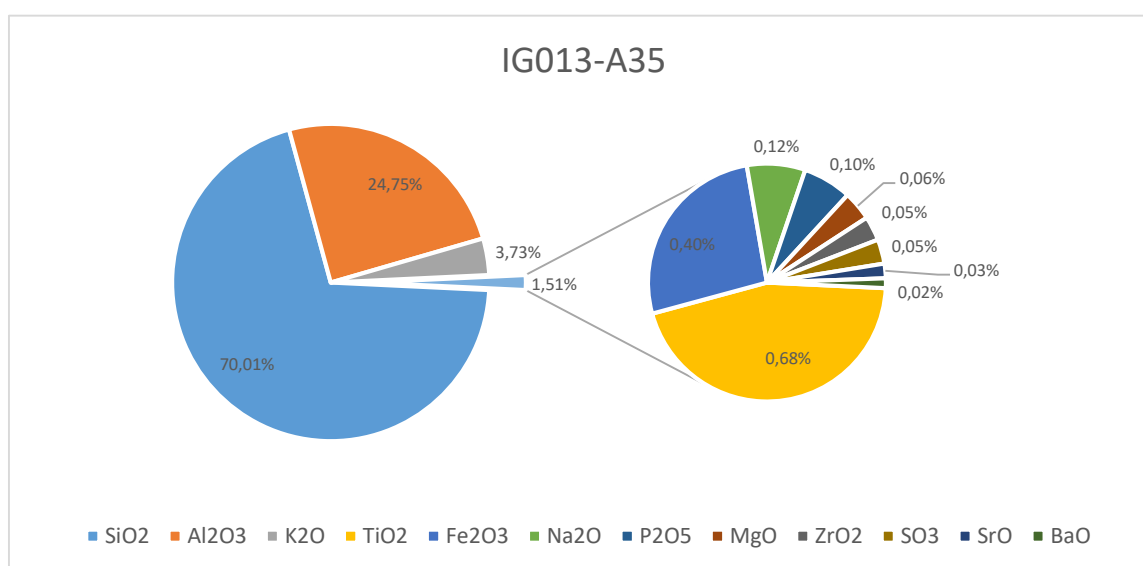


Fig. 9 – Gráfico de composição química total para a amostra IG013-A35.

## IG013-A36

A amostra IG013-A36 corresponde a um metarenito alterado, que ocorre em pacote sobrejacente ao pacote argiloso da amostra anterior. A análise apontou para predominância de sílica (86,97%), pela predominância de grãos de quartzo no arcabouço, mas com quantidade razoável de Al (12,04%), possivelmente pela presença de matriz de filossilicatos (pirofilita/caulinita). A baixa quantidade de K (0,22%) indica a ausência (ou em ocorrência em quantidade incipiente) de muscovita na matriz ou mesmo de feldspatos no arcabouço (para além da ausência de outros cátions como Na e Ca).

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO2	86,97%	0,20%	529,6 PPM	15,7 um
Al2O3	12,04%	0,51%	218,5 PPM	12,6 um
TiO2	0,49%	1,64%	71,4 PPM	79 um
K2O	0,22%	2,64%	50,5 PPM	34 um
Fe2O3	0,13%	1,41%	33,7 PPM	213 um
P2O5	0,07%	9,53%	128,1 PPM	9,0 um
SO3	0,04%	10,40%	105,4 PPM	12,4 um
ZrO2	0,02%	1,27%	14,9 PPM	3,1 mm
SrO	0,01%	2,05%	9,4 PPM	2,23 mm
CaO	0,01%	15,50%	66,1 PPM	45 um

Tabela 4. Composição química total para a amostra IG013-A36.

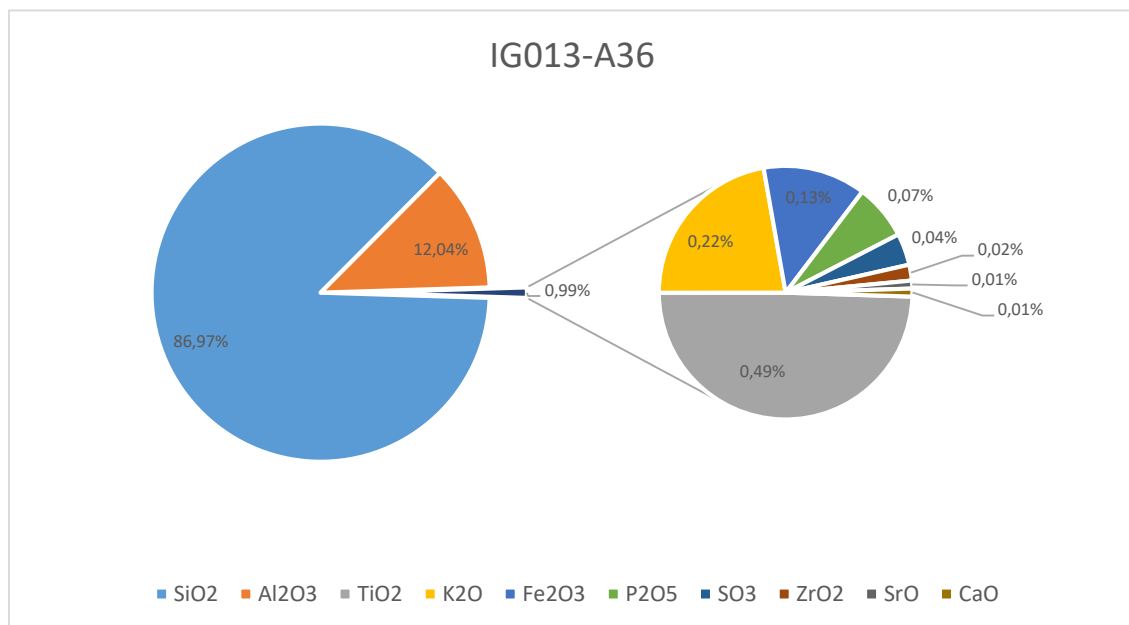


Fig. 10 – Gráfico de composição química total para a amostra IG013-A36.

## IG013-A37

A amostra IG013-A37 corresponde a um metarenito alterado. A análise apontou para predominância de sílica (86,98%), pela predominância de grãos de quartzo no arcabouço, mas com quantidade razoável de Al (12,51%), possivelmente pela presença de matriz de filossilicatos (pirofilita/caulinita). A composição química é bastante semelhante à da amostra anterior.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	86,98%	0,19%	551,6 PPM	15,7 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,51%	0,49%	228,7 PPM	12,7 um
TiO <sub>2</sub>	0,24%	2,28%	72,0 PPM	80 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11%	1,49%	34,2 PPM	216 um
SO <sub>3</sub>	0,09%	5,83%	98,9 PPM	12,5 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02%	20,20%	118,4 PPM	9,0 um
Cl	0,01%	20,00%	91,4 PPM	17,7 um
K <sub>2</sub> O	0,01%	14,60%	42,0 PPM	34 um
ZrO <sub>2</sub>	0,01%	2,45%	10,6 PPM	3,2 mm
CaO	62 PPM	23,70%	54,9 PPM	46 um
CuO	20 PPM	19,60%	18,0 PPM	0,42 mm

Tabela 5. Composição química total para a amostra IG013-A37.

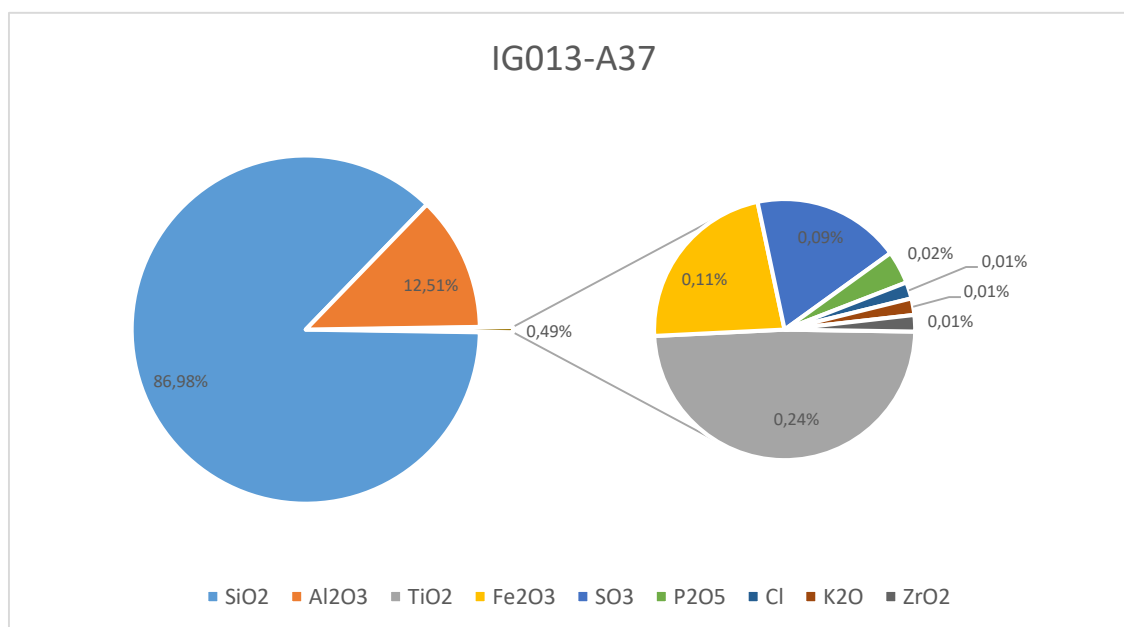


Fig. 11 – Gráfico de composição química total para a amostra IG013-A37.

## Gruta da Parede Vermelha – IG015

A Gruta da Parede Vermelha foi registrada no ponto IG015, para qual foi analisada uma amostra de metarenito fresco (IG015-A09) e alterado (IG015-A10) de um mesmo pacote, além de espeleotema coletado no teto da cavidade (IG015-A11).

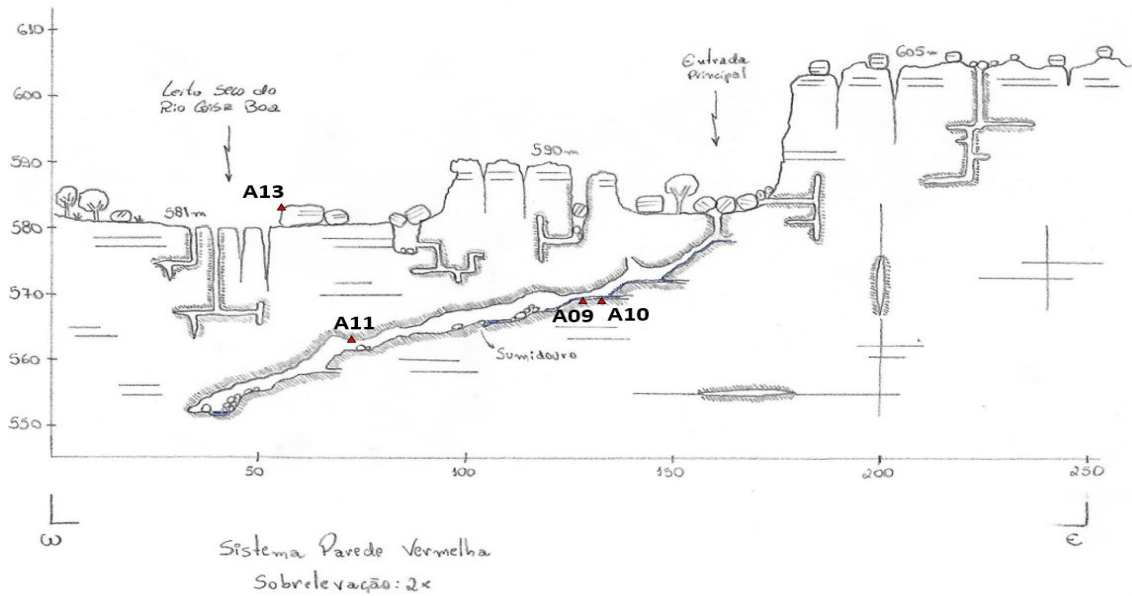


Fig. 12 – Modelo conceitual com distribuição de amostras coletadas na Gruta Parede Vermelha.

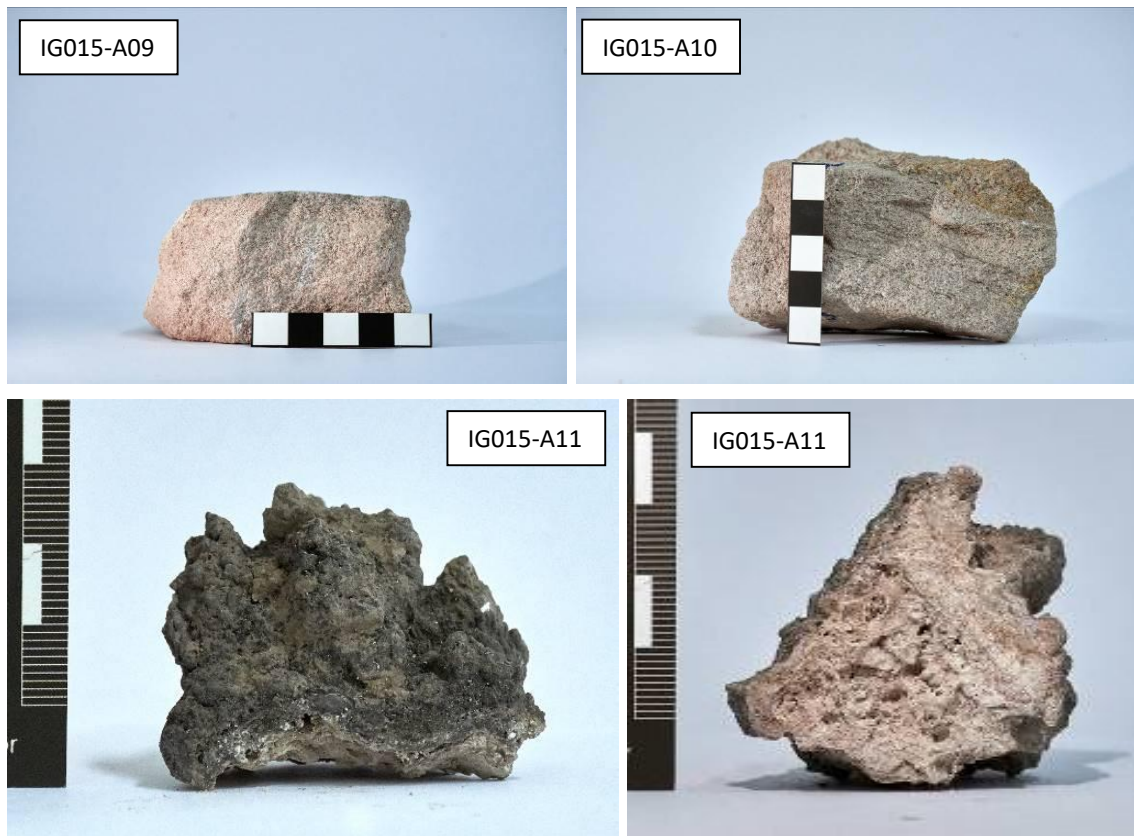


Fig. 13 – Amostras de metarenito e espeleotema analisadas na Gruta Parede Vermelha.

## IG015-A09

A amostra IG015-A09 corresponde a um metarenito fresco. A análise apontou para predominância de sílica (85,95%), pela predominância de grãos de quartzo no arcabouço, mas com quantidade razoável de Al (13,68%), possivelmente pela presença de matriz de filossilicatos (pirofilita/caulinita). A baixa porcentagem de K (0,09%) reflete a ausência de feldspatos no arcabouço ou muscovita na matriz da rocha.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	85,95%	0,19%	572,8 PPM	15,4 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,68%	0,46%	242,0 PPM	12,7 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11%	1,45%	33,0 PPM	216 um
TiO <sub>2</sub>	0,10%	3,68%	71,2 PPM	79 um
K <sub>2</sub> O	0,09%	3,87%	41,8 PPM	34 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03%	13,80%	115,9 PPM	9,0 um
SO <sub>3</sub>	0,01%	21,00%	96,3 PPM	12,4 um
ZrO <sub>2</sub>	93 PPM	2,26%	13,7 PPM	3,2 mm
SrO	81 PPM	2,65%	9,2 PPM	2,28 mm
CuO	22 PPM	17,20%	17,7 PPM	0,42 mm

Tabela 6. Composição química total para a amostra IG015-A09.

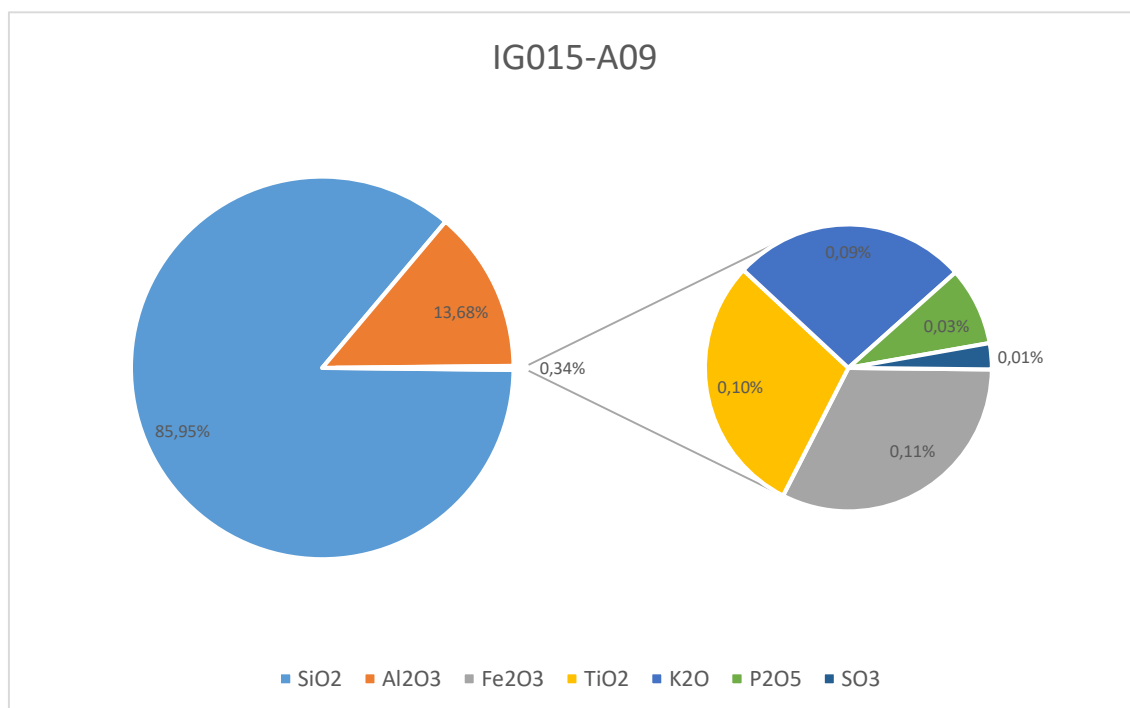


Fig. 14 – Gráfico de composição química total para a amostra IG015-A09.

## IG015-A10

A amostra IG015-A10 corresponde a um metarenito coletado no mesmo pacote da amostra anterior (IG015-A09), porém alterado. A análise apontou para uma redução na quantidade de sílica (82,91%), frente a uma concentração de Al (16,14%), com relação a amostra anterior. Tal evidência sugere perda/lixiviação de Si, por dissolução do quartzo ou da matriz, enquanto o Al, elemento mais pesado e menos móvel, é enriquecido.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO2	82,91%	0,21%	517,1 PPM	14,7 um
Al2O3	16,14%	0,45%	207,4 PPM	12,6 um
TiO2	0,42%	1,78%	69,8 PPM	79 um
K2O	0,21%	2,72%	50,4 PPM	34 um
Fe2O3	0,17%	1,23%	33,9 PPM	212 um
P2O5	0,08%	8,62%	118,4 PPM	8,9 um
SO3	0,03%	13,20%	99,4 PPM	12,4 um
CaO	0,02%	10,70%	62,3 PPM	45 um
ZrO2	0,02%	1,46%	14,2 PPM	3,1 mm
SrO	0,01%	2,49%	9,3 PPM	2,22 mm

Tabela 7. Composição química total para a amostra IG015-A10.

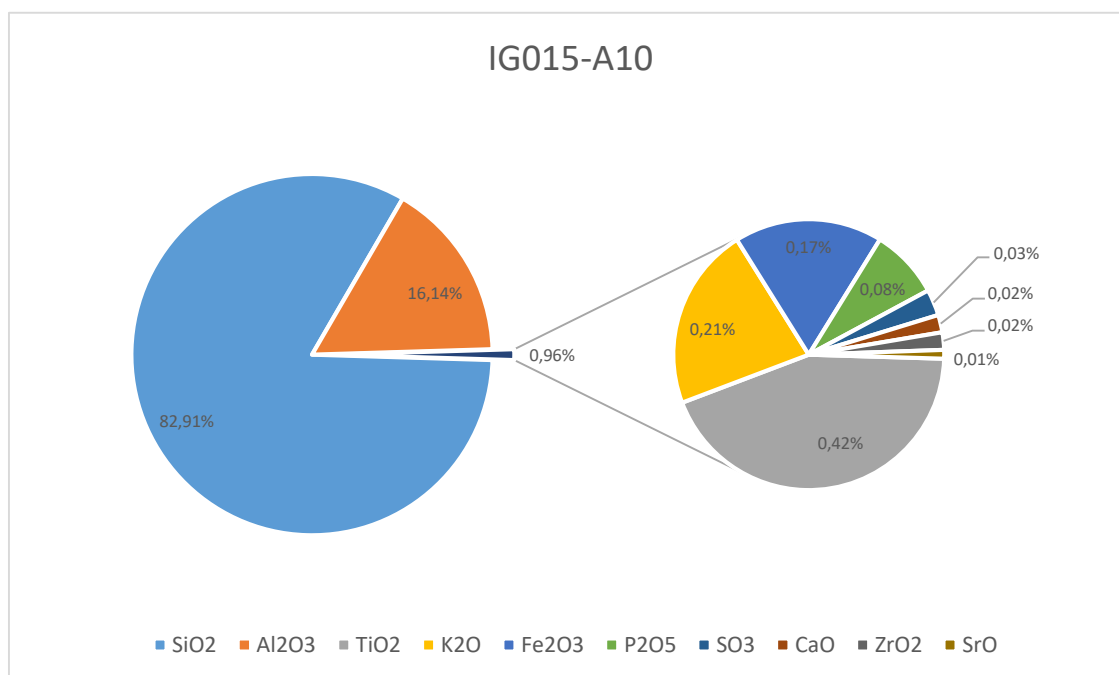


Fig. 15 – Gráfico de composição química total para a amostra IG015-A10.

## IG015-A11

A amostra IG015-A11 corresponde a um espeleotema do tipo crosta coletado no teto da Gruta da Parede Vermelha. A análise aponta para uma composição essencialmente de sílica (97,50%), correspondendo a sílica amorfa precipitada a partir da percolação de água. Secundariamente, ocorre Al (1,89%), resultante também da mobilização em solução aquosa e precipitado, ou então em cristais de pirofilita residuais carregados mecanicamente pela água.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO2	97,50%	0,17%	505,2 PPM	19,2 um
Al2O3	1,89%	1,25%	168,3 PPM	12,9 um
TiO2	0,19%	2,60%	79,0 PPM	81 um
Fe2O3	0,15%	1,24%	35,0 PPM	218 um
P2O5	0,06%	9,90%	133,4 PPM	9,1 um
SO3	0,05%	7,82%	88,1 PPM	12,6 um
K2O	0,05%	5,71%	44,9 PPM	35 um
CaO	0,03%	7,56%	60,3 PPM	46 um
Cl	0,03%	9,35%	77,5 PPM	17,9 um
ZrO2	0,02%	1,49%	14,1 PPM	3,2 mm
SrO	72 PPM	3,09%	9,7 PPM	2,29 mm

Tabela 8. Composição química total para a amostra IG015-A11.

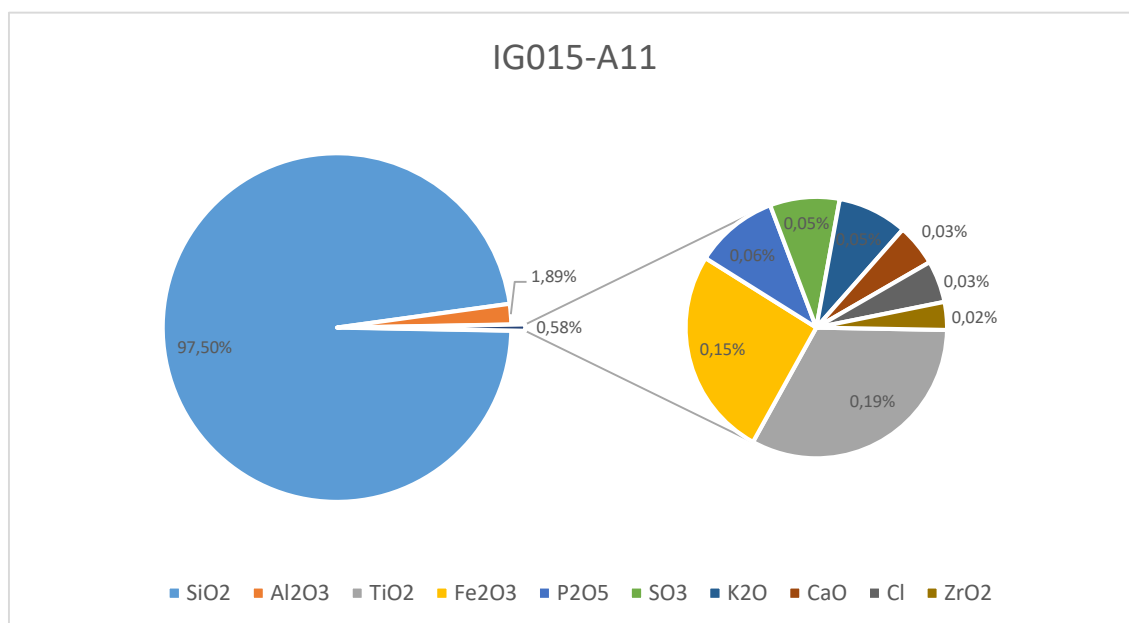


Fig. 16 – Gráfico de composição química total para a amostra IG015-A11.

## Gruta do Trianglim – IG023

Para a Gruta do Trianglim, foram analisadas amostras de metarenito muito alterado (IG023-A20) e espeleotemas - do tipo estalactite (IG023-A14; IG023-A15), coluna de “barro rojo” (IG023-A19), crostas finas (IG023-A21), concreções concêntricas (IG023A-23), crosta de coloração rosa (IG023-A26), mineral branco fibroso a acicular preenchendo fratura (IG023-A27) e pequenas esferas ocas (IG023-A28). Não foi possível posicionar a distribuição das amostras coletadas no modelo, uma vez que o mapa da cavidade não foi concluído até o momento da coleta.

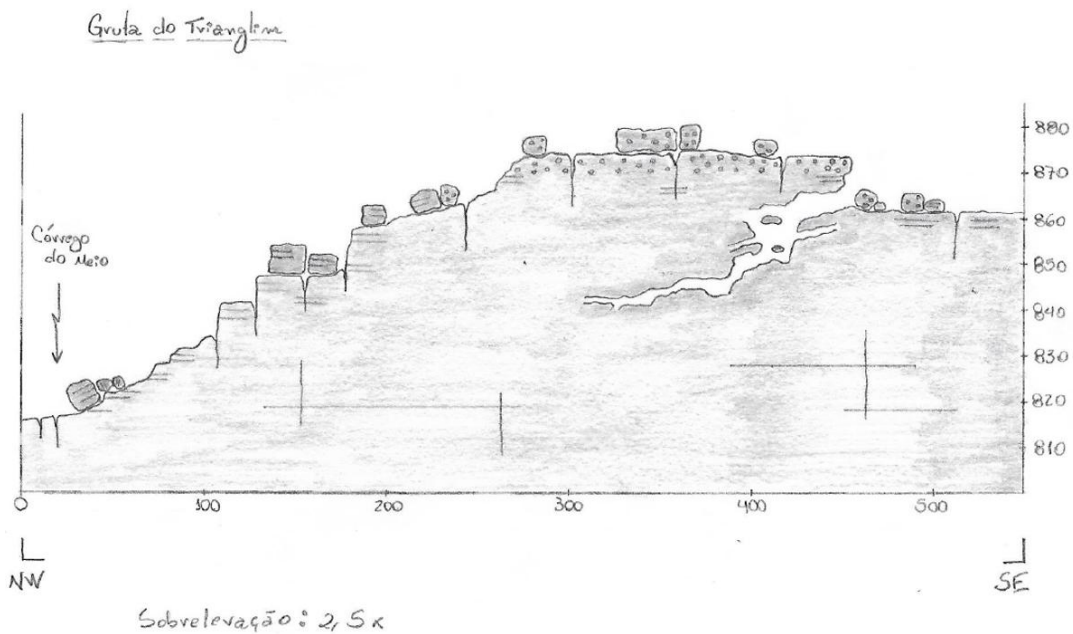


Fig. 17 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas na Gruta do Trianglim.



Fig. 18 – Amostras de espeleotemas analisadas na Gruta do Trianglim.

## IG023-A14

A amostra IG023-A14 corresponde a estalactite de aproximadamente 4 cm, coletada no teto da Gruta da Parede Vermelha. A análise apontou para uma composição química essencialmente silicosa (98,78%), proveniente da sílica amorfa que foi precipitada em ponto de gotejamento de água. A quantidade de Al é baixa (0,95%), mas indica que o elemento também é, em escala muito menor, remobilizado em solução (ou pode corresponder a grãos de pirofilita carregados mecanicamente pela água).

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	98,78%	0,17%	552,7 PPM	19,7 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,95%	1,75%	163,2 PPM	13,0 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,06%	2,12%	33,8 PPM	221 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06%	9,82%	131,7 PPM	9,2 um
SO <sub>3</sub>	0,06%	7,20%	79,1 PPM	12,7 um
K <sub>2</sub> O	0,03%	7,53%	47,1 PPM	35 um
Cl	0,02%	11,20%	73,2 PPM	18,0 um
CaO	0,02%	10,20%	57,0 PPM	47 um
ZrO <sub>2</sub>	0,01%	1,88%	10,7 PPM	3,2 mm
NiO	27 PPM	16,60%	20,7 PPM	0,35 mm
CuO	20 PPM	19,10%	17,9 PPM	0,43 mm

Tabela 9. Composição química total para a amostra IG023-A14.

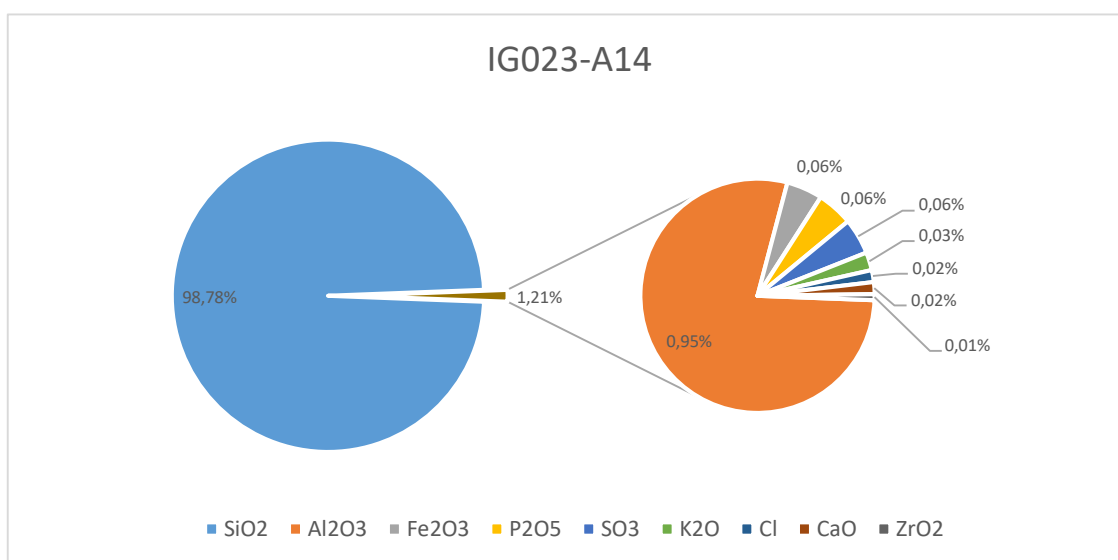


Fig. 19 – Gráfico de composição química total para a amostra IG023-A14.

## IG023-A15

A amostra IG023-A15 corresponde a espeleotema do tipo coraloide, coletado no teto da cavidade. A análise apontou para uma composição química essencialmente silicosa (97,45%), proveniente da sílica dissolvida da rocha e precipitada na sua variedade amorfa. Al também está presente (2,12%), em concentração maior que nos espeleotemas tipo estalactite e crosta anteriores). Outros elementos ocorrem de forma incipiente.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	97,45%	0,17%	598,2 PPM	19,2 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,12%	1,17%	155,6 PPM	12,9 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11%	1,46%	33,7 PPM	220 um
K <sub>2</sub> O	0,08%	4,25%	48,9 PPM	35 um
TiO <sub>2</sub>	0,08%	4,27%	72,9 PPM	81 um
SO <sub>3</sub>	0,05%	8,13%	88,3 PPM	12,7 um
Na <sub>2</sub> O	0,04%	20,60%	340,4 PPM	5,0 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03%	14,10%	131,2 PPM	9,2 um
CaO	0,01%	13,40%	61,7 PPM	46 um
ZrO <sub>2</sub>	89 PPM	2,50%	13,8 PPM	3,2 mm
SrO	65 PPM	3,37%	9,7 PPM	2,32 mm

Tabela 10. Composição química total para a amostra IG023-A15.

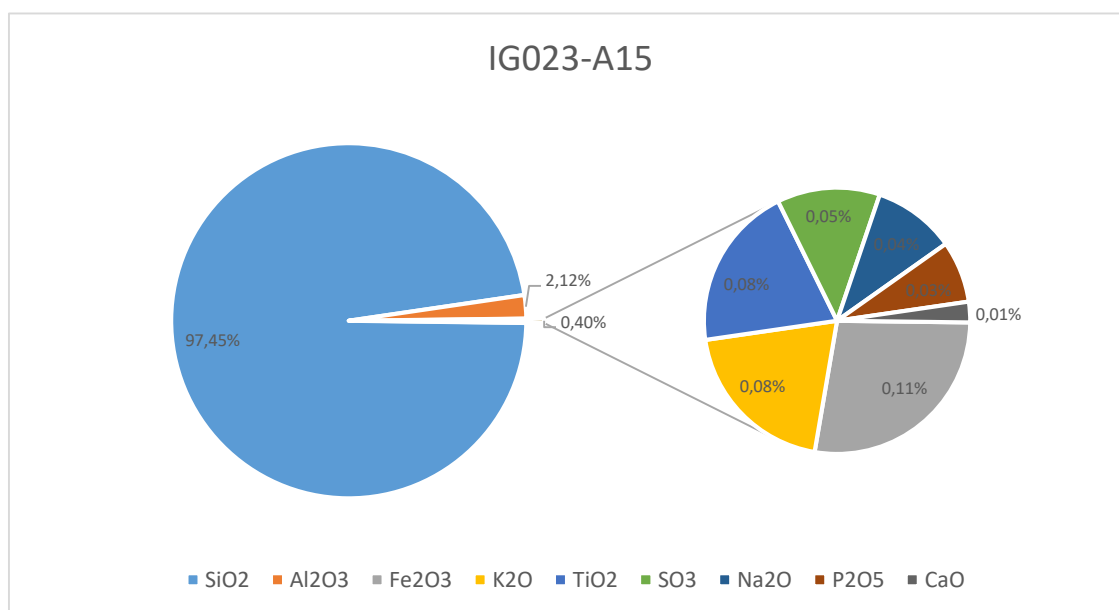


Fig. 20 – Gráfico de composição química total para a amostra IG023-A15.

## IG023-A19

A amostra IG023-A19 corresponde a coluna de espeleotema “barro rojo”, de composição argilosa e cor avermelhada. A análise química apontou para a predominância de Fe (92,81%), conforme esperado. Além disso, também ocorre Si (6,31%), possivelmente presente nas argilas ou em grãos de quartzo residuais.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
Fe2O3	92,81%	0,06%	221,1 PPM	65 um
SiO2	6,31%	0,91%	257,6 PPM	1,95 um
Al2O3	0,52%	3,54%	282,2 PPM	1,30 um
SO3	0,18%	3,68%	113,1 PPM	3,9 um
Gd2O3	0,07%	16,20%	182,9 PPM	56 um
Cl	0,05%	6,61%	88,1 PPM	5,5 um
TiO2	0,01%	17,00%	89,0 PPM	24,3 um
ZrO2	0,01%	6,28%	32,4 PPM	114 um
MnO	0,01%	13,10%	65,6 PPM	52 um
As2O3	94 PPM	11,10%	44,7 PPM	38 um
Cr2O3	90 PPM	14,40%	56,2 PPM	41 um
Br	52 PPM	17,00%	42,3 PPM	53 um
Tb4O7	8 PPM	3,94%	601,2 PPM	61 um

Tabela 11. Composição química total para a amostra IG023-A19.

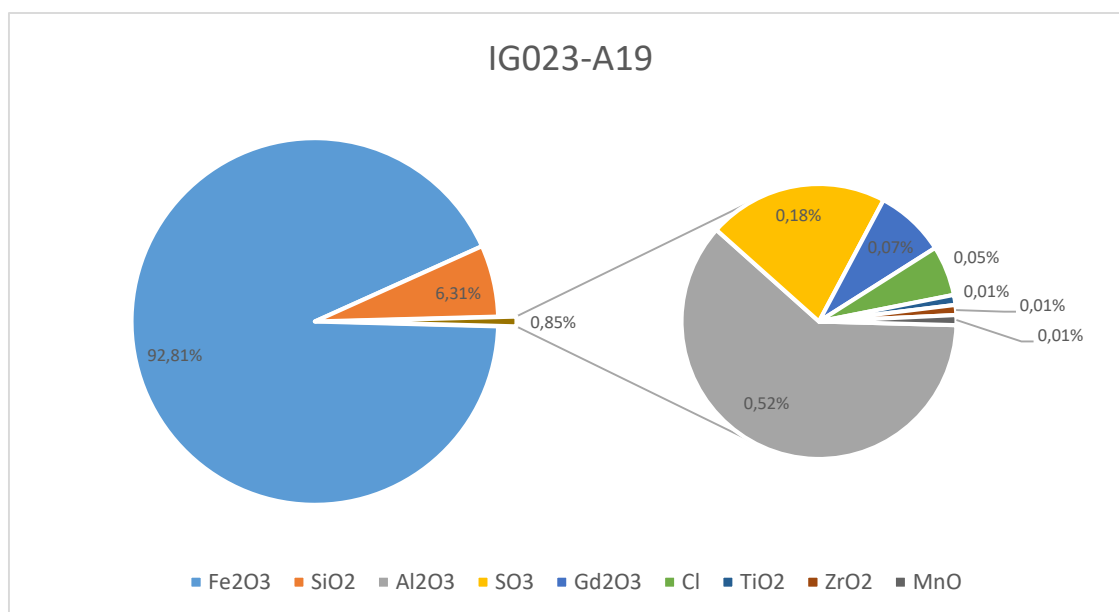


Fig. 21 – Gráfico de composição química total para a amostra IG023-A19.

## IG023-A20

A amostra IG023-A20 corresponde a amostra de metarenito alterado, pouco coeso. A análise apontou para uma composição essencialmente quartzosa (98,05%), enquanto o Al aparece de forma incipiente (1,31%).

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO2	98,05%	0,18%	551,8 PPM	19,5 um
Al2O3	1,31%	1,57%	154,5 PPM	13,0 um
P2O5	0,36%	3,77%	138,7 PPM	9,2 um
Fe2O3	0,13%	1,44%	34,2 PPM	220 um
TiO2	0,08%	4,49%	70,7 PPM	81 um
SO3	0,02%	17,20%	103,6 PPM	12,7 um
Cl	0,02%	14,20%	80,1 PPM	18,0 um
CaO	0,01%	14,50%	54,1 PPM	47 um
K2O	0,01%	15,70%	47,5 PPM	35 um
ZrO2	75 PPM	3,25%	11,7 PPM	3,2 mm
SrO	15 PPM	14,40%	9,3 PPM	2,32 mm

Tabela 12. Composição química total para a amostra IG023-A20.

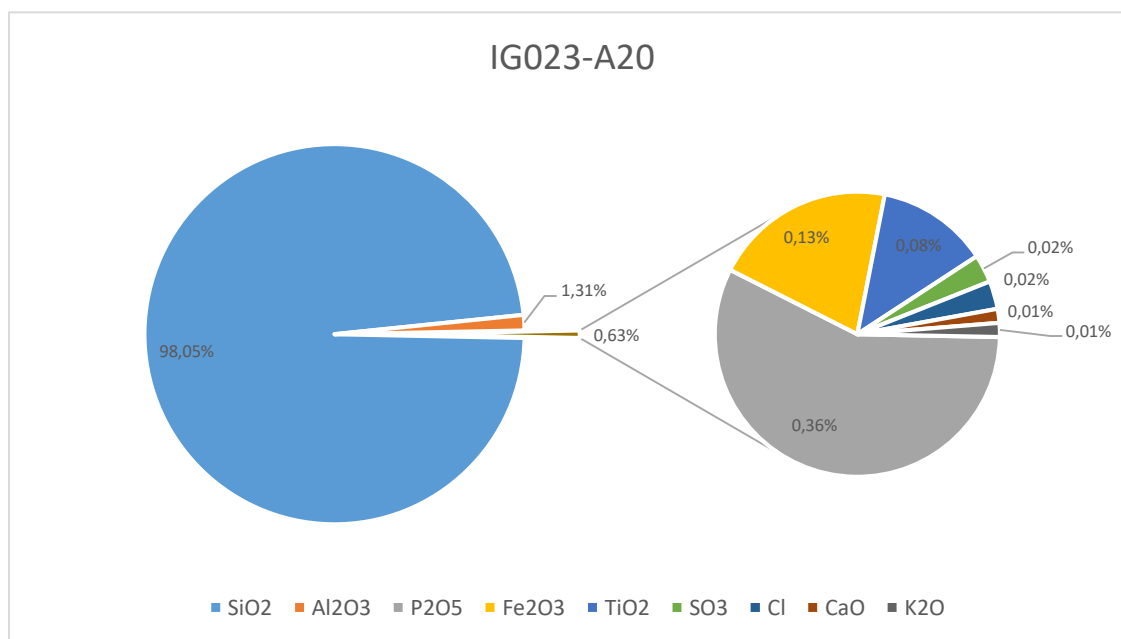


Fig. 22 – Gráfico de composição química total para a amostra IG023-A20.

## IG023-A21

A amostra IG023-A21 corresponde a uma fina crosta que recobre um metarenito muito alterado no piso da Gruta do Trianglim. A crosta tem composição essencialmente silicosa (95,33%), mas também estão presentes Al (1,87%), Fe (1,51%) e P (0,94%), o que pode determinar a alternância de coloração entre as camadas finas da crosta.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	95,33%	0,18%	558,3 PPM	18,0 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,87%	1,28%	174,2 PPM	12,1 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,51%	0,37%	130,7 PPM	210 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,94%	2,20%	142,4 PPM	8,8 um
TiO <sub>2</sub>	0,11%	3,58%	73,5 PPM	77 um
SO <sub>3</sub>	0,08%	6,31%	105,3 PPM	12,2 um
CaO	0,05%	5,72%	60,3 PPM	45 um
K <sub>2</sub> O	0,05%	5,78%	52,9 PPM	33 um
Cl	0,04%	8,31%	74,2 PPM	17,2 um
ZrO <sub>2</sub>	0,02%	1,26%	13,3 PPM	2,82 mm
SrO	39 PPM	5,66%	9,9 PPM	2,04 mm

Tabela 13. Composição química total para a amostra IG023-A21.

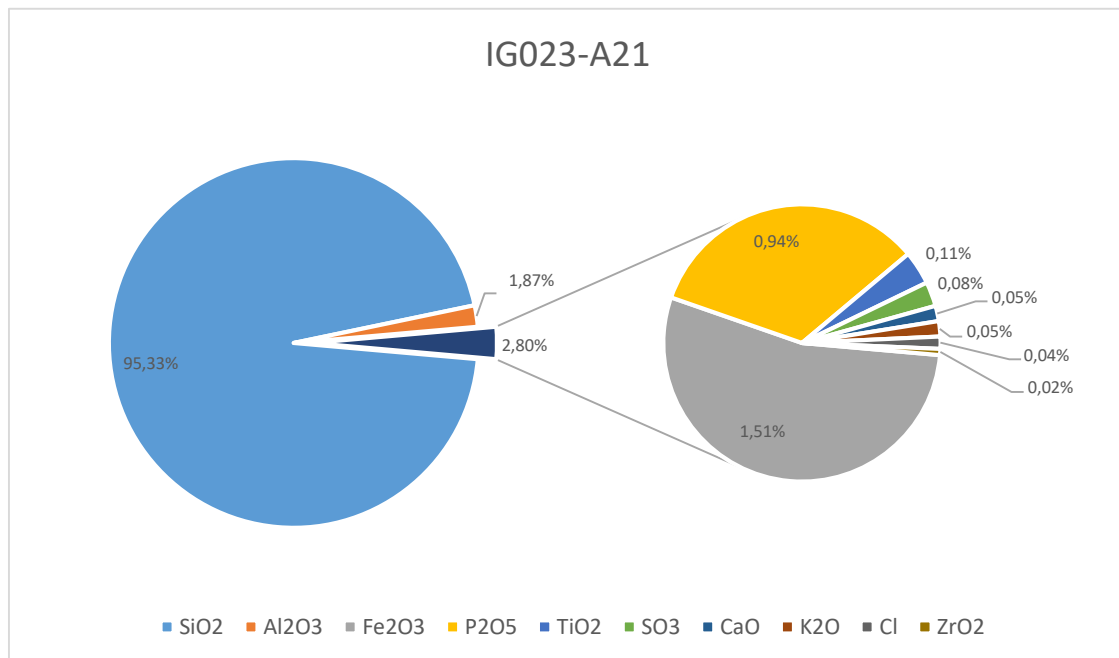


Fig. 23 – Gráfico de composição química total para a amostra IG023-A21.

## IG023-A23

A amostra IG023-A23 corresponde a espeleotema do tipo concreção concêntrica, coletado no piso da cavidade. A composição é predominantemente silicosa (86,17%), mas também ocorrem, em quantidade razoável, Al (5,91%), P (4,01%) e Fe (3,47%).

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	86,17%	0,19%	539,0 PPM	15,3 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,91%	0,72%	187,2 PPM	11,0 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	4,01%	1,05%	169,9 PPM	8,5 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,47%	0,24%	138,3 PPM	198 um
TiO <sub>2</sub>	0,16%	2,90%	77,0 PPM	73 um
SO <sub>3</sub>	0,10%	5,38%	102,8 PPM	11,5 um
CaO	0,05%	5,60%	64,3 PPM	42 um
K <sub>2</sub> O	0,05%	5,78%	51,0 PPM	31 um
ZrO <sub>2</sub>	0,03%	1,05%	15,6 PPM	2,37 mm
Cl	0,03%	10,70%	80,1 PPM	16,3 um
SrO	70 PPM	3,57%	10,9 PPM	1,72 mm
ZnO	38 PPM	10,60%	18,0 PPM	0,40 mm
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33 PPM	10,40%	15,7 PPM	0,72 mm
CuO	22 PPM	19,80%	20,5 PPM	0,33 mm

Tabela 14. Composição química total para a amostra IG023-A23.

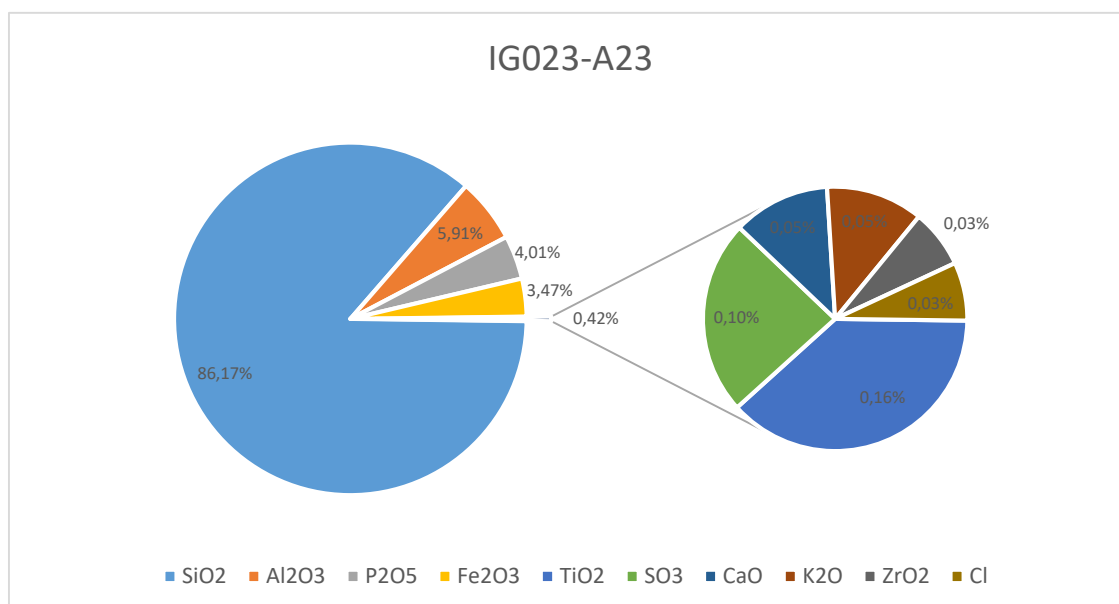


Fig. 24 – Gráfico de composição química total para a amostra IG023-A23.



## IG023-A27

A amostra IG023-A47 corresponde a um mineral de coloração branca, de hábito fibroso a acicular, que ocorre preenchendo fratura em parede da Gruta do Trianglim. A análise de FRX apontou para composição química onde ocorre S (52,47%) e Ca (45,27%), sugerindo se tratar de gipsita ( $\text{CaSO}_4$ ). Também ocorre Al (1%) subordinado.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SO3	52,47%	0,17%	227,4 PPM	35 um
CaO	45,27%	0,19%	458,0 PPM	61 um
Al2O3	1,00%	1,91%	158,9 PPM	10,9 um
SiO2	0,59%	2,39%	156,7 PPM	16,4 um
MnO	0,19%	1,93%	63,7 PPM	90 um
K2O	0,15%	3,12%	66,8 PPM	45 um
P2O5	0,13%	4,93%	151,8 PPM	24,2 um
Cl	0,07%	5,39%	87,5 PPM	24,9 um
MgO	0,06%	12,90%	248,3 PPM	6,9 um
SrO	0,05%	1,19%	17,3 PPM	1,06 mm
Fe2O3	0,01%	12,70%	56,7 PPM	112 um
MoO3	40 PPM	13,50%	23,6 PPM	1,96 mm

Tabela 16. Composição química total para a amostra IG023-A27.

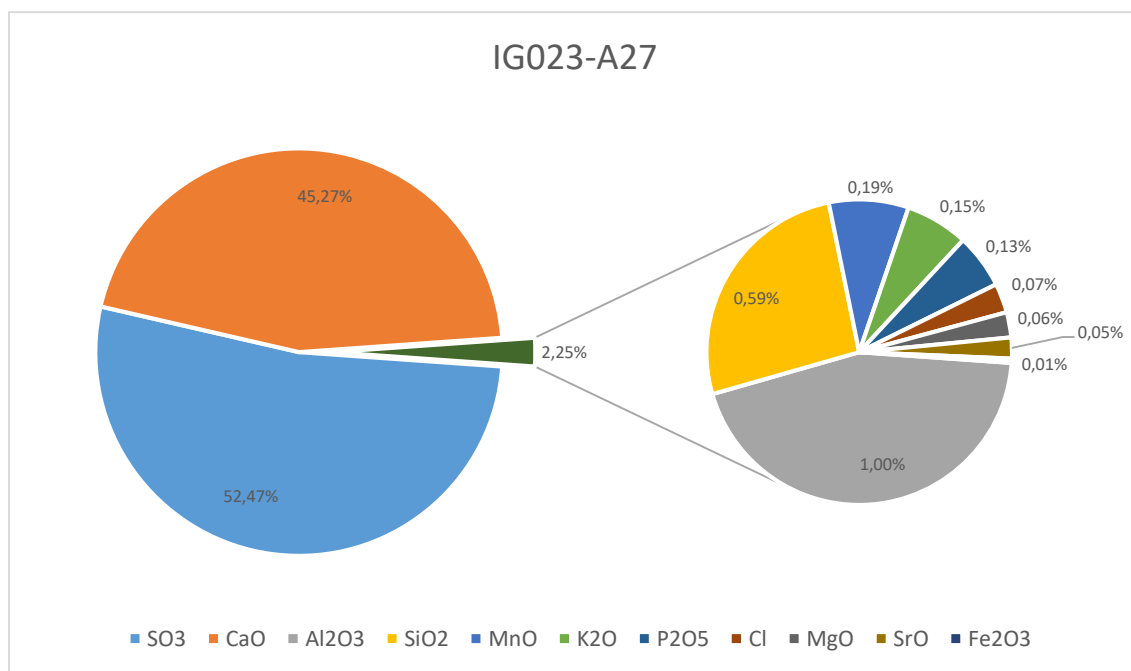


Fig. 26 – Gráfico de composição química total para a amostra IG023-A27.

## IG023-A28

A amostra IG023-A28 corresponde a pequenas esferas ocas, acumuladas no interior de espécies de travertinos, onde aparentemente represava água. A análise química indicou composição essencialmente silicosa (95,04%), com a presença em muito menor escala de alumínio (2,81%), para além de algum P (0,93%) e Fe (0,50%).

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO2	95,04%	0,17%	562,1 PPM	18,6 um
Al2O3	2,81%	1,00%	178,5 PPM	12,7 um
P2O5	0,93%	2,15%	131,4 PPM	9,1 um
Fe2O3	0,50%	0,63%	35,1 PPM	217 um
SO3	0,35%	2,75%	107,2 PPM	12,6 um
CaO	0,08%	4,30%	66,0 PPM	46 um
K2O	0,08%	4,21%	49,5 PPM	34 um
Cl	0,08%	5,18%	90,1 PPM	17,8 um
TiO2	0,07%	4,63%	73,8 PPM	80 um
MgO	0,05%	14,40%	302,7 PPM	8,0 um
ZrO2	0,01%	2,08%	14,3 PPM	3,1 mm
SrO	60 PPM	3,65%	10,0 PPM	2,23 mm

Tabela 17. Composição química total para a amostra IG023-A28.

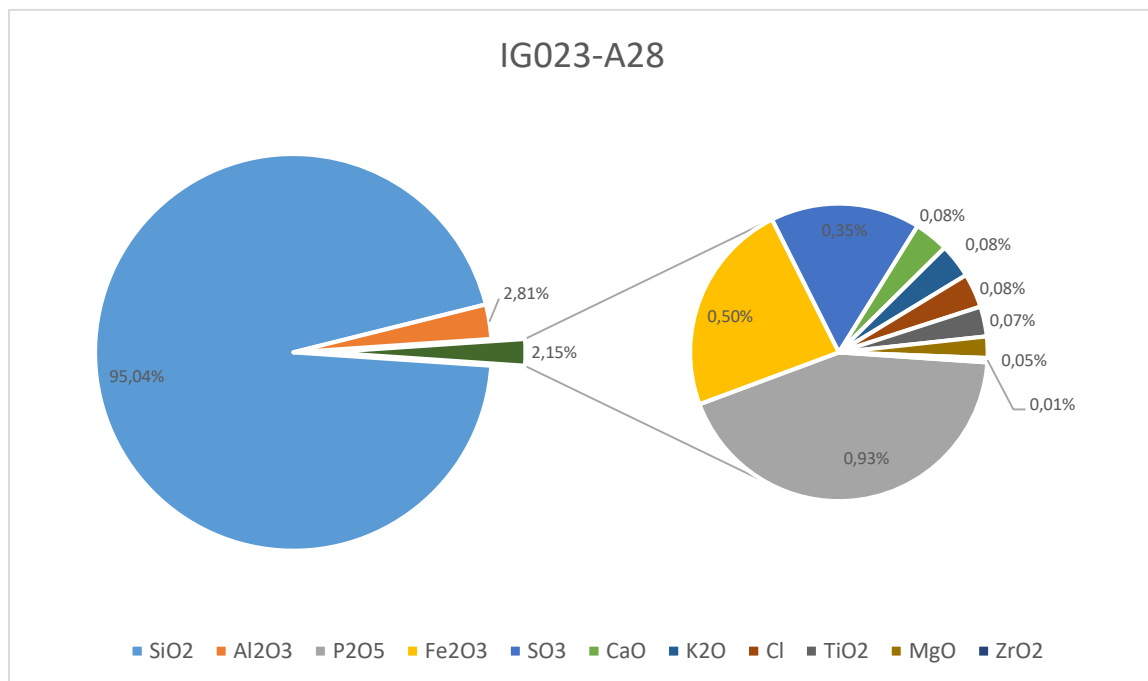


Fig. 27 – Gráfico de composição química total para a amostra IG023-A28.

## Gruta do Teté – IG024

Para a Gruta do Teté, foram analisadas amostras de metarenito alterado da parede da cavidade, para além de (IG024-A48) sedimentos em depósitos clásticos coletados no interior da caverna (IG024-A47 e IG024-A50).

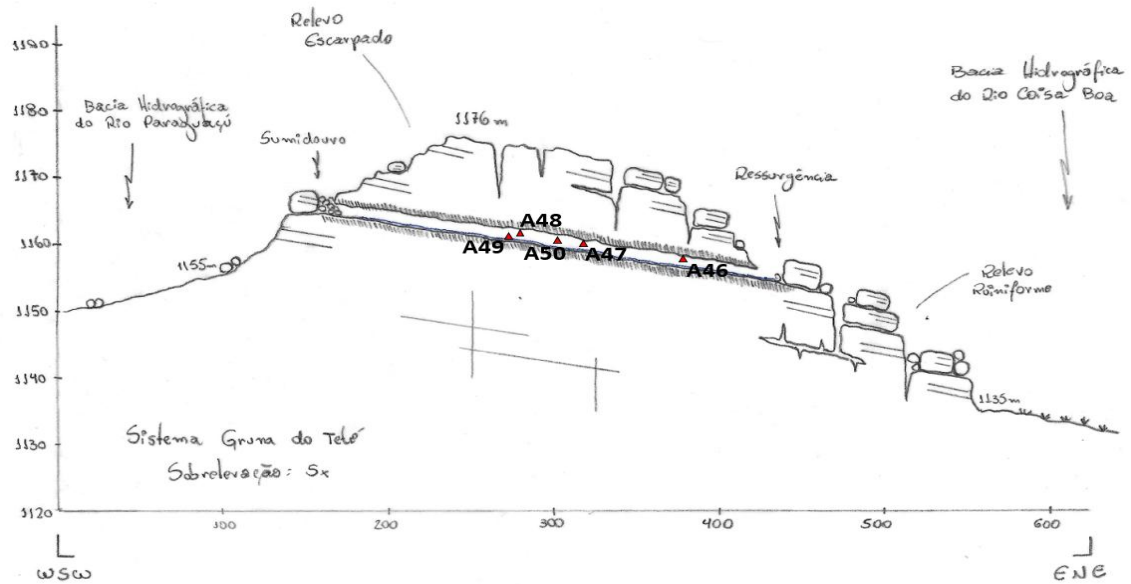


Fig. 28 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para a Gruta do Teté.

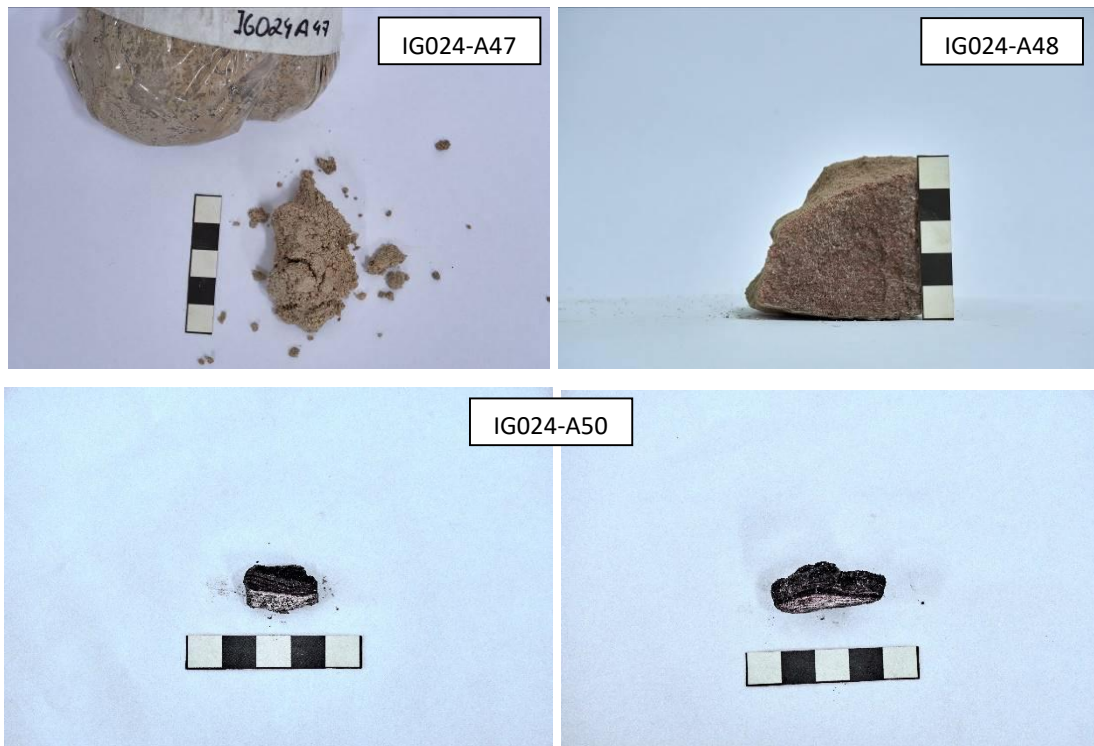


Fig. 29 – Amostras de metarenito alterado e sedimentos clásticos analisadas na Gruta do Teté.

## IG024-A47

A amostra IG024-A47 corresponde a depósito clástico coletado nas bancadas laterais ao curso fluvial no interior da Gruta do Teté. Corresponde ao cascalho denominado pelos garimpeiros de “coalhada”, devido a presença de material argiloso de coloração branca. Predomina a sílica (87,85%), mas a quantidade de Al é considerável (10,42%). A presença de Ti como elemento maior (>1%) também é notável.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	87,85%	0,19%	553,1 PPM	15,9 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,42%	0,53%	225,9 PPM	12,4 um
TiO <sub>2</sub>	1,43%	0,90%	74,6 PPM	79 um
ZrO <sub>2</sub>	0,09%	0,47%	43,8 PPM	3,0 mm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,09%	1,71%	34,5 PPM	207 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06%	9,96%	145,1 PPM	8,9 um
SO <sub>3</sub>	0,04%	10,10%	111,9 PPM	12,3 um
SrO	0,01%	2,05%	9,6 PPM	2,17 mm
K <sub>2</sub> O	94 PPM	15,60%	45,1 PPM	34 um
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	34 PPM	7,45%	13,4 PPM	3,5 mm

Tabela 18. Composição química total para a amostra IG024-A47.

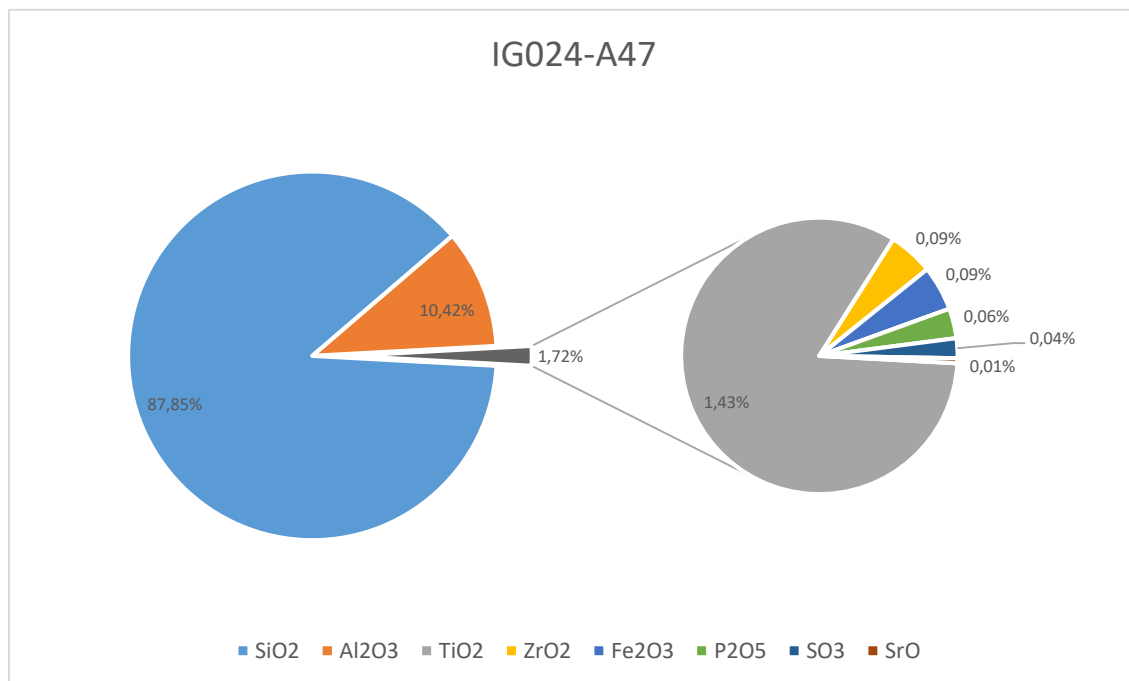


Fig. 30 – Gráfico de composição química total para a amostra IG024-A47.

## IG024-A48

A amostra IG024-A48 corresponde a um metarenito bastante alterado, coletado da parede da caverna, aparentemente no pacote rochoso onde a cavidade se desenvolve. A composição química é predominantemente silicosa (91,75%), porém a proporção de Al é razoável (7,77%), indicando ser o metarenito provido de matriz aluminosa (filossilicatos).

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO2	91,75%	0,18%	569,7 PPM	17,1 um
Al2O3	7,77%	0,60%	212,7 PPM	12,8 um
TiO2	0,29%	2,04%	69,5 PPM	80 um
Fe2O3	0,09%	1,62%	33,6 PPM	217 um
Cl	0,02%	11,80%	85,8 PPM	17,8 um
P2O5	0,02%	18,00%	125,9 PPM	9,0 um
SO3	0,02%	14,90%	105,2 PPM	12,5 um
K2O	0,01%	11,70%	43,8 PPM	34 um
ZrO2	0,01%	1,91%	13,7 PPM	3,2 mm
SrO	81 PPM	2,65%	9,3 PPM	2,29 mm
CuO	22 PPM	17,40%	17,8 PPM	0,42 mm

Tabela 19. Composição química total para a amostra IG024-A48.

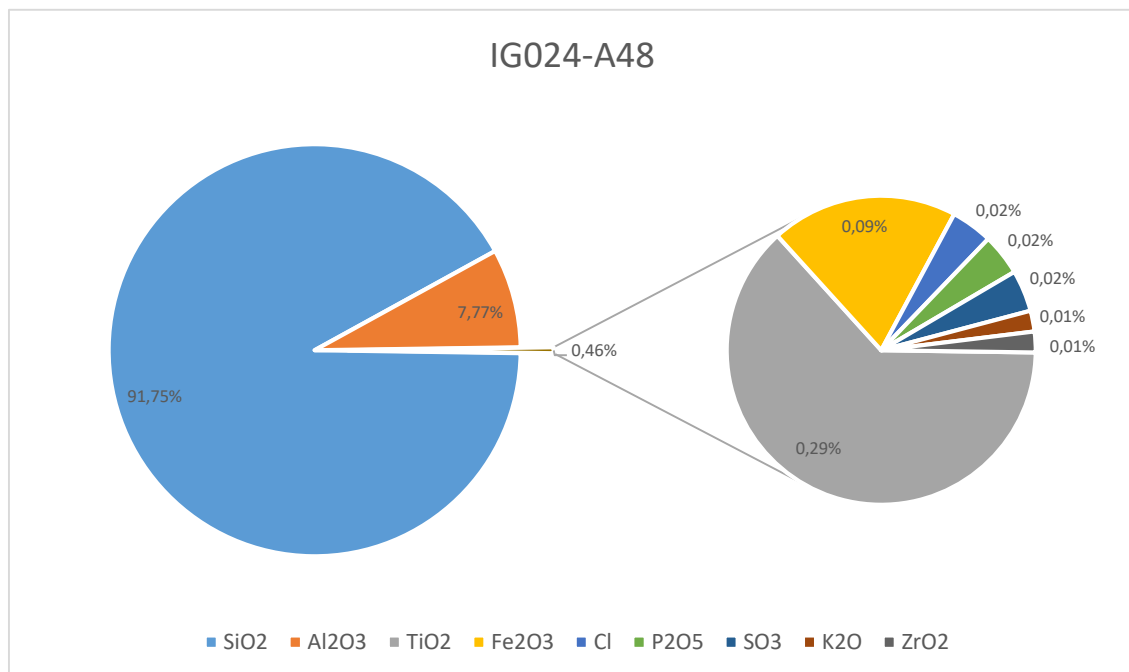


Fig. 31 – Gráfico de composição química total para a amostra IG024-A48.

## IG024-A50

A amostra IG024-A50 corresponde a depósito clástico coletada em bancadas laterais ao curso fluvial no interior da caverna, sendo caracterizada por alternância de lâminas claras e escuras, aparentemente ricas em matéria orgânica. A composição é silicosa (81,16%), porem enriquecida em Al (15,40%), possivelmente devido às argilas. A concentração do Ti como elemento maior também é notável (1,74%).

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	81,16%	0,21%	534,7 PPM	14,2 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,40%	0,46%	249,5 PPM	12,0 um
TiO <sub>2</sub>	1,74%	0,86%	76,4 PPM	77 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,47%	0,72%	35,5 PPM	199 um
CaO	0,30%	2,26%	65,1 PPM	44 um
SO <sub>3</sub>	0,27%	3,34%	105,2 PPM	12,2 um
MgO	0,25%	4,77%	362,8 PPM	7,6 um
ZrO <sub>2</sub>	0,12%	0,46%	49,5 PPM	2,82 mm
Na <sub>2</sub> O	0,08%	14,30%	397,3 PPM	4,6 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08%	8,80%	137,3 PPM	8,8 um
K <sub>2</sub> O	0,06%	5,41%	42,4 PPM	33 um
Cl	0,05%	7,03%	83,4 PPM	17,2 um
SrO	0,02%	1,86%	10,7 PPM	2,03 mm
Br	56 PPM	5,75%	13,1 PPM	1,21 mm
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	36 PPM	8,82%	15,0 PPM	3,3 mm
NiO	30 PPM	17,60%	21,9 PPM	0,31 mm
ZnO	30 PPM	14,30%	17,4 PPM	0,47 mm

Tabela 20. Composição química total para a amostra IG024-A50.

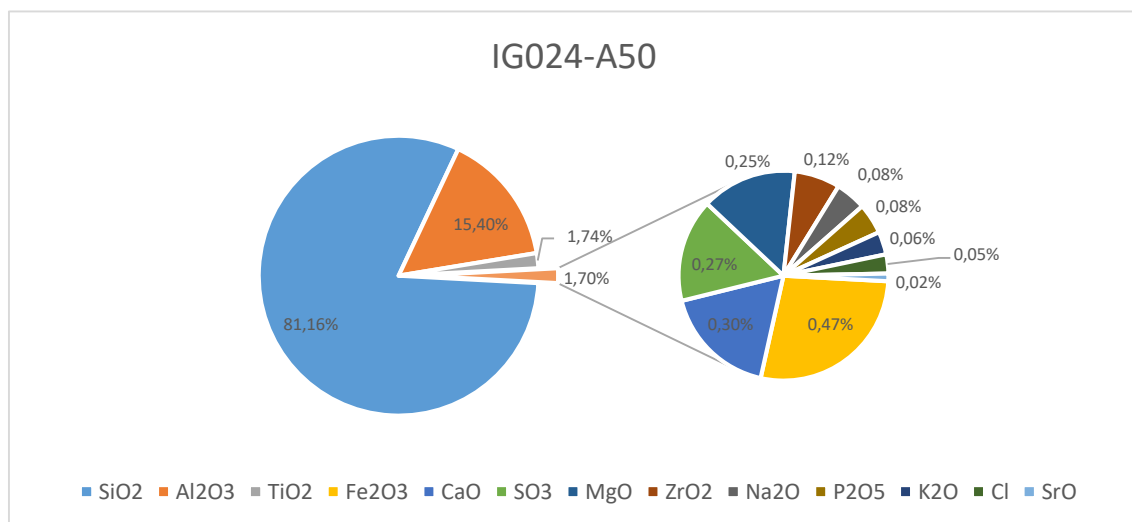


Fig. 32 – Gráfico de composição química total para a amostra IG024-A50.

## Gruta de Torras – IG029

As amostras descritas para a Gruta de Torras correspondem a espeleotema do tipo precipitação de óxidos/hidróxidos de ferro (IG029-A30), além de metarenito alterado (IG029-A31), coletado na parede da caverna e correspondente ao pacote em que a cavidade se desenvolve, além de metarenito granuloso (microconglomerado) alterado coletado no teto da caverna (IG029-A32).

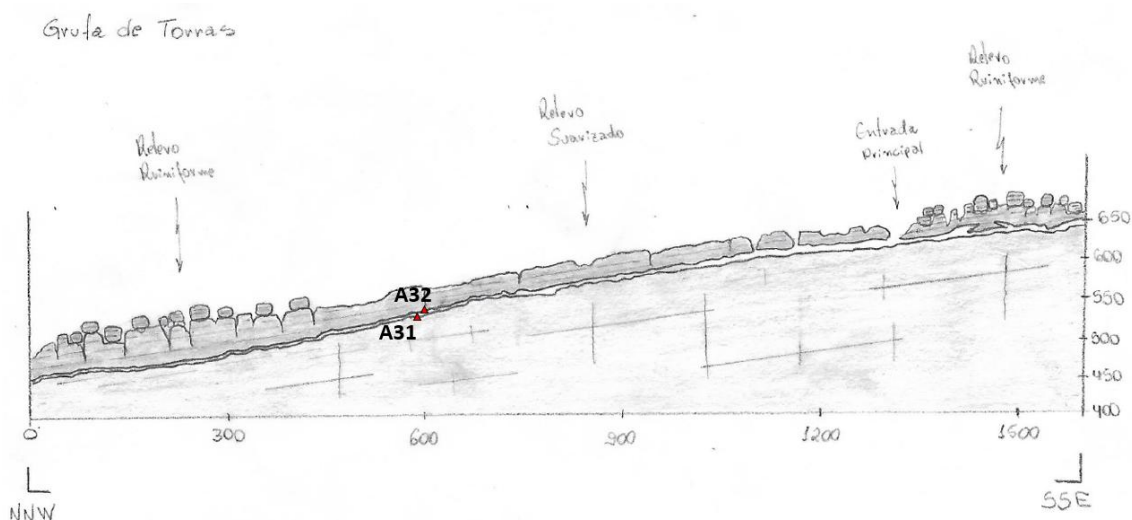


Fig. 33 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para a Gruta de Torras.



Fig. 34 – Amostras de espeleotema, metarenito e metarenito granuloso da Gruta de Torras.

## IG029-A30

A amostra IG029-A30 corresponde a espeleotema coletado na Gruta de Torras, do tipo concreções e precipitações de óxidos de ferro, laminado e de cor avermelhada. A análise química apontou para uma composição essencialmente de Fe (93,45%), com Si (2,40%), Al (1,93%) e P (1,86%) subordinados.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
Fe2O3	93,45%	0,06%	217,5 PPM	65 um
SiO2	2,40%	1,50%	267,4 PPM	1,91 um
Al2O3	1,93%	1,78%	283,8 PPM	1,29 um
P2O5	1,86%	1,43%	192,9 PPM	2,74 um
SO3	0,15%	4,06%	110,0 PPM	3,9 um
Gd2O3	0,06%	17,80%	180,1 PPM	55 um
TiO2	0,05%	5,93%	88,2 PPM	24,2 um
V2O5	0,03%	8,65%	100,1 PPM	31 um
As2O3	0,02%	5,00%	44,0 PPM	37 um
Ag	0,02%	18,90%	139,4 PPM	296 um
Cr2O3	0,02%	7,44%	75,6 PPM	40 um
ZrO2	98 PPM	7,51%	32,1 PPM	113 um
Tb4O7	8 PPM	3,94%	598,8 PPM	61 um

Tabela 21. Composição química total para a amostra IG029-A30.

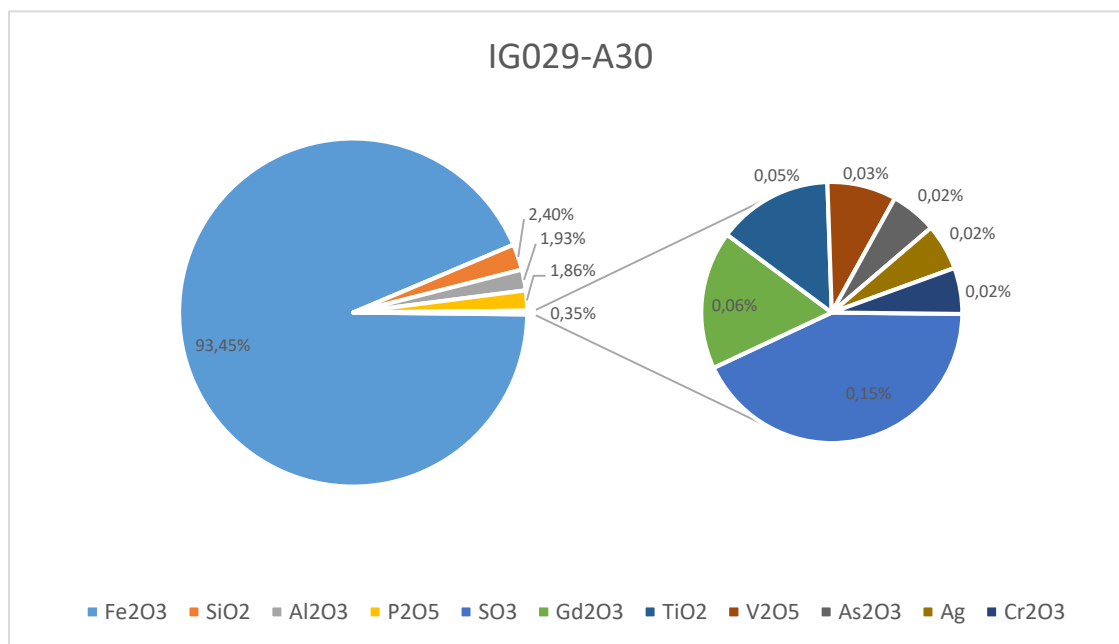


Fig. 35 – Gráfico de composição química total para a amostra IG029-A30.

## IG029-A31

A amostra IG029-A31 corresponde a metarenito alterado do pacote em que a caverna se desenvolve. Predomina a sílica (85,20%), no entanto a porcentagem de Al também é relevante (13,50%), indicando uma rocha rica em aluminossilicatos na matriz. Elementos menores (0,1-1%), como Fe (0,42%) e P (0,13%) também ocorrem.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	85,20%	0,19%	557,1 PPM	15,3 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,50%	0,46%	226,5 PPM	12,5 um
K <sub>2</sub> O	0,56%	1,54%	51,6 PPM	34 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,42%	0,70%	34,4 PPM	212 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,13%	6,22%	121,9 PPM	8,9 um
TiO <sub>2</sub>	0,09%	3,95%	72,9 PPM	78 um
Na <sub>2</sub> O	0,04%	21,60%	372,8 PPM	4,8 um
SO <sub>3</sub>	0,03%	11,70%	103,1 PPM	12,4 um
SrO	0,02%	1,14%	9,5 PPM	2,19 mm
ZrO <sub>2</sub>	0,01%	1,71%	16,4 PPM	3,0 mm

Tabela 22. Composição química total para a amostra IG029-A31.

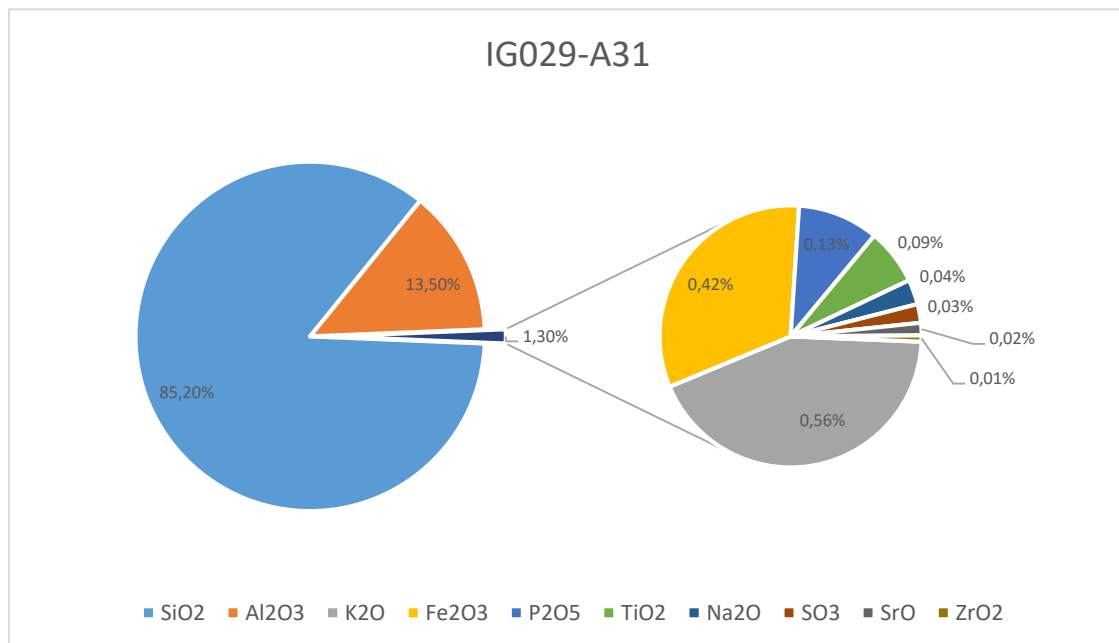


Fig. 36 – Gráfico de composição química total para a amostra IG029-A31.

## IG029-A32

A amostra IG029-A32 corresponde a metarenito granuloso (ou microconglomerado) de coloração arroxeada, coletado no teto da cavidade. A amostra é predominantemente silicosa (91,70%), com uma porcentagem de Al também considerável (6,02%), para além de Fe (1,82%) como elemento maior, o que dá a coloração para a rocha.

Formula	Concentration	Stat. error	LLD	Analyzed layer
SiO <sub>2</sub>	91,70%	0,19%	571,1 PPM	16,4 um
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,02%	0,72%	200,0 PPM	11,9 um
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,82%	0,34%	131,2 PPM	207 um
K <sub>2</sub> O	0,17%	2,94%	49,2 PPM	33 um
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14%	6,25%	140,6 PPM	8,6 um
TiO <sub>2</sub>	0,09%	4,02%	69,6 PPM	76 um
SO <sub>3</sub>	0,03%	11,90%	103,4 PPM	12,0 um
SrO	0,03%	1,08%	9,9 PPM	1,97 mm
ZrO <sub>2</sub>	79 PPM	2,08%	17,6 PPM	2,73 mm

Tabela 23. Composição química total para a amostra IG029-A32.

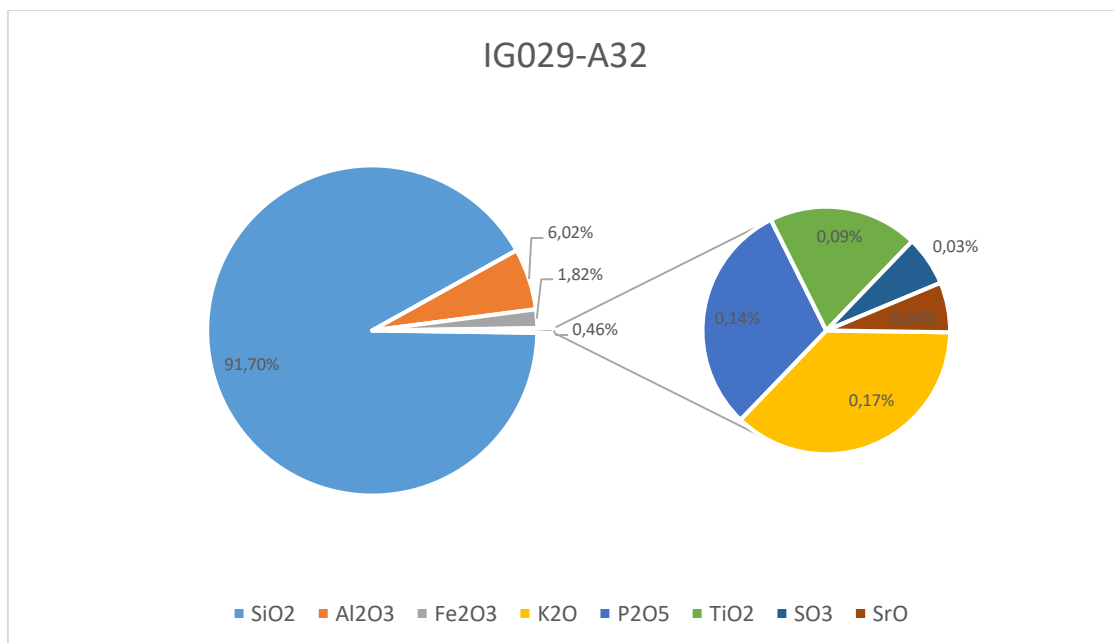


Fig. 37 – Gráfico de composição química total para a amostra IG029-A32.

## DISCUSSÃO

As análises de fluorescência aplicadas em amostras de rocha permitiram a diferenciação de metarenitos mais puros, maduros e quartzosos (quartzo-metarenitos), nos quais a concentração de sílica supera os 98% e a de alumínio não ultrapassa os 2% (Ex. IG019-A06, IG019-07 e IG023-A20). Por outro lado, identificou-se uma classe de rochas mais impuras, menos maduras e com maior proporção de matriz (quartzo-metagrauvas), na qual a porcentagem de sílica varia entre 82 e 91%, enquanto o total de alumínio se mantém entre 6 e 16% (Ex. IG013-A36, IG013-A37, IG015A09, IG015-A10, IG024-A48, IG029-A31 e IG029-A32).

Os dados de composição química aqui expostos coincidem com aqueles encontrados por Sauro (2014) para grandes sistemas de cavernas desenvolvidas em arenitos nos Tepuis venezuelanos, para os quais se identifica duas fácies sedimentares: quartzarenitos puros e quartzarenitos ricos em filossilicatos aluminosos. De acordo com o autor, os quartzarenitos puros coincidem com os estratos mais arenizados, onde há maiores feições e evidência de dissolução, enquanto os quartzarenitos ricos em filossilicatos aluminosos aparecem em estratos mais frescos e preservados. Argumenta-se que isso ocorra pois os quartzarenitos puros possuem uma porosidade primária maior, são mais afetados por fraturas intra-estratais e tem menor quantidade de argilas, que preenchem vazios e retardam o processo de carstificação.

As composições obtidas para os espeleotemas também coincidem com dados da literatura (Sauro et al., 2013; Pontes et al. 2020; Adamovic et al., 2022), predominando para os espeleotemas composições silicosas, na sua variedade amorfa e, secundariamente, aluminosas. Por vezes também se identifica a presença de cálcio e fosfatos. Espeleotemas de gipsita muito semelhantes ao identificado foram descritos por Pontes et al. (2020) em caverna quartzo-areníticas em Ponta Grossa, Paraná. Os autores alegam que a fonte de sulfato pode estar no guano de morcegos ou de pássaros, enquanto o Ca deve ser oriundo da alteração de feldspatos presentes na Fm. Furnas. Espeleotemas com composição predominante de ferro (IG023-A19 e IG029-A30) também coincidem com descritos para cavernas em arenitos na Venezuela (Aubretch et al., 2012; Sauro et al., 2013).

## REFERÊNCIAS

ADAMOVIC, J.; KUKLA, J.; FILIPPI, M.; SKALA, R.; MÉSZÁROSOVÁ, N. Speleothems in sandstone crevice and boulder caves of the Elbe River Canyon, Czech Republic. **International Journal of Speleology**, 51, 2, p. 141-162, 2022.

AUBRECHT, R.; BARRIO-AMORÓS, C.L.; BREURE, A.S.H.; BREWER-CARÍAS, C.; DERKA, T.; FUENTES-RAMOS, O.A.; GREGOR, M.; KODADA, J.; KOVÁČIK, L.; LÁNCZOS, T.; LEE, N.M.; LIŠČÁK, P.; SCHLÖGL, J.; ŠMÍDA, B.; VLČEK, L. **Venezuelan Tepuis: Their Caves and Biota**. Acta Geologica Slovaca Monographcomenius University, Bratislava, 167 p., 2012.

PONTES, H. S.; FERNANDES, L. A.; DE MELO, M. S.; GUIMARÃES, S G. B.; MASSUQUETO, L. L. Speleothems in quartz-sandstone caves of Ponta Grossa municipality, Campos Gerais region, Paraná state, Southern Brazil. **International Journal of Speleology**, 49, 2, p. 119-136, 2020.

SAURO, F. (2014) Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone: Evidence of the arenisation process. **Geomorphology**, 226, 106-123.

SAURO, F.; LUNDBERG, J.; DE WAELE, J.; TISATO, N.; GALLI, E. Speleogenesis and speleothems of the Guacamaya Cave, Auyan Tepui, Venezuela. **In: Proceedings of 16<sup>th</sup> International Congress of Speleology**, República Tcheca, p. 298-304, 2013.

SOUZA, A. S. de (2017) **Estudo Petrográfico e Petrológico da Formação Tombador, Mesoproterozoico da Chapada Diamantina, Bahia**. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN).

**DIFRAÇÃO  
DE RAIOS-X**

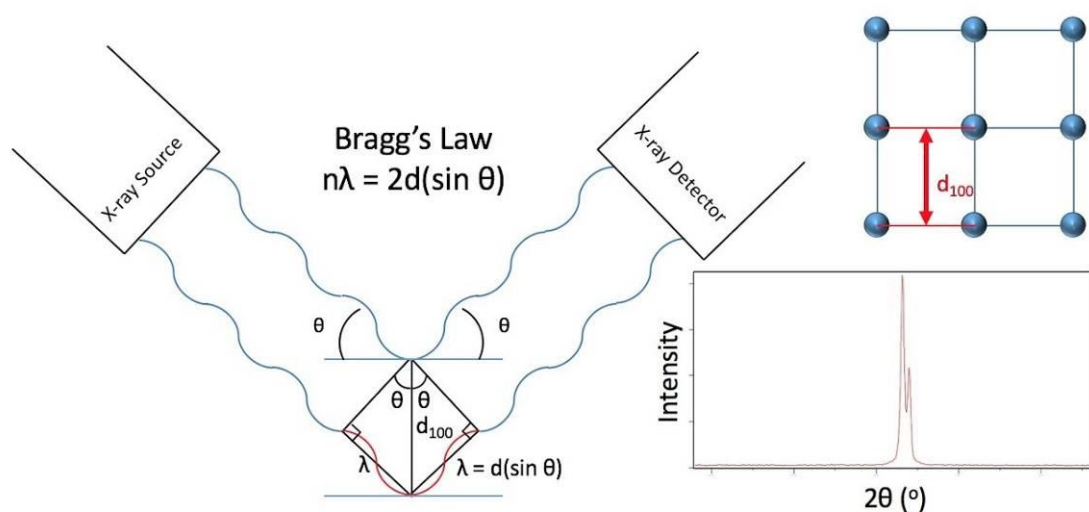
## INTRODUÇÃO

O presente anexo é referente às atividades laboratoriais desenvolvidas no âmbito do subprojeto “Geoespeleologia do Carste Siliciclástico da Formação Tombador: Subsídios à Conservação do Patrimônio Espeleológico na Chapada Diamantina”. A área de estudo deste projeto contempla a Bacia do Rio Coisa Boa, área que abrange a Vila de Igatu (antiga Xique-Xique de Igatu), distrito do município de Andaraí, na Chapada Diamantina, Bahia.

Raios-X são ondas eletromagnéticas de alta energia, com comprimento de onda ( $\lambda$ ) muito pequeno, na ordem de 0,1 a 100 Å. *Uma vez que este comprimento de onda é da mesma ordem de grandeza da distância entre átomos em um cristal, pode ser utilizado, através do efeito de “difração”, para medi-las.*

A difratometria de raios-X é uma técnica que consiste em incidir radiação em uma determinada amostra e detectar o feixe emitido, em uma inclinação conhecida (0-90°). Assim, através da “Lei de Bragg” ( $n\lambda = 2d \sin\theta$ ), é possível medir a distância entre átomos e, assim, identificar os minerais que compõem a amostra. A geração de elétrons é feita através de um filamento de tungstênio por efeito termoiônico. Os elétrons são acelerados no sentido do anodo por uma diferença de potencial (30 a 60 kV).

Fig.1 – Ilustração esquemática do funcionamento da difração de raios-x, a qual mede o ângulo de incidência e difração do feixe para calcular a distância entre os átomos da estrutura cristalina de determinada amostra mineral. Fonte: JIAM Diffraction Facility.



## MATERIAL E MÉTODOS

### Preparação das Amostras

As amostras de rocha e espeleotemas foram preparadas no Laboratório de Preparação Sedimentológica/Geoquímica (LPSGq) do Centro de Ciências Naturais Aplicadas (UNESPetro), do Departamento de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus Rio Claro, entre os dias 16 e 20 de outubro de 2023.

Fez-se uso de um Moinho Almofariz Pistilo MA590, da marca Marconi. A moagem das amostras foi realizada no moinho programado com rotatividade de 55.74 rpm durante 7 minutos. Para garantir uma moagem efetiva, repetiu-se o processo por 3 a 4 vezes por amostra.

Fig. 2 – Fotografia do Moinho Almofariz Pistilo MA590, marca Marconi, programado com rotatividade de 55.74 rpm e 7 minutos, no LPSGq/UNESPetro.



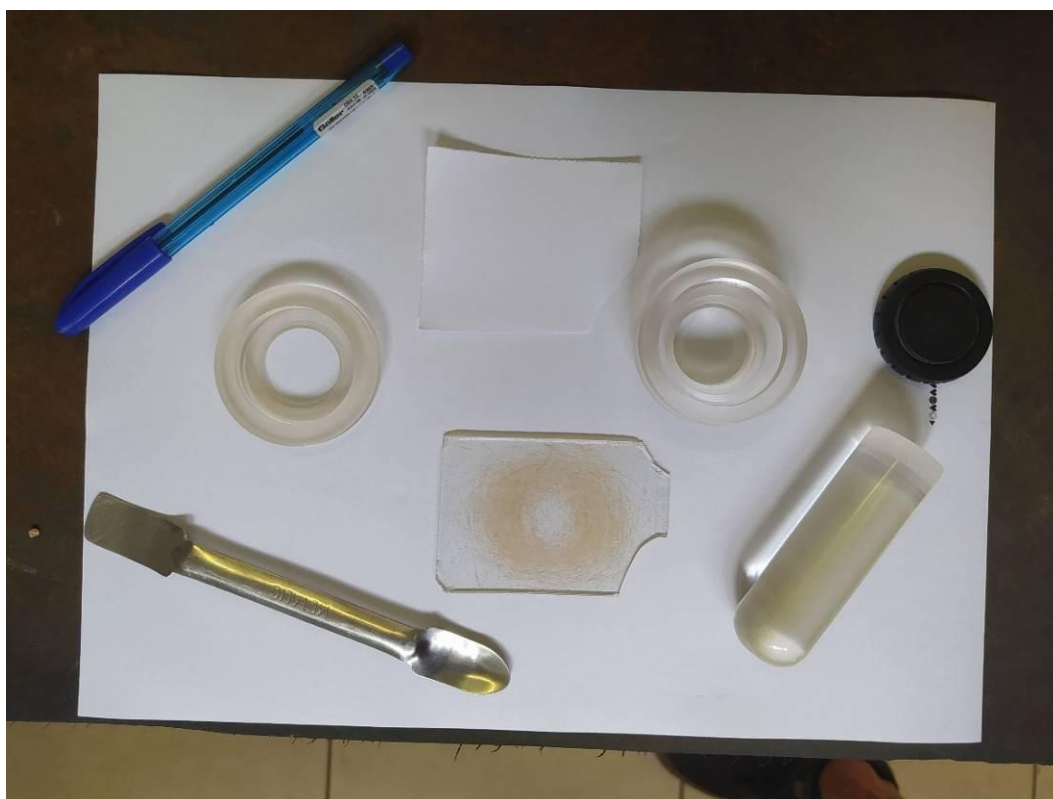
Algumas amostras que se encontravam muito úmidas, dificultando, assim, a moagem, foi necessário realizar a secagem em uma Estufa de Secagem e Esterilização SL-100, da marca SOLAB, em temperatura de 60 °C, durante cerca de 5 horas.

Fig. 3 – Fotografias da Estufa de Secagem e Esterilização SL-100, marca SOLAB, LPSGq/UNESPetro.



Com as amostras devidamente secas e moídas, preparou-se então as pastilhas que são encaixadas no equipamento de DRX para análise, com auxílio de vidrarias, devidamente esterilizadas.

Fig. 4 – Fotografia da vidraria utilizada para a montagem da pastilha de análise para DRX.



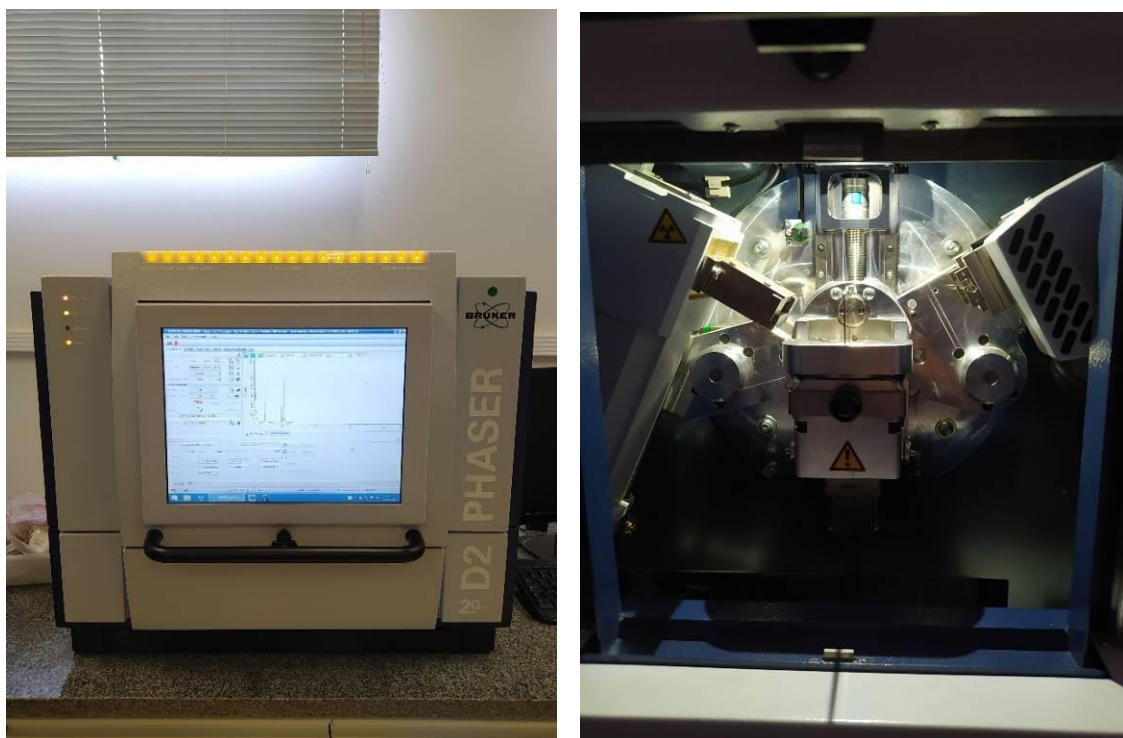
## Difratometria de Raios-X

As análises de Difratometria de Raios-X (DRX) foram realizadas no Laboratório de Radiações Ionizantes (LARIM), no Centro de Ciências Naturais Aplicadas (UNESPetro), do Departamento de Geologia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Campus Rio Claro, durante o mês de outubro de 2023.

Foi utilizado equipamento DRX PHASER D2 2nd Generation, da marca BRUKER. Neste, fez-se uso da fenda primária de 0,6 mm e fenda de 1mm, medidas padronizadas para amostras de rocha total. O equipamento foi configurado em Voltagem de 30 Kv, Corrente de 10 mA / 300 W, com Tubo de Cobre de 1.54184 Å e Detector SSD160 (1D mode).

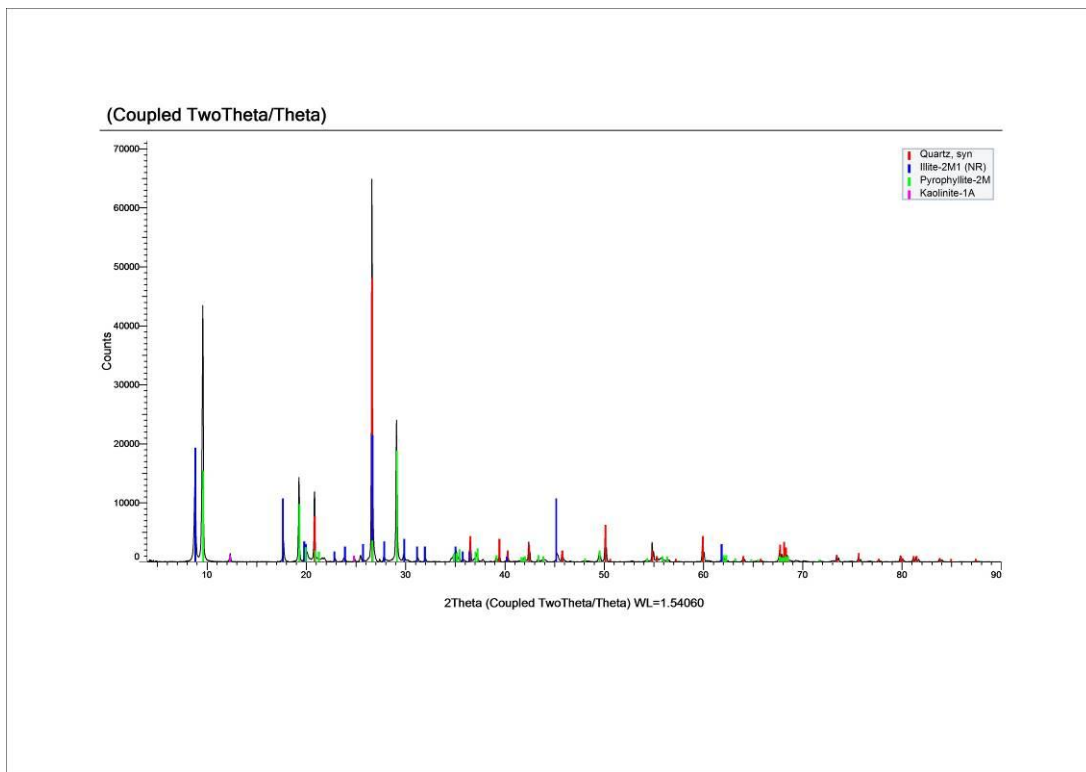
A análise de cada amostra tem duração média de 1h20min e é possível acompanhar o progresso no monitor do equipamento. O software utilizado para interpretação das análises foi o DIFRAC.COMMANDER.

Fig. 5 – Fotografias do DRX PHASER D2 2nd Generation, marca BRUKER, no LPSGq/UNESPetro. À esquerda, captura do monitor de interface do equipamento e, à direita, detalhe do maquinário.

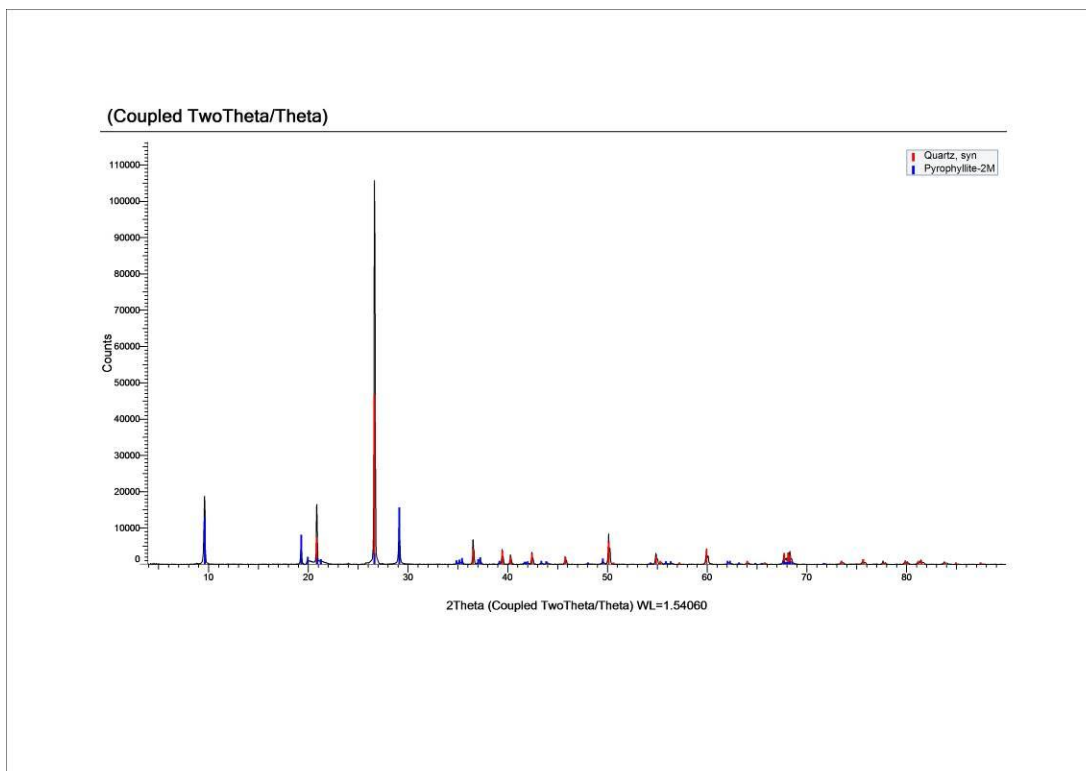


# RESULTADOS

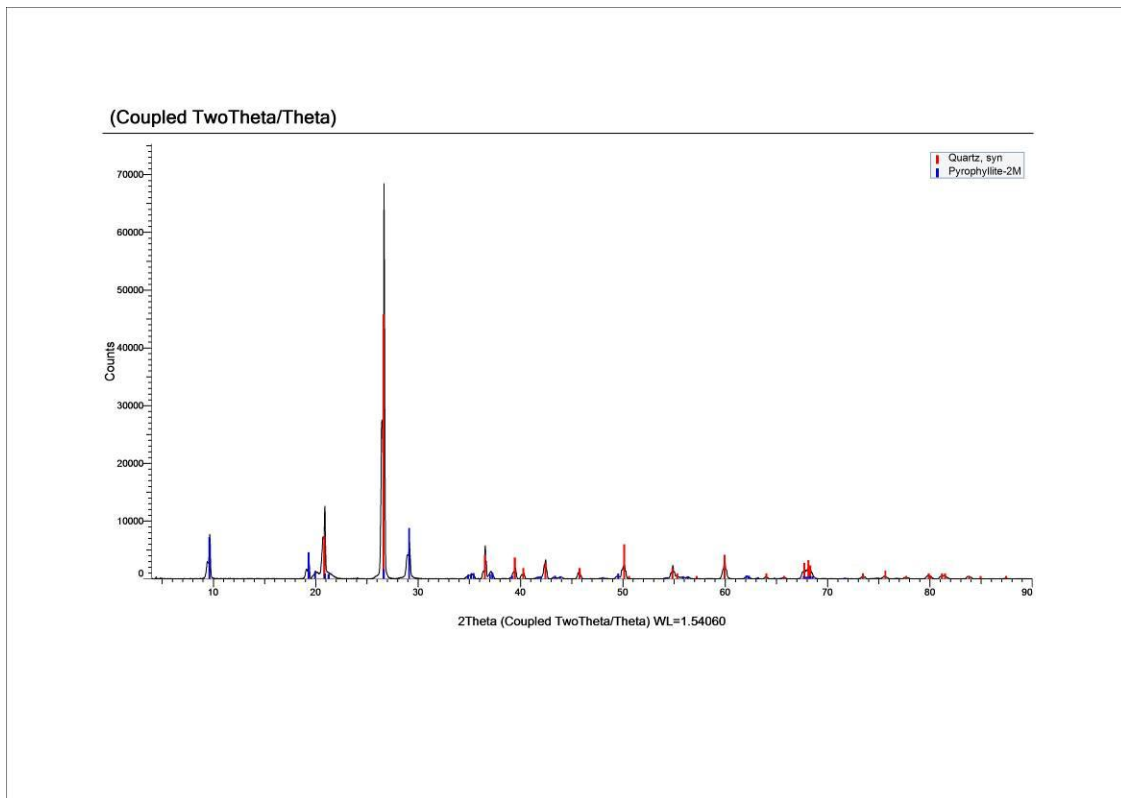
## IG013-A35



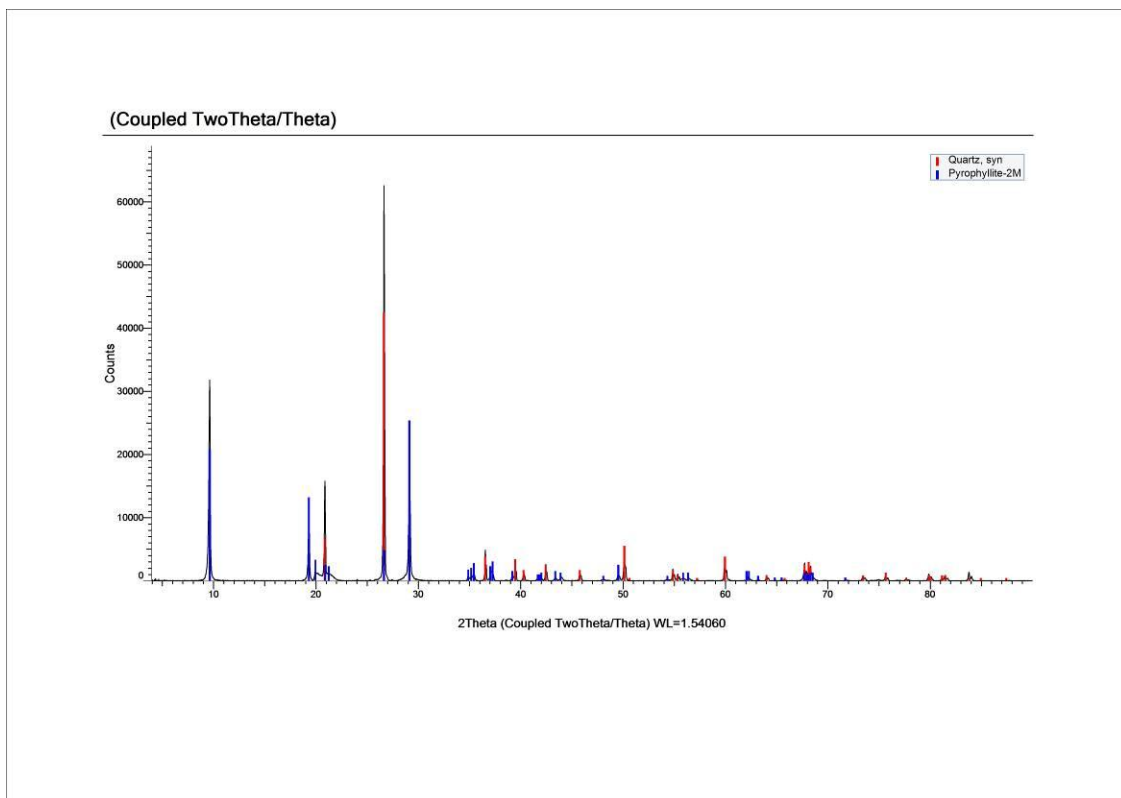
## IG013-A36



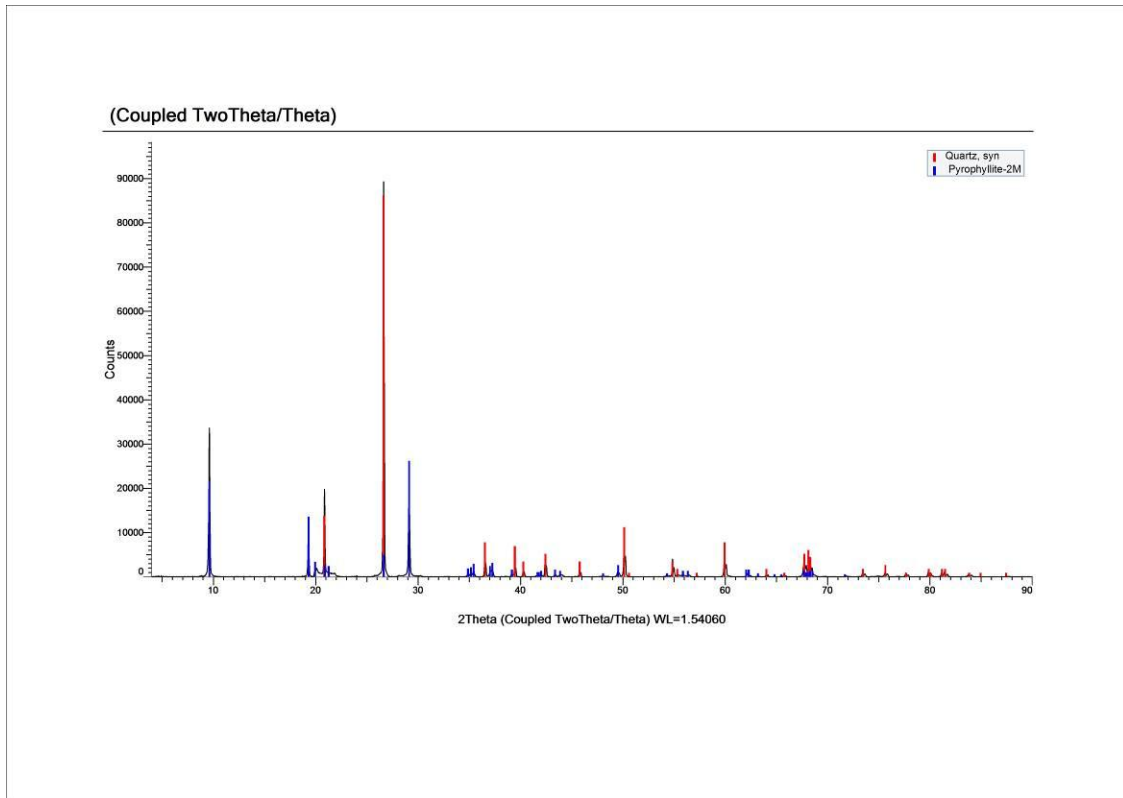
# IG013-A37



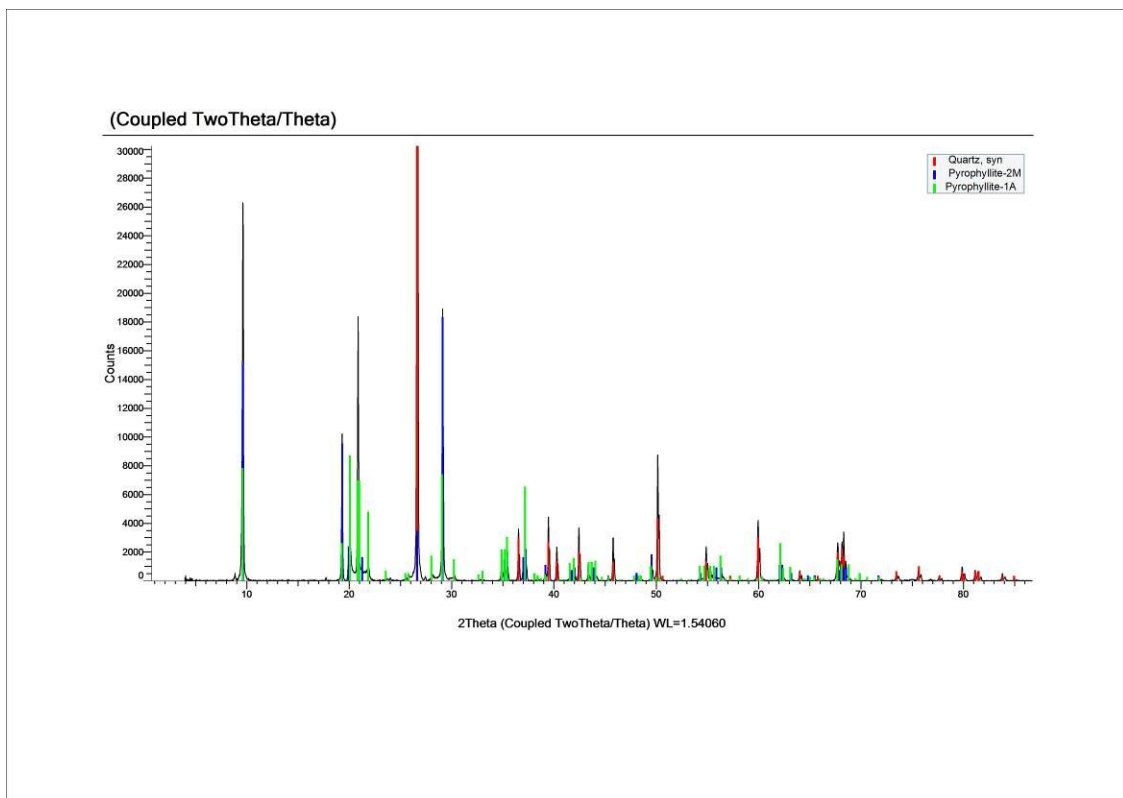
# IG013-A38



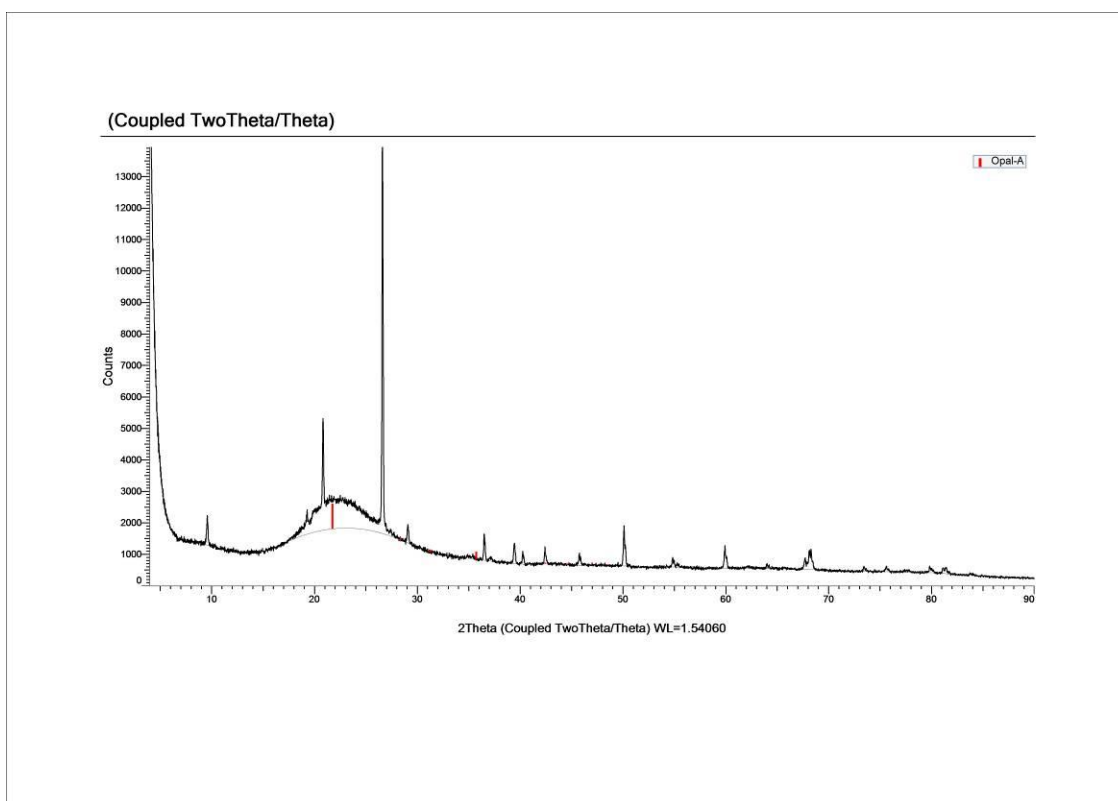
# IG015-A09



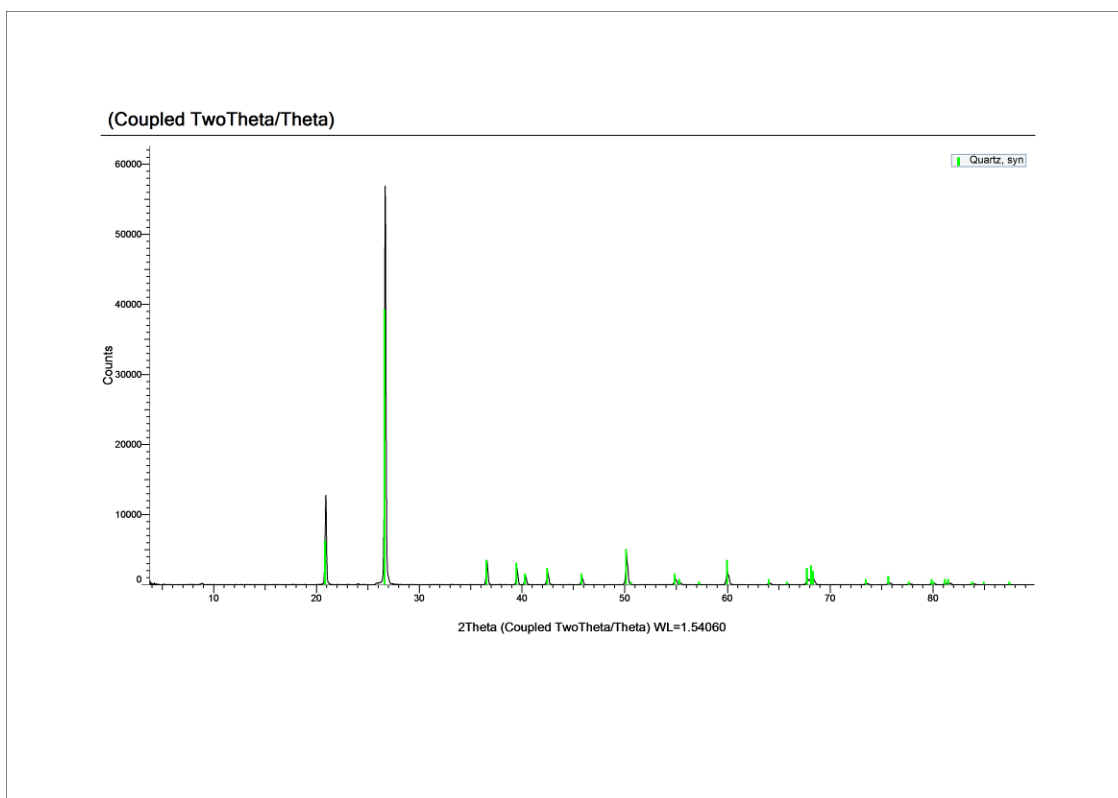
# IG015-A10



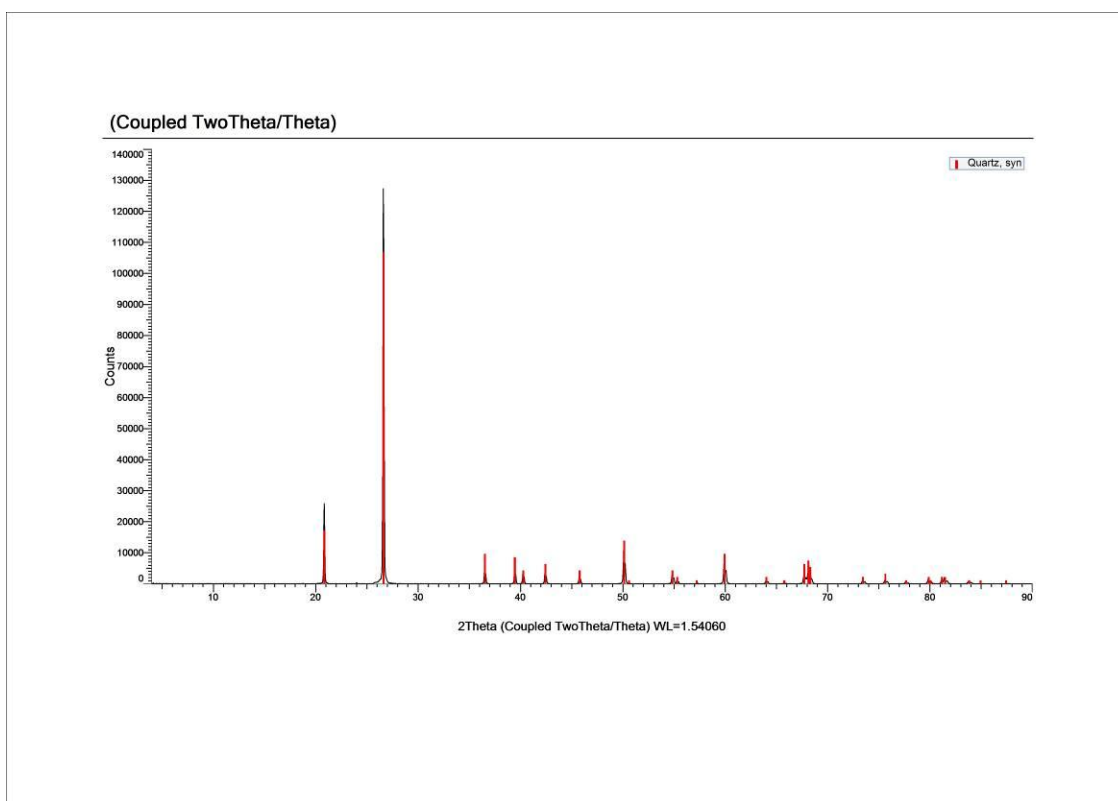
# IG015-A11



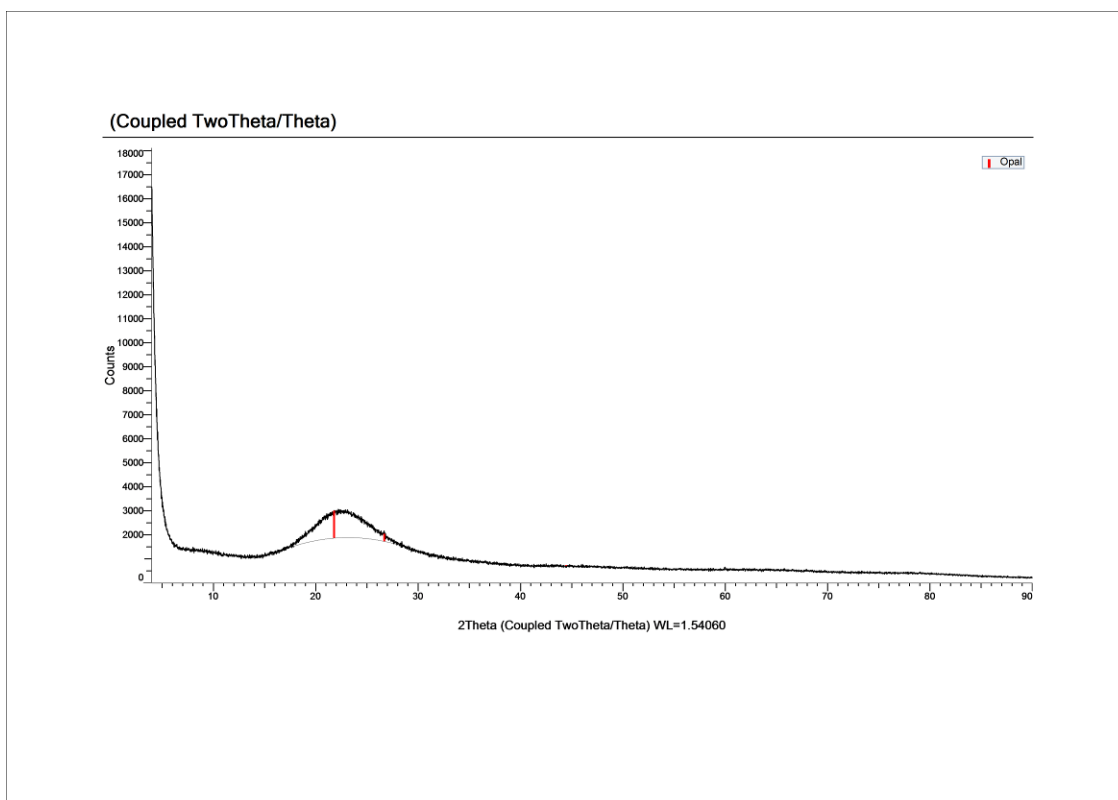
# IG019-A06



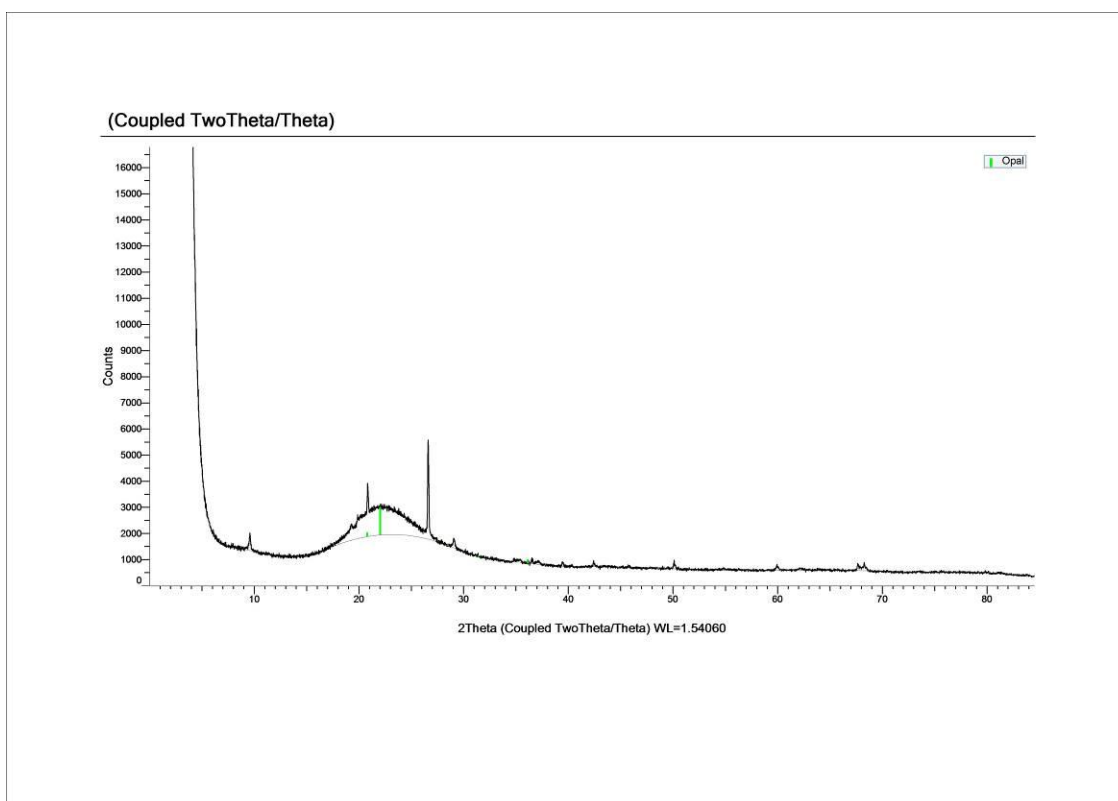
# IG019-A07



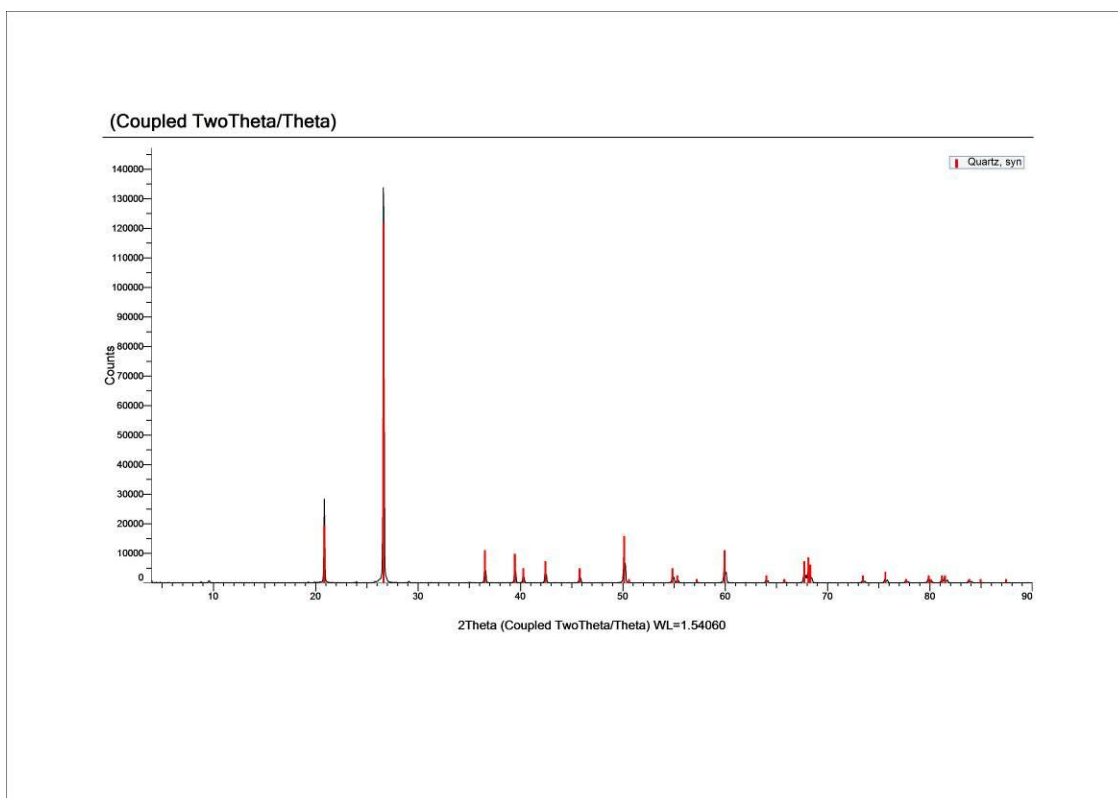
# IG023-A14



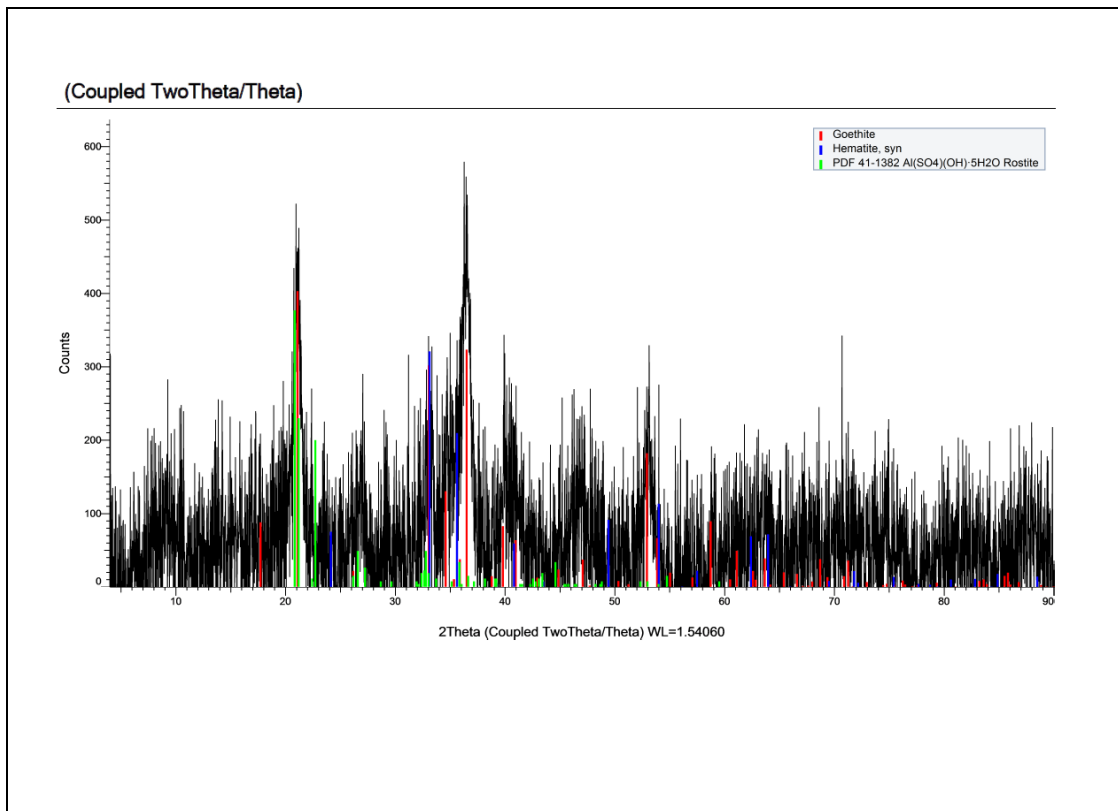
# IG023-A15



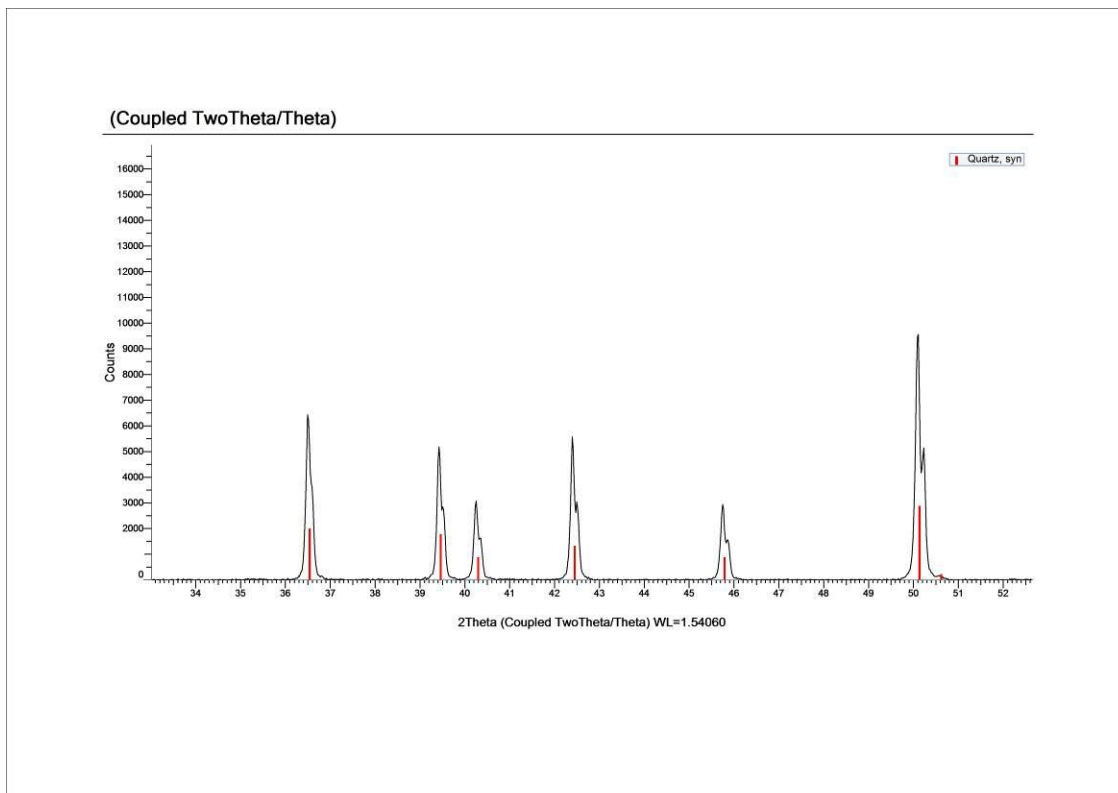
# IG023-A17



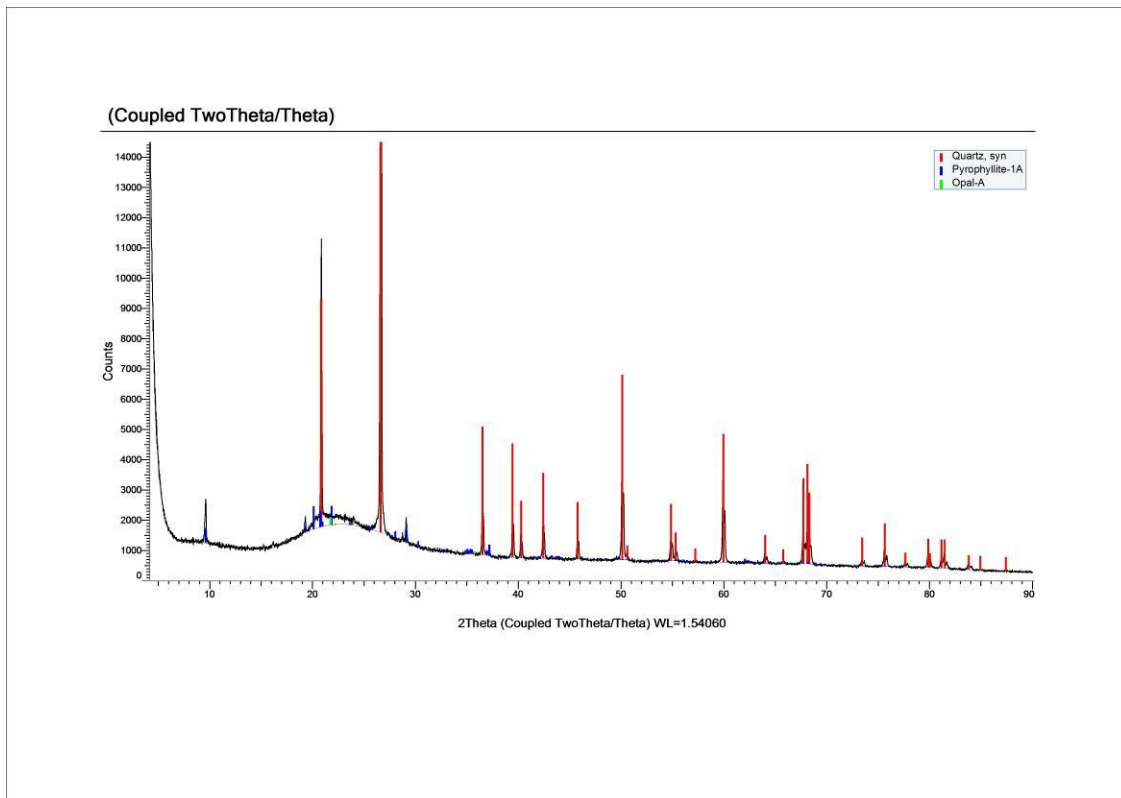
# IG023-A19



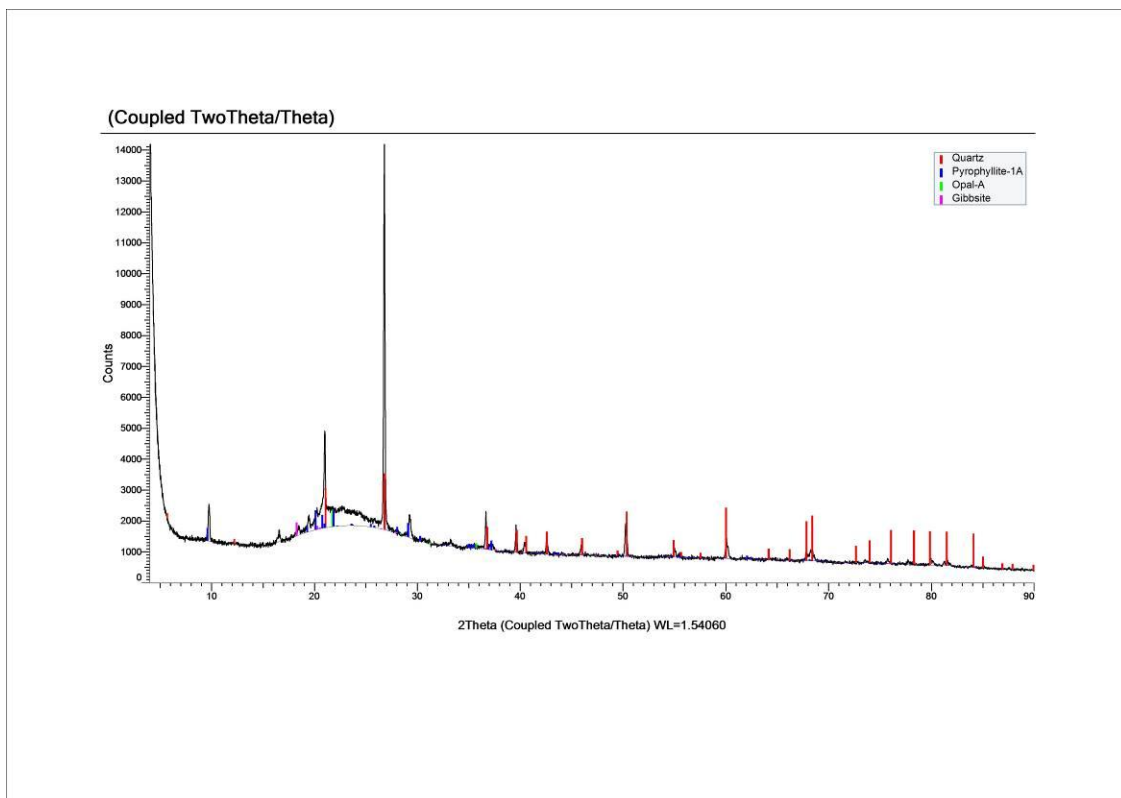
# IG023-A20



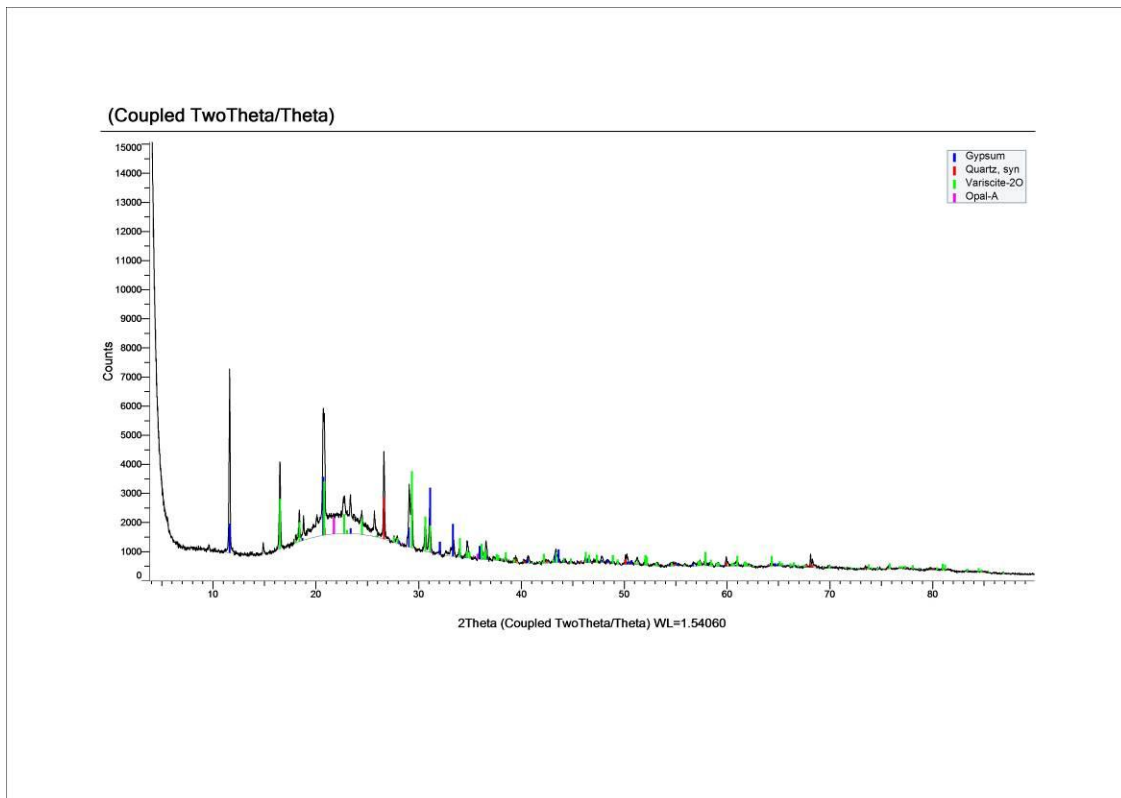
# IG023-A21



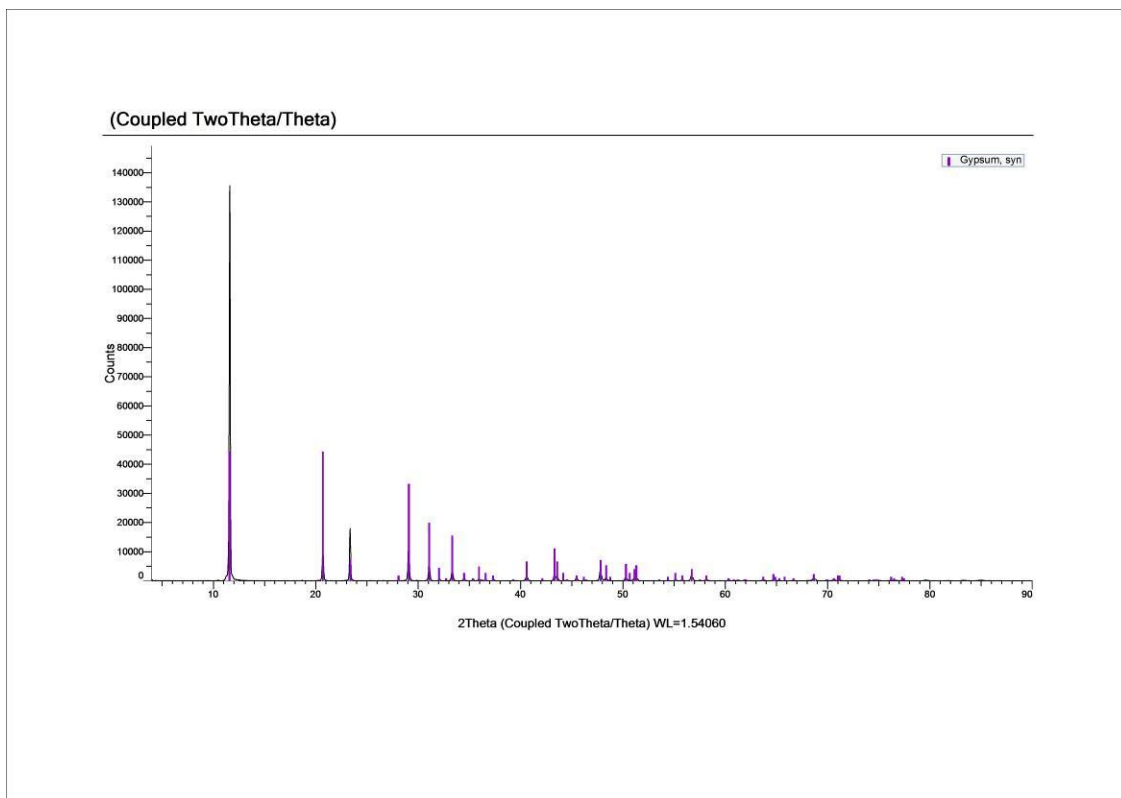
# IG023-A23



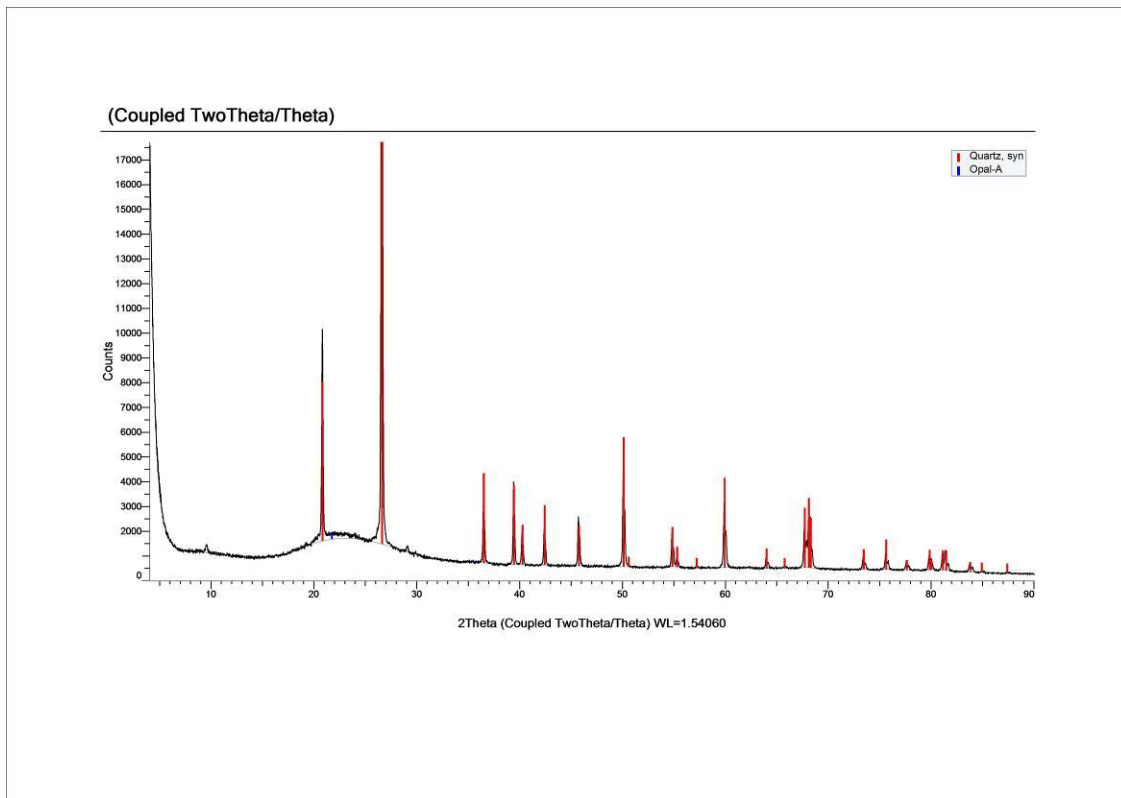
# IG023-A26



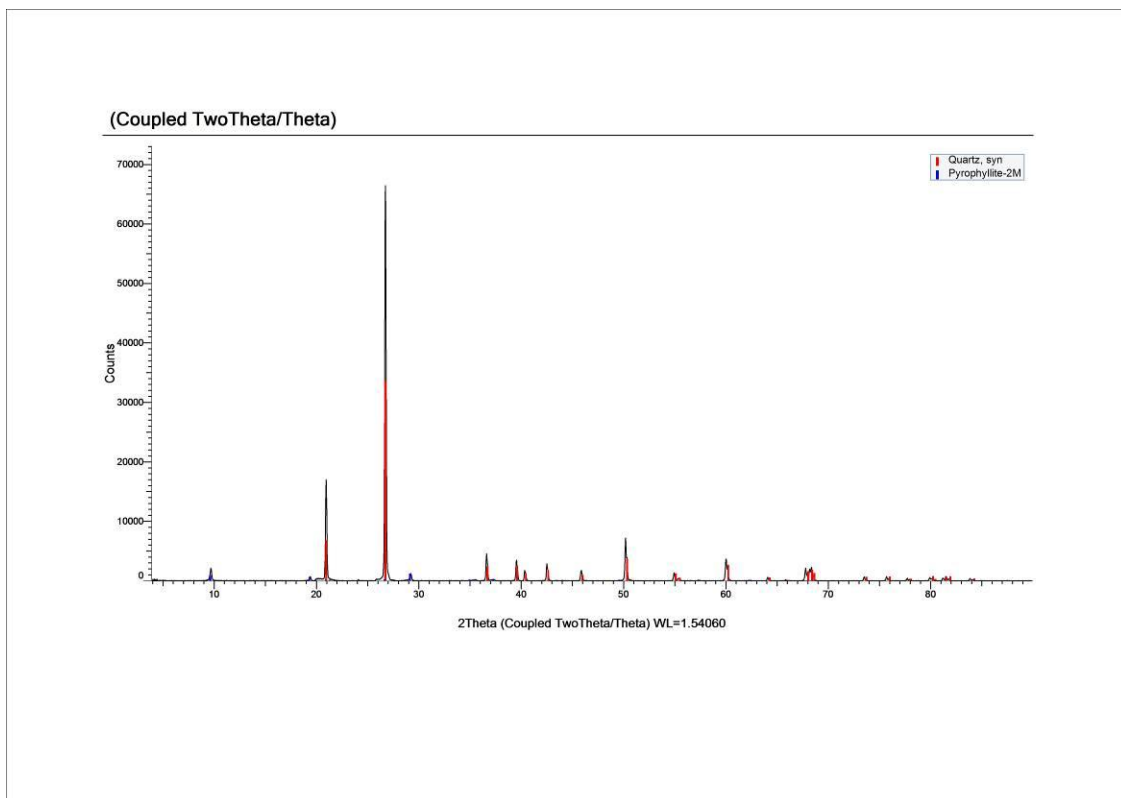
# IG023-A27



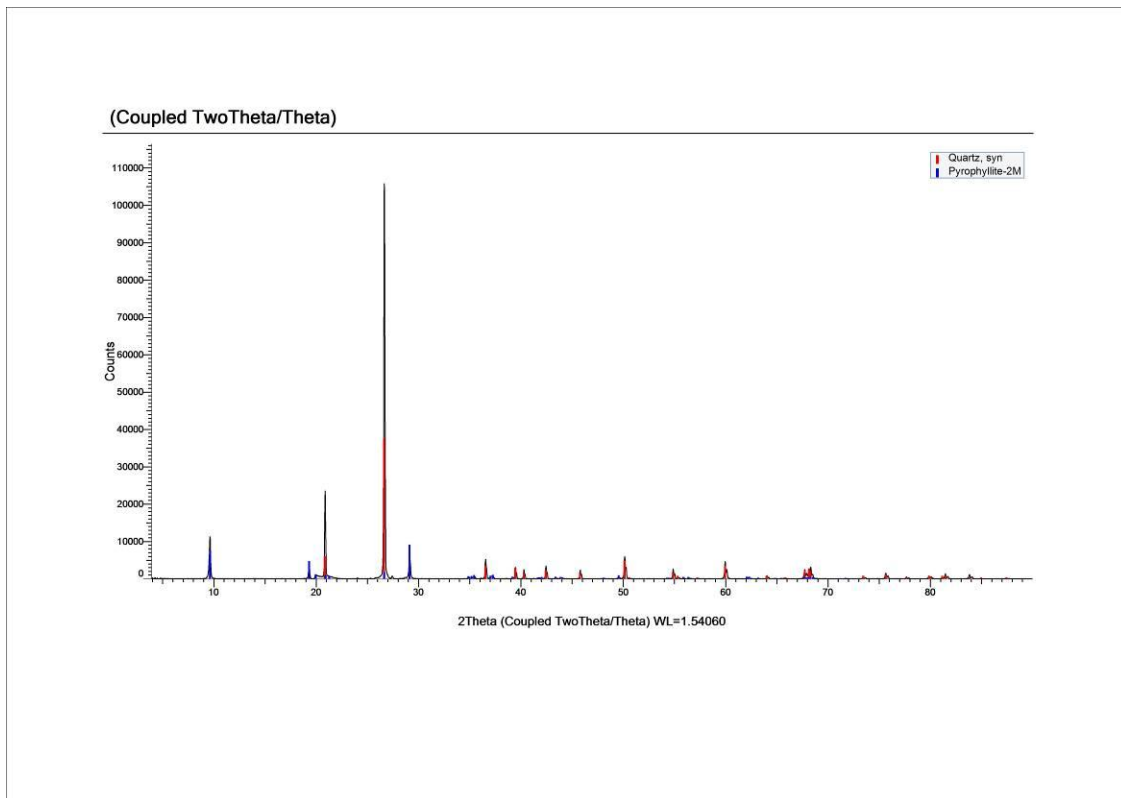
# IG023-A28



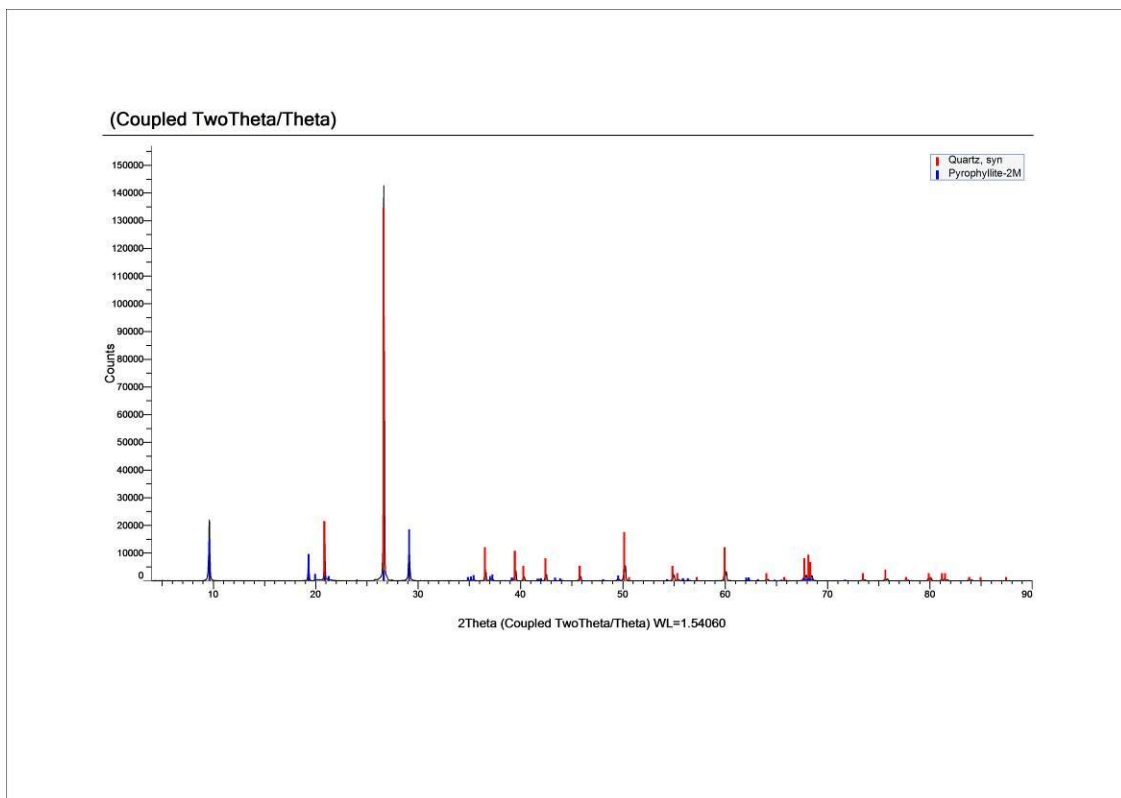
# IG024-A46



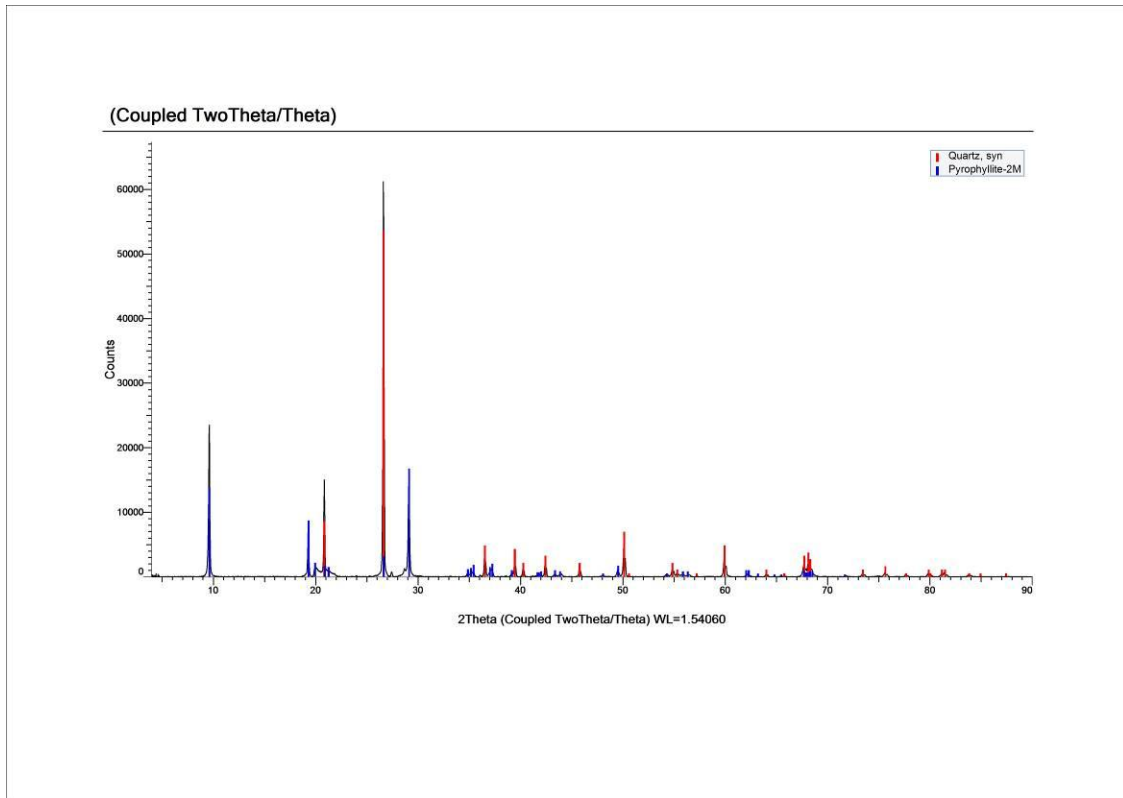
# IG024-A47



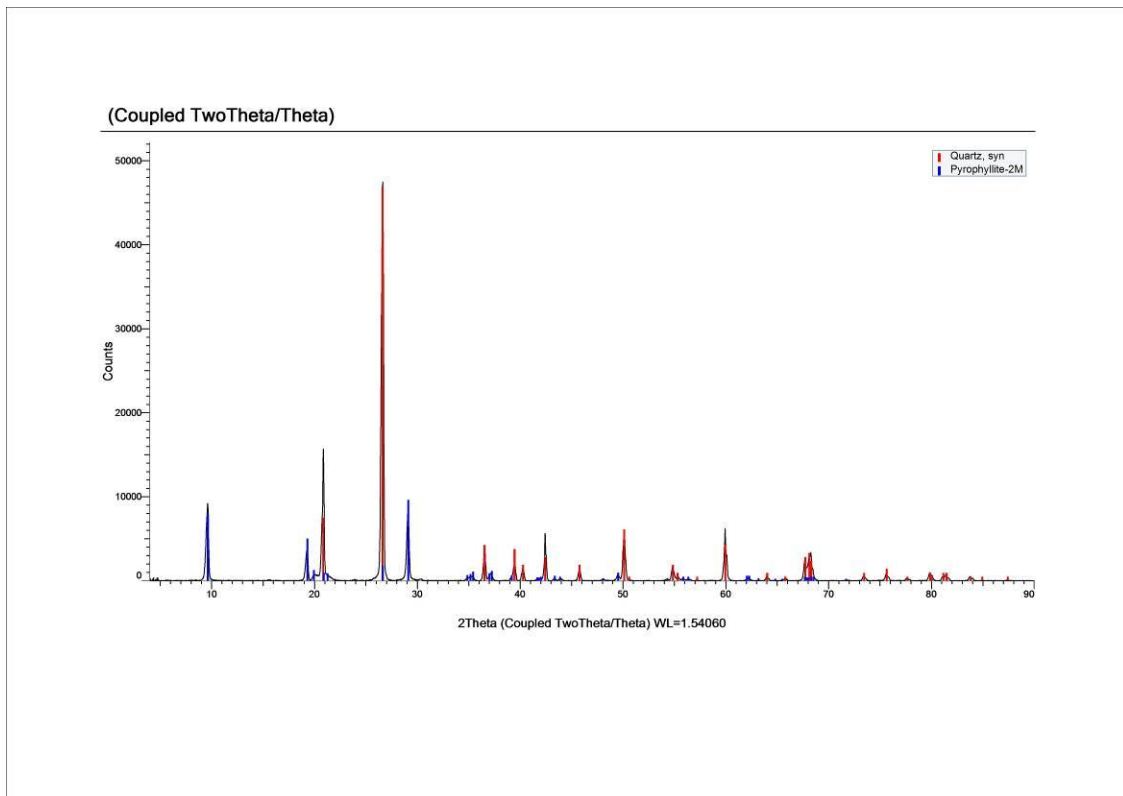
# IG024-A48



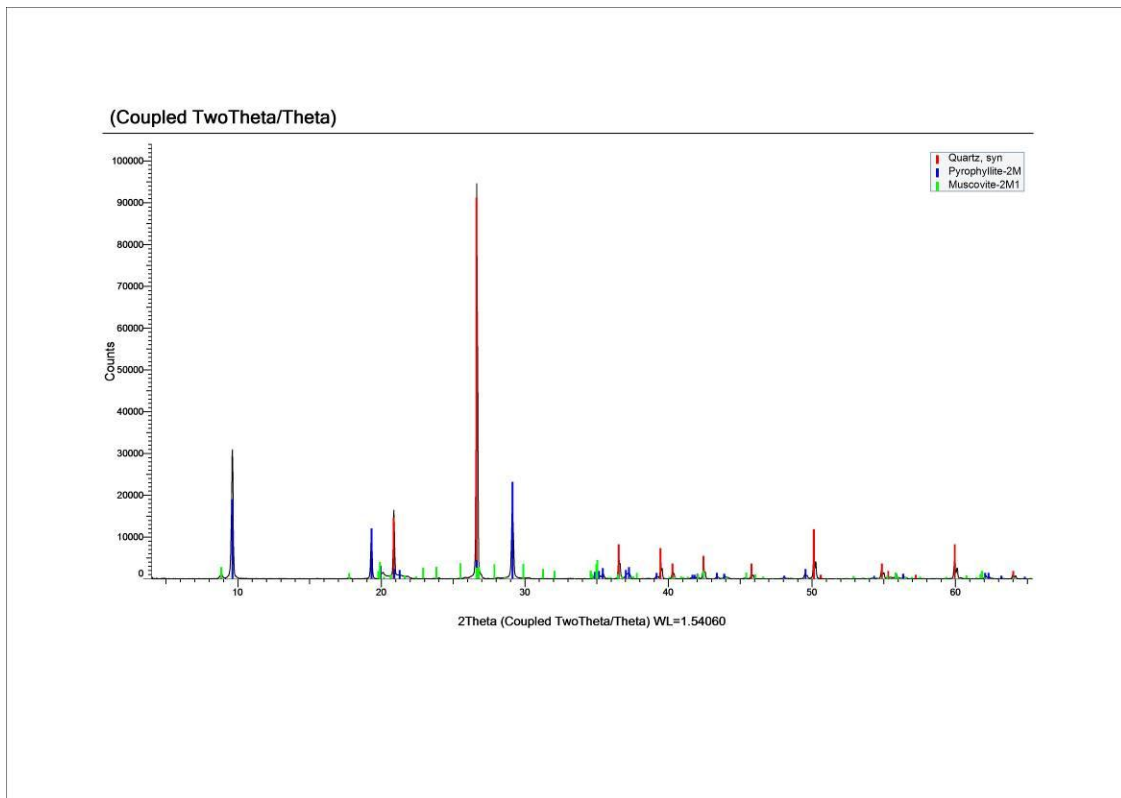
# IG024-A50



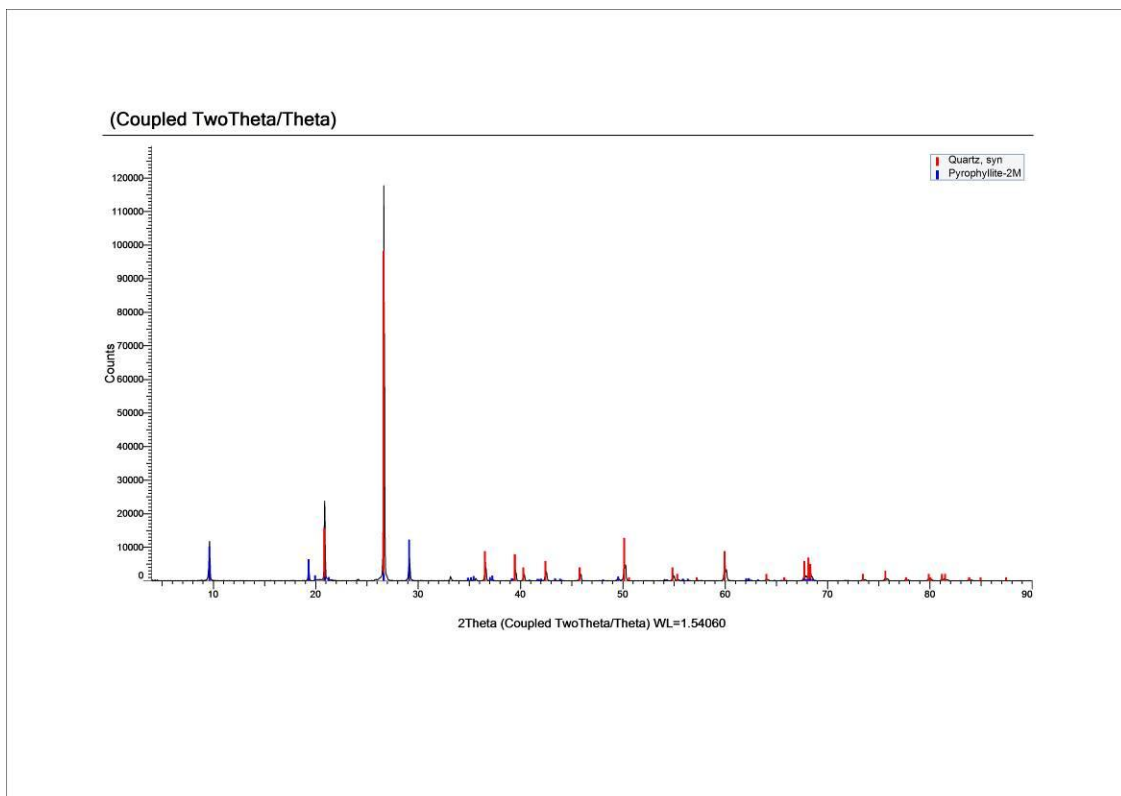
# IG028-A13



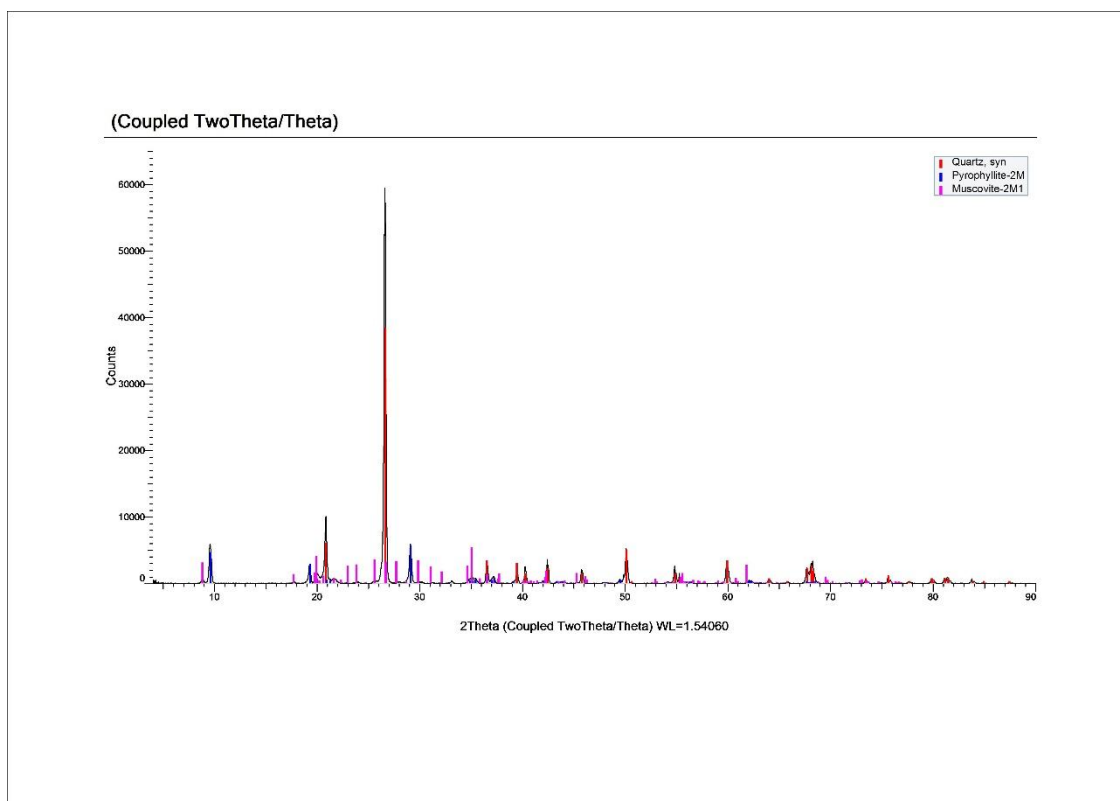
# IG029-A31



# IG029-A32



## IG033-A45



## DISCUSSÃO

### IG013 – Canal da Fumaça

Para o Sistema do Canal da Fumaça, foram analisadas, através do DRX, quatro amostras de rocha. A amostra IG013A-A35 se refere a um nível argiloso, de cerca de 30 cm de espessura, que se coloca no limite entre o pacote inferior de metarenito fresco e o pacote superior de metarenito alterado. A análise apontou, nesta camada, a presença dos argilo-minerais caulinita e illita, para além de quartzo e pirofilita. Esta observação indica a presença de níveis pelíticos intercalados nas fácies areníticas da Fm. Tombador, que possivelmente podem atuar como selantes do manto de intemperismo químico.

Já as amostras IG013A-A36, IG013A-A37 e IG013A-A38, que correspondem aos metarenitos alterados da parede da caverna, obtiveram mineralogia semelhante, predominando quartzo e pirofilita. As amostras A37 e A38 são parte de um mesmo pacote, onde há variação de coloração entre uma e outra, provavelmente marcada pela mobilização de elementos. No entanto, a análise de DRX não foi conclusiva quanto a este processo, uma vez que a mineralogia não varia. Análises de FRX, observando a composição química, devem trazer melhores resultados.

### **IG015 – Gruta Parede Vermelha**

Na Gruta Parede Vermelha, as amostras IG015-A09 e IG015-A10 foram coletadas em um mesmo nível de metarenitos. Contudo, a amostra A09 representa a rocha fresca e a amostra A10 representa a rocha alterada. A comparação entre ambas teve intuito de perceber a neoformação de minerais, através de processo de intemperismo (por ex. argilo-minerais). No entanto, as grandes predominâncias de quartzo e pirofilita ocultaram, na análise, a presença de minerais menores. Esse processo poderá ser melhor observado na microscopia óptica e nas imagens de MEV.

Já a amostra IG015-A11 representa um espeleotemas do tipo crosta e coraloide coletado no teto da cavidade. O difratograma resultante apontou uma curva suave no intervalo de  $2\theta$  entre 18 a 28, que é típica da sílica amorfa, neste caso, interpretada como Opala-A. Também se observam picos de quartzo cristalino, que podem ser interpretados como grãos detríticos que foram incorporados pela precipitação química no ambiente da caverna.

### **IG019 – Sistema Rio dos Pombos**

Para o sistema Rio dos Pombos, foram analisadas as amostras IG019-A06 e IG019-A07, que representam metarenitos coletados em um mesmo nível, no interior da caverna, sendo a A06 em rocha fresca e A07 em rocha alterada. Os difratogramas apontaram que essas rochas têm como peculiaridade serem estritamente quartzosas, não havendo cimentação por pirofilita. No entanto, a comparação entre ambas também não foi bem-sucedida através da análise de DRX, uma vez que não há – ou não foi detectada – variação na mineralogia entre a porção fresca e a alterada.

### **IG023 – Gruta do Trianglim**

A Gruta do Trianglim é aquela com maior cobertura entre as análises de DRX, uma vez que é a cavidade com maior diversidade de depósitos químicos secundários. Sendo assim, para compreender os processos de remobilização de elementos que podem contribuir para o desenvolvimento do carste, é importante conhecer a composição mineralógica destes espeleotemas.

A amostra IG023-A14 corresponde a estalactites com até quatro centímetros de espessura, algumas de superfície lisa, outras cobertas por coraloídes. O difratograma com curva

suave no intervalo de  $2\theta$  entre 18 a 28 evidencia a ocorrência de sílica amorfa (Opala). Já a amostra IG023-A15 corresponde a uma crosta com coraloides de crescimento vertical, também constituídas de sílica amorfa (Opala), com grãos detríticos de quartzo e pirofilita.

A amostra IG023-A17 corresponde a um metarenito silicificado extraído do teto da cavidade. Nele, uma precipitação de sílica o revestia e formava uma pequena estalactite. A análise de DRX apontou para uma rocha estritamente quartzosa. A amostra IG023-A20 também corresponde a um metarenito, este, por sua vez, levemente alterado, extraído do piso da cavidade, também de mineralogia quartzosa.

A mostra IG023-A19 corresponde ao espeleotemas “barro rojo” (SAURO et al., 2019), coluna de coloração vermelho-forte e granulação argilosa. Nota-se que o difratograma para esta amostra exibe um ruído muito marcante. Isso se dá pela alta presença de minerais de Ferro, cujo filamento de Cobre do equipamento de DRX utilizado não consegue capturar com precisão. Para maior clareza, dever-se-ia utilizar DRX com filamento de Cobalto, que não é comum nos laboratórios no Brasil. No entanto, ainda se assim se pôde interpretar e identificar a presença de óxidos de ferro como hematita e goethita. Também apontou a presença de rostita, um sulfato de alumínio, cuja ocorrência poderá ser confirmada com análises de FRX.

Já a amostra IG023-A21 corresponde a uma porção de metarenito alterado do piso da cavidade revestida por uma crosta fina e de coloração escura. O DRX apontou para grãos de quartzo e pouca pirofilita, provenientes do metarenito e também Opala-A na crosta de revestimento.

Por sua vez, a amostra IG023-A23 corresponde aos espeleotemas de formato concêntrico encontrados no piso e nas paredes da Gruta do Trianglim. Essa feição é revestida por uma fina crosta cinza, composta por sílica amorfa (Opala) e seu interior é parcialmente vazio, com material argiloso alaranjado, cujo DRX revelou a presença de gibbsita, um hidróxido de alumínio, produto de lixiviação. Também estão presentes grãos de quartzo cristalino e pirofilita residuais.

A amostra IG023-A26 corresponde a uma crosta, coletada na superfície lateral de um bloco, revestida por materiais precipitados de uma diversidade de cores. A análise por DRX revelou a presença de Gipsita e Variscita, para além da sílica amorfa (Opala-A). Também estão presente grãos de quartzo detríticos. O material de coloração rosa na

amostra parece não ter sido identificado pelo difratograma. A amostra IG023-A27, material de coloração branca e hábito acicular, coletado em plano de fratura na parede da caverna, é composto exclusivamente por Gipsita. A presença destes minerais levanta uma pergunta a respeito da origem dos elementos que os compõem, tais como o Ca e S. A contribuição mais plausível seria por hidrotermalismo, mas também não se descarta a influência de águas meteóricas.

Por sua vez, as amostras IG023-A28 correspondem a pequenas esferas, com diâmetro menor que 1cm, ocas por dentro, e com superfície porosa, de coloração branca, cinza ou amarronzada. Geralmente possuem um pequeno orifício. Estas “bolotas” foram coletadas aglomeradas em pequenas bacias, onde, apesar de seco, pareceu acumular água em algum momento. As análises pelo DRX revelaram ser compostas basicamente por sílica amorfa (Opala-A) e algum quartzo detrítico.

#### **IG024 – Gruta do Teté**

As amostras IG024-A46 e IG024-A47 são representativas de depósitos sedimentares clásticos presentes em bancadas laterais na Gruta do Teté. Esses sedimentos foram escavados e “lavados” pelos garimpeiros a procura de diamante. O primeiro tem coloração preta, de densidade baixa, aparentemente rico em matéria orgânica, enquanto o segundo é de coloração cinza e muito argiloso. De toda forma, em ambos foi identificado, através de DRX, apenas quartzo e pirofilita.

Já a amostra IG024-A48 corresponde a metarenito bastante alterado, coletado na parede da cavidade. O difratograma apontou apenas para a presença de quartzo e pirofilita. Minerais na fração argila, constituintes do cimento da rocha, podem ter sido ocultados na análise pelos minerais maiores.

Por fim, a amostra IG024-A50 corresponde, também, a depósitos clásticos, de coloração variada entre branco-creme e preto, com laminações plano-paralelas e onduladas. A análise por DRX também revelou apenas a presença de quartzo e pirofilita.

#### **IG028 – Leito do Rio Coisa Boa**

A amostra IG028-A13 foi coletada na parede lateral do leito seco do Rio Coisa Boa, em nível relativamente acima da Gruta Parede Vermelha. Corresponde a um metarenito bastante fresco, coeso. A difração evidenciou a presença exclusiva de quartzo e pirofilita.

### **IG029 – Gruta das Torras**

A amostra IG029-A31 foi coletada na parede da caverna, e corresponde a metarenito muito alterado de coloração alaranjada. A composição mineralógica apontada pela difração foi a de quartzo, pirofilita e, de forma incipiente, muscovita. Apesar da visível presença de cimento, de material fino e coloração ocre, a análise também não identificou a presença de argilo-minerais. Já a amostra IG029-A32 corresponde a uma fácies de microconglomerado (ou metarenito grosso com grânulos), de coloração roxa e medianamente alterado, que define o teto da cavidade. Neste, também foi identificado apenas quartzo e pirofilita.

### **IG033 – Rio Laranjeiras**

A amostra IG033-A45 corresponde a metarenito estratificado, fresco e de coloração rosada, coletado na margem do leito de Rio Laranjeiras. A análise pela difração de raios-x apontou para a presença de quartzo, pirofilita e muscovita mais incipiente

## **CONCLUSÃO**

A técnica de análise por Difração de Raios-X é extremamente útil para identificação de minerais constituintes de rocha e depósitos secundários siliciclásticos e químicos. Para este trabalho, considera que a investigação aplicada aos espeleotemas foram muito satisfatórias, apontando a presença de minerais compatíveis com aqueles frequentemente descritos na literatura científica para cavernas nesta litologia, tal como a Opala. Além disso, evidenciou a presença de minerais diversificados, em formações químicas pouco comuns, tais como óxidos de ferro (hematita e goethita), sulfato de cálcio (gipsita), hidróxido de alumínio (gibbsita), para além de minerais mais raros, como variscita e rostita.

Por outro lado, as análises aplicadas às rochas encaixantes das cavernas apresentaram resultados medianamente satisfatórios. A homogeneidade mineralógica dos metarenitos resultou em uma baixa diversidade de minerais identificados, resumindo-se a quartzo, pirofilita e, ocasionalmente, muscovita. Ainda assim, como ponto positivo, pôde-se constatar a ausência de feldspatos nestas rochas.

A identificação de minerais neoformados, produtos do intemperismo químico, processo importante na carstificação de rochas siliciclásticas, tais como os argilo-minerais (caulinita, ilita), não foi possível. Tal fato pode ser explicado pelas baixas proporções desses minerais na rocha, em comparação aos minerais maiores, como quartzo e pirofilita, sendo então ocultados por estes.

Dessa forma, recomenda-se que seja aplicada, para algumas amostras mais relevantes, a análise de DRX em elementos finos. Esta análise requer uma preparação diferente, na qual, por processos de decantação, pode-se separar o material fino da rocha, analisando-o individualmente. Essa abordagem pode ser aplicada, estrategicamente, nas amostras de metarenito alterado, visando uma comparação com seus correspondentes frescos. São elas: IG013-A36, IG015-A10, IG019-A07, IG023-A20, IG024-A48 e IG029-A31.

## **REFERÊNCIAS**

SAURO, F.; MECCHIA, M.; PICCINI, L.; DE WAELE, J.; CARBONE, C.; COLUMBU, A.; PISANI, L.; VERGARA, F. Genesis of giant sinkholes and caves in the quartz sandstone of Sarisariñama tepui, Venezuela. *Geomorphology*, v. 342, p. 223-238, 2019.

**MICROSCOPIA**

**ELETRÔNICA**

**DE VARREDURA**

## **INTRODUÇÃO**

O presente anexo é referente a caracterização petrográfica de detalhe através de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) em amostras de rocha e espeleotemas, no âmbito do subprojeto “Geoespeleologia do Carste Siliciclástico da Formação Tombador: Subsídios à Conservação do Patrimônio Espeleológico na Chapada Diamantina”. A área de estudo desse projeto contempla a Bacia do Rio Coisa Boa, área que abrange a Vila de Igatu (antiga Xique-Xique de Igatu), distrito do município de Andaraí, na Chapada Diamantina, Bahia.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

A partir de amostras de rocha e espeleotemas, coletadas nos sistemas de cavernas da área de estudo, foram preparadas lâminas polidas no Laboratório de Laminação, Departamento de Geologia (DeGeo) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). As lâminas polidas foram metalizadas à vácuo com Carbono e, então, analisadas em microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM-G010LA, equipado com sensor de espectroscopia por energia dispersiva (EDS), em laboratório do DeGeo/UNESP. O software utilizado para aquisição dos dados é chamado InTouch Scope.

## **ESTADO DA ARTE**

O uso de microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem sido uma ferramenta importante para o estudo do carste em rochas siliciclásticas. Sauro (2014) demonstra, para os arenitos da Formação Mataui, nos Tepuis da Venezuela, diferentes morfologias de dissolução (*pitting* e *v-shape*) presentes nos grãos de quartzo, sobretudo nas bordas e contatos, influenciando no processo de arenização e, posteriormente, carstificação da rocha. Melo *et al.* (2015) demonstram através de MEV a dissolução de filossilicatos (caulinita e ílita) da matriz de arenitos da Formação Furnas, no estado do Paraná, que promovem a desagregação dos grãos de quartzo e, posteriormente, a formação de cavernas e dolinas. Pontes *et al.* (2020) usam da técnica para descrever e caracterizar uma diversidade de espeleotemas coletados em sistemas cársticos siliciclásticos em arenitos da Formação Furnas e Vila Velha, identificando fragmentos de plantas e invertebrados, bem como possíveis bioassinaturas cianobactérias e diatomáceas).

## RESULTADOS

### Sistema Rio dos Pombos – IG007 e IG019

O Sistema Rio dos Pombos foi caracterizado através de dois pontos distintos: nos entornos do seu sumidouro (IG007) e de sua ressurgência (IG019). Análises de MEV foram aplicadas nas amostras IG007-A01 e IG019-A06.

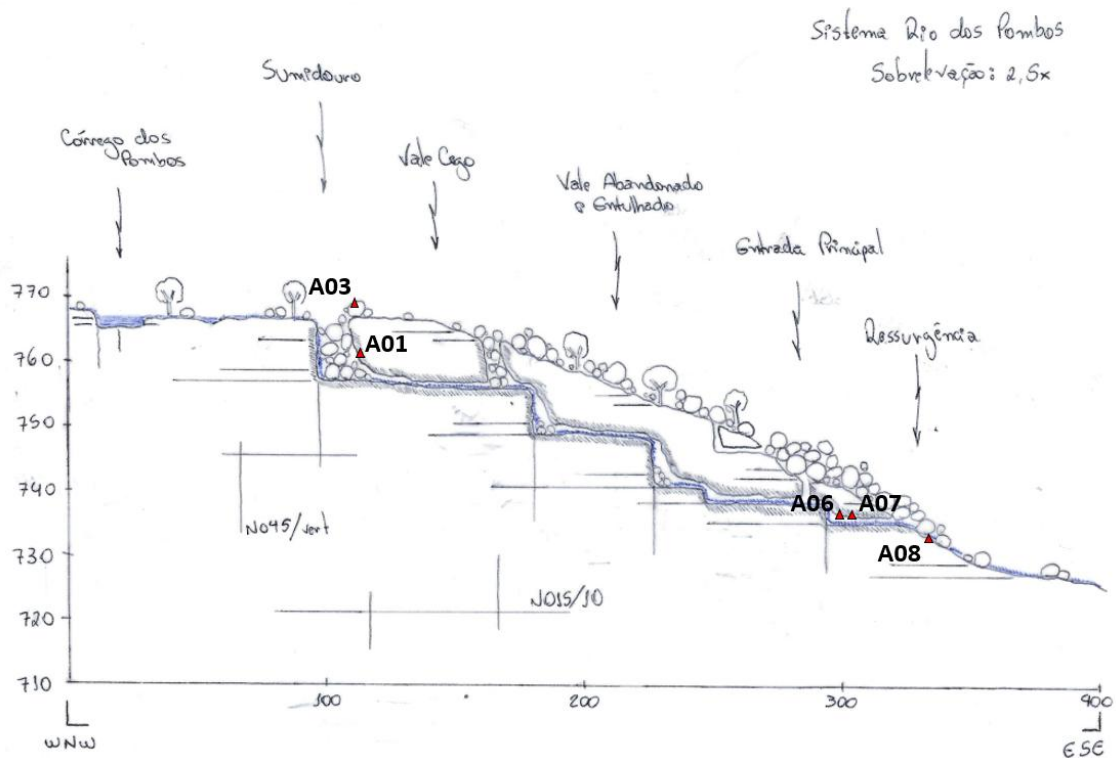


Fig. 1 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para o Sistema Rio dos Pombos.



Fig. 2 – Amostras de metarenito analisada no Sistema Rio dos Pombos.

## IG007-A01

A amostra corresponde a um quartzo-metarenito, com maturidade textural avançada e empacotamento fechado entre os grãos do arcabouço. Nas imagens de MEV é possível observar um fraturamento dos grãos de quartzo em duas direções ortogonais entre si (diagonais nas imagens da Fig. 3). Esses fraturamentos atuam como planos de ação preferencial dos processos intempéricos, deixando marcas de corrosão orientadas na superfície dos grãos e contribuindo para a criação de porosidade intragranular. Também se nota a porosidade aumentada no contato entre os grãos.

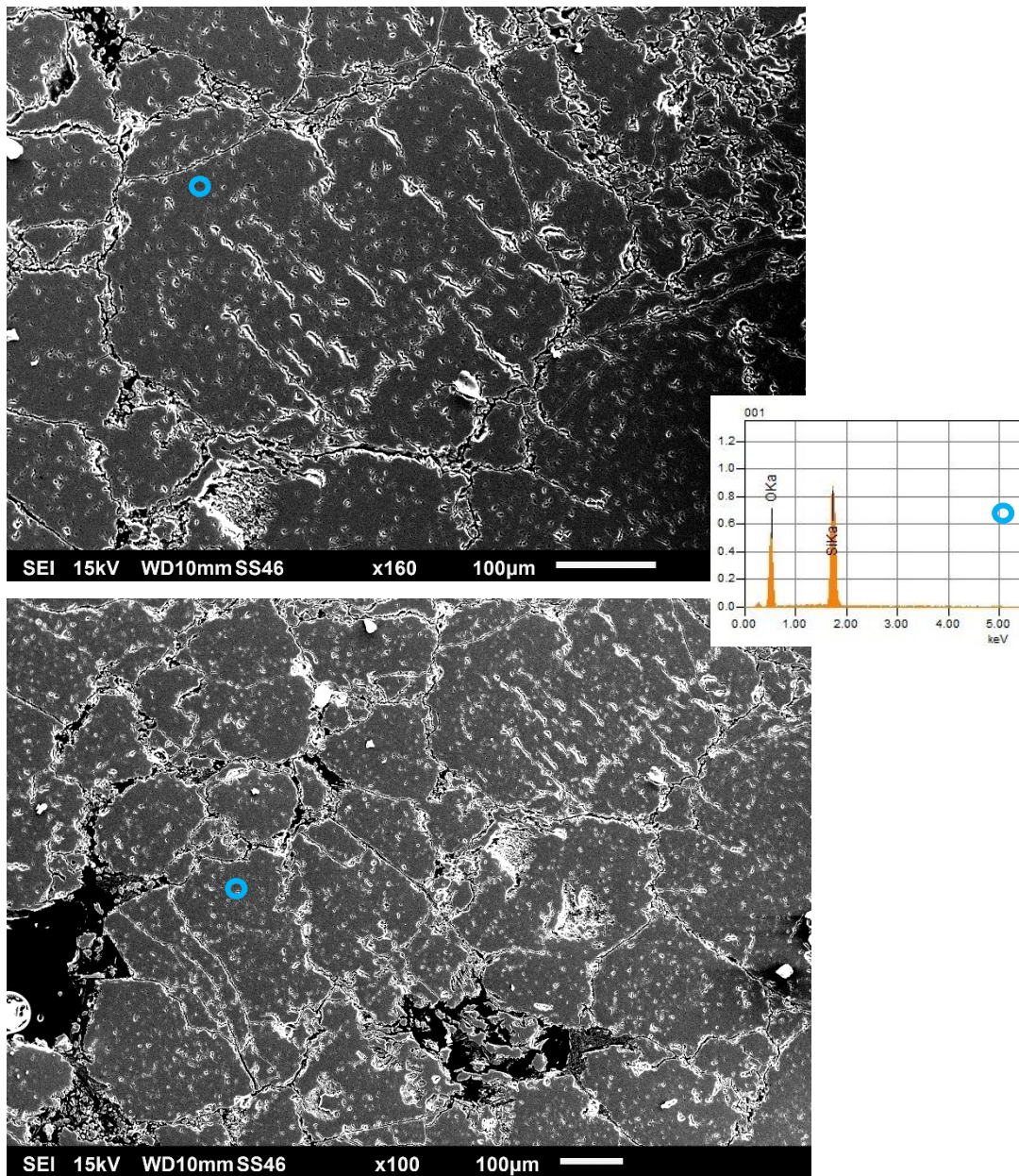


Fig. 3 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG007-A01.

Já nas Fig. 4 e 5 é possível observar o consumo de quartzo pela reação metamórfica de formação da pirofilita (caulinita + quartzo = pirofilita). Onde há presença de  $K_2O$ , possivelmente oriundo de argilominerais, como a illita, ou da alteração de feldspatos, ocorre a formação de muscovita. A reação ocorre entre uma protomatriz existente nos interstícios do arcabouço e as bordas dos grãos, em alguns casos consumindo o grão todo. Por vezes, a recristalização oblitera a porosidade primária. Por outro lado, a reação também favorece a fragmentação dos grãos, criando porosidade e atuando como pontos de fraqueza, onde o intemperismo age com maior intensidade e diminui a coesão da rocha, permitindo o desenvolvimento do carste.

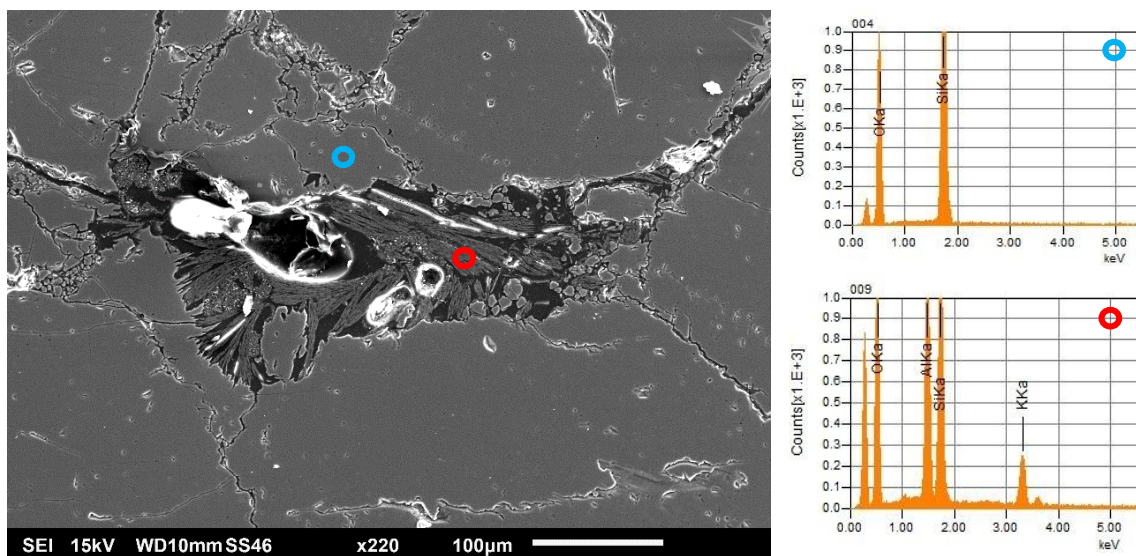


Fig. 4 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG007-A01.

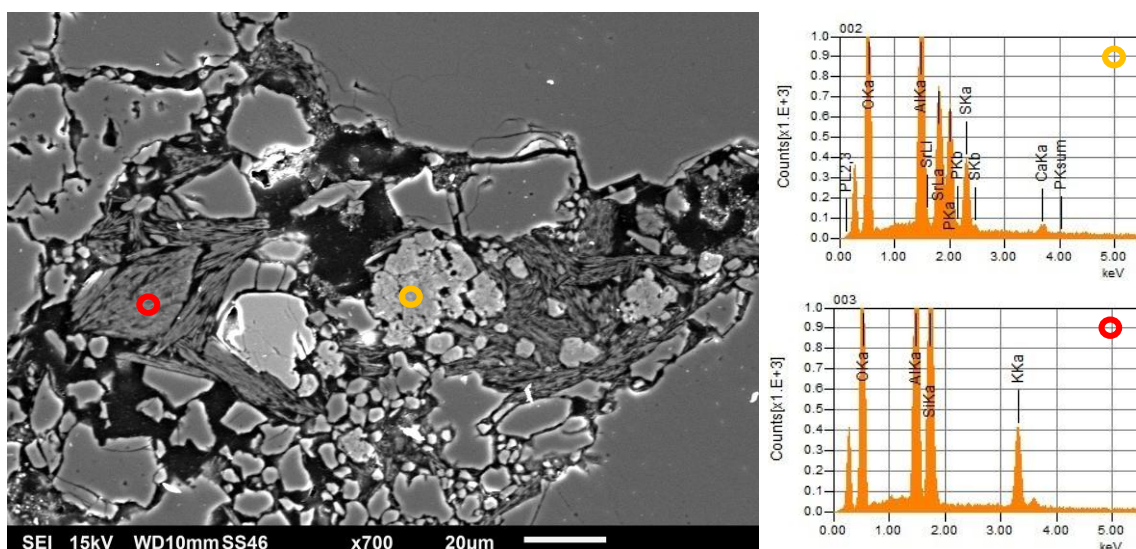


Fig. 5 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG007-A01.

## IG019-A06

A amostra IG019-A06 corresponde a um quartzo-metarenito, de alta maturidade textural, com empacotamento normal entre os grãos do arcabouço, muito sobrecrescimento sintaxial de quartzo e quase nenhuma matriz. Na Fig. 6 é possível observar a cristalização metamórfica de muscovita, aparentemente seguindo uma componente cisalhante, demonstrando que essa reação se correlaciona com o evento de deformação da rocha. Vê-se também a fragmentação dos grãos de quartzo que acompanha essa reação, cuja criação de porosidade e de zonas de enfraquecimento, além do aumento da superfície de contato, parecem ser importantes para o desenvolvimento da carstificação na telodiagênese.

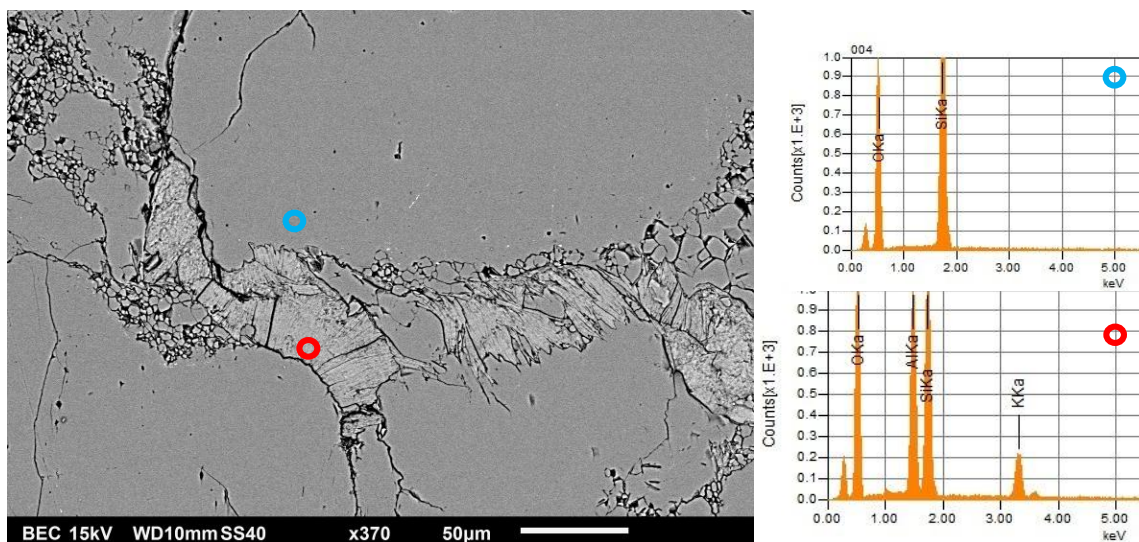


Fig. 6 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG019-A06.

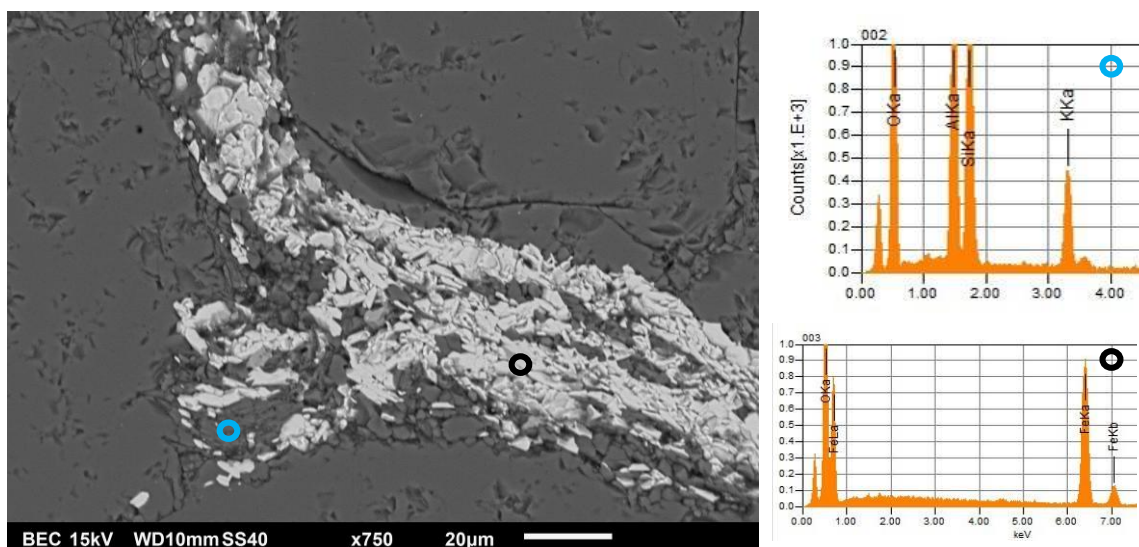


Fig. 7 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG019-A06.

A Fig. 7 evidencia também a presença de minerais de óxidos de ferro, possivelmente hematita, ocorrendo como cimento da rocha, junto à muscovita, nos interstícios do arcabouço.

### Gruta do Canal da Fumaça – IG013

Para a Gruta do Canal da Fumaça (IG013), fora analisada amostra de rocha fresca coletada no pacote superior à cavidade (IGO13-A40).

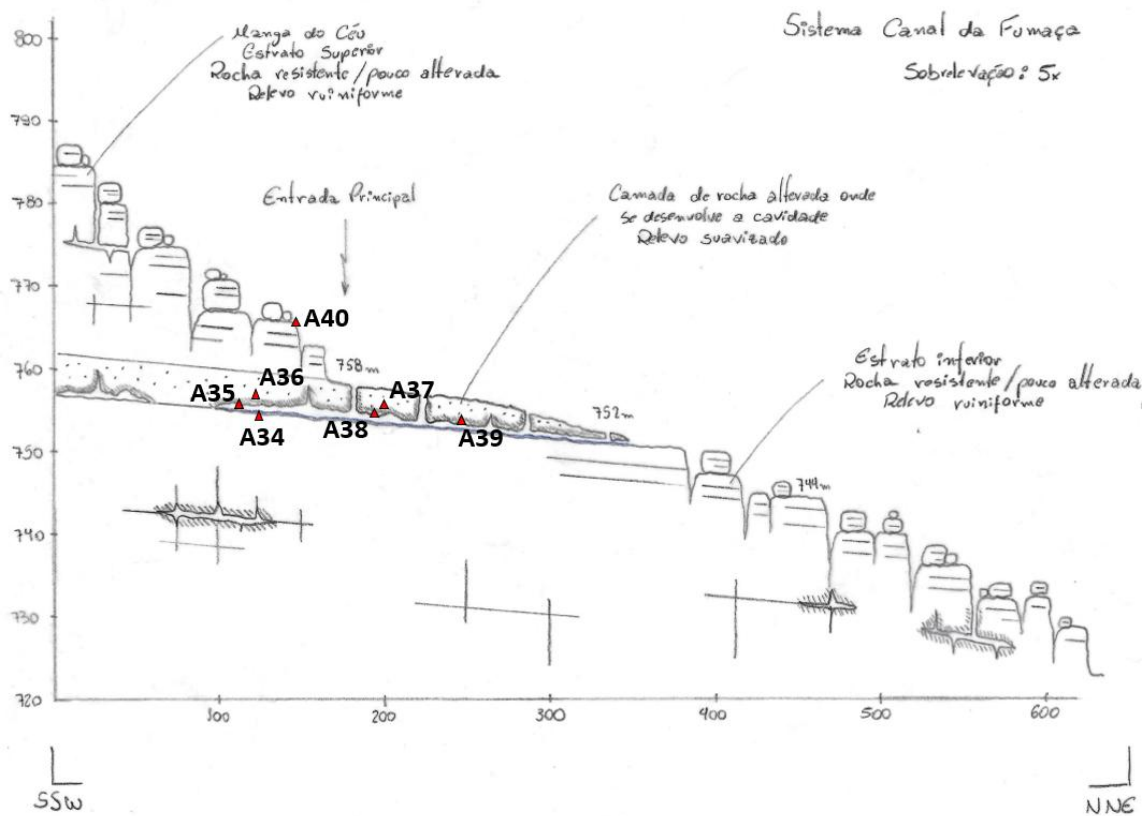


Fig. 8 – Modelo conceitual com distribuição de amostras coletadas Gruta do Canal da Fumaça.



Fig. 9 – Amostra de metarenito analisada na Gruta do Canal da Fumaça.

## IG013-A40

A amostra IG013-A40 é de baixa maturidade textural e apresenta altas proporções de matriz de filossilicatos (metagrauvaca). Desse modo, a Fig. 10 exibe cristais de pirofilita bem desenvolvidos envolvendo os grãos de quartzo. A pirofilita é oriunda da reação de anquimetamorfismo (caulinita + quartzo = pirofilita), o que fica evidente no consumo das bordas e na intensa fragmentação dos grãos de quartzo na imagem. Já a Fig. 11 mostra a reação intempérica (telodiagênese) da pirofilita alterando novamente para caulinita (*booklets*) na borda de um grão de quartzo que já foi corroído e fragmentado pela reação metamórfica pretérita.

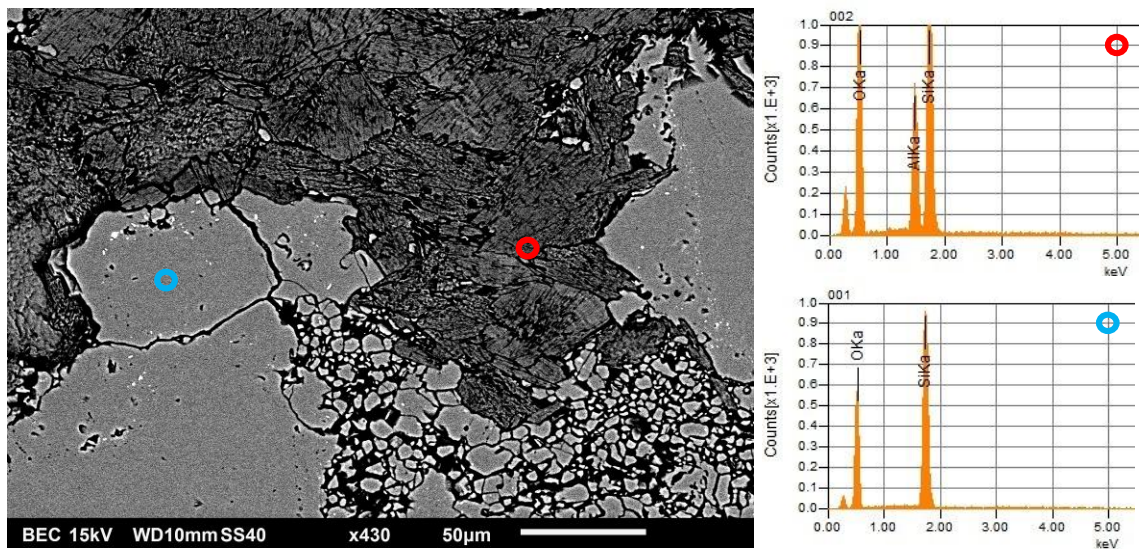


Fig. 10 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG013-A40.

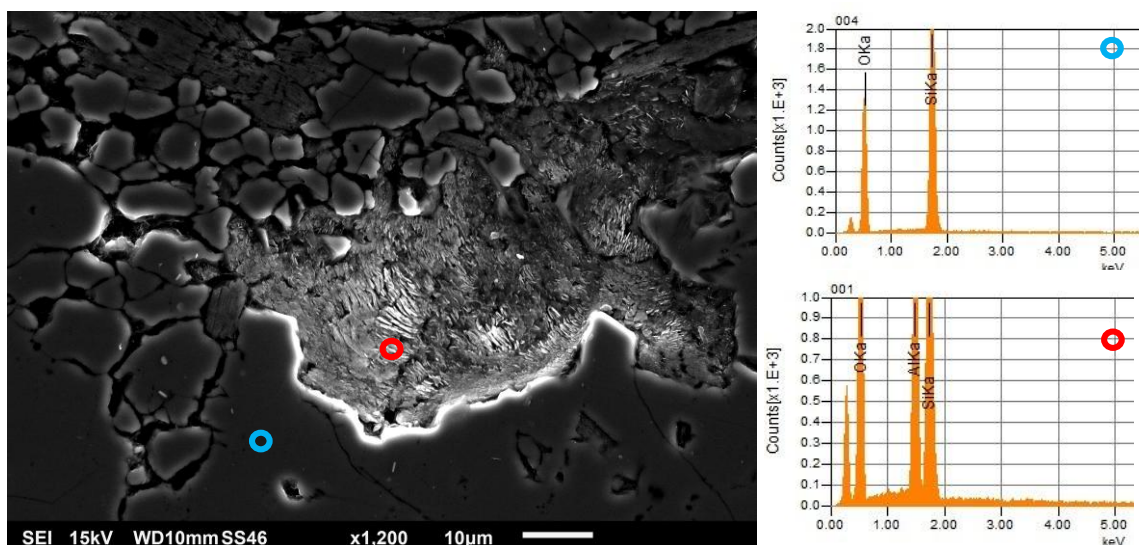


Fig. 11 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG013-A40.

Já as Fig. 12 e 13 mostram grãos de feldspatos sódicos, possivelmente Albita, muito fraturados, fragmentados e consumidos. Nas bordas dos grãos, vê-se o consumo intenso dos grãos de quartzo, o que sugere que esses também são fontes de alumínio para a reação de formação da pirofilita. A Fig. 12 evidencia como a porosidade ao redor da ocorrência do feldspato é aumentada, o que pode contribuir consideravelmente para a carstificação da rocha.

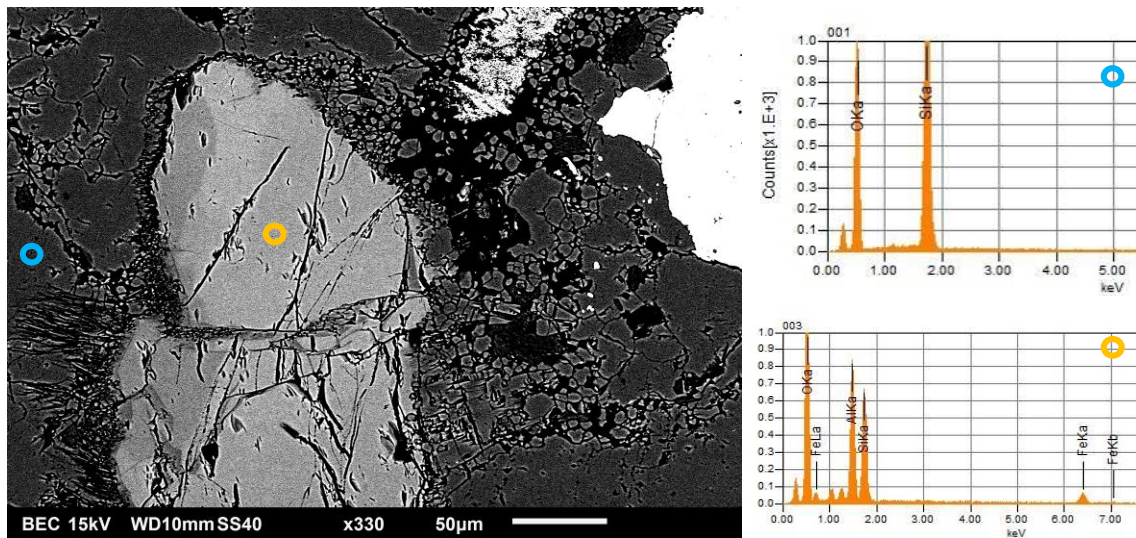


Fig. 12 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG013-A40.

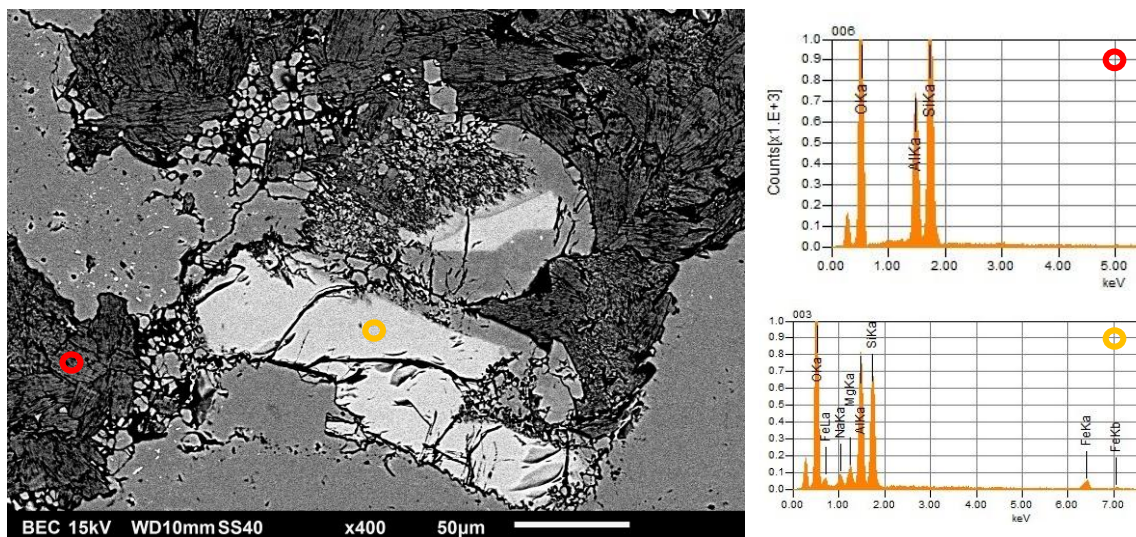


Fig. 13 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG013-A40.

## Gruta da Parede Vermelha – IG015

A Gruta da Parede Vermelha foi registrada no ponto IG015, para qual foi analisada uma amostra de metarenito fresco (IG015-A09).

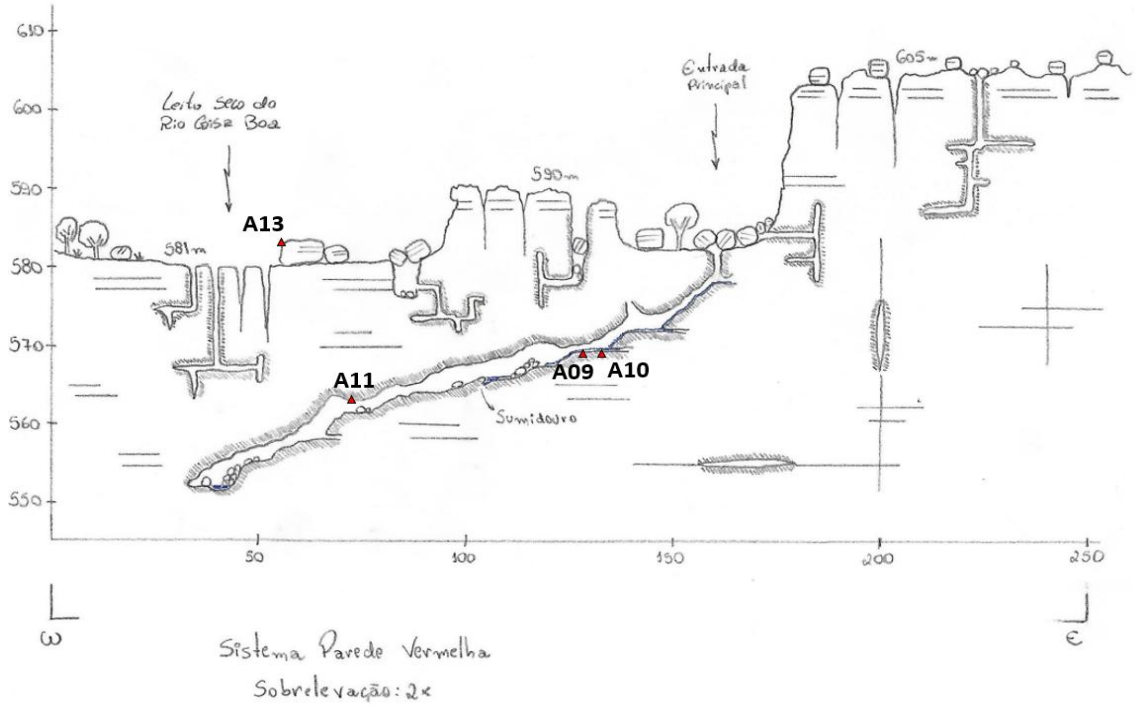


Fig. 14 – Modelo conceitual com distribuição de amostras coletadas na Gruta Parede Vermelha.



Fig. 15 – Amostra de metarenito analisada na Gruta Parede Vermelha.

## IG015-A09

A amostra IG015-A09 corresponde a um metarenito fresco, com baixa maturidade textural e altas proporções de matriz de filossilicatos. A Fig. 16 mostra corrosão das bordas dos grãos de quartzo devido a reação de recristalização de pirofilita nos interstícios do arcabouço, obliterando a porosidade primária da rocha. Já a Fig. 17 mostra, para além das bordas corroídas, um grão de quartzo com intensa fragmentação devido ao ataque químico da reação metamórfica, aumentando a porosidade intragranular.

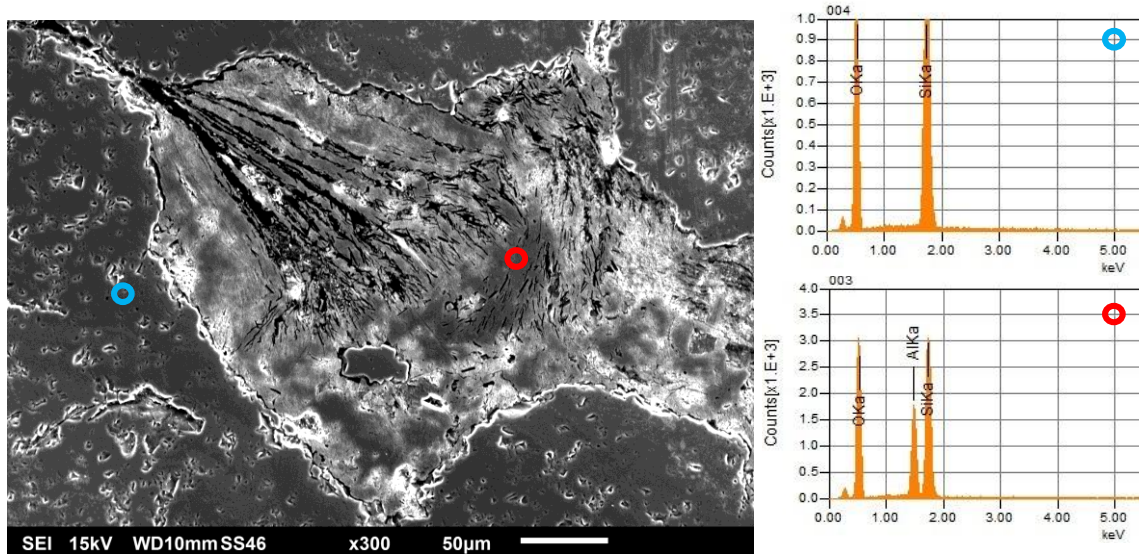


Fig. 16 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG015-A09.

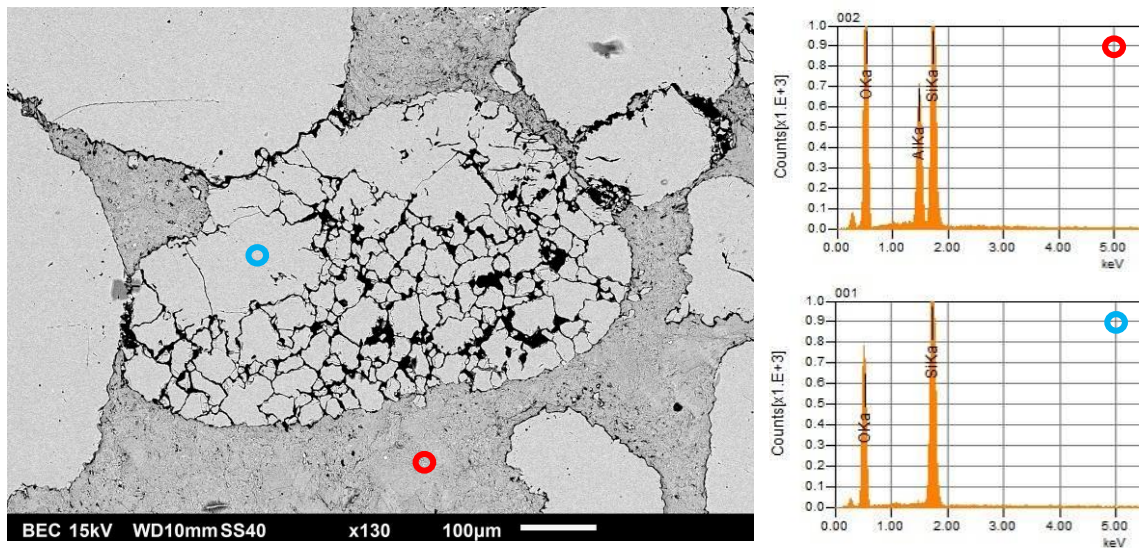


Fig. 17 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG015-A09.

As Fig. 18 e 19 exibem a evolução petrográfica das rochas da Formação Tombador na área de estudo. Primeiramente, os grãos de quartzo consumidos (com *pits* de corrosão) evidenciam a reação de anquimetamorfismo para formação da pirofilita, que se apresenta como ortomatriz, envolvendo os grãos do arcabouço. Posteriormente, mostra a neoformação de *booklets* de caulinita, resultado da alteração da pirofilita durante a telodiagênese. Junto com essa reação intempérica, também se alarga a porosidade da rocha.

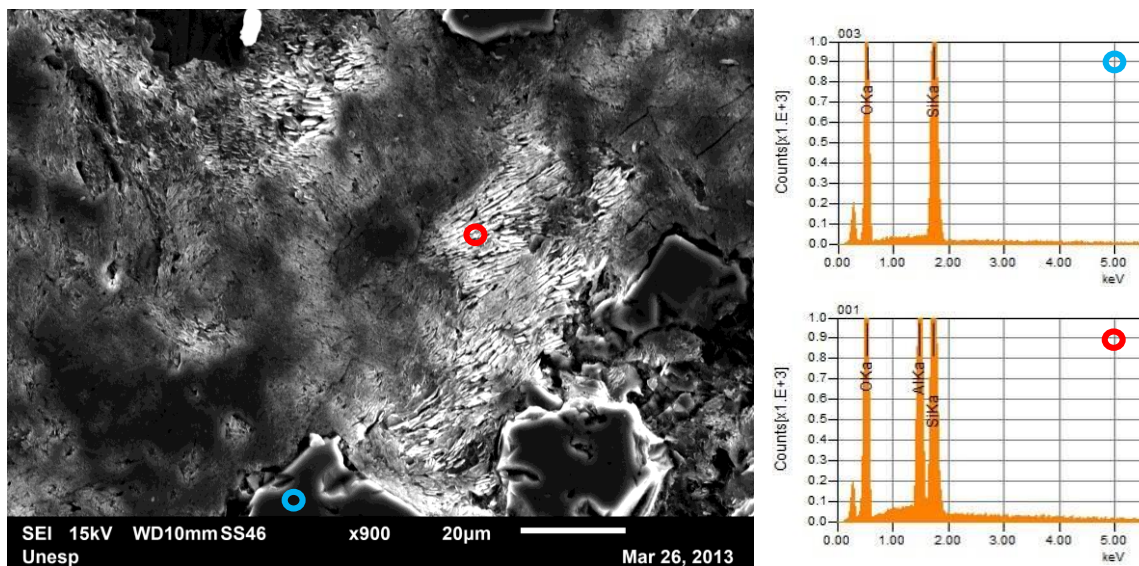


Fig. 18 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG015-A09.

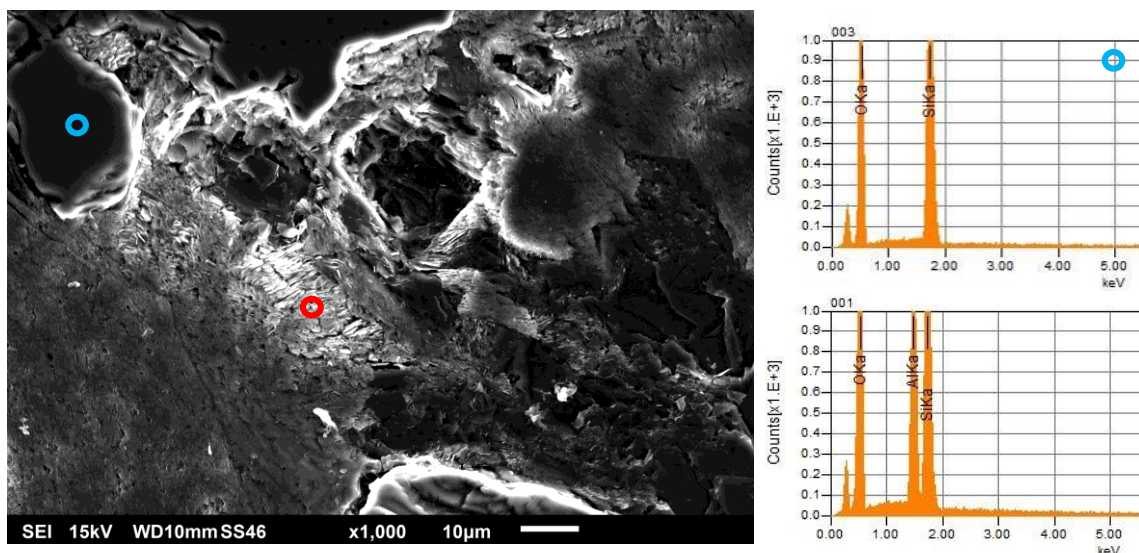


Fig. 19 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG015-A09.

## Gruta do Trianglim – IG023

Para a Gruta do Trianglim, foram analisadas amostras de espeleotema do tipo microtravertino (IG023-A16) e amostra de rocha com precipitação (IG023-A17). Não foi possível posicionar a distribuição das amostras coletadas no modelo, uma vez que o mapa da cavidade não foi concluído até o momento da coleta.

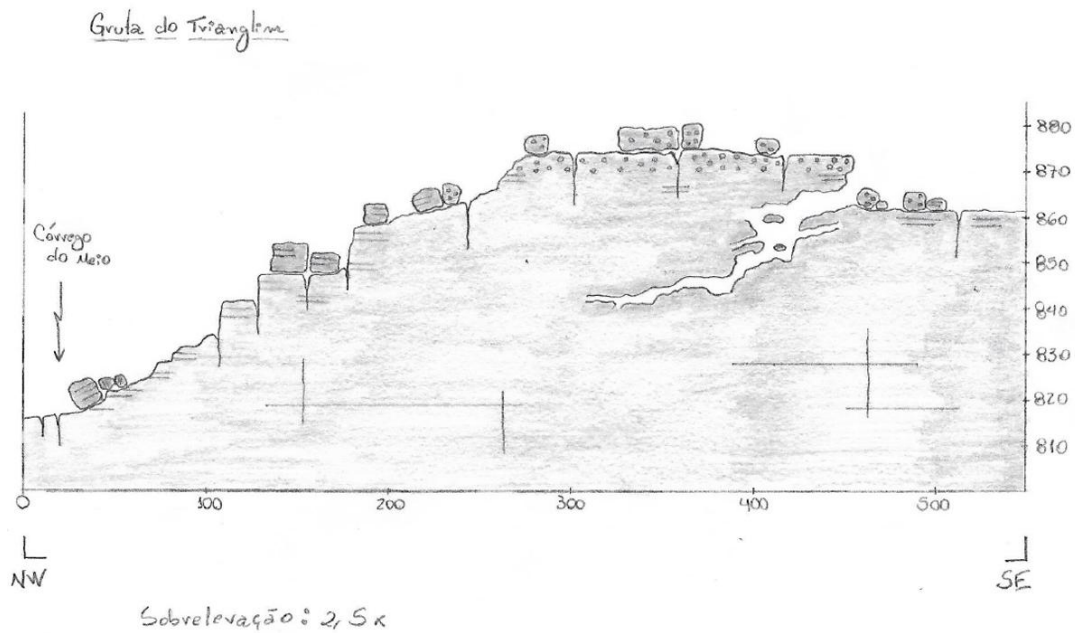


Fig. 20 – Modelo conceitual da Gruta do Trianglim.

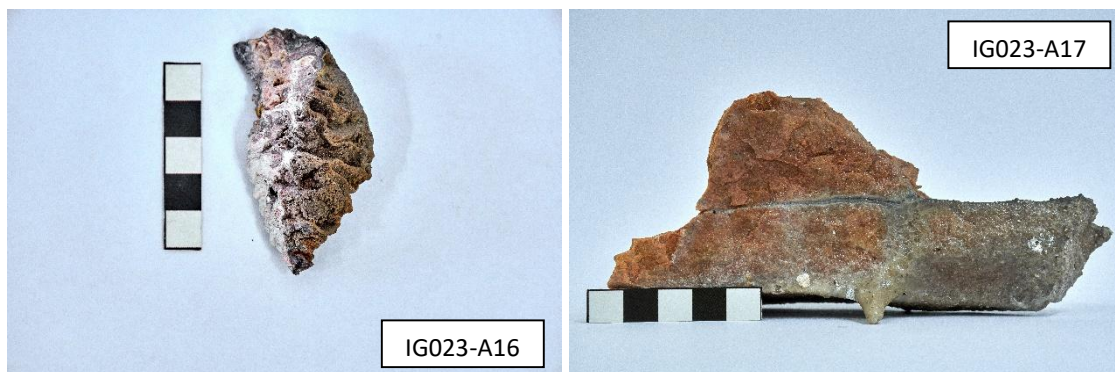


Fig. 21 – Amostras de espeleotema e rocha analisadas na Gruta do Trianglim.

## IG023-A16

A amostra corresponde a espeleotema do tipo microtravertino, coletado na lateral de um bloco no interior da caverna. As imagens de MEV (Fig. 22 e 23) exibem um crescimento bandado, ora com estrutura porosa e linhas de crescimento regulares (Fig. 22), ora com estrutura maciça e linhas de crescimento irregulares (Fig. 23). A composição química varia de acordo com a alternância de bandas, mas predomina a composição silicosa com proporções de alumínio. Em alguns pontos, lâminas com presença de sódio e cloro também foram identificadas.

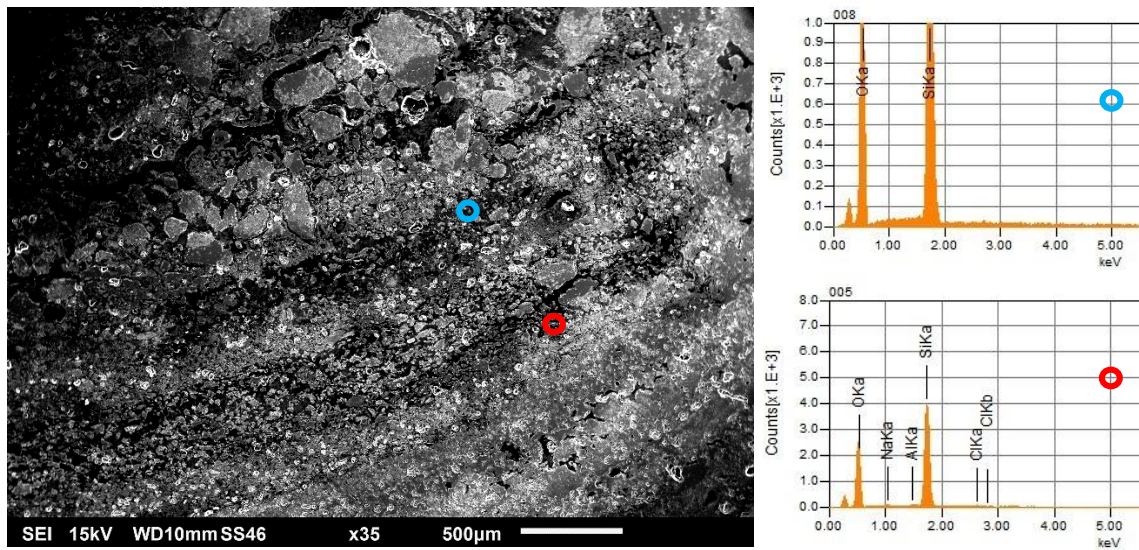


Fig. 22 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG023-A16.

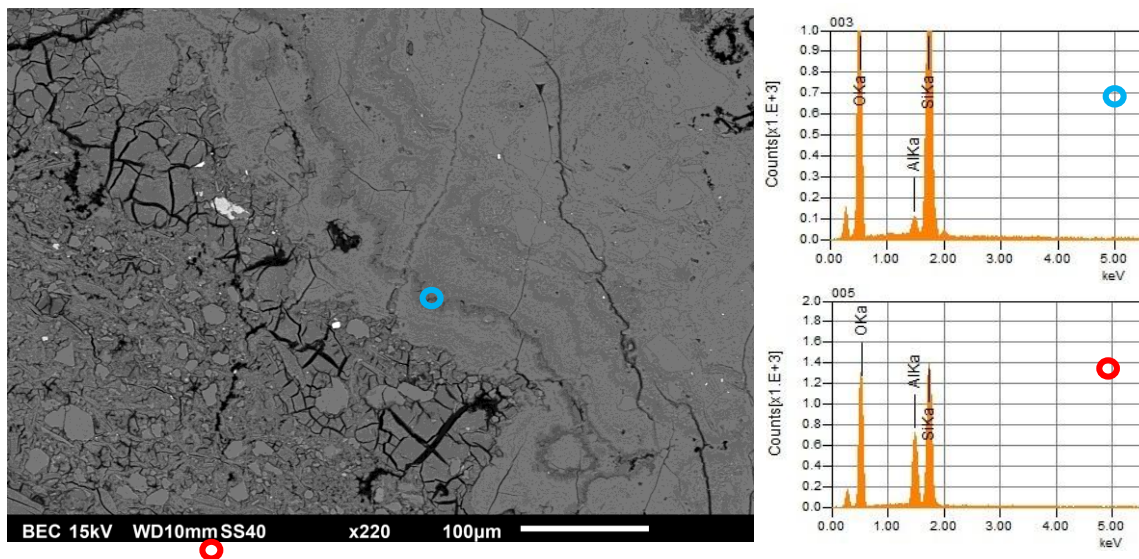


Fig. 23 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG023-A16.

## IG023-A17

A amostra IG024-A17 corresponde a um metarenito fresco, coletado no teto da cavidade, do qual se pronuncia uma precipitação de material silicoso, branco-acinzentado, que converge para uma pequena estalactite. A Fig. 24 evidencia a porosidade reduzida da rocha, que possivelmente foi obliterada pela precipitação de sílica amorfa nos interstícios dos grãos do arcabouço. Também ocorrem pirofilitas como ortomatriz e minerais de óxidos de ferro cimentando a rocha (Fig. 25).

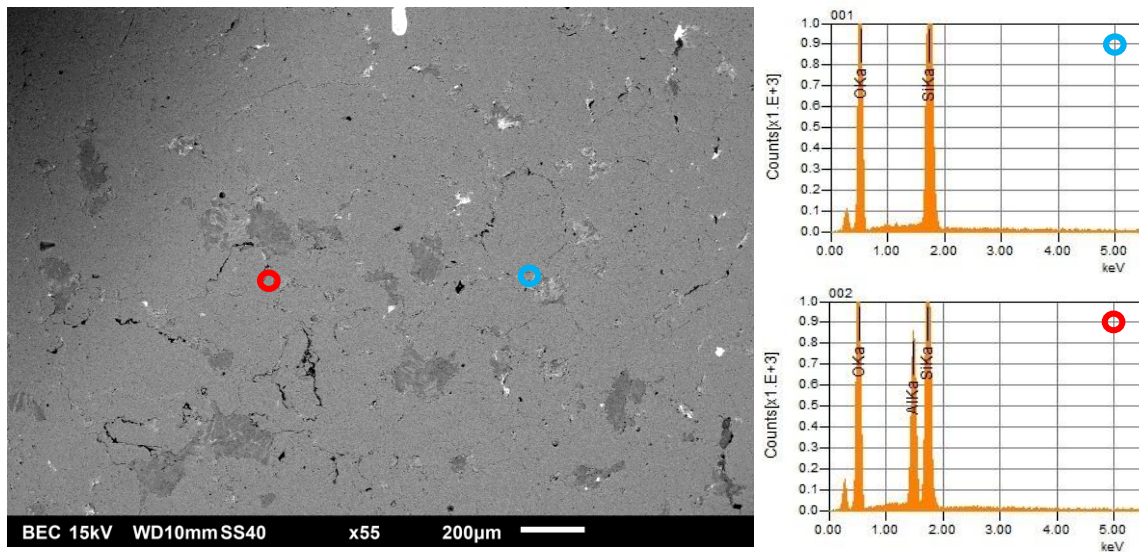


Fig. 24 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG023-A17.

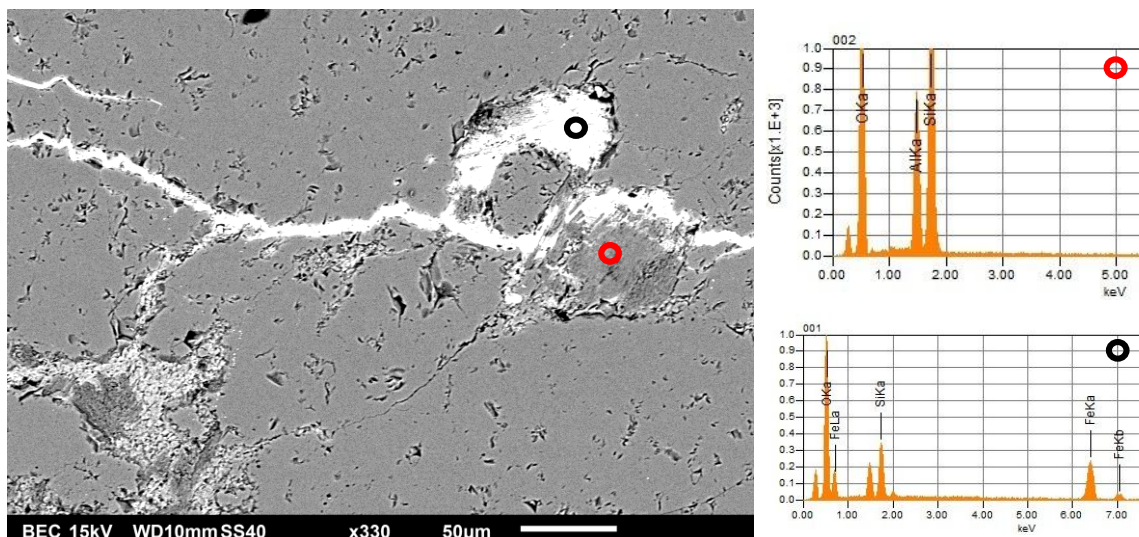


Fig. 25 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG023-A17.

## Gruta de Torras – IG029

A amostra descrita para a Gruta de Torras corresponde a metarenito granuloso (ou microconglomerado) moderadamente alterado, coletado no teto da caverna (IG029-A32). Na galeria onde foi descrita, a litologia parece sustentar o teto da cavidade.

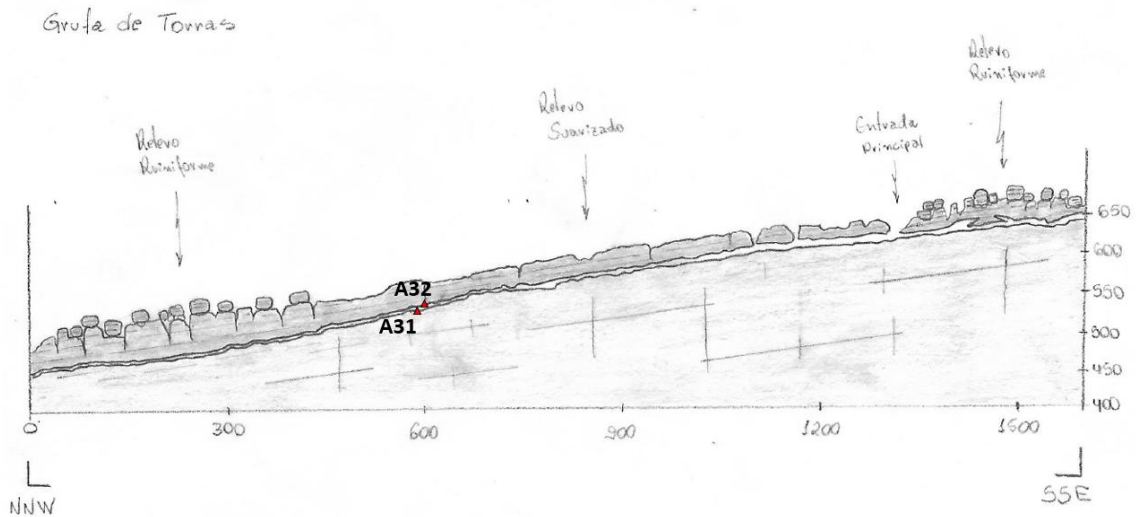


Fig. 26 – Modelo conceitual com a distribuição das amostras coletadas para a Gruta de Torras.

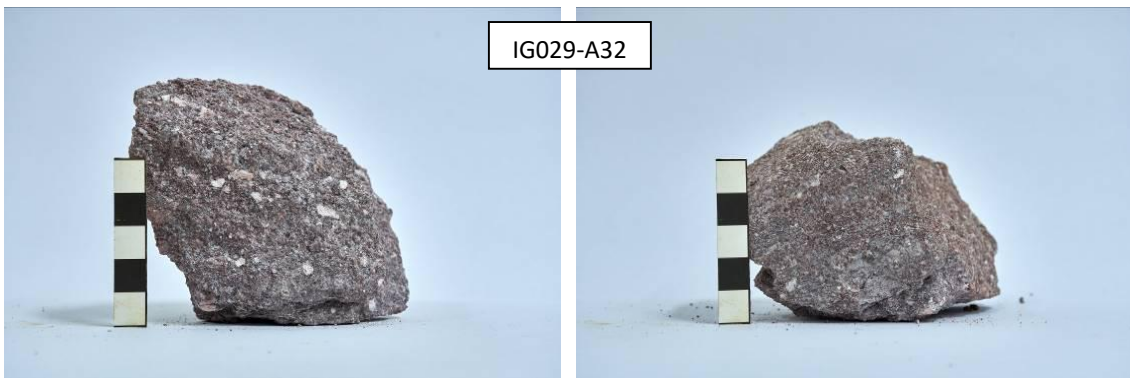


Fig. 27 – Amostra de metarenito granuloso da Gruta de Torras.

## IG029-A32

A amostra IG029-A32 corresponde a metarenito granuloso (ou micro-conglomerado) de coloração arroxeada, coletado no teto da cavidade. Mais notório na amostra é a coloração arroxeada, que parece ser condicionada pela presença de óxidos de ferro. De fato, as análises de MEV confirmam a hipótese, como visto na Fig. 28, onde massas compostas de pequenas placas de hematita cimentam a rocha. Tais minerais parecem ser de uma fase posterior ao anquimetamorfismo, uma vez que aparecem preenchendo vazios entre fragmentos de grãos de quartzo e pirofilita. O ferro pode ter origem hidrotermal, conforme sugerido por Cruz *et al.* (2018).

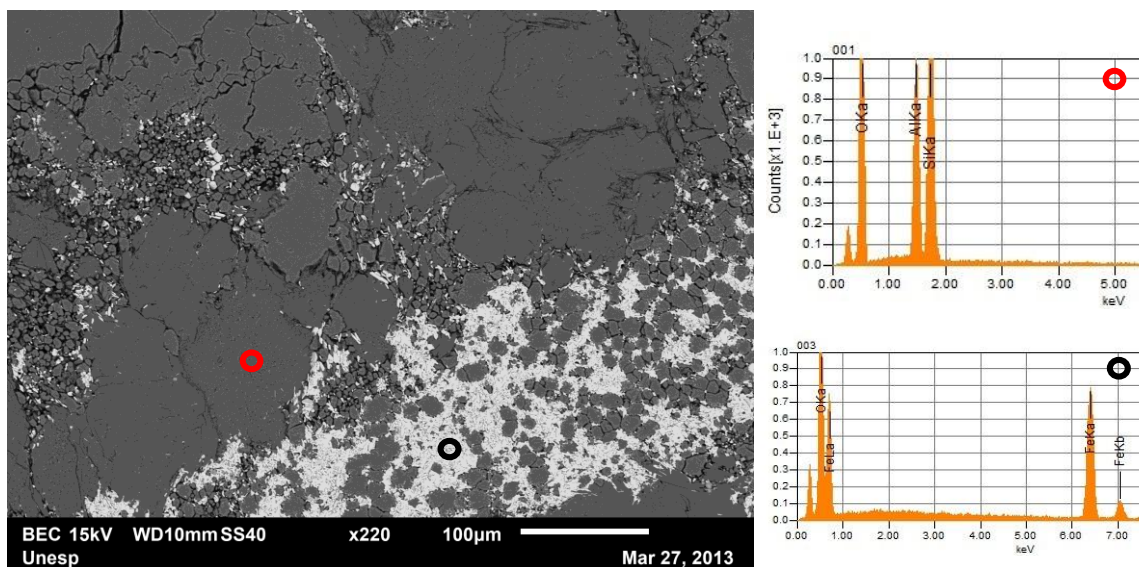


Fig. 28 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG029-A32.

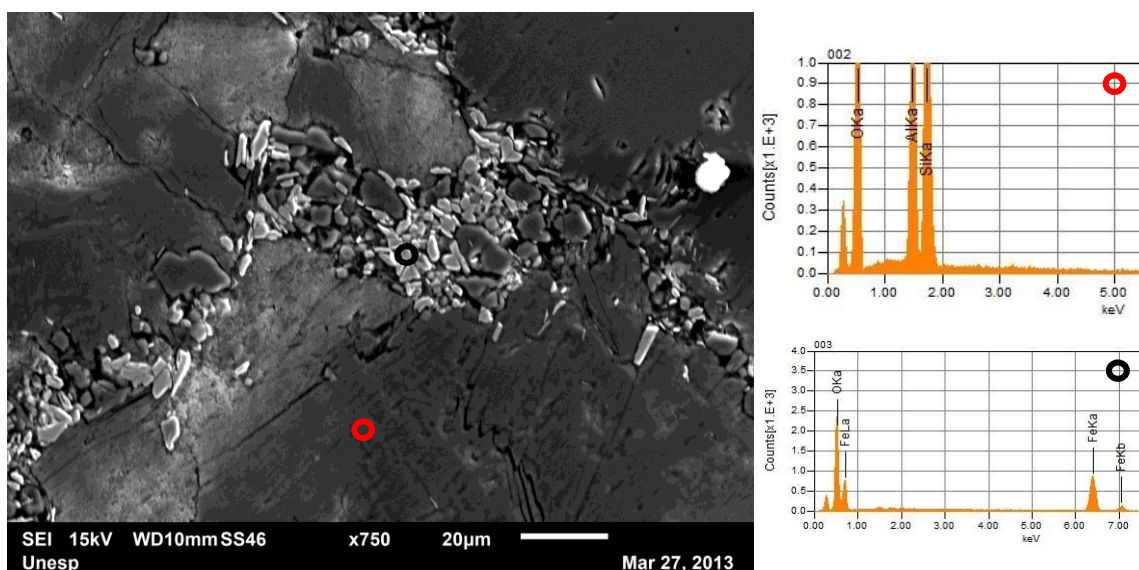


Fig. 29 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG029-A32.

Na Fig. 30, é possível observar a geminação de pequenos cristais de hematita nas bordas fragmentadas dos grãos de quartzo. A questão que se levanta é se a presença de óxidos de ferro influencia na fragmentação do quartzo, uma vez que o Fe no meio pode aumentar a solubilidade da sílica (Wray e Sauro, 2017). Por sua vez, a Fig. 31 mostra a alteração da pirofilita para caulinita, resultado de reações intempéricas durante a telodiagênese, além da superfície dos grãos de quartzo corroídas pela reação metamórfica de formação da pirofilita.

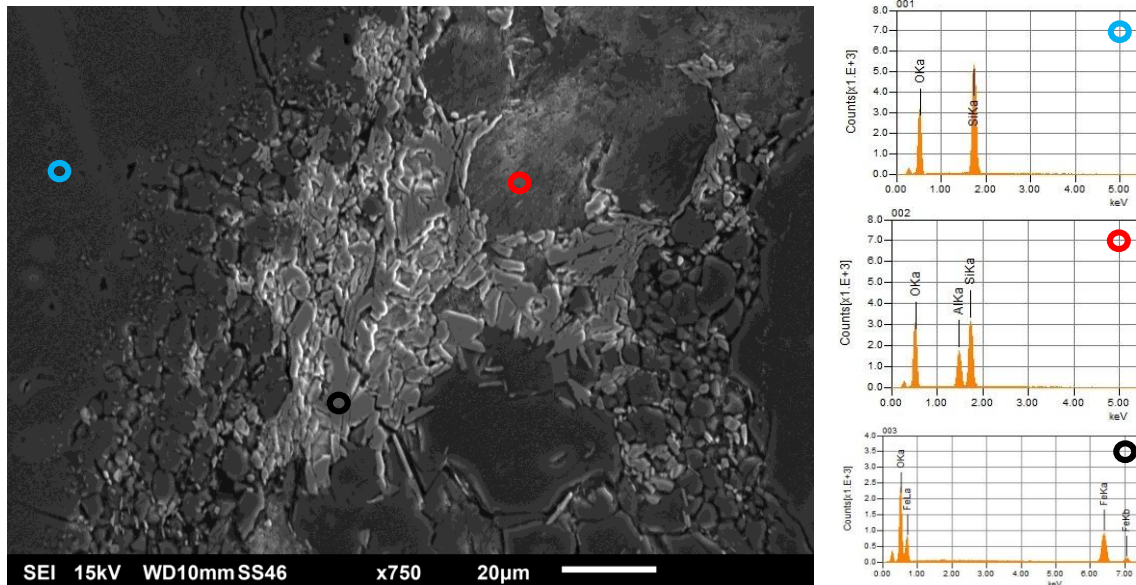


Fig. 30 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG029-A32.

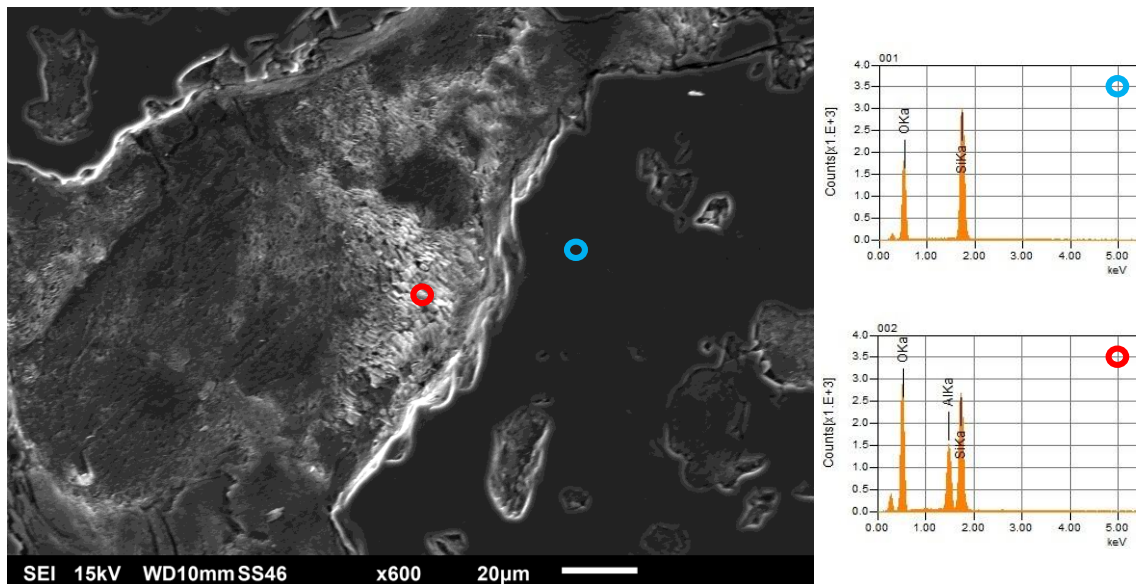


Fig. 31 – Imagem de MEV com composição química obtida por EDS da amostra IG029-A32.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permitiu a identificação de estruturas mineralógicas e petrográficas que auxiliam na compreensão dos processos geológicos aos quais foram submetidas as rochas da Formação Tombador na área de estudo.

Primeiramente, foi possível observar em detalhe as reações de consumo do quartzo e formação da pirofilita, associada ao anquimetamorfismo ( fácies prehnita-pumpellita a xisto verde inferior), através da reação *caulinita + quartzo = pirofilita*. Em muitas imagens se vê as bordas e, por vezes, todo o grão de quartzo corroído, dando espaço a cristais tabulares a lamelares de pirofilita. Destaca-se que essa reação ocorre associada a fragmentação dos grãos de quartzo, a qual pode ter relação direta com o ataque químico da reação ou mesmo com a deformação tectônica a qual as rochas foram expostas durante o metamorfismo regional. De toda forma, esses locais atuam como pontos de fraqueza da rocha, ou seja, onde posteriormente o intemperismo age com mais intensidade.

Com relação ao processo mais recente (telodiagênese) de intemperismo, foi possível observar a neoformação de caulinitas, marcadas pela estrutura em *booklets*, oriundas da alteração da pirofilita sob condição saturada de água. Sugere-se que esse fenômeno ocorra pela dissolução incongruente da pirofilita, que deixa como resíduo de fase sólida a caulinita, liberando sílica em solução. Esse processo amplifica a porosidade da rocha e causa a desagregação dos grãos de quartzo do arcabouço, que serão posteriormente removidos mecanicamente por *piping*, desenvolvendo a carstificação.

Conclui-se, ainda, que não foi possível afirmar com propriedade se existem feições de corrosão do quartzo devido aos processos intempéricos, uma vez que esses já são consumidos pela reação de metamorfismo. Para isso, recomenda-se que sejam feitas novas análises, dessa vez diretamente sob amostras de rocha, sem passar pelo processo de polimento em lâmina, o que permitirá observar as estruturas em relevo. Além disso, é necessário concluir as análises também para as amostras de rocha alterada, que foram impregnadas com resina, para identificar melhor estruturas de intemperismo e dissolução.

## REFERÊNCIAS

CRUZ, V.A., CRUZ, S.C.P., LOBATO, L.M., RIOS, F.J., SANTOS, J.S., LIMA, G.M.P., 2018. Structural control and hydrothermal evolution model of unusual, high-grade metasandstone-hosted iron deposits, Mesoproterozoic eastern Chapada Diamantina, Brazil. **Ore Geology Reviews**, 221-272.

MELO, M. S.; GUIMARÃES, G. B.; CHINELATTO, A. L.; GIANNINI, P. C.; PONTES, H. S.; CHINELATTO, A. C. A.; ATENCIO, D. (2015) 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**, v. 63, p. 20-35. DOI: 10.1016/j.jsames.2015.06.011

PONTES, H. S.; FERNANDES, L. A.; DE MELO, M. S.; GUIMARÃES, S. G. B.; MASSUQUETO, L. L. (2020) Speleothems in quartz-sandstone caves of Ponta Grossa municipality, Campos Gerais region, Paraná state, Southern Brazil. **International Journal of Speleology**, 49, 2, p. 119-136.

SAURO, F. (2014) Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone: Evidence of the arenisation process. **Geomorphology**, 226, 106-123.

WRAY, R.A.L., SAURO, F., 2017. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. **Earth-Science Reviews**, 171, 520-557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.008>.

**ANEXO 6**

**HIDROQUÍMICA E**

**MICROBIOLOGIA**

# **HIDROQUÍMICA**

## MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa de campo com foco para o estudo das condições hidroquímicas na área de estudo foi desenvolvido entre os dias 08 e 16 de setembro de 2025, ou seja, ao fim da estação seca na região. Dessa forma, a vazão dos cursos d'água estavam baixas, sendo descrita apenas qualitativamente, não sendo determinada ou quantificada. A atividade contou, para além do pesquisador Raphael Parra e do coordenador do projeto, Prof. Ricardo Pereira, com o Geólogo Msc. Tom Morita, o qual possui experiência no tema.

Foram avaliados, ao todo, 20 pontos em cursos d'água diversos: drenagens superficiais e subterrâneas, empoçamento em *kamenitzas* e água estagnada. Com o auxílio de Sonda Multiparâmetro Horiba Série U50 e de Hanna HI98129, foram medidos parâmetros físico-químico *in-situ*, dentre os quais: temperatura, pH, ORP, condutividade, turbidez, oxigênio dissolvido, sólidos totais dissolvidos e salinidade em todos os pontos.

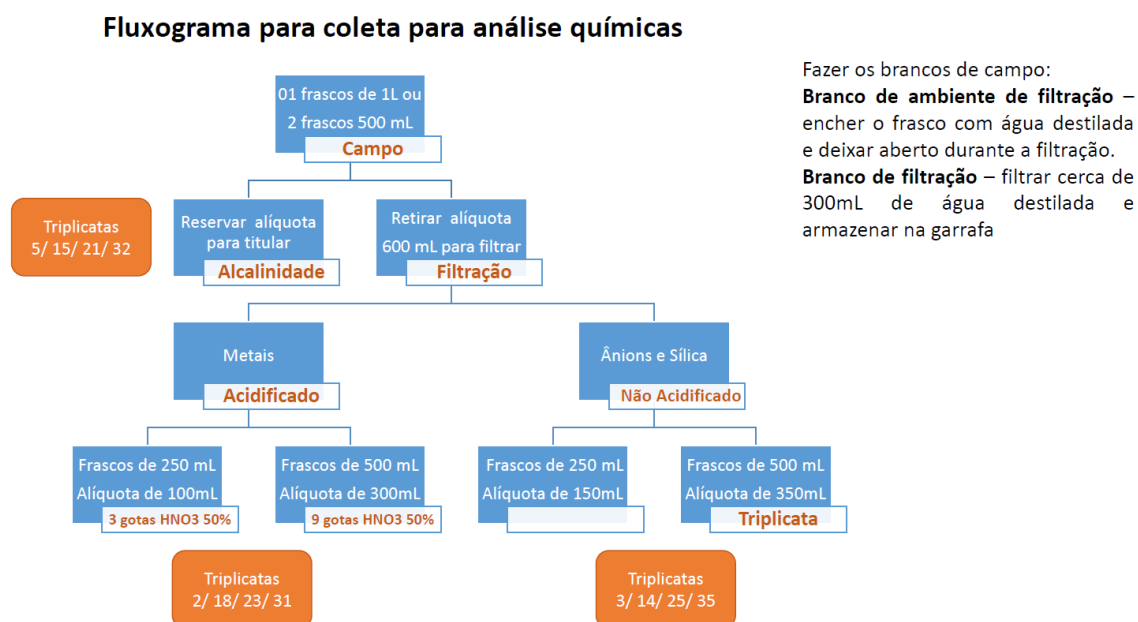


**Fig. 1** – Registros da análise de parâmetros físico-químicos *in-situ* (esquerda) e da coleta de amostras (direita).

Para além disso, nos 20 pontos foram coletadas amostras de água em recipiente de 1L, previamente descontaminados e ambientados três vezes com água do local amostrado. Ao final do dia de campo, na pousada, as amostras foram separadas e preparadas com diferentes finalidades. Uma alíquota de 400 mL de amostra foi separada para análise de alcalinidade *in-loco*, através da titulação com uso de indicadores corantes Fenolftaleína 1% e indicador misto. No entanto, o pH ácido das amostras (3,5 – 5,0) inviabilizou a determinação da alcalinidade, já que a solução se mostrou abaixo do ponto de viragem (*turning point*) dos indicadores. Dessa forma, a alcalinidade para as amostras foi considerada zero, ou seja, não há carbono na forma de  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$ .

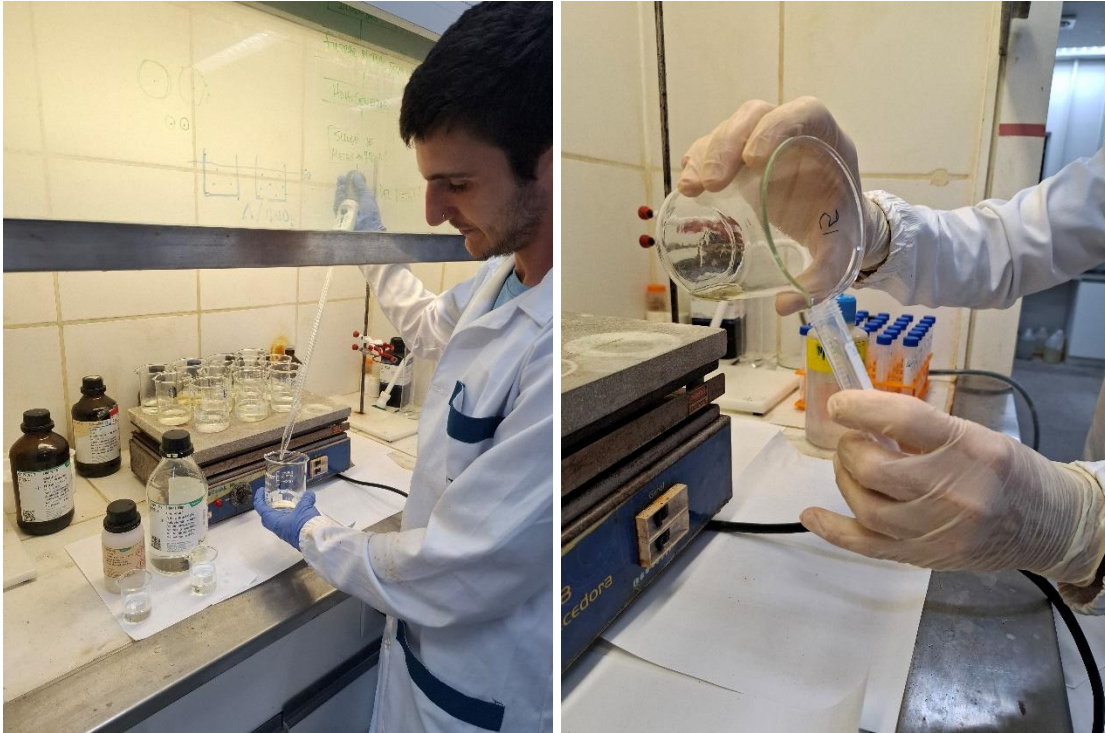
Por sua vez, 600 mL de amostra foram filtrados, utilizando filtro com membrana de 0,45 µm e com auxílio de bomba de vácuo manual. Desses, foram tomadas alíquotas para análises de metais e cátions, com 100 mL de amostra, acidificados com HNO<sub>3</sub> 50% para garantir a solubilidade dos metais e evitar sua precipitação. Por fim, alíquotas de 150 mL foram tomadas e armazenadas sem tratamento, para a análise dos ânions e da sílica.

Foram tomadas triplicatas, branco de filtração e branco de ambiente de filtração para garantir o controle da qualidade das amostras e das análises aplicadas. O procedimento seguido está sistematizado no fluxograma da Fig. 1. As amostras foram armazenadas na geladeira e transportadas em caixa térmica com gelo até o LEPETRO – IGeo/UFBA, em Salvador, onde foram preparadas e analisadas.



**Fig. 2** – Fluxograma de coleta, separação, filtração e tratamento de amostras de água, desenvolvido pelo LEPETRO – IGeo/UFBA, laboratório responsável pelas análises.

Para a extração dos metais, as amostras foram tratadas, em laboratório, com HNO<sub>3</sub> 65% e HCl 37%. Devido à baixa quantidade de íons dissolvidos nas amostras, condição já esperada devido aos parâmetros físico-químicos medidos em campo, foi necessário realizar uma concentração de seis vezes (60 mL p/ 10 mL), à uma temperatura de 170 °C, para a análise de cátions/metals. Em sequência, as análises para cátions/metals foram realizadas em ICP-OES, enquanto os ânions foram analisados utilizando Cromatografia Iônica.



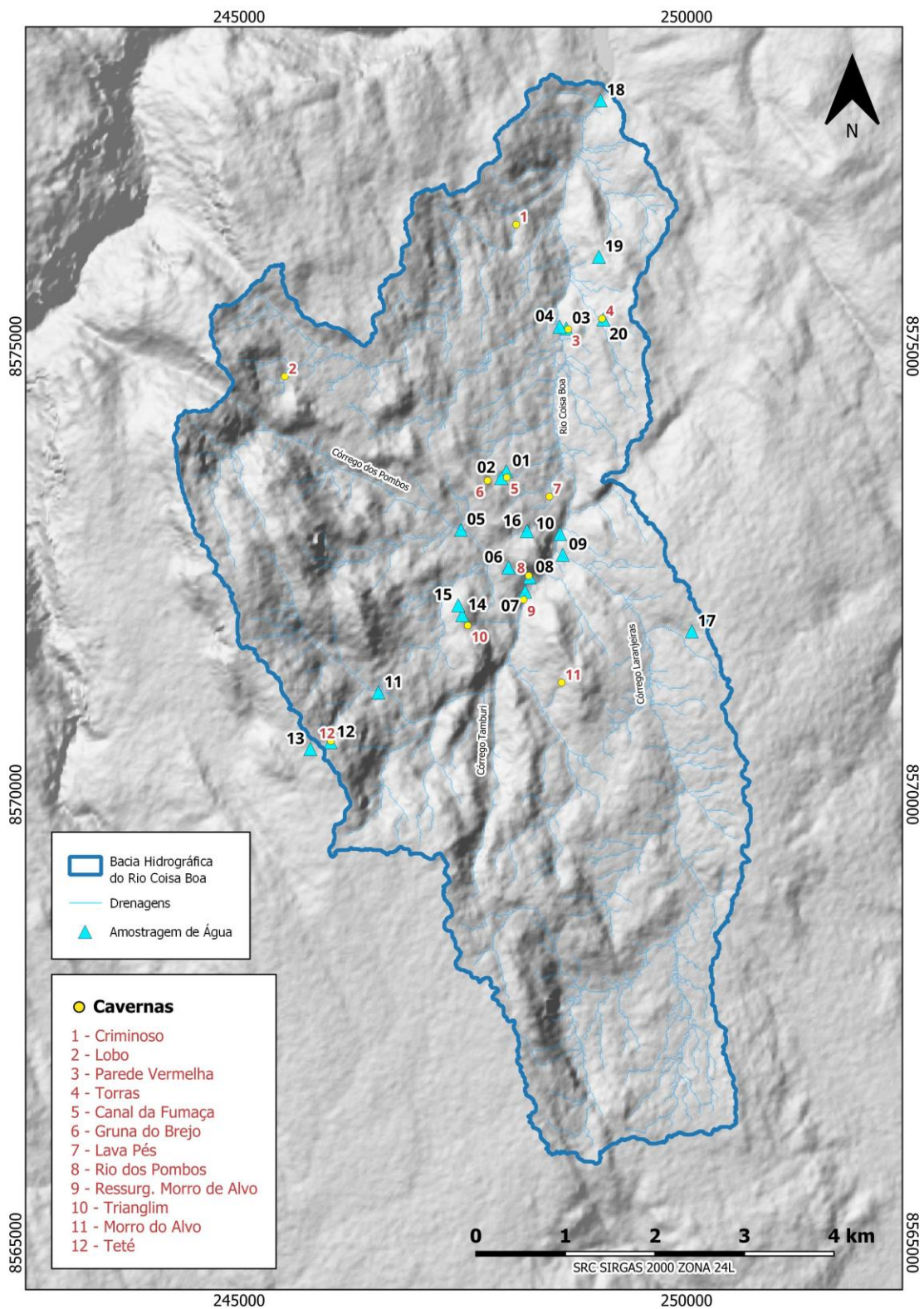
**Fig. 3** – Registro do processo de tratamento com  $\text{HNO}_3$  65% e  $\text{HCl}$  37% e a concentração de seis vezes das amostras no laboratório do LEPETRO – IGeo/UFBA.

## RESULTADOS

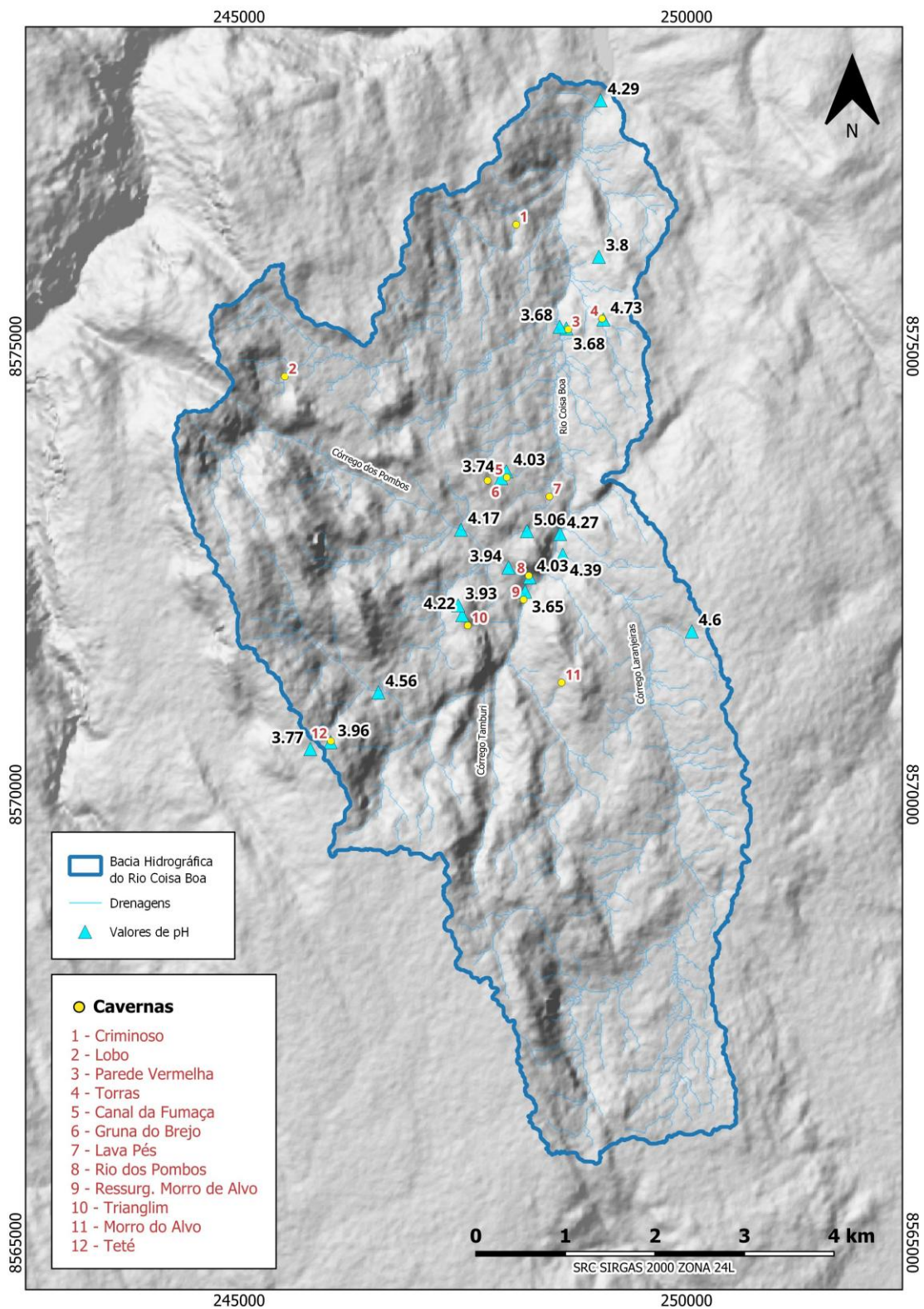
Ao todos foram coletadas e analisadas 21 amostras, sendo a amostra IG-HIDRO-21 uma duplicata da amostra IG-HIDRO-20, com a finalidade de controlar a qualidade das análises do laboratório e, por esse motivo, não aparece no mapa de distribuição. A amostra IG-HIDRO-16 foi descartada, uma vez que foi localizado um local de coleta mais adequado (IG-HIDRO-17).

Destaca-se que os resultados obtidos através das análises laboratoriais ainda necessitam ser tratados e interpretados, por exemplo através da elaboração de diagramas específicos, ou da aplicação de modelagens para identificar quais minerais estão sendo dissolvidos no processo de carstificação. Os *softwares* a ser utilizados são, por exemplo, o QualiGraf e PHREEQC.

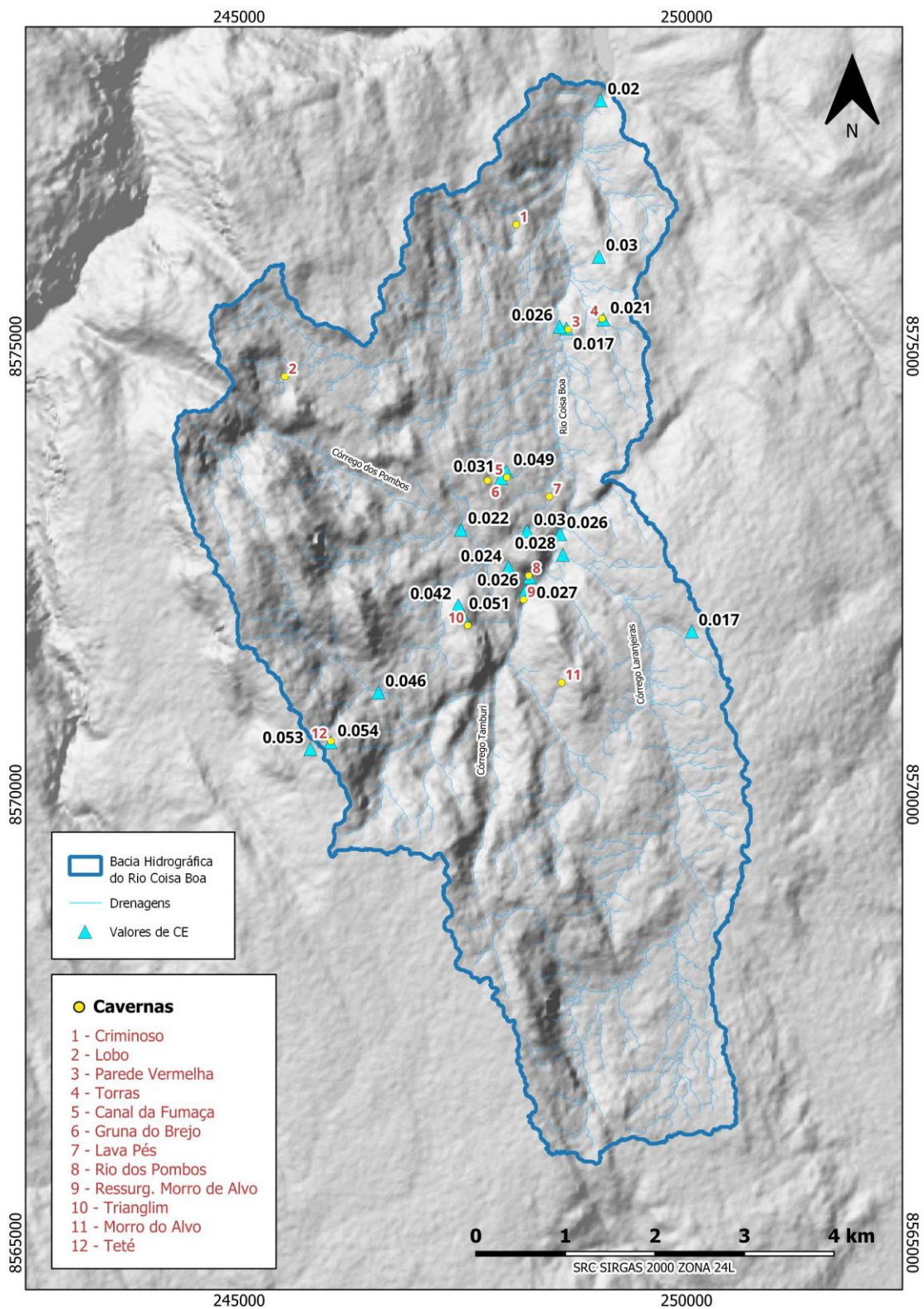
Espera-se, portanto, que, somado aos dados de petrografia, aos mapeamentos e de microbiologia, a caracterização hidroquímica traga respostas consistentes a respeito dos processos de espeleogênese na área de estudo.



**Fig. 4** – Mapa de distribuição das amostras de água coletadas em campanha de campo ao final do período chuvoso.



**Fig. 5** – Mapa de distribuição das amostras de água e de valores de pH medidos in-situ através de sondas multiparâmetro.



**Fig. 6** – Mapa de distribuição das amostras de água e de valores de condutividade elétrica medidos in-situ através de sondas multiparâmetro.

Amostra	IG-HIDRO-01			Código	0205/25-01	Coleta em	09/09/25 15:05
Ensaio	Resultado	Unidade	Limites não definidos	LQ	Método	Data do Ensaio	
Nitrogênio Amoniacal	< 0,10	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Cloretos (Cl) agua - soluvel	3,35	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fluoreto (F) agua - soluvel	< 0,10	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - soluvel	< 0,10	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B	22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - soluvel	7,52	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica	22/09/25	
Brometo (Br) agua - soluvel	< 0,10	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - soluvel	< 0,10	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - soluvel	0,93	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Aluminio (Al) agua - soluvel	0,76	mg/L	--	0,02	SM-3120B	09/10/25	
Calcio (Ca) agua - soluvel	1,64	mg/L	--	0,05	SM-3210B	09/10/25	
Ferro (Fe) agua - soluvel	0,15	mg/L	--	0,01	SM 3120B	09/10/25	
Potassio (K) agua - soluvel	0,36	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Magnesio (Mg) agua - soluvel	0,29	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Manganes (Mn) agua - soluvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B	09/10/25	
Sodio (Na) agua - soluvel	1,60	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Silicio (Si) agua - soluvel	4,36	mg/L	--	0,05	SM-3120B	25/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L3)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-02			Código	0205/25-02	Coleta em	09/09/25 16:40
Ensaio	Resultado	Unidade	Limites não definidos	LQ	Método	Data do Ensaio	
Nitrogênio Amoniacal	<0,10	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Cloretos (Cl) agua - soluvel	1,53	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fluoreto (F) agua - soluvel	<0,10	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - soluvel	0,13	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B	22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - soluvel	2,31	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica	22/09/25	
Brometo (Br) agua - soluvel	<0,10	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - soluvel	<0,10	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - soluvel	<0,10	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Aluminio (Al) agua - soluvel	0,37	mg/L	--	0,02	SM-3120B	09/10/25	
Calcio (Ca) agua - soluvel	0,49	mg/L	--	0,05	SM-3210B	09/10/25	
Ferro (Fe) agua - soluvel	0,16	mg/L	--	0,01	SM 3120B	09/10/25	
Potassio (K) agua - soluvel	0,07	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Magnesio (Mg) agua - soluvel	0,30	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Manganes (Mn) agua - soluvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B	09/10/25	
Sodio (Na) agua - soluvel	0,76	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Silicio (Si) agua - soluvel	2,54	mg/L	--	0,05	SM-3120B	25/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L3)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	ng/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	ng/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	ng/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	ng/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-03			Código	0205/25-03	Coleta em	10/09/25 16:10
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,41	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fosfato (PO4) agua - solúvel	0,16	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25
Sulfato (SO4) agua - solúvel	1,31	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,06	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,63	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,15	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25
Potassio (K) agua - solúvel	0,07	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,16	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25
Sodio (Na) agua - solúvel	0,94	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Silicio (Si) agua - solúvel	1,93	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25

Amostra	IG-HIDRO-04			Código	0205/25-04	Coleta em	10/09/25 18:00
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Cloretos (Cl) agua - solúvel	3,39	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fosfato (PO4) agua - solúvel	1,25	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25
Sulfato (SO4) agua - solúvel	1,04	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrato (NO3) agua - solúvel	1,48	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,11	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,46	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,05	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25
Potassio (K) agua - solúvel	0,06	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,19	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25
Sodio (Na) agua - solúvel	1,24	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Silicio (Si) agua - solúvel	2,74	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25

Amostra	IG-HIDRO-05			Código	0205/25-05	Coleta em	11/09/25 11:00
Ensaio	Resultado	Unidade	Limites não definidos	LQ	Método	Data do Ensaio	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,33	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - solúvel	<0,1	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B	22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,42	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica	22/09/25	
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,07	mg/L	--	0,02	SM-3120B	09/10/25	
Calcio (Ca) agua - solúvel	1,95	mg/L	--	0,05	SM-3210B	09/10/25	
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,20	mg/L	--	0,01	SM 3120B	09/10/25	
Potassio (K) agua - solúvel	0,05	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,37	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B	09/10/25	
Sodio (Na) agua - solúvel	2,15	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Silicio (Si) agua - solúvel	2,84	mg/L	--	0,05	SM-3120B	25/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L3)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-06			Código	0205/25-06	Coleta em	11/09/25 12:30
Ensaio	Resultado	Unidade	Limites não definidos	LQ	Método	Data do Ensaio	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,39	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - solúvel	0,15	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B	22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,29	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica	22/09/25	
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,11	mg/L	--	0,02	SM-3120B	09/10/25	
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,35	mg/L	--	0,05	SM-3210B	09/10/25	
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,19	mg/L	--	0,01	SM 3120B	09/10/25	
Potassio (K) agua - solúvel	0,09	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,25	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B	09/10/25	
Sodio (Na) agua - solúvel	1,71	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Silicio (Si) agua - solúvel	2,13	mg/L	--	0,05	SM-3120B	25/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L3)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-07			Código	0205/25-07	Coleta em	11/09/25 13:50
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,94	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fosfato (PO4) agua - solúvel	1,31	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,48	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alumínio (Al) agua - solúvel	0,10	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,67	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,15	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25
Potassio (K) agua - solúvel	0,10	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,43	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25
Sódio (Na) agua - solúvel	1,65	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Silício (Si) agua - solúvel	3,17	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável(L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25

Amostra	IG-HIDRO-08			Código	0205/25-08	Coleta em	11/09/25 14:20
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Cloretos (Cl) agua - solúvel	4,49	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fosfato (PO4) agua - solúvel	<0,1	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,71	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alumínio (Al) agua - solúvel	0,11	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,11	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,26	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25
Potassio (K) agua - solúvel	0,07	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,25	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25
Sódio (Na) agua - solúvel	1,78	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Silício (Si) agua - solúvel	2,17	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25

Amostra	IG-HIDRO-09				Código	0205/25-09	Coleta em	11/09/25 17:45
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,69	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - solúvel	1,07	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,51	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25	
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,18	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25	
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,38	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25	
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,44	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25	
Potassio (K) agua - solúvel	0,10	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Magnesio (Mg) agua - solúvel	0,27	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Manganes (Mn) agua - solúvel	0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25	
Sodio (Na) agua - solúvel	1,55	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Silicio (Si) agua - solúvel	0,34	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-10				Código	0205/25-10	Coleta em	11/09/25 18:05
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,64	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - solúvel	<0,1	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,42	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25	
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,11	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25	
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,32	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25	
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,23	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25	
Potassio (K) agua - solúvel	0,12	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Magnesio (Mg) agua - solúvel	0,29	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25	
Sodio (Na) agua - solúvel	1,56	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Silicio (Si) agua - solúvel	2,35	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-11				Código	0205/25-11	Coleta em	12/09/25 17:00
Ensaio	Resultado	Unidade	Limites não definidos	LQ	Método		Data do Ensaio	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método		Data do Ensaio	
Cloretos (Cl) agua - solúvel	10,8	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - solúvel	<0,1	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,80	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25	
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - solúvel	0,18	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método		Data do Ensaio	
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,26	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25	
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,81	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25	
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,61	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25	
Potassio (K) agua - solúvel	0,84	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Magnesio (Mg) agua - solúvel	2,25	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25	
Sodio (Na) agua - solúvel	6,78	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Silicio (Si) agua - solúvel	0,45	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L3)	LQ	Método		Data do Ensaio	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-12				Código	0205/25-12	Coleta em	12/09/25 15:50
Ensaio	Resultado	Unidade	Limites não definidos	LQ	Método		Data do Ensaio	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método		Data do Ensaio	
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,35	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - solúvel	0,11	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,86	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25	
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - solúvel	1,93	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método		Data do Ensaio	
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,23	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25	
Calcio (Ca) agua - solúvel	1,78	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25	
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,14	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25	
Potassio (K) agua - solúvel	0,08	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Magnesio (Mg) agua - solúvel	0,44	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Manganes (Mn) agua - solúvel	0,02	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25	
Sodio (Na) agua - solúvel	1,63	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Silicio (Si) agua - solúvel	1,29	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L3)	LQ	Método		Data do Ensaio	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-13			Código	0205/25-13	Coleta em	12/09/25 12:55
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,54	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fosfato (PO4) agua - solúvel	<0,1	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25
Sulfato (SO4) agua - solúvel	1,24	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrato (NO3) agua - solúvel	0,63	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alumínio (Al) agua - solúvel	0,21	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,55	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,19	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25
Potassio (K) agua - solúvel	0,17	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,22	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25
Sódio (Na) agua - solúvel	1,17	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Silício (Si) agua - solúvel	1,47	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25

Amostra	IG-HIDRO-14			Código	0205/25-14	Coleta em	13/09/25 13:30
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Cloretos (Cl) agua - solúvel	1,78	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fosfato (PO4) agua - solúvel	<0,1	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,51	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrato (NO3) agua - solúvel	2,23	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alumínio (Al) agua - solúvel	0,11	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,24	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,03	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25
Potassio (K) agua - solúvel	0,12	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,19	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25
Sódio (Na) agua - solúvel	0,93	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Silício (Si) agua - solúvel	2,62	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável(L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25

Amostra	IG-HIDRO-15			Código	0205/25-15	Coleta em	13/09/25 16:15
Ensaio	Resultado	Unidade	Limites não definidos	LQ	Método	Data do Ensaio	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Cloretos (Cl) agua - soluvel	1,75	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fluoreto (F) agua - soluvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - soluvel	<0,1	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B	22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - soluvel	0,56	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica	22/09/25	
Brometo (Br) agua - soluvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - soluvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - soluvel	3,09	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Aluminio (Al) agua - soluvel	0,09	mg/L	--	0,02	SM-3120B	09/10/25	
Calcio (Ca) agua - soluvel	0,19	mg/L	--	0,05	SM-3210B	09/10/25	
Ferro (Fe) agua - soluvel	0,02	mg/L	--	0,01	SM 3120B	09/10/25	
Potassio (K) agua - soluvel	0,11	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Magnésio (Mg) agua - soluvel	0,17	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Manganes (Mn) agua - soluvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B	09/10/25	
Sodio (Na) agua - soluvel	0,77	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Silicio (Si) agua - soluvel	2,92	mg/L	--	0,05	SM-3120B	25/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L3)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-17			Código	0205/25-17	Coleta em	14/09/25 15:30
Ensaio	Resultado	Unidade	Limites não definidos	LQ	Método	Data do Ensaio	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L1)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Cloretos (Cl) agua - soluvel	1,89	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fluoreto (F) agua - soluvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - soluvel	<0,1	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B	22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - soluvel	<0,1	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica	22/09/25	
Brometo (Br) agua - soluvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - soluvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - soluvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B	22/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L2)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Aluminio (Al) agua - soluvel	0,02	mg/L	--	0,02	SM-3120B	09/10/25	
Calcio (Ca) agua - soluvel	0,09	mg/L	--	0,05	SM-3210B	09/10/25	
Ferro (Fe) agua - soluvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM 3120B	09/10/25	
Potassio (K) agua - soluvel	< 0,05	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Magnésio (Mg) agua - soluvel	0,12	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Manganes (Mn) agua - soluvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B	09/10/25	
Sodio (Na) agua - soluvel	1,37	mg/L	--	0,05	SM-3120B	09/10/25	
Silicio (Si) agua - soluvel	3,08	mg/L	--	0,05	SM-3120B	25/09/25	
Ensaio	Resultado	Unidade	Limite aceitável (L3)	LQ	Método	Data do Ensaio	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B	09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-18				Código	0205/25-18	Coleta em	14/09/25 17:00
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Cloretos (Cl) agua - solúvel	3,71	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - solúvel	0,37	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,74	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25	
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - solúvel	0,24	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,06	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25	
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,41	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25	
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,29	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25	
Potassio (K) agua - solúvel	0,10	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,22	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25	
Sodio (Na) agua - solúvel	2,20	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Silicio (Si) agua - solúvel	3,01	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-19				Código	0205/25-19	Coleta em	16/09/25 15:40
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Cloretos (Cl) agua - solúvel	2,03	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Fosfato (PO4) agua - solúvel	0,54	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25	
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,82	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25	
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
Nitrato (NO3) agua - solúvel	1,55	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,09	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25	
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,26	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25	
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,20	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25	
Potassio (K) agua - solúvel	0,16	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,23	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25	
Sodio (Na) agua - solúvel	1,45	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25	
Silicio (Si) agua - solúvel	3,15	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25	
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>	
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25	

Amostra	IG-HIDRO-20			Código	0205/25-20	Coleta em	16/09/25 16:40
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Cloretos (Cl) agua - solúvel	1,71	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fosfato (PO4) agua - solúvel	0,19	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,58	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,04	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,15	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,07	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25
Potassio (K) agua - solúvel	< 0,05	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,12	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25
Sodio (Na) agua - solúvel	1,36	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Silicio (Si) agua - solúvel	2,39	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25

Amostra	IG-HIDRO-21			Código	0205/25-21	Coleta em	16/09/25 16:50
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limites não definidos</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Nitrogênio Amoniacal	<0,1	mg/L NH4	--	0,10	Cromatografia Ionica		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L1)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Cloretos (Cl) agua - solúvel	1,67	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fluoreto (F) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Fosfato (PO4) agua - solúvel	0,98	mg/L PO4	--	0,10	SM 411B		22/09/25
Sulfato (SO4) agua - solúvel	0,47	mg/L	--	0,10	cromatografia ionica		22/09/25
Brometo (Br) agua - solúvel	<0,1	mg/L	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrito (NO2) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO2	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
Nitrato (NO3) agua - solúvel	<0,1	mg/L NO3	--	0,10	SM 4110B		22/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L2)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Aluminio (Al) agua - solúvel	0,04	mg/L	--	0,02	SM-3120B		09/10/25
Calcio (Ca) agua - solúvel	0,31	mg/L	--	0,05	SM-3210B		09/10/25
Ferro (Fe) agua - solúvel	0,08	mg/L	--	0,01	SM 3120B		09/10/25
Potassio (K) agua - solúvel	< 0,05	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Magnésio (Mg) agua - solúvel	0,14	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Manganes (Mn) agua - solúvel	< 0,01	mg/L	--	0,01	SM-3120B		09/10/25
Sodio (Na) agua - solúvel	1,71	mg/L	--	0,05	SM-3120B		09/10/25
Silicio (Si) agua - solúvel	2,58	mg/L	--	0,05	SM-3120B		25/09/25
<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidade</b>	<b>Limite aceitável (L3)</b>	<b>LQ</b>	<b>Método</b>		<b>Data do Ensaio</b>
Alcalinidade bicarbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade carbonato	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade hidróxidos	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25
Alcalinidade total	< 2,0	mg/L CaCO3	--	2,0	SM 2320 A/B		09/09/25

# **MICROBIOLOGIA**

## MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras de microbiologia foram coletadas em matrizes diversas, buscando entender a existência de microrganismos na cavidade e sua possível relação com a mobilização de elementos, dissolução de rocha ou precipitação de espeleotemas. Foram utilizados frascos de vidro para matrizes sólidas e tubos falcon de polipropileno para matrizes líquidas, devidamente esterilizados e contendo conservante de DNA. Utilizou-se de luvas de nitrila e máscaras para todas as coletas. Espátulas de alumínio auxiliaram na raspagem de rocha e espeleotemas rígidos.

Durante os dias de campo, as amostras foram armazenadas em freezer de geladeira comum, ou seja, a cerca de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e o transporte até o LEPETRO-IGeo/UFBA foi feito em caixa térmica com gelo. Já no laboratório, foram armazenadas em freezer a  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



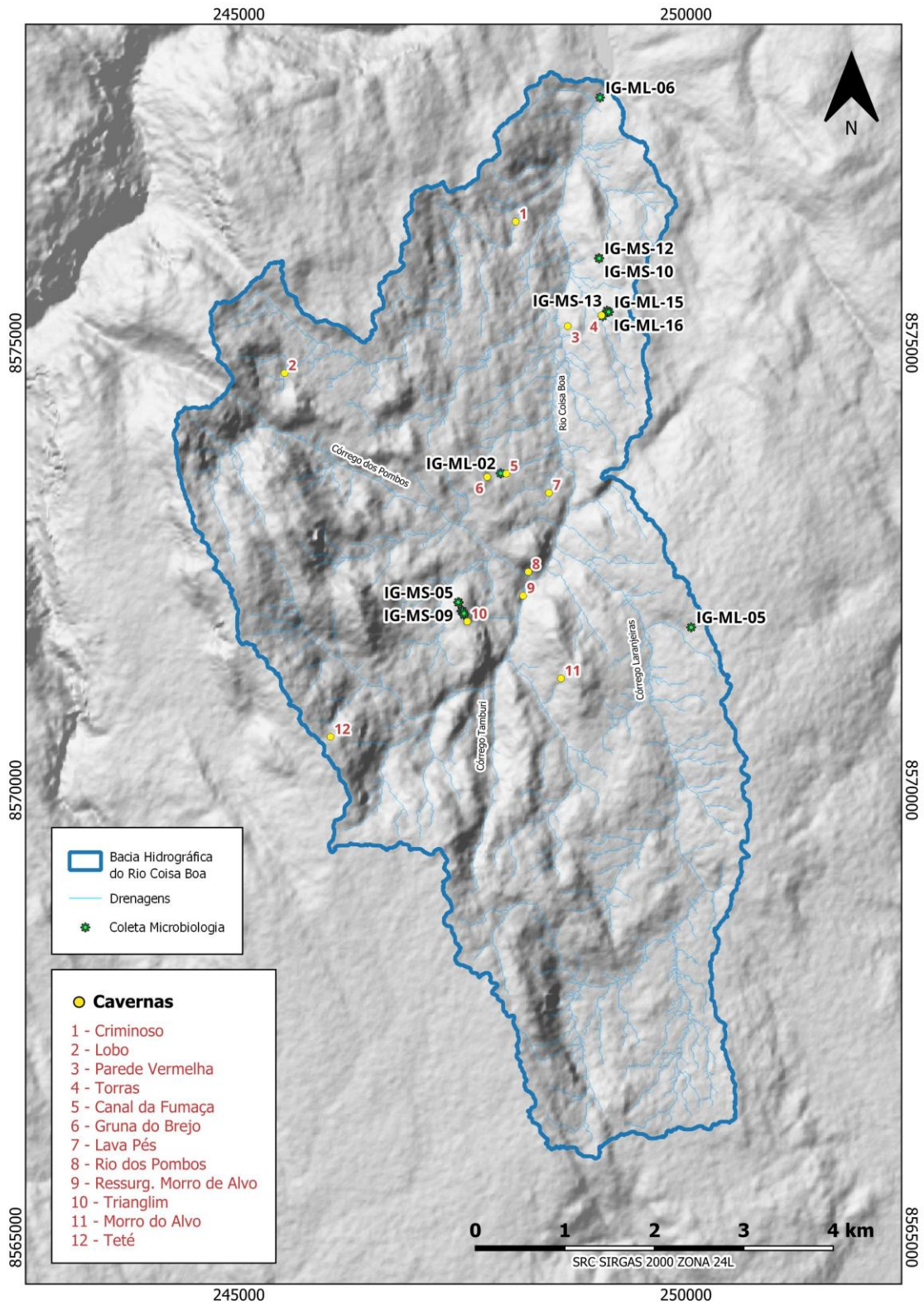
**Fig. 1** – Coleta de amostras de microbiologia sólida (à esquerda) e de água (à direita).

Também no LEPETRO – IGeo/UFBA, foi realizada a extração do DNA, com uso do kit DNeasy PowerSoil Pro QIAGEN. A Tabela 1 apresenta a quantificação de material genético obtida para cada uma das amostras, evidenciando uma quantidade suficiente para a grande maioria. Em sequência, esse material foi transportado para a amplificação do DNA por meio de PCR em laboratório na Universidade Provincial de Koto, no Japão, através de parceria com o Prof. André Freire Cruz. Em seguida, foi enviado para sequenciamento na Genome Quebec, no Canadá e, no momento, está em fase de montagem, sob responsabilidade de Prof. André.



**Fig. 2** – Coleta de amostras de microbiologia em espeleotema do tipo “*stromatolite-like*” (à esquerda) e do tipo “*barro-rojo*” (à direita).

## RESULTADOS

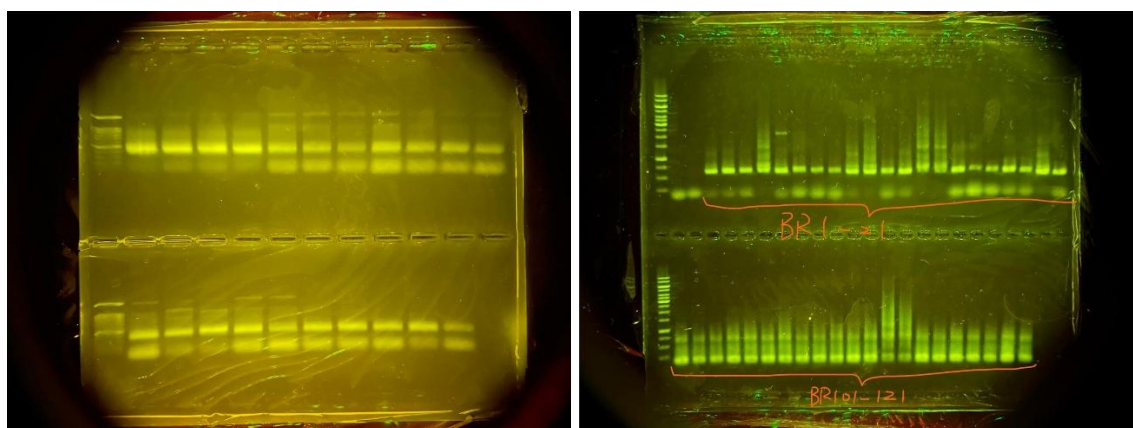


**Fig. 3** – Mapa de distribuição de amostras de microbiologia coletadas em campo.

Foram coletadas, ao todo, 21 amostras para análises de microbiologia, de matrizes sólidas (IG-MS) diversas, tais como rocha, espeleotemas, sedimento e guano, bem como de água (IG-ML) em drenagens, empoçamento e gotejamento.

**Tab. 1** – Quantificação do material genético extraído de cada amostra.

Amostra	ID Campo	ng/ul	A206/A280	A260/A230	A260	A280
1	IG-MS-01	42.0	1.52	0.41	0.84	0.55
2	IG-MS-02	5	1.60	0.04	0.10	0.06
3	IG-MS-03	87.8	1.52	0.66	1.76	1.15
4	IG-MS-04	3.8	1.40	0.04	0.08	0.05
5	IG-MS-05	23.0	1.55	1.22	0.46	0.30
6	IG-MS-06	38.9	1.49	0.43	0.78	0.52
7	IG-MS-07	86.1	1.50	0.38	1.72	1.15
8	IG-MS-08	52.8	1.53	1.29	1.06	0.69
9	IG-MS-09	54.6	1.49	0.95	1.09	0.73
10	IG-MS-10	19.4	1.55	0.16	0.39	0.25
11	IG-MS-11	64.9	1.56	0.34	1.30	0.83
12	IG-MS-12	5.0	1.30	0.12	0.10	0.08
13	IG-MS-13	15.9	1.84	0.63	0.37	0.86
14	IG-ML-01	15.1	1.30	0.12	0.10	0.08
15	IG-ML-02	74.2	1.54	0.52	1.48	0.97
16	IG-ML-04	1.5	1.43	0.05	0.03	0.02
17	IG-ML-05	96.9	1.59	0.58	1.94	1.22
18	IG-ML-06	54.6	1.57	0.22	1.09	0.70
19	IG-ML-15	163.2	1.53	0.40	3.26	2.13
20	IG-ML-16	154.9	1.53	0.54	3.19	2.03
21	IG-ML-17	17.6	1.53	0.13	0.35	0.23



**Fig. 4** – Biblioteca da região de fungos (ITS1/ITS2) à esquerda; biblioteca das bactérias (V3/V4) e fungos (ITS1/ITS2) à direita.

**Tab. 2** – Tabela de metadados utilizada nas análises genéticas de bactérias.

SampleID	Toponimia	Nicho	Tipo	Ambiente	Matriz
#q2:types	categorical	categorical	categorical	categorical	categorical
Br1	Trianglim	IGTRN1	Solida	Subterraneo	Rocha
Br2	Trianglim	IGTRN1	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br3	Trianglim	IGTRN1	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br4	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br5	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br6	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Guano
Br7	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br8	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br9	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br10	Torras	IGTON2	Solida	Subterraneo	EspeleotemaSedimento
Br11	Torras	IGTON2	Solida	Subterraneo	Rocha
Br12	Torras	IGTON2	Solida	Subterraneo	Rocha
Br13	Torras	IGTON1	Solida	Subterraneo	EspeleotemaSedimento
Br14	Fumaca	Outro	Liquida	Subterraneo	Aguaempocamento
Br15	Fumaca	Outro	Liquida	Subterraneo	Aguaempocamento
Br16	Trianglim	IGTRN1	Liquida	Subterraneo	Aguadrenagem
Br17	Outros	Outro	Liquida	Superficial	Aguadrenagem
Br18	Outros	Outro	Liquida	Superficial	Aguadrenagem
Br19	Torras	IGTON1	Liquida	Subterraneo	Aguaempocamento
Br20	Torras	IGTON1	Liquida	Subterraneo	Aguagotejamento
Br21	Torras	IGTON1	Liquida	Subterraneo	Aguadrenagem

**Tab. 3** – Tabela de metadados utilizada nas análises genéticas de fungos.

SampleID	Toponimia	Nicho	Tipo	Ambiente	Matriz
#q2:types	categorical	categorical	categorical	categorical	categorical
Br101	Trianglim	IGTRN1	Solida	Subterraneo	Rocha
Br102	Trianglim	IGTRN1	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br103	Trianglim	IGTRN1	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br104	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br105	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br106	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Guano
Br107	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br108	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br109	Trianglim	IGTRN2	Solida	Subterraneo	Espeleotema
Br110	Torras	IGTON2	Solida	Subterraneo	EspeleotemaSedimento
Br111	Torras	IGTON2	Solida	Subterraneo	Rocha
Br112	Torras	IGTON2	Solida	Subterraneo	Rocha
Br113	Torras	IGTON1	Solida	Subterraneo	EspeleotemaSedimento
Br114	Fumaca	Outro	Liquida	Subterraneo	Aguaempocamento
Br115	Fumaca	Outro	Liquida	Subterraneo	Aguaempocamento
Br116	Trianglim	IGTRN1	Liquida	Subterraneo	Aguadrenagem
Br117	Outros	Outro	Liquida	Superficial	Aguadrenagem
Br118	Outros	Outro	Liquida	Superficial	Aguadrenagem
Br119	Torras	IGTON1	Liquida	Subterraneo	Aguaempocamento
Br120	Torras	IGTON1	Liquida	Subterraneo	Aguagotejamento
Br121	Torras	IGTON1	Liquida	Subterraneo	Aguadrenagem

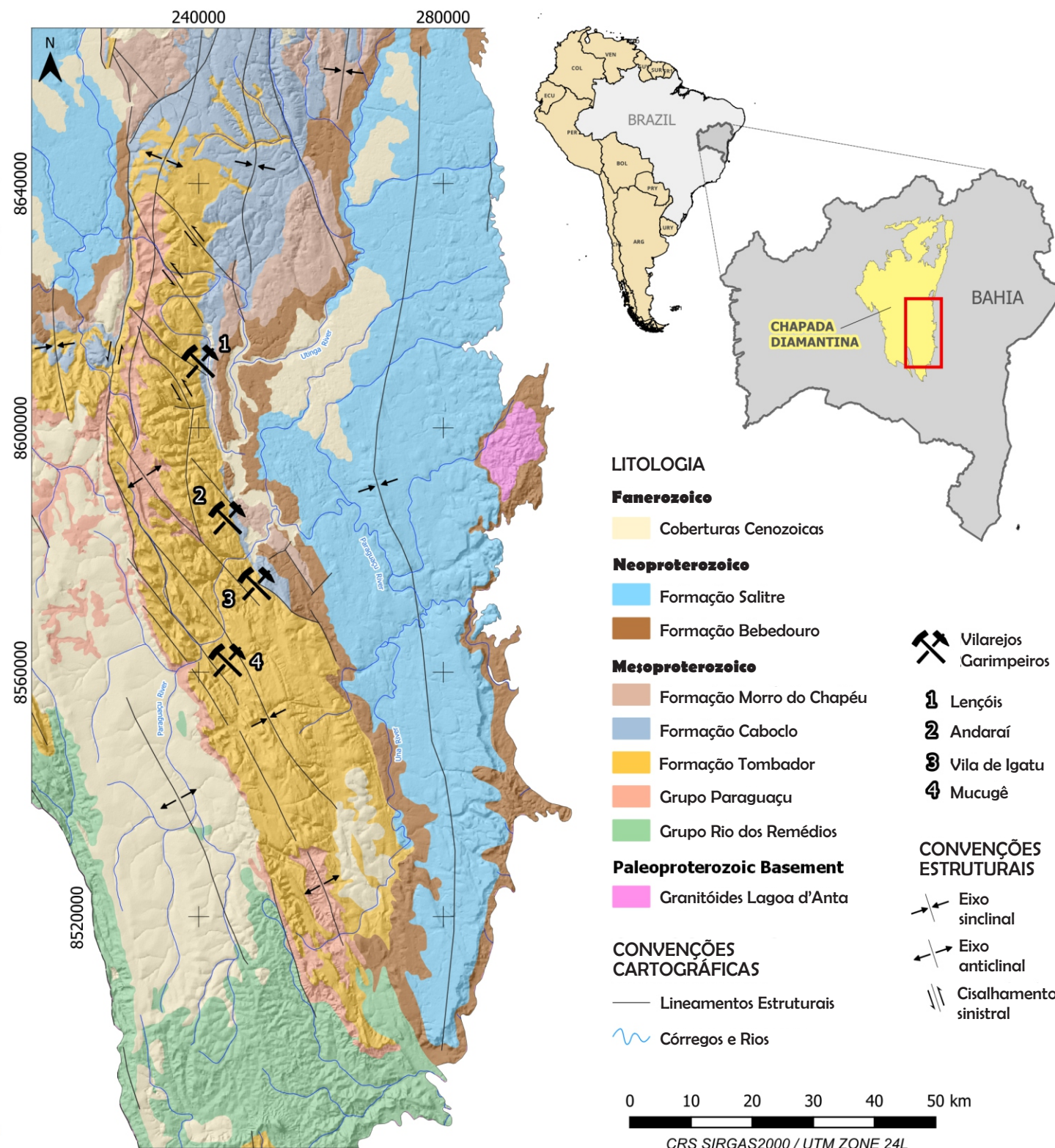
# GRUTA DO CANAL DA FUMAÇA Caverna ou mina de diamante?

## CHAPADAS E DIAMANTES

A Chapada Diamantina está localizada no centro do estado da Bahia, sendo formada por rochas antigas, com idades entre 1,7 bilhão e 500 milhões de anos.

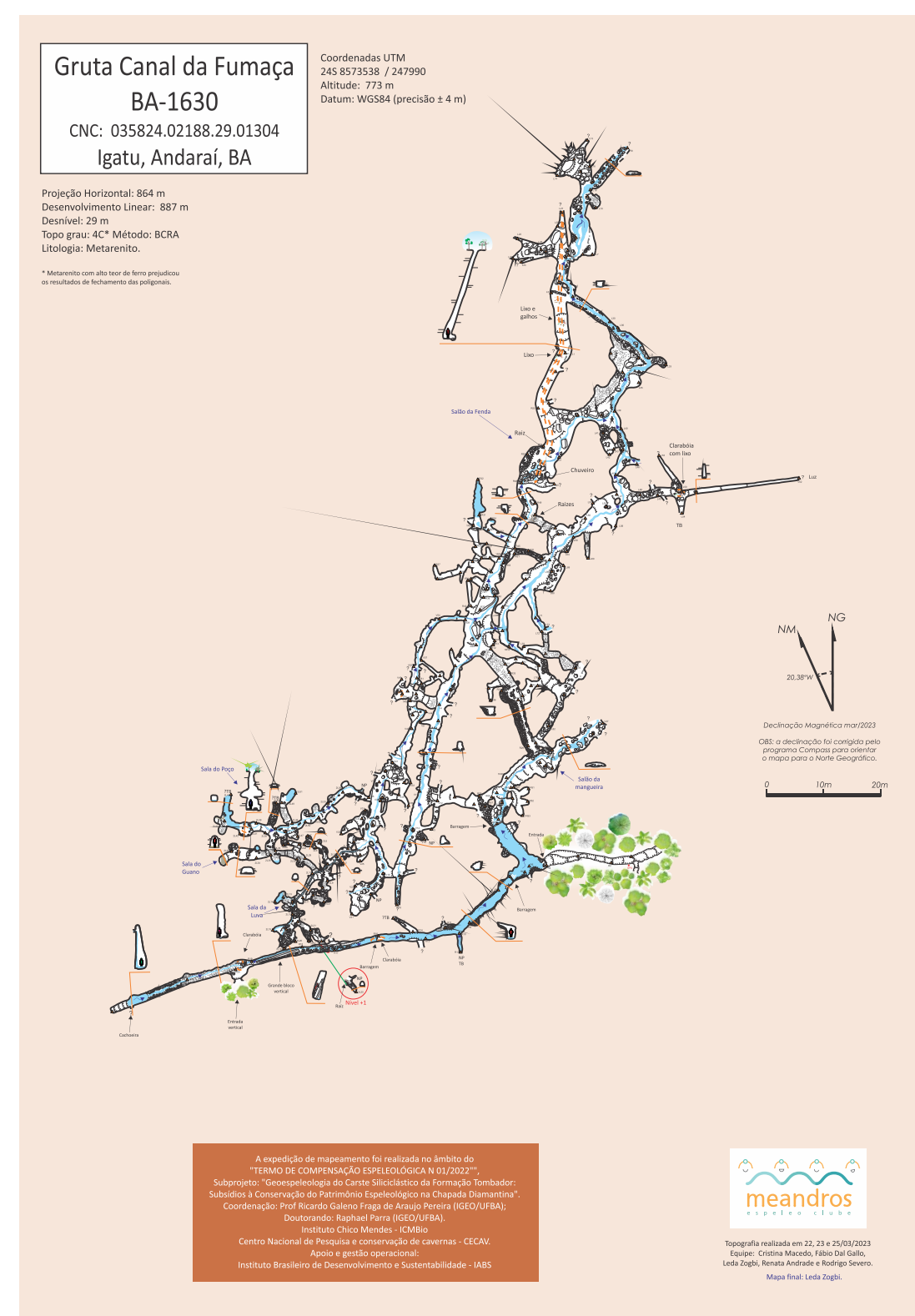
Uma de suas formações rochosas, a Formação Tombador, com cerca de 1,4 bilhão de anos, armazena diamantes trazidos das profundezas da Terra e depositados junto a cascalhos e areias em um antigo continente.

Essas rochas são, também, as que sustentam os morros e chapadas da Serra Sincorá, região onde se instalou, no século XIX, o garimpo de diamantes, formando as vilas como Lençóis, Andaraí, Mucugê e Xique-Xique de Igatu, ou apenas: Vila de Igatu.



**Fig 1.** Mapa geológico da Serra Sincorá, com as principais vilas garimpeiras no século XIX.

## O RICO GARIMPO



**Fig 2.** Mapa da Gruta do Canal da Fumaça.

Não se sabe, ao certo, quando teve início o garimpo de diamantes na Chapada Diamantina. Os primeiros registros oficiais datam de 1844<sup>1</sup>. No entanto, acredita-se que as pedras já eram conhecidas há mais tempo, ficando fora dos registros oficiais, uma vez que a mineração, fora do estado de Minas Gerais, era proibida pela coroa portuguesa.

Fato é que, ao final do século XIX, uma intensa onda migratória transformou a Serra Sincorá, formando as vilas garimpeiras, com a chegada de pessoas vindas de todo o Brasil buscando o enriquecimento.

Nesse contexto, formou-se a Vila de Igatu. Diversos locais de garimpo foram criados, explorando os solos, leitos de rios, fendas, canais e grutas. Um dos primeiros e mais ricos garimpos, foi o Canal da Fumaça.

*"[Igatu] de pequeno que era, cresceu e prosperou devido às grandes riquezas encontradas, principalmente no célebre Canal da Fumaça, que foi tão abundante em diamantes que os trabalhadores os recolhiam em tigelas, quando faziam as apurações."*

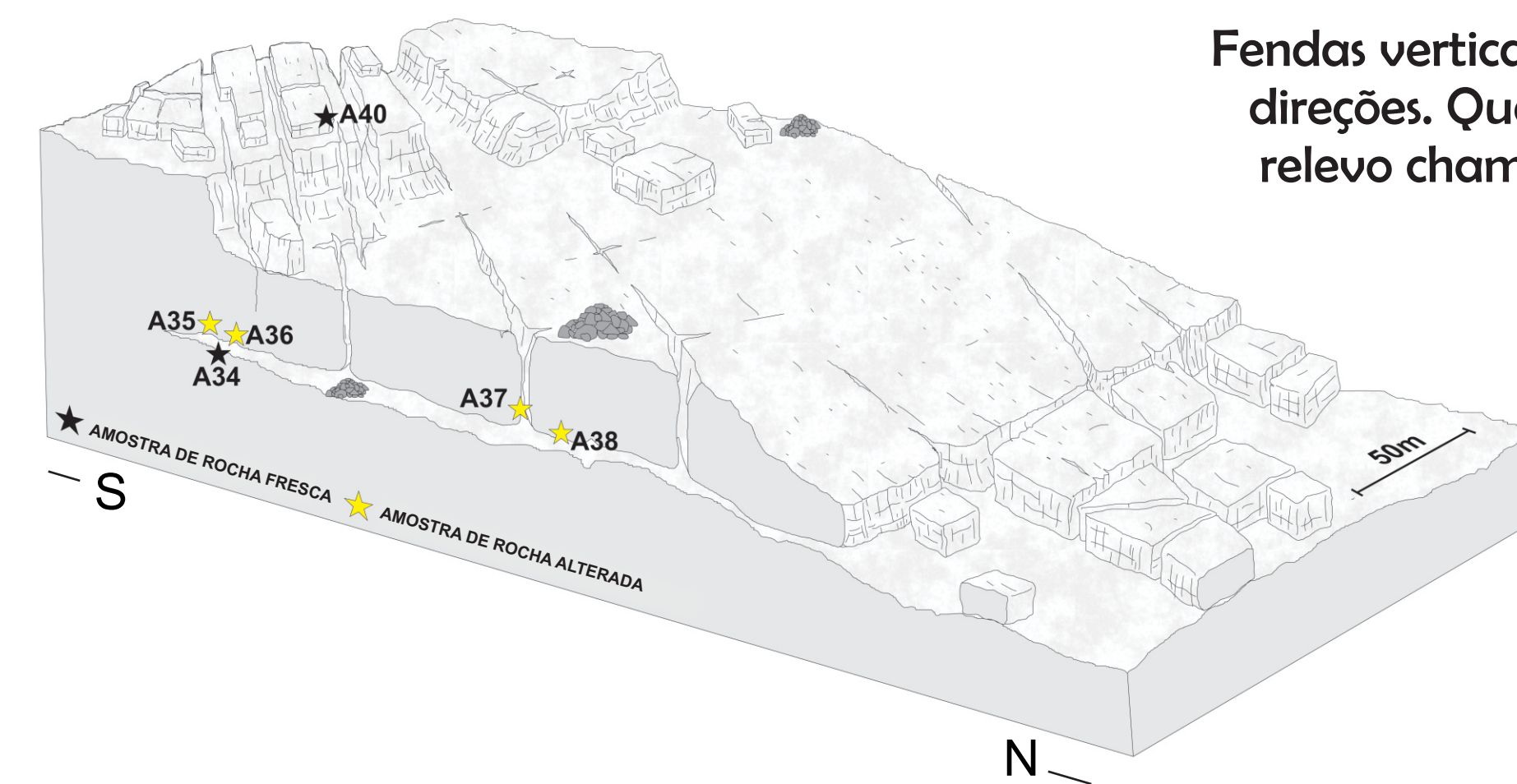
Gonçalo de Athahyde Pereira, 1937<sup>2</sup>.

O Canal da Fumaça é formado por um conjunto de fendas verticais que conectam a superfície a um labirinto de condutos e salões subterrâneos.

Até o momento, foram mapeados 887m de condutos e, a cada campanha, novas passagens são encontradas e sua extensão cresce.

Em geral, seus condutos são estreitos e baixos, mas alguns salões alcançam 10m de largura e 5m de altura.

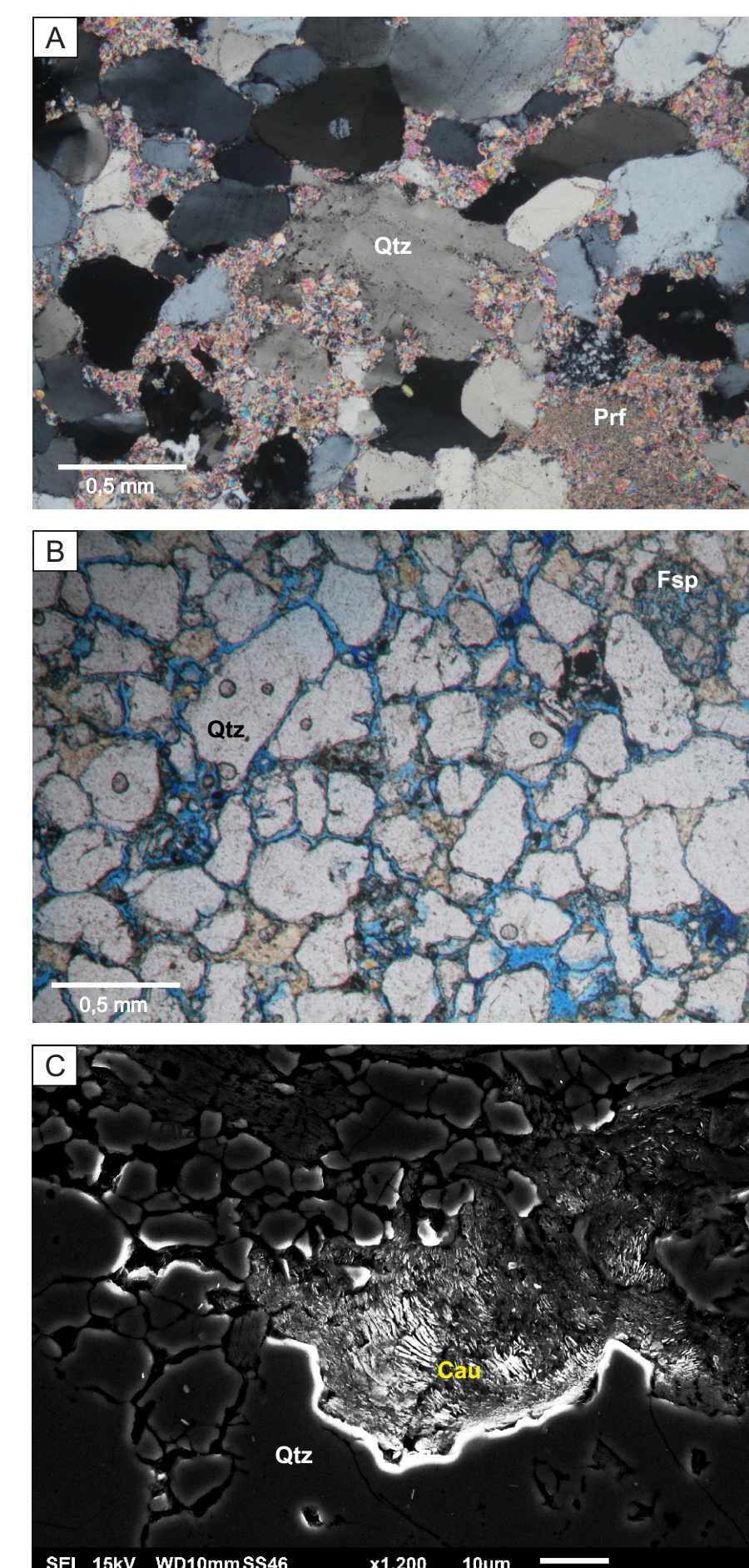
**Fig 3.** A) Registro aéreo das fendas; B) Interior da fenda de entrada; C) Salão principal da gruta.



Fendas verticais cortam as rochas em variadas direções. Quando se encontram, formam um relevo chamado "ruiniforme", pois lembram ruínas de uma antiga cidade.

**Fig 4.** Modelo esquemático e conceitual do relevo de superfície e subterrâneo da Gruta do Canal da Fumaça. Notar o terreno plano logo acima da gruta e irregular a Sul (-S) e ao Norte (N-).

## E O QUE HÁ POR DENTRO?



Observando bem de perto as rochas da Gruta do Canal da Fumaça, com o auxílio de microscópios, podemos ver grãos de quartzo de tamanho areia, envolvidos por uma matriz fina, argilosa.

Essa rocha sofre, ao longo de milhões de anos, um lento ataque químico das águas ácidas de Igatu. Assim, os grãos de quartzo se desagregam e permitem a circulação da água por entre os grãos, 'vazios' chamados de poros.

O fluxo de água passa a ter cada vez mais força dentro desses 'vazios', e começa, então a remover os grãos, formando os primeiros condutos.

Acredita-se que, o ataque químico se dê principalmente nos minerais da matriz argilosa da rocha.

**Fig 6.** Imagens de microscópio mostrando lâminas de rocha na qual a gruta se desenvolve. A) Rocha fresca com grãos e matriz íntegros; B) Rocha alterada, destacando em azul a porosidade por qual a água circula; C) Aumento de 1.200x mostrando a alteração química de minerais pela água.

## MARCAS DE UM PASSADO PRÓSPERO

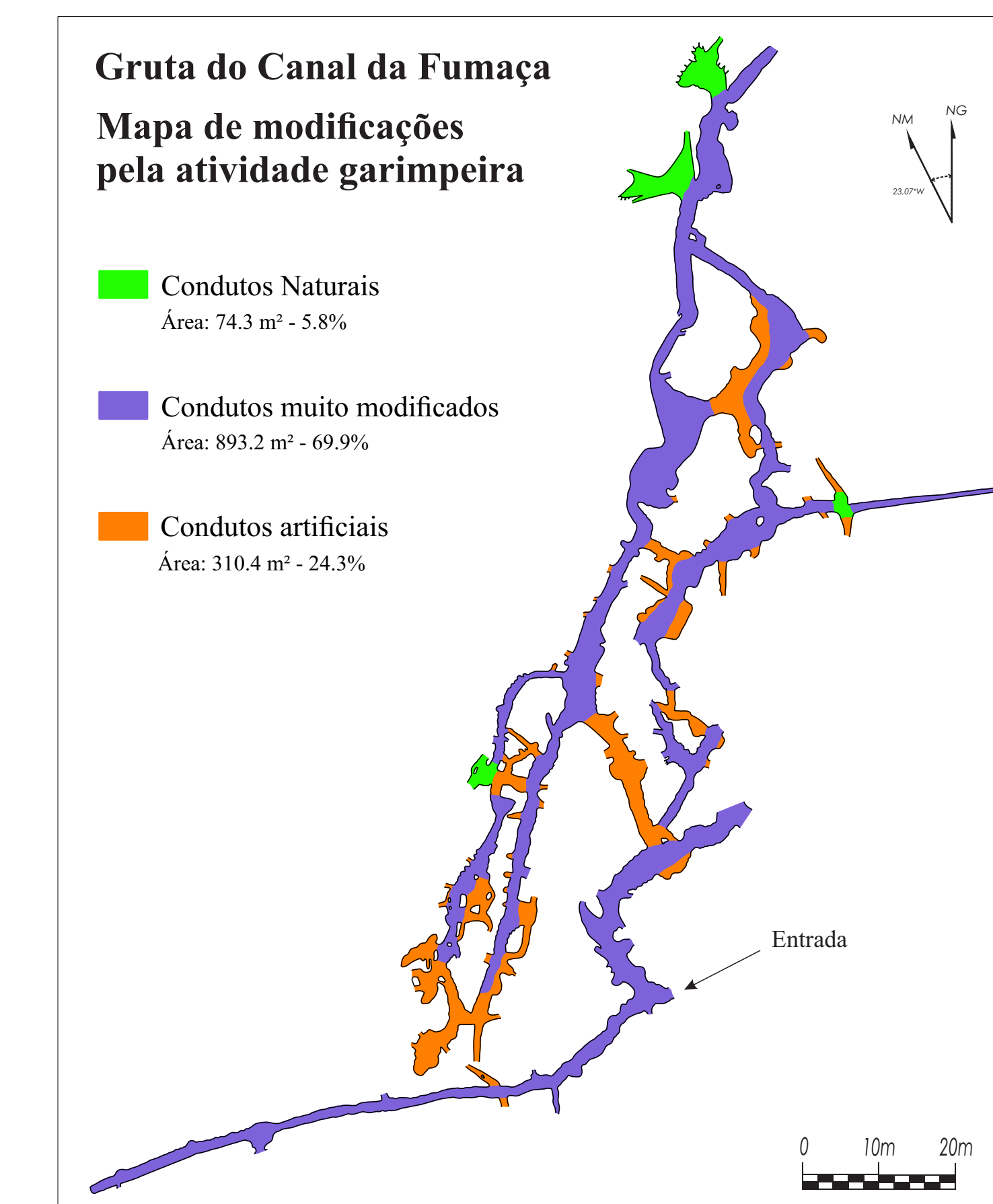
O garimpo de diamantes, na região de Igatu, perdurou por, pelos menos, 150 anos, desde a metade do século XIX até o final do século XX. Todos esses anos de intensa exploração deixaram severas marcas nas paisagens da Vila e, da mesma forma, no interior das grutas.



**Fig 7.** A) Depósitos de cascalhos diamantíferos; B) e C) Condutos com marcas de escavação nas paredes; D) Marca de dinamite; E) Muro no interior da gruta; F) Pilha de blocos removidos.

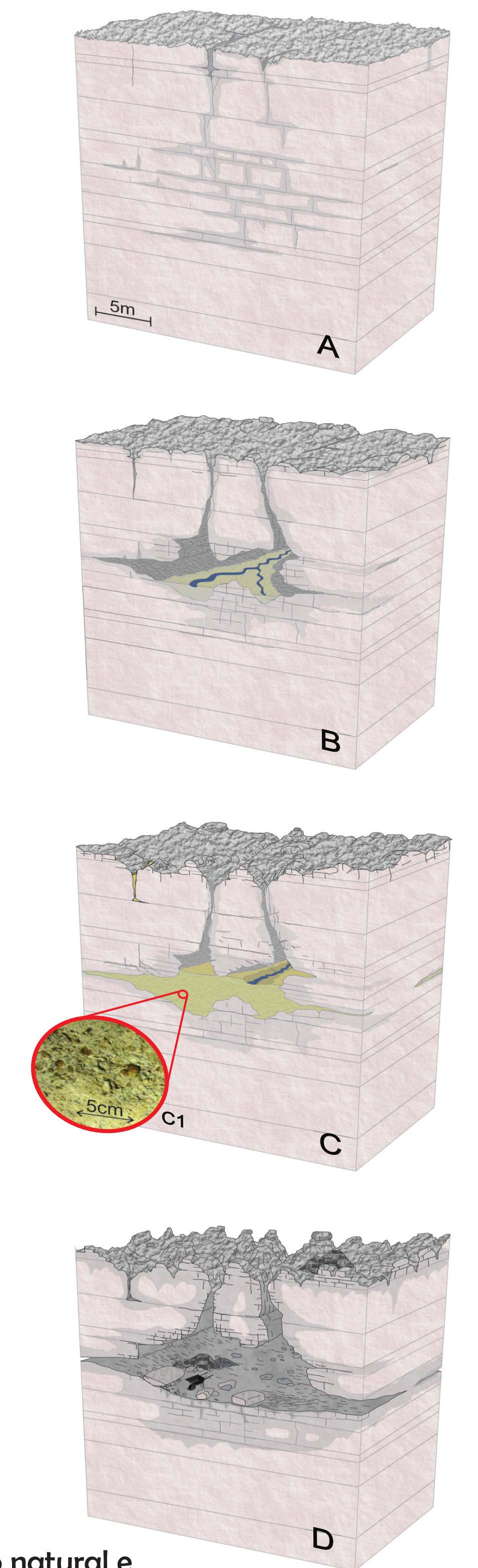
## DA NATUREZA AO SER HUMANO

Tamanha foram as modificações na gruta que, hoje, torna-se um desafio distinguir o que é formado naturalmente daquilo que foi construído ou alterado pelos trabalhadores do garimpo. Para melhor mensurar esse contraste, foi feito um mapeamento descritivo dos condutos. Descobriu-se, assim, que apenas 5.8% da área da gruta é integralmente natural, 69.9% é de condutos originais mas muito modificados e 24.3% de condutos artificiais totalmente escavados.



**Fig 8.** Mapa de modificações na Gruta do Canal da Fumaça, destacando condutos naturais, modificados e artificiais.

É possível, então, contar uma história para a formação da gruta. Primeiro, a água infiltra-se pelos planos da rocha, desgastando-a lentamente (A). Essa mesma água passa a ter um fluxo mais forte, que remove grão por grão, formando condutos (B). Esse fluxo muda e, ao invés de degradar, passa a depositar grãos de areia e cascalhos, esses ricos em diamantes (C). Por fim, em um tempo mais recente, os garimpeiros removem essas areias e cascalhos, além de desmontar também a própria rocha, aumentando as dimensões da cavidade (D), chegando, então, ao cenário que vemos hoje.



**Fig 9.** Modelo de evolução natural e antrópica da Gruta do Canal da Fumaça.

## REFERÊNCIAS

Esse painel foi construído com base em estudo desenvolvido por pesquisadores na Gruta do Canal da Fumaça, publicado em língua inglesa em revista científica. Para acessar o artigo na íntegra, escaneie o QR Code:

PARRA, R., PEREIRA, R.G.F.A., VIERA, L.F., MAIA, R.P., 2025. Siliciclastic cave or diamond mine? Multiapproach investigation in Igatu Village, Chapada Diamantina, Northeastern Brazil.

## REFERÊNCIAS CITADAS NO TEXTO

1. Acauã, B.M.S., 1855. Memória sobre os terrenos diamantinos da província da Bahia: Descrição dos terrenos diamantinos (1847). In: Ferreira, F.I. (Org.) Dicionário Geográfico das Minas do Brasil, Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, p.209 - 217.
2. Pereira, G.A., 1937. Memória histórica e descritiva do Município de Andaraí, Bahia: Imprensa Oficial do Estado, 39 p.



Scan me!



Available online at [scholarcommons.usf.edu/ijs](https://scholarcommons.usf.edu/ijs)

# International Journal of Speleology

Official Journal of Union Internationale de Spéléologie



## Siliciclastic cave or diamond mine? Multiapproach investigation in Igatu Village, Chapada Diamantina, Northeastern Brazil

Raphael Parra <sup>1\*</sup>, Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira <sup>1</sup>, Leonardo Fortes Vieira <sup>1</sup>, and Rubson Pinheiro Maia <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente, Universidade Federal da Bahia. Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Campus Universitário de Ondina, Salvador, Bahia, Brazil

<sup>2</sup>Departamento de Geografia, Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 911, Fortaleza, Ceará, Brazil

**Abstract:** The territory around Igatu, as that of many villages in southeastern Chapada Diamantina (Bahia, Brazil), was deeply modified by diamond mine activity. Caves were special targets for miners, since they can act as diamond-bearing sediment traps, and the Canal da Fumaça Cave was one of the most important and rich of them. The question that arises is whether the formation is a natural cave or an artificial diamond mine. In order to answer this question, we developed speleological and geological studies with detailed cave surveys, remote sensing and field measurements for structural analysis, optical and electronic microscope for petrographic characterization, as well as chemical and mineralogical analyses. Data indicate that structures associated to strike-slip faults play a fundamental role in conduit opening and ruiniform relief formation, acting as preferential weathering fronts. Petrological description suggests that chemical attack on quartz-metasandstone occurs mainly in the phyllosilicate (pyrophyllite + kaolinite) matrix, which is more soluble in acid conditions, and secondarily along the quartz grains. The phantomization reduces grain cohesion promoting piping processes that remove the loose quartz grains mechanically. However, anthropogenic impact during mining activity was strong, leaving several marks, such as constructions, excavations, and areas of detonation that certainly increased cave dimensions. Finally, we propose a model for natural and anthropogenic evolution of the Canal da Fumaça Cave.

**Keywords:** Siliciclastic karst, mined cave, speleogenesis, phantomization, Tombador Formation

*Received 31 December 2024; Revised 19 May 2025; Accepted 26 May 2025*

**Citation:** Parra, R., Pereira, R.G.F. de A., Vieira, L.F., Maia, R.P., 2025. Siliciclastic cave or diamond mine? Multiapproach investigation in Igatu Village, Chapada Diamantina, Northeastern Brazil. *International Journal of Speleology*, 54(1), ijs2543. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.ijs2543>

### INTRODUCTION

Chapada Diamantina displays a unique landscape in northeastern Brazil (Fig. 1) and was the scene of diamond mining throughout the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries, as recorded in its name (“Diamond Plateau”). The activity was so intense that, once the surface deposits were exhausted in the first phases of exploitation, miners began to prospect inside caves. According to Nolasco et al. (2001) caves acted as traps for diamond-rich alluvial sediments, which exploitation caused several modifications inside these caves.

Pagliara et al. (2010) defined “mine caves” as those natural cavities intercepted by mining, whereas Onac (2019) classified as “mined caves” the natural cavities from which mineral resources were explored. Examples of the latter are known from many parts of the world (Frank, 1998; Simons, 1998; Algeo, 2004; Mickelson, 2008; Gázquez et al., 2012; Crothers et al., 2013). In Brazil, cave mining involved mainly the extraction of

saltpeter during the 18<sup>th</sup> and 19<sup>th</sup> centuries, especially in the states of Bahia and Minas Gerais, as described by naturalists (Couto, 1809; Spix & Martius, 1824; Eschwege, 1833; Mattos, 1938) and recent publications (Gomes & Piló, 1992; Souza & Auler, 2015; Baeta, 2018; Faria & Filgueiras, 2019, 2021).

In Chapada Diamantina, one important example of mined cave exploited for diamonds is the Lapão Cave, in the municipality of Lençóis. Auler (2004) and Wray and Sauro (2017) rank it among the most relevant caves in siliciclastic rocks in South America and in the world. The cave has a development of 1.6 km and contains unique karst features, as well as signs of past mining, such as artificial tunnels and retaining walls (Parra et al., 2023).

In a similar context, the Igatu Village, municipality of Andaraí, has several mined caves, such as Torras Cave (Pereira, 2010). With 3.6 km of development, it was considered the 8<sup>th</sup> longest in South America among sandstone and quartzite caves (Auler & Sauro,

\*raphaelparra95@gmail.com

2019). Furthermore, Andrade (2008) mentions the Canal da Fumaça Cave, one of the richest mines in Igatu, which supported the development of the village (Pereira, 1937).

Despite the well-documented mined cave occurrence at the Igatu Village and region, the relationship between the genesis of these underground voids, the filling by diamond-bearing sediments and, finally, the extraction of these deposits by miners remains poorly known. This comprehension is affected by the difficulties in distinguishing karstic features from the changes provoked by the miners in these cave systems. Therefore, this paper aims to discuss the geological processes that lead to cave development, through morphological, structural, petrographic, chemical and mineralogical analysis applied to the Canal da Fumaça Cave. Herein we propose a model for the evolution of this siliciclastic karst area from a natural perspective, but also considering the anthropogenic processes occurred during historical time.

## STUDY AREA

Chapada Diamantina is located in the central portion of Bahia state and acts as a drainage divide between the São Francisco River basin, to the west, and the eastern river basins that flow into the Atlantic Ocean, especially the Paraguaçu. With an area of 65,619 km<sup>2</sup> and covering 75 municipalities, Chapada Diamantina can be defined as a set of mountains, plateaus and karst systems, developed in Proterozoic sedimentary and metasedimentary rocks (Pedreira, 1997; Pereira, 2010).

The Igatu Village is a district in the municipality of Andaraí, situated in the southeastern portion of Chapada Diamantina, the Sincorá Range. The region is 434 km away from the state capital Salvador and occupies the eastern limits of Chapada Diamantina National Park. Within the village's territory is the Igatu Urban Park (PUI), created in 2007, aimed at protecting the environmental and historical heritage (Russ & Nolasco, 2012). The limits of this park partially cover the area overlying the Canal da Fumaça Cave, object of this study.

### Climate and hydrology

Climate of the region is complex and influenced by the altitude. According to Köppen and Geiger classification, the study area is within the tropical highland (Cwb) climate (SEI, 2023), with annual average temperature of 24.0°C and the average precipitation about 1,060 mm (INMET, 2022). Two seasons are well defined: the wet one is concentrated in austral summer, between December and March, when the rainfall represents about 50% of annual precipitation. The dry season occurs in winter, between June and September.

The Igatu Village is within the hydrographic basin of the Coisa Boa River, a tributary of the Paraguaçu River. With an area of 43.8 km<sup>2</sup>, the basin has a low drainage density (1.78 km/km<sup>2</sup>) and is elongated in the NNE-SSW direction, with rapid surface runoff (Rodrigues et al., 2011). Through dye trace experiments, Auler et al. (2020) identified and characterized subterranean

flows in the basin area. According to the authors, parameters such as travel time, distance and velocity are associated with conduit morphological aspects, which in turn are controlled by stratigraphic and structural factors.

### Geological aspects

Chapada Diamantina is located in the context of the Precambrian covers of the São Francisco Craton (Almeida, 1977), which are divided in Mesoproterozoic Espinhaço Supergroup and Neoproterozoic São Francisco Supergroup (Guimarães et al., 2012). These units constitute the Paramirim Aulacogen, a succession of two overlapping rifts, partially inverted during the Neoproterozoic Brazilian tectonic cycle (Schobbenhaus, 1996; Cruz & Alkmim, 2006, 2017; Alkmim & Martins-Neto, 2012). Inversion deformed the basins through folds and thrusts (Alkmim et al., 1996; Cruz & Alkmim, 2007), also compartmentalizing Chapada Diamantina in western and eastern domains, limited by the NNW-SSE oriented João Correia – Barra do Mendes lineament (Jardim de Sá et al., 1976).

For the eastern domain, in which the study area is located, two deformation phases are recognized. The first one, ductile-brittle, had a regional WSW-ENE to E-W stress field and generated open and smooth folds formed by interstratal flexural sliding, as well as reverse and thrust faults (Danderfer, 1990). The second had brittle-ductile character and corresponded to a sinistral transpressive fault, with an N-S to NW-SE tension field, which resulted in faults and brachy-anticlinal folds that structured the Sincorá Range (Pedreira & Margalho, 1990; Cruz et al., 2018).

The Espinhaço Rift started forming at about 1.75 Ga (Neves et al., 1995; Danderfer et al., 2009). Sandstone and basal conglomerates of pre-rift Serra da Gameleira Formation compose the initial basin sequence (Guimarães et al., 2008). Overlying the syn-rift volcanosedimentary sequences of the Rio dos Remédios Group are post-rift terrigenous deposits of the Paraguaçu Group (Guimarães et al., 2008; Loureiro et al., 2009; Magalhães et al., 2015). In its upper part, the Chapada Diamantina Group is represented by the siliciclastic facies of the Tombador Formation and carbonate-siliciclastic sequences of the Caboclo Formation (Babinski et al., 1993; Ferronato et al., 2021). Schobbenhaus (1996) removed the subsequent Morro do Chapéu Formation, due to the existence of an erosive surface. Finally, the Neoproterozoic São Francisco Supergroup, deposited in extensive synclines, contains glacial deposits of the Bebedouro Formation and the cap carbonates of the Salitre Formation (Guimarães et al., 2011; Santana et al., 2021; Caxito et al., 2022).

The siliciclastic Tombador Formation makes up the relief of mountains and plateaus characteristic of the region. In the Sincorá Range, Magalhães et al. (2016) divided the formation into a lower sequence, where fluvial and estuarine facies predominate, an intermediate one, with fluvial and alluvial fan deposits, without marine influence, and an upper sequence, which marks the beginning of a new transgression. These systems deposited sandy facies, often pebbly,

interspersed with conglomerates supported sometimes by clasts, sometimes by the matrix (Bonfim & Pedreira, 1990; Filho et al., 1999; Magalhães et al., 2014).

Geochronological studies gave ages of  $1,394 \pm 14$  Ma (Gruber et al., 2011) and  $1,436 \pm 26$  Ma (Guadagnin et al., 2015), and petrographic analyses set a high diagenesis stage to an anchi-metamorphism grade - related to the Neoproterozoic Brazilian tectonic cycle - toward the south of the Sincorá Range (Varajão & Gomes, 1997; Battilani et al., 1999; Souza, 2017). Souza (2017) established temperatures in the order of  $300^\circ\text{C}$  and 10-12 km of burial with illite crystallinity analysis, suggesting a prehnite-pumpellyite to greenschist metamorphism grade.

The conglomerates, especially the clast-supported ones, host the diamonds (Sampaio et al., 1994). Their

primary origin remains uncertain, although diamond-bearing intrusive rocks are known in the northern region of the São Francisco Craton (Battilani et al., 2007; Pereira, 2007; Nannini et al., 2017). Most of deposits mined in Chapada Diamantina are of the detrital type, hosted in colluvium or in alluvial gravels, derived from the weathering and erosion of the Tombador conglomerates (Svisero, 1995; Carvalho, 2010; Lima et al., 2022), frequently accumulated inside the caves. Nolasco et al. (2001) and Nolasco & Macedo (2005) described these deposits in more detail, based on popular nomenclature. The open fissures - herein referred as channels - deposit is an important type, contained in superficial or subterranean vertical fractures, between 5 m in width and 20 m in depth, filled with gravel and quartz sand and often with water flowing at the bottom.

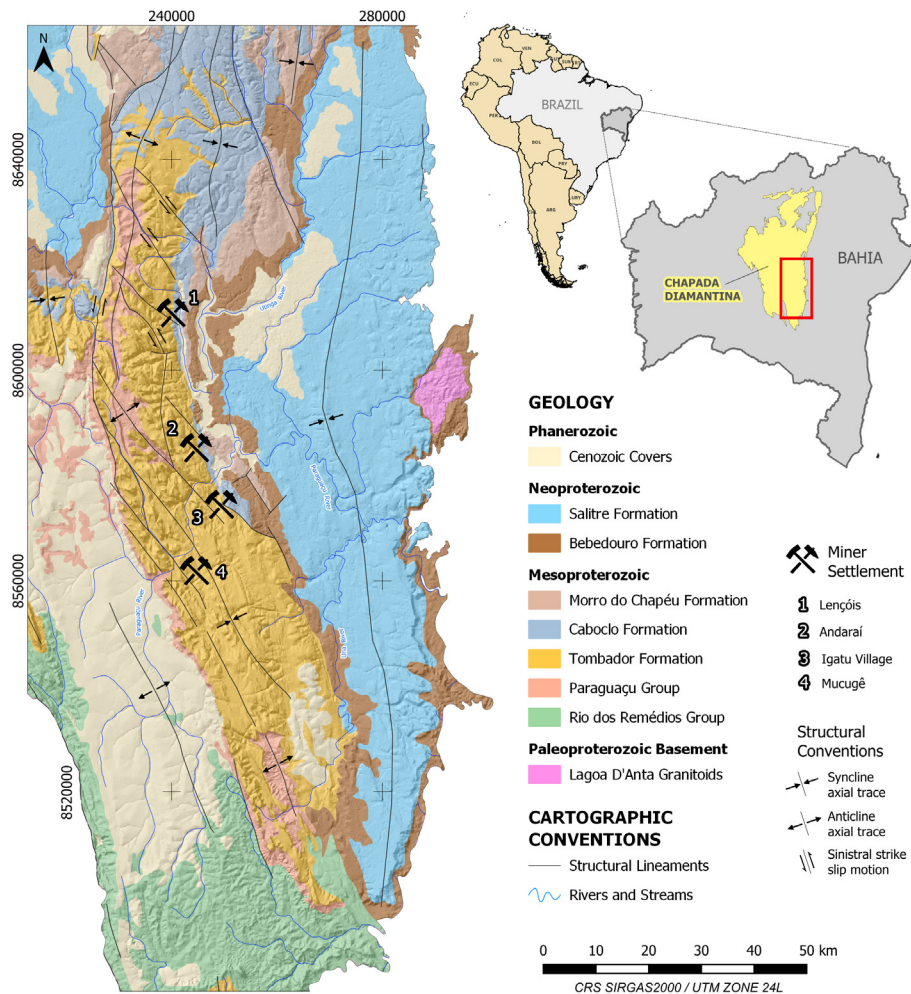


Fig. 1. Location and geological map of the Sincorá Ridge, southeast of Chapada Diamantina and the main mining settlements. Lithology and structural data based on Bonfim & Pedreira (1990), Pedreira (1994), and Souza et al. (2003).

### Geomorphological aspects

Chapada Diamantina is part of the Espinhaço Ridge, a mountain range that extends from Minas Gerais to northern Bahia (Eschwege, 1833; Derby, 1906). According to Lima & Nolasco (2015), it is a region marked by mountainous relief with pronounced scarps, deep valleys, and high plateaus. These authors positioned the outcrop area of the sediments of the Tombador Formation in the lithostructural domain, in which deformation planes, associated to synclines and anticlines, control the erosional processes. Furthermore, variations in resistance of different

lithologies induce the action of differential erosion, favoring the formation of irregular terrains.

In southern Chapada Diamantina, the Sincorá Range reaches 1,700 m altitude. According to Pedreira (1994), its rough terrains belong to the Post-Gondwana Surface, a denudation cycle that was active over what now is eastern Brazil during the Upper Cretaceous, first described by King (1956) and recently endorsed by Rabassa (2014). The western slope of the Sincorá Range is scarped and oriented in a NNW-SSE direction, while the eastern side has a smoother relief, where siliciclastic layers dip beneath

the rocks of the Una-Utinga Basin. The thickest layers of diamond-containing conglomerates outcrop on the eastern side, where the main mining locations are settled, including the Igatu Village. In this region, structural valleys with scarped slopes occur, sometimes forming canyons (Lima & Nolasco, 2015). In addition, truncated families of fracture planes create a ruiniform relief (Bonfim & Pedreira, 1990). The Coisa Boa River basin has a high inclination, with minimum and maximum altitudes, respectively, of 351 and 1,216 m (Fig. 2A).

Hundred and fifty years of mining deeply modified the local landscape and morphology (Santos et al., 2010). Diamond prospection resulted in emptying of riverbeds, fractures, channels, and cave systems, once filled by sediments (Russ, 2012; Castro et al., 2021). The remobilization of sand and gravel caused the silting of the Paraguaçu River, on the flatlands downstream of the village, and may have caused the formation of the Marimbus Wetland (Lima et al., 2023).

### Early diamond exploration in Brazil

The history of diamond exploration in Brazil begins in Minas Gerais, where the mineral was found near the gold mines, around 1720 (Sarmiento, 1731; Barbosa, 1991). Due to Portuguese control, other diamond regions did not prosper for around a century, until Brazil's independence in 1822, when the production monopoly was overthrown and new deposits were discovered (Svisero et al., 2017). In Chapada Diamantina, the exact timing of diamond discovery remains uncertain. The first official record dates of 1844 (Acauã, 1855, p. 215). However, Nolasco et al. (2017) report that mineral sources were probably already known, but with no official record due to the prohibition. In any case, at the end of the first half of the 19<sup>th</sup> century, an intense migratory flow affected the region, forming large mining areas and the first settlements, such as Mucugê, Lençóis, Andaraí, and Xique-Xique, nowadays Igatu (Pereira, 1937; Giudice & Souza, 2009).

In addition to the gem-form, diamonds in Chapada Diamantina were found as a dark impure and porous variety, known as carbonado, which consists of a diamond, graphite, and amorphous carbon mixture, formed at shallower levels of the Earth's mantle (Haggerty, 2014). Carbonado, with its hardness comparable to diamond, held significant industrial applications and experienced substantial demand during the transition between the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries, thereby propelling the local economy. (Svisero et al., 2017). In the mines, during this period, hydraulic blasting predominated, with a gradual increase in the use of gunpowder and the construction of underground mines (Nolasco et al., 2017).

At the end of the 20<sup>th</sup> century, mechanized mining, with the use of dredging and excavation machines replaced traditional techniques (Pimentel, 2014). Due to its heavy environmental impact (Santos et al., 2010), the activity was "hidden" and later prohibited with the consolidation of the Chapada Diamantina National Park (Guanaes, 2006). Nowadays, mining gave place to ecotourism exploiting the historical, cultural, and environmental values of the area (Guanaes, 2001;

Carvalho & Nolasco, 2007; Russ & Nolasco, 2012; Loureiro et al. 2021).

The Igatu Village experienced its heyday at the beginning of 20<sup>th</sup> century, when it housed at least 4,600 inhabitants (Jesus, 2019). Today, after the mining decline, no more than 500 persons live here, and the memories of these old times are partially preserved as ruins. Castro et al. (2021) consider the Igatu Village as part of the Brazilian geomining heritage, since its landscapes incorporate natural and anthropogenic elements derived from diamond exploration. In addition, the National Historical and Artistic Heritage Institute (IPHAN) listed the village's Landscape, Architectural, and Urban Complex.

## MATERIAL AND METHODS

Geoprocessing and spatial analyses in GIS environment were applied to start this work. Field campaigns were carried out in a second step, aimed at producing the cave survey and topography, describing the host rock and associated clastic deposits, as well as sampling. Finally, we carried out laboratory analyses including petrographic, chemical, and mineralogical characterization of the samples.

Geoprocessing included the elaboration of basic cartography and structural lineament extraction, both using QGIS 3.28 and, for the latter, using an ALOS PALSAR Digital Elevation Model (12 m resolution), obtained from Alaska Satellite Facility, Earth Data, NASA, and Google Satellite image from HCMGIS plugin. We carried out the lineament extraction at the scales 1:20,000, 1:5,000, and 1:2,000 and prepared the rose-diagrams through the QGIS plugin Line Direction Histogram.

Fieldwork was performed in three campaigns, in the months of March and August, 2023 and August, 2024. The first one focused on the speleological survey and mapping, which was carried out with BCRA 4C accuracy level using Leica DISTO-X. The second one involved morphological assessment of cave passages and the description of host rock facies and preserved clastic deposits. Bedding and fractures planes were measured with a BRUNTON geological compass, following strike-dip notation (Right Hand Rule). Structural data treatment involved the elaboration of rose-diagrams and stereograms in Stereonet.

The last field campaign had the purpose to map the cave modification by mining activity. Three categories of conduits were identified: (1) natural conduits, which show no visible signs of human alteration; (2) highly modified conduits, which originated as natural features but were extensively impacted by mining activity—sometimes retaining traces of their natural form, other times being entirely reshaped; and (3) artificial conduits, which were excavated entirely by miners. Identified natural features are mainly represented by stream incisions and water-smoothed floors, while anthropic features correspond to excavation and/or detonation marks, walls, pillars, and dams.

Fresh and weathered rock samples were collected, to assess chemical weathering processes, as summarized in Figure 5. The altered and friable sample (A36) was

impregnated with a mixture of Epoxy Resin 1.204 and Epoxy Hardener 1.601, in a 3:1 proportion. Afterwards, they were colored with Keystone Blue Dye OCON-241, allowing the observation and description of intergranular porosity. Thin sections were prepared and analyzed under an optical microscope. Polished sections were prepared and coated with carbon and then described under a JEOL JSM-G010LA scanning electronic microscope (SEM) equipped with an Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) detector. SEM analyses were carried out at the Geology Department of São Paulo State University (UNESP).

The mineralogical composition of samples was determined by X-ray diffraction (XRD), using a Bruker D2 Phaser diffractometer (CuK $\alpha$ , 30 kV, 10 Ma, 4 to 90° 2 $\theta$ ), at the Ionizing Radiation Laboratory (LARIN) of the Center for Applied Natural Sciences (UNESPetro), at UNESP (São Paulo State University). Prior to analysis, the samples were ground to a fine powder in a Marconi MA-590 electronic mortar and pestle and then pressed in a plastic sample holder. Whole-rock chemical compositions – major and minor elements – were obtained by X-Ray Fluorescence (XRF), using a Bruker S8 Tiger at Multitask Laboratory (LabMulti) of Energy and Environment Interdisciplinary Center (CIENAM), Chemistry Institute, Federal University of

Bahia (UFBA). For these analyses, samples were ground again in a manual agate mortar, ensuring a particle size smaller than 177  $\mu\text{m}$  (Mesh No. 80). A mixture of rock sample and Hoechst Wax C Micropowder, in a proportion 9:1, was used to prepare powder pellets, arranged in boric acid and compressed in a hydraulic press at 5 tons for 3 minutes.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Structural lineaments and cave morphology

The structural lineament analysis, at scale 1:2,500 and 1:5,000, showed that the Canal da Fumaça Cave is positioned over a 3 km long deformation corridor, marked by a high density of lineaments with a predominant NNW-SSE trend in its northern extremity, which changes towards NNE-SSW nearby the cave, to the south (Fig. 2B). Remote sensing and field data suggest that the structure probably relates to the N-S to NW-SE sinistral transpressive belt of D2 deformation phase, which affects the Sincorá Ridge, as described by Pedreira & Margalho (1990) and Cruz et al. (2018).

In the surface area above the cave, vertical fracture planes that cut the outcropping rocks mark the lineaments, mainly in the NNW-SSE, NNE-SSW, NE-SW, and ENE-WSW directions (Fig. 2C).

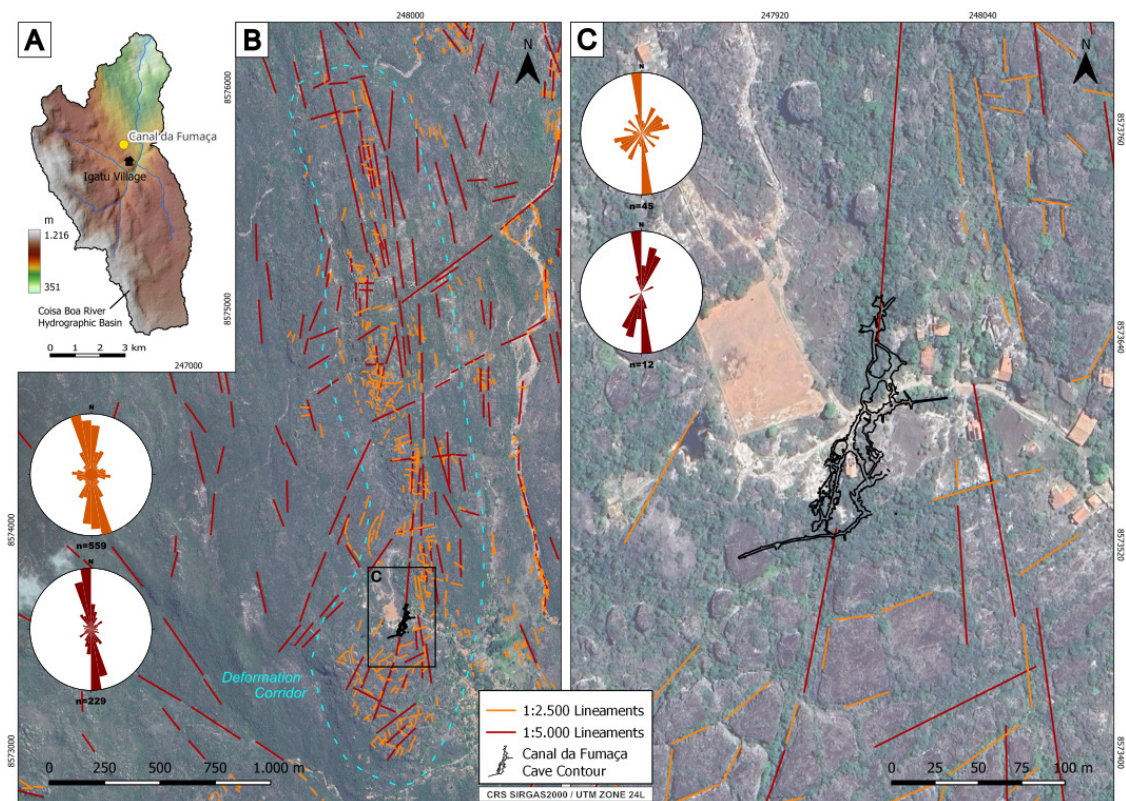


Fig. 2. **A)** Hypsometric map of the Coisa Boa River Hydrographic Basin, locating the Igatu Village and the Canal da Fumaça Cave; **B)** Structural lineaments indicating a NNW-SSE to NNE-SSW oriented deformation corridor affecting the cave development; **C)** More detailed view at main lineaments as vertical fracture planes (fissures and channels) that control cave conduits and ruiniform relief.

Although the NNW-SSE preferential lineaments are not significantly reflected in the cave orientation, it is visible that secondary directions that surround the cavity, such as NNE-SSW and ENE-WSW conditioned the conduit formation. Even so, it is notable that the main elongation direction of the cave is crossed by the NNE-SSW main lineament at the southern corridor, which suggests a close correlation between them.

The floor plan map of Canal da Fumaça Cave is shown in Figure 3. To date, the cave has 624 m in length and 29 m in vertical range mapped. The distance between extremes is 172 m, pointing to an overall slope of 17% or 9.6°, dipping from SSW to NNE. Conduits are straight and their general dimensions are narrow and low. Small watercourses (streams) are present in almost the entire cave (see cave map in [Supplementary Fig. S1](#)).

Passage connectivity is high (around 90 connections), which leads to a network maze pattern, according to Palmer's classification (1991). However, this morphological analysis must consider that the cavity was modified by important anthropogenic changes, in which the widening of existing conduits and excavation of new ones increased the cave's length and its connectivity. This topic will be described in detail later.

Structural measurements inside the cave also show a slight relationship between structures and cave development (Fig. 3). Although this may be discerned individually in each fracture plane (red lines) plotted at the measurement conduit site, this correlation is less evident in the rose diagrams. This may be due to the whole cave conduit statistics, which includes

natural and artificial ones. Some subvertical fracture planes occur parallel both to the primary (NNE-SSW) and to secondary (ENE-WSW and NNW-SSE) orientations of cave elongation. In addition, a stronger correlation can be observed and is related to the bedding planes pointed to an N dip trend, with gentle angles close to  $10^\circ$ , as seen in the stereogram of Figure 3, which directs water flow and consequently contributes to the N to NNE-SSW cave elongation. The similarity between bedding dip and overall cave slope ( $9.6^\circ$ ) suggests that the cave has developed following a specific rock strata. Water flow along the bedding dip tends to be fast (Auler et al., 2020), which increases the erosion potential and, consequently, the enlargement of galleries and channels.

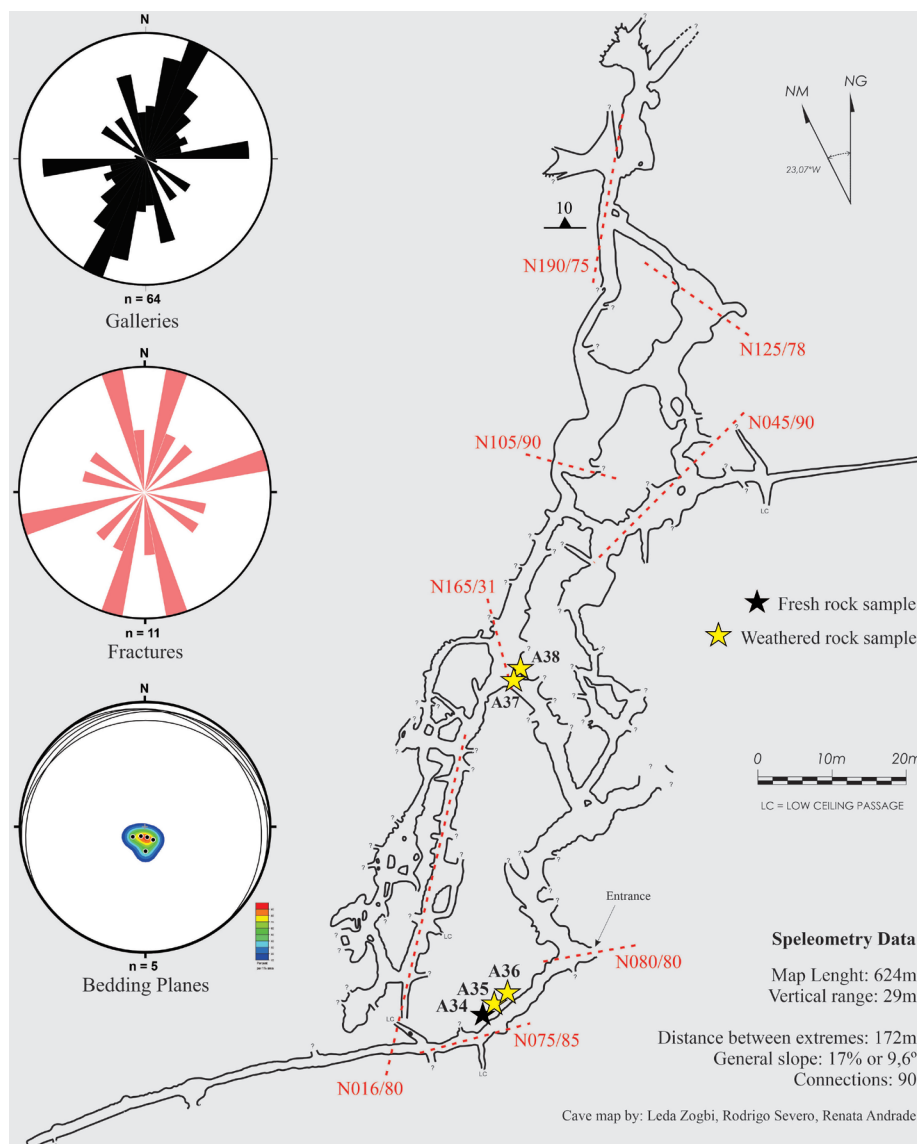


Fig. 3. Speleometric data and plan view of Canal da Fumaça Cave illustrating the main structures measured and their relationship with conduit development. Rose diagrams point to a slight coherence of cave galleries and fracture planes direction, once the main orientations of both are relatively coincident (NNE-SSW, NNW-SSE, and ENE-WSW). Stereogram with bedding plane dip data shows orientation tending to N, which guide the water flow and lead the conduit development toward this direction. Star symbols represent rock samples (black for fresh rock and yellow for weathered rock samples).

Fracture families identified in the field agree with structural lineament directions obtained by remote sensing. These structures are often represented by eroded fracture planes that reach 15 m in depth and 8 m in width, forming a network of fissures and channels in oblique directions (Fig. 4A) that connect surface to subterranean galleries

(Fig. 4B, C). Where these fracture families intersect, especially to the south and to the north of the cave, a ruiniform relief occurs, such as foreseen by Wray and Sauro (2017) for karstic terrains in siliciclastic rocks.

The main and longest passage, which determines the preferential elongation of the cave, is oriented in

the NNE-SSW direction. This same conduit is strongly affected by NNE-SSW subvertical fracture planes that occur alone (Fig. 4E) and, sometimes, as a zone of dense fracturing with cataclastic aspect (Fig. 4F). In this second case, the falling of blocks from the ceiling seems to be more intense, contributing to the development of larger galleries. Subhorizontal fractures also occur, sometimes filled by fibrous quartz and bounding rock strata, with contrasting color (N342/25 plane in Figure 4F and 4G).

The structural control of karst features, such as caves, sinkholes, depressions, and karstic valleys in siliciclastic rocks is largely discussed in the literature (Ribeiro et al., 2005; Melo & Giannini, 2007; Sauro, 2014). First, discontinuities of joints and faults help to increase the secondary porosity creating voids that act as starting points and enhancing karstification processes (Silva & Maia, 2024). These planes allow and increase the water flow, expanding the chemical weathering front through the rock.

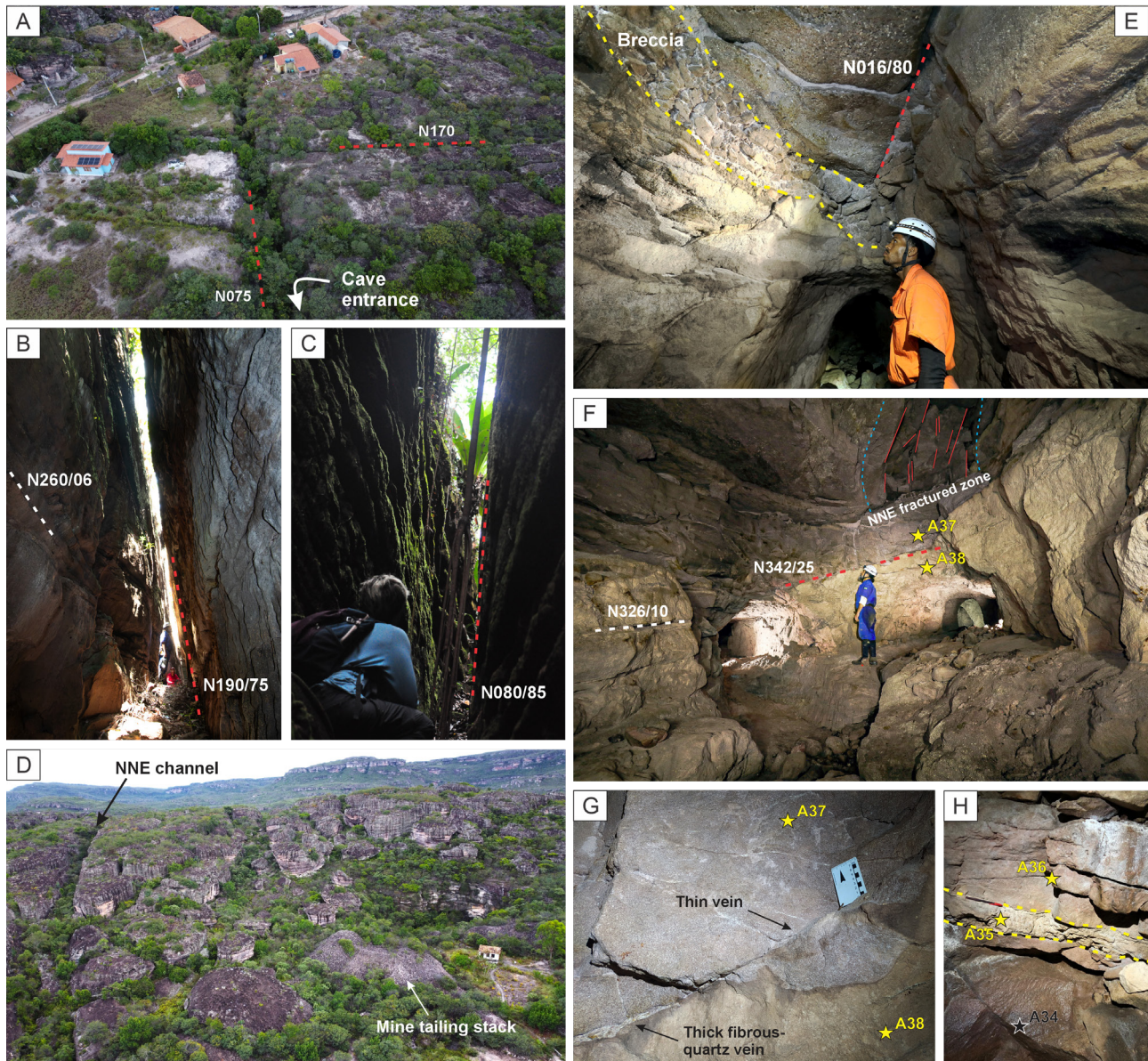


Fig. 4. **A)** Terrain above the cave crossed by a network of deep fissures (channels), which connect the surface, to underground conduits. Two main families are recognized, one NNE-SSW to NNW-SSE oriented (**B)** and the other ENE-WSW oriented (**C)**, both parallel to directions of development of cave passages; **D)** Aerial view of the surface relief to the south of the cave, showing ruiniform features and tailing stacks inherited from mining activity. The NNE-SSW channel belongs to the same lineament that crosses the cave elongation. **E)** NNE oriented fracture plane, controlling the main direction of the cave and clastic breccia filling paleo-conduit; **F)** Largest gallery of Canal da Fumaça Cave, where a subhorizontal fracture plane filled by fibrous quartz controls the differential weathering of the rock and a NNE oriented fracture zone controls the ceiling block fall and the drainage channel. **G)** Detail of fracture plane filled with quartz from F. The weathering mantle coming from the surface exceeds the limits of the fracture plane where the vein is thin or absent. **H)** Clay layer separating the lower fresh metasandstone layer from upper weathered one. Stars represent samples collected (yellow for weathered rock and black for fresh rock). Photos B, E, and F by Cristina Alves de Macedo.

### Detailed lithology

The surrounding landscape of the Canal da Fumaça Cave is conditioned by the weathering degree of the rocks. Terrains to the south and north of the cave are composed of unweathered rock (sample A40), supporting an irregular, sloping, and ruiniform relief, resulting from the intersection between fractures and bedding planes. In turn, rocks in which the

cave develops show an advanced weathering degree (samples A35, A36, A37, and A38). Exceptions occur in the eastern and southernmost fissure-aligned cave conduits, where the mining operations in the channels have exposed fresh rocks (sample A34). At the surface, the weathered rocks cause a smooth and flattened relief. Figure 5 illustrates the characteristics of the relief and the distribution of rock sampling.

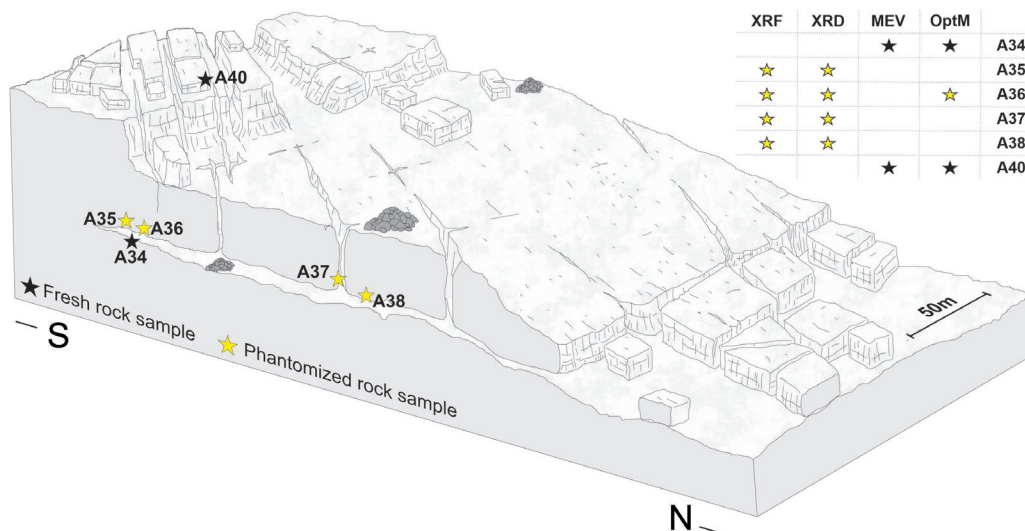


Fig. 5. Conceptual model of the Canal da Fumaça cave system. The cavity occurs in a flat smoothed terrain, where the rock weathering is advanced, between areas of ruiniform relief in fresh rock. Star symbols represent rock samples collected and analyzed for this cave (OptM = optical microscopy).

Generally, the cave rock facies are sandy (A34, A36, A37, and A38), composed of quartz and rare feldspar grains at advanced stage of alteration. Grains are angular to sub-angular, of low sphericity, and very poorly sorted, varying between fine and coarse sand, often reaching granule size. The thin section of the fresh rock sample A34 (Fig. 6A), collected inside the southern passage of the cave, shows open to normal packing and, when there is contact between grains, they are concave-convex, suggesting low-grade chemical compaction during diagenesis. On the other hand, sample A40, collected from fresh rock in the southern ruiniform terrains above the cave, represents a sandy rock with a

slight superior maturity degree, moderately sorted, with sub-angular to sub-rounded grains, varying between fine and medium sand (Fig. 6B).

Microphotographs also show an abundant matrix, consisting of phyllosilicates (kaolinite and pyro-phyllite), which increases the aluminum amount of rock samples (Table 1). However, different from cave rock (A34), in which the matrix occurs as fine-grained aggregates (Fig. 6A), in upper cave strata (A40), it occurs as brownish masses of well-crystallized pyrophyllite, with lamellar to radial habit (Fig. 6B). This difference may have concentrated the weathering in the low-crystalline and fine-grained matrix of the cave rock stratum.

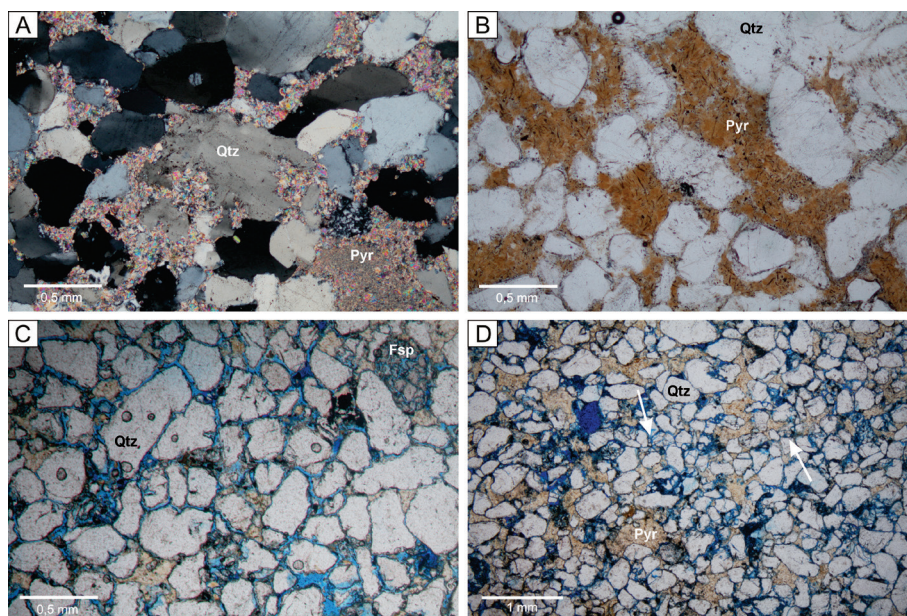
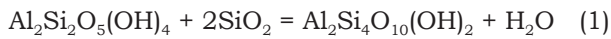


Fig. 6. **A**) Thin section (crossed nicols) of quartz grains embedded in a fine-grained phyllosilicate matrix from sample A34. Metamorphic corrosion of quartz is visible at the center; **B**) Thin section (at parallel nicols) of brownish well-crystallized pyrophyllite matrix from sample A40; **C–D**) Thin section (at parallel nicols) of weathered rock sample A36 impregnated with resin and dye. Blue shades represent the rock porosity, which is observed as intergranular pores, with high connectivity, as well as intragranular pores, where feldspar or quartz grains are partially or totally dissolved. Microfractures also increase the porosity (white narrows). Qtz = quartz; Pyr = pyrophyllite; Fsp = feldspar.

The occurrence of pyrophyllite indicates that the regional anchi-metamorphism, described by Varajão & Gomes (1997), Battilani et al. (1999), and Souza (2017), affected the study area. Thus, the rock in this area can be classified as a quartz-metasandstone.

The aluminosilicates can be assumed as orthomatrix, resulted from recrystallization of depositional silicate fine minerals (protomatrix). Furthermore, the quartz grains are – at the boundaries and, sometimes, the whole grain – consumed by the metamorphic reaction

with kaolinite to form pyrophyllite (Figs 6A, B, 7B), as described by Hemley et al. (1980), Hurst & Kunkle (1985), Matsuda et al. (1992), and Sauro (2014):



Thin-sections and SEM images of rock samples evidence the influence of this known deformation on the quartz-metasandstone porosity. Initially, the structural forces induced microcracks in the quartz grains, leading to grain crushing and slightly increasing the porosity. Likewise, the outset of the metamorphic reaction of pyrophyllite formation led to quartz grains surface cracking, also contributing to an increase in microporosity (Fig. 7B).

On the other hand, the progress of the metamorphic reaction leads to the crystallization of euhedral pyrophyllite in the grains interstices (Fig. 7A), resulting in filling of the voids and, consequently, in a reduction of the porosity. Syntaxial quartz overgrowth cement, which was formed during mesodiagenesis and occurs incipiently, also helps to obliterate primary porosity. Thus, fresh metasandstones are cohesive and have low porosity (Fig. 6A, B). Nevertheless, despite obliterating the porosity and reducing the intergranular flow, these reaction surfaces are weak and more susceptible to weathering. According to Hurst & Bjorkum (1986), they act as high free-energy sites which concentrate the chemical attack, being starting points for the weathering development and, thus, rock karstification.

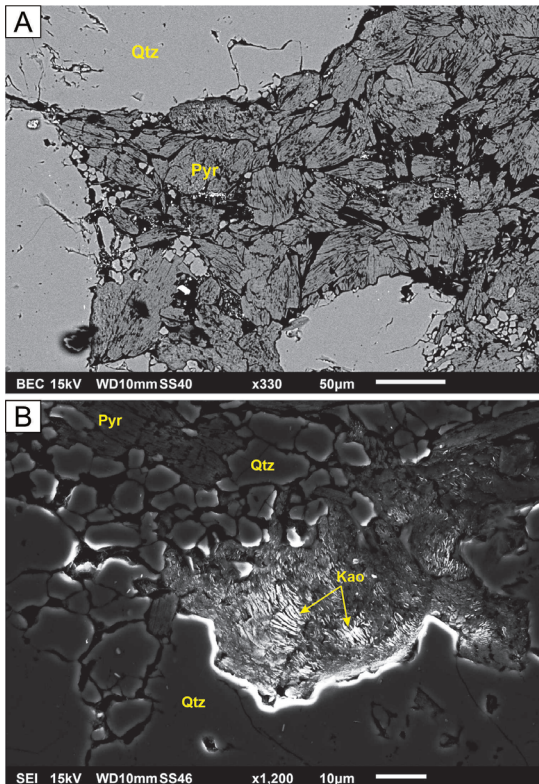


Fig. 7. SEM images of sample IG013-A40, showing pyrophyllite matrix consuming quartz through an anchimetamorphic reaction. Quartz boundaries appear cracked and corroded, as a consequence of this reaction (A). Kaolinite with typical booklet pattern also occurs (B), as a product of pyrophyllite weathering. Microporosity is evident at the boundaries between the phyllosilicate matrix and the quartz grains, and in the cracked surfaces (see EDS spectra in [Supplementary Fig. S2 and S3](#)).

### Weathering processes

The weathered rock assumes a friable aspect and has an increased porosity compared to the fresh rock. Thin section of sample A36, impregnated with hardener resin and blue dye, showed the increase in intra- and intergranular secondary porosity (Fig. 6C, D). Intragranular pores are observed where partial or total dissolution of quartz and feldspar grains occur. Intergranular pores are scattered through the matrix and, in some cases, at the quartz grain contacts or overgrowth cement (Fig. 6C), creating a well-connected network and providing great permeability to the rock.

Both types of porosity are conditioned by early diagenesis or anchimetamorphic processes. Corroded surfaces at reaction points are the high free-energy sites that guide the porosity enhancing. The dissolution of quartz grain-to-grain surface contacts or triple points can also be considered as a secondary factor. Microfractures were also observed involving the quartz grains and contributing to increase the porosity (white narrows at Fig. 6D), illustrating the important role of microstructures in karstification.

A weathered clayey layer was also identified, with a thickness varying from 10 to 20 cm (Fig. 4H). XRD analysis of the clay (sample A35) detected the presence of kaolinite and illite ([Supplementary Fig. S4](#)), which explains the high percentage of aluminum and potassium identified by XRF (Table 1). Quartz and pyrophyllite were also recognized.

This layer was observed in the eastern and southernmost galleries of the cave, exactly at the same sites where fresh rocks were described before. The clay layer seems to limit this lower fresh metasandstone facies from an upper altered one, suggesting that this less permeable clay level could play a hydrological role (acting as a seal), preventing the percolation of meteoric water and, thus, minimizing rock weathering below. This points to a lithostratigraphic control on karstification.

In some cases, depositional structures, such as bedding planes, are totally obliterated by weathering, which also affect the rock color. In the example of Figure 4F, there are two strata with advanced weathering contrasting in colors, limited by a N342/25 fracture plane filled with fibrous quartz. The upper layer is mottled white and brown (A37), while the lower one is homogenous brownish (A38). Despite this well marked boundary, the upper color crosses the quartz vein and penetrates the lower layer at some points. This suggests that the less permeable quartz veins sometimes limit the weathering front coming from the surface, which passes these veins only where they are thin or discontinuous (Fig. 4G). The hypothesis of different Al content between these samples due to primary abundance of phyllosilicate in different facies was also considered but it appears less likely, since the stains occur in both packages as an alteration halo front.

Rock weathering is a fundamental stage of karstification in siliciclastic terrains, in which in situ chemical alteration decreases the rock strength and leaves the grains loose for later mechanical removal (Rodet, 1996; Quinif, 1999). Classical literature

addresses two models for this process: the arenization (Martini, 1979, 1982, 2000; Jennings, 1983) and the phantomization (Quinif, 2010; Hardt, 2011; Dubois et al., 2014). Wray & Sauro (2017) made an accurate differentiation between them. The arenization occurs in mono-mineral quartz sandstone or quartzite, in

which grains, overgrowth, and/or silica cement is dissolved. On the other hand, phantomization requires a more soluble fraction, such as clay matrix or feldspar, which undergoes incongruent dissolution and leaves residual less soluble quartz grains in place.

Table 1. Whole-rock chemical composition obtained by XRF.

wt%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	MnO
<b>A35</b>	70.01	24.75	3.73	0.68	0.40	0.00	0.10	0.12	0.06	0.00
<b>A36</b>	86.97	12.04	0.22	0.49	0.13	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00
<b>A37</b>	86.98	12.51	0.01	0.24	0.11	< 0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
<b>A38</b>	80.97	18.33	0.02	0.48	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Considering the identified mineralogy, lithology, and the models discussed above, it is more likely that chemical attack acts on quartz-metasandstone mainly on the aluminous phyllosilicate matrix, instead of on the quartz grains, similar to that described by Melo & Giannini (2007), Melo et al. (2015), and Pontes et al. (2022) for sandstone karst in southern Brazil. Figure 7B evidences the occurrence of kaolinite with typical booklet patterns, interpreted as a product of pyrophyllite weathering, the main process that led to quartz grain dissociation and, thus, rock strength decreases. The booklet pattern is a common morphology in weathering kaolinites (Beauvais & Bertaux, 2002) and can indicate the action of a long-term weathering under constant environmental conditions, probably beneath the groundwater level and erosion surfaces (Keller, 1978).

Advanced quartz grain corrosion (Figs 6A and 7B) is assumed as a product of an anchi-metamorphic reaction, rather than surface-condition dissolution. The fact that kaolinite masses occur within corroded quartz grain edges certifies that the anchi-metamorphic reaction of quartz consumption and pyrophyllite crystallization precedes the kaolinite formation reaction, possibly during telodiagenesis (Supplementary Table S1).

Thus, evidence here suggest that weathering acts mainly on the pyrophyllite matrix. Congruent dissolution of pyrophyllite would leach both Si and Al. Water analysis were not carried out in this work, but in a very similar context Mecchia et al. (2014) found extremely low amounts of aluminum in cave waters. Therefore, it is more probable that incongruent dissolution acts over pyrophyllite, immobilizing Al in neofomed kaolinite and releasing Si into the solution, through the hydroxylation-desilication reaction described by Hemley et al. (1980) and Hurst & Kunkle (1985):



In addition, neofomed kaolinite dissolution can also occur, enhancing the porosity and contributing to rock phantomization. The alteration of kaolinite in acidic medium occurs according to Chin & Mills (1991) reaction:



In turn, these processes need specific conditions to occur. The solubility of phyllosilicates tends to increase under acidic conditions, which may be favored by the presence of organic compounds (Huang & Keller, 1970; Eberl & Hower, 1975), especially oxalic acid (H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), originated from organic matter dispersed in water (Chin & Mills, 1991; Ganor & Lasaga, 1994). The study area perfectly fits these conditions, where water has acidic character (pH = 4-5, according to Auler et al., 2020) and amber color, due to organic matter dissolved, similar to the Venezuelan Tepui sandstone karst systems (Mecchia et al., 2014).

Considering this, it is reasonable to assume that the white mottled aspect of sample A37 derives from kaolinization of the pyrophyllite matrix – through the reaction (2). This process is more advanced in this stratum than in the lower one (A38), due to its interaction with acid water that infiltrates from the surface. In this case, specifically, such acid conditions must have led to the dissolution of newly formed kaolinite– through the reaction (3) – leaching Al in solution. This process, which occurs locally, could justify the lower amount of Al in sample A37 than in A38, as indicated by XRF analysis (Table 1). Nonetheless, further studies must include water analysis, which together with petrographic data presented herein will assist to refine our understanding about the anion mobilization and confirm this hypothesis.

### Clastic deposits and diamonds

Despite the fact that most of the clastic deposits were removed during the mining activities, some accumulations remain preserved within the cave. These deposits can be distinguished from weathered Proterozoic metasandstone through their discordant contact and, sometimes, it is possible to identify the conduit morphology in which they were deposited (Fig. 8A). The color and grain size also differs, with the clastic sediments being coarser (containing pebbles) than the metasandstones (Fig. 8B), similar to those described by Lima et al. (2022) and Sampaio et al. (1994).

These kinds of clastic sediments suggest the deposition by water flow, in which small channels sorted grains between sand and pebble, depending on rainfall level. The lack of preserved deposits limits detailed interpretations about the sedimentological dynamics. However, it is acceptable to assume that significant changes have occurred during the transition from an

erosional regime to a depositional one. The elevated sedimentation rates may be related to the increased sediment input or reduction in the hydraulic gradient

due to tectonics, climatic changes or triple porosity evolution. Additional studies with deposits from other systems are required to address this question.

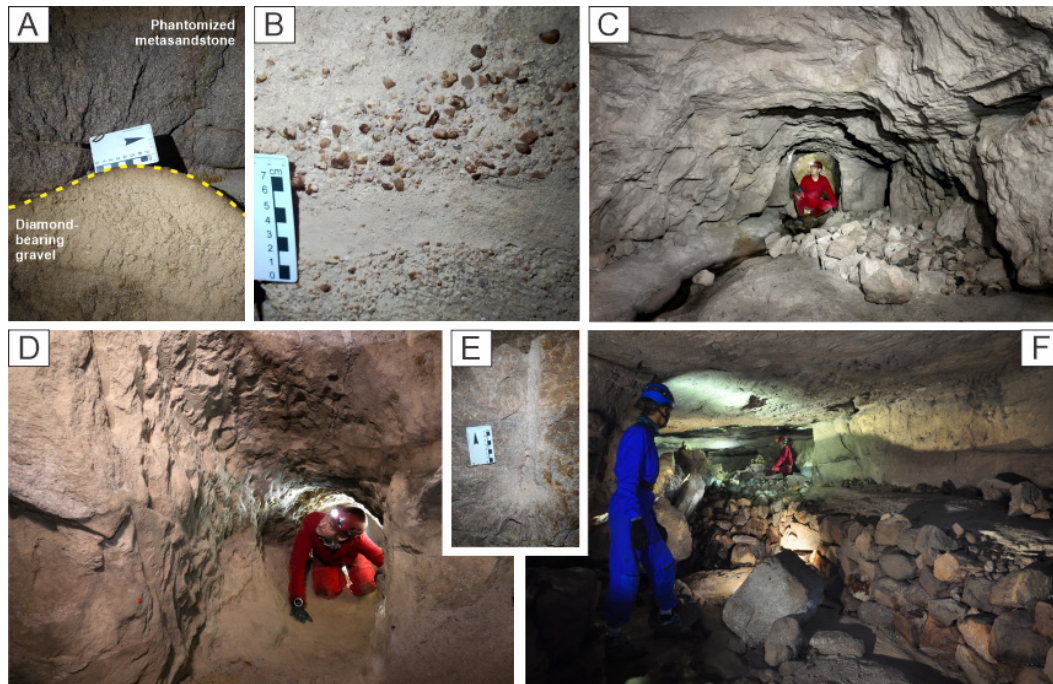


Fig. 8. **A)** Clastic diamond-bearing gravel filling a paleo-conduit in phantomized metasandstone; **B)** Detail of banded clastic gravel deposits along the cave wall. These deposits were exploited by the miners, and their removal led in the emptying of the cave galleries; **C)** Contrast between natural and anthropogenic features: cave floor smoothed and carved by the water flow vs. ceiling and walls with straight morphology and signs of excavation. **D)** Artificial passage opened in the weathered metasandstone (chisel marks at the left side); **E)** Detonation hole in a fresh rock wall; **F)** Stonewall built inside a cave gallery. Photos C and D by Cristina Alves de Macedo.

On the other hand, poorly sorted deposits were also identified, in some cases forming breccias, such as the ones shown in Figure 4E. These deposits contain straight faceted blocks of metasandstones, with short or no transport, surrounded and cemented by coarse sand, often filling fractures or bedding planes. They suggest that the conduit enlargement, by gravitational detachment of blocks, could have occurred contemporaneously with sedimentation. The low level of cohesion of the host rock, due to weathering, added to planar sedimentary and tectonic structures, favoring this kind of deposit.

### The mined cave evolution

The advanced degree of weathering, which gives a friable aspect to the rock, allowed miners to excavate and deeply modify the interior of the cave. In some cases, existing conduits and galleries were widened. These conduits keep natural features preserved, such as the smoothed floor carved by the water flow, contrasting with excavated walls and ceiling (Fig. 8C). Man-made surfaces are irregular and rectified, often following the fractures and bedding planes, in which the rock blocks were detached by miners or naturally fell down after the cave deposits were removed and the galleries were emptied. In other cases, passages were artificially created (Fig. 8D), aiming to connect conduits, allowing access to gravel deposits and the traffic of miners, tools, and ore. It is assumed that miners also explored the coarser facies of weathered metasandstone in search of diamonds. These galleries present several chisel marks along the walls, registering the excavation of the friable rock portions.

At the rare points where fresh metasandstone occurs, in the eastern and southernmost straight conduits of the cave, signs of detonation were observed (Fig. 8E). The use of gunpowder seems to have created the unweathered rock outcropping on the floor and along the walls of these conduits. The reason why miners carried out these detonations remains unclear, but it probably relates to the widening of the galleries, making the circulation of the workers, tools, ore, and tailings easier. Another explanation is the hydraulic control: the presence of dams and ponds are nowadays recognized at these sites. The water dynamic was fundamental to ore washing. On the other hand, these structures may be associated with recent water uptake, since hoses were identified inside the cave.

Mine tailing stacks are common all over the cave and at the surface (Fig. 4D). These deposits are made up of decimetric to metric blocks, removed from the interior of the cavity and associated channels. Stone walls are also registered (Fig. 8F). Once the interior of the cavity was emptied, several points were subject to roof collapsing, putting the miners at risk. Therefore, it was usually necessary to support the ceiling with block pillars.

Aiming to compare and understand the coexistence of natural and man-made morphologies inside the Canal da Fumaça Cave, a map of modification by mining activity was drawn (Fig. 9). Three classes of conduits and galleries were identified: natural, highly modified and artificial. The natural ones, those where no signal of human impact could be observed, are scarce – about 5.8% of the entire cave area – and restricted to galleries, fissures

and sinkholes formed by the collapse of blocks. Nonetheless, we must consider that these collapses could be posterior and a consequence of conduit emptying by miners.

### Canal da Fumaça Cave

#### Map of Modifications by Mining Activity

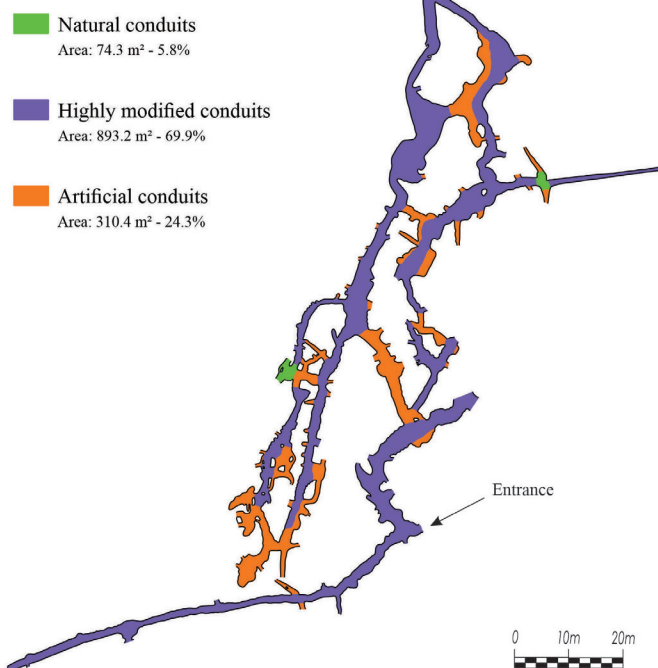


Fig. 9. Map of modifications by mining activity in the Canal da Fumaça Cave. Three classes of conduits were distinguished: natural, highly modified, and artificial ones.

In turn, the highly modified conduits are the most common in the cave, characterizing 69.9% of the cavity area. They represent those original passages, used and deeply modified by miners. Commonly, the original water activity in these conduits can still be discerned, mainly through shallow stream incisions and the presence of a smoothed floor, although human marks of cave widening, especially at the walls and ceiling, also occur (Fig. 8C). They are often associated with current water flow. The first meters of the cave entrance gallery are a particular case of highly modified conduit, where fresh rocks occur because of dismantling with gunpowder. The presence of dams led to the formation of ponds and sand accumulation, which severely obscured the natural features of the cave. Nonetheless, the conduit concordance with the original stream orientation suggests that it is an original conduit highly modified by anthropic activity.

Finally, the artificial conduits are those without any signal of natural evolution, marked only by man-made scars (Fig. 8D). They tend to be lateral secondary dry conduits. This class represents 24.3% of the cavity area. Although in this study those artificial conduits are being considered part of the major Canal da Fumaça system, they do not qualify as a cave in the strict sense, since the Brazilian laws consider caves as “natural underground cavities that are accessible to humans” (Brasil, 1990).

Based on what has been presented, an evolution model can be proposed for the Canal da Fumaça Cave (Fig. 10), which goes from phases of natural karstic processes to human action during diamond mining cycles.

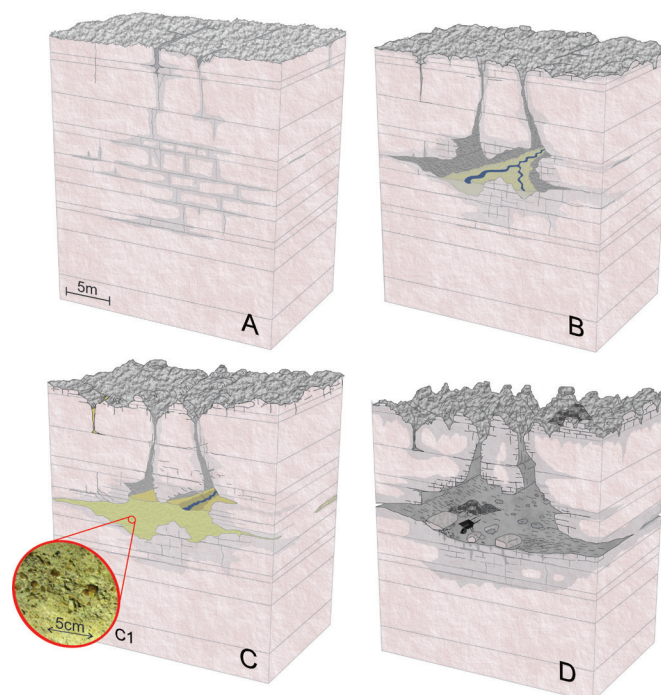


Fig. 10. Geological and anthropogenic evolution of Canal da Fumaça Cave. **A)** Fractures and bedding planes as preferential paths for water percolation, leading to rock phantomization; **B)** Erosion phase: piping removes loose grains, creating surface channels and cave conduits. **C)** Deposition phase: sandy and gravelly diamond-bearing sediments (detail in C1), weathering products of Proterozoic rocks, fill opened conduits; **D)** Miners emptied and excavated galleries, resulting in the currently enlarged arrangement of the cave.

Initially, the NNE brittle deformation of metasandstones related to sinistral shear strain created subvertical fracture planes that, together with bedding planes, acted as preferential water flow paths and, so, as weathering fronts. The chemical attack, under acidic water conditions, possibly in a phreatic phase, acts mainly on the phyllosilicate matrix, undermining the quartz grain cohesion, in a process classified as phantomization. Thus, during periods of higher water flow energy, under vadose conditions, mechanical processes, such as piping, removed loose grains, creating subterranean conduits. At the surface, the erosion of subvertical fissures developed large channels, which together with bedding planes shaped a unique ruiniform relief. Subsequent to a shift in the erosional-sedimentological dynamics, these voids were thus filled by diamond-rich sediments, originating from the dismantling of Proterozoic rocks from the Tombador Formation. Finally, miners extracted these sediments searching for diamond and carbonado, emptying the spaces again, in addition to excavating the altered rock and detonating the fresh rock, widening existing conduits and creating new artificial ones.

## CONCLUSIONS

This paper aimed to present and discuss studies developed within the Canal da Fumaça Cave, a siliciclastic karst system hosted in metasandstone

rocks of the Tombador Formation, which was strongly affected by diamond mining activity that characterized the Chapada Diamantina area during the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries.

Natural processes of karstification were recognized, similar to those reported in literature for siliciclastic rocks. Structural features are a fundamental factor conditioning cave development. Fracture planes act as preferential flow paths, initiating weathering fronts, enlarging fissures and channels that connect the surface to the subterranean network. In turn, bedding plane dip guides the water flow and causes the cave's elongation. The lithological contrast of facies, which vary mainly in terms of metasandstone matrix crystallization, probably promoted differential weathering. Clay layers were also recognized and may have acted as less permeable levels, restricting weathering to a specific layer where the cave developed. Petrography suggests that chemical attack acted mainly on the phyllosilicate matrix (pyrophyllite and kaolinite), decreasing grain cohesion, through a process called phantomization. Secondarily, dissolution of quartz grains and overgrowth possibly occurred. Mechanical processes (piping) removed loose grains and enlarged voids, creating conduits, channels and galleries. Later, fluvial sedimentation processes filled the cave conduits with diamond-containing deposits.

In contrast with these natural process, anthropogenic modifications by mining activities took place and left several signs in the cave system. Existing conduits were enlarged, new galleries were excavated in weathered rocks, fresh rocks were detonated with gunpowder, and most of the sediment fills were removed. Stone walls and pillars were also recognized. The main impacts of these modifications are the destruction of natural features and the increase of the conduits area and volume. It is notable that if, on the one hand, cave mining allowed the access to places, once inaccessible, of scientific relevance, on the other, it can also suppress, omit or decontextualize natural aspects of the cave.

This research presents contributions to karst systems in siliciclastic and non-carbonate rock literature and also to the study of mined caves, which are common in the Chapada Diamantina or other regions of the Espinhaço Ridge. Future studies in this cave system should include water analysis, aiming to better understand the mobility of elements. Furthermore, additional research should be directed on other cave systems in Igatu Village, providing a more complete view of this speleological and historical region. Such research would also contribute to advancing knowledge of the geomorphological evolution of the Serra do Sincorá and support the ongoing development of the Serra do Sincorá Geopark Project.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by a Term of Commitment and Speleological Compensation, signed between the Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), through its speleological section, the Centro Nacional de Pesquisa e

Conservação de Cavernas (CECAV), and the mining company Vale S.A. (TCCE ICMBio/Vale nr. 01/2022). Financial and logistical management were mediated by the Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS), to whom we express our thanks. Masters and scientific initiation scholarships were funded, respectively, by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and the Pró-Reitoria de Pesquisa, Criação e Inovação, Universidade Federal da Bahia. We kindly thank those who supported the field campaigns: Leda Zogbi, Renata Andrade, and Rodrigo Severo for the fundamental contribution in cave survey; Fabio Dal Gallo, Cristina Macedo, and Oli Marsiglia for the exploration and photographic recording; Leo Linke and Fabiano Ferreira for data acquisition and sample collection. We also thank locals and residents of the Igatu Village, who opened their homes and minds to us. We are grateful to professors, technicians, and students who supported the execution of laboratory analyses, specially to Dr. Iata Anderson, Renata Martins, Prof. Dr. George Luvizotto, Dr. Daniel Godoy, from the UNESPetro and the Geology Department of UNESP, and Prof. Raildo Fiuza, MSc. Matheus Nascimento, and Leidiane Ferreira, from the CIENAM, Chemistry Institute, and Geosciences Institute of Federal University of Bahia (UFBA). Finally, we acknowledge the journal editors, Jo De Waele and Bogdan P. Onac, as well as the reviewers for all significant contributions to the manuscript.

**Autorship statement:** RP and RGFAP organized and designed the research project. RP, RGFAP, and LFV conducted fieldworks, data acquisition, and rock sample collection. LFV carried out cave speleometric analysis. RP took part of all analysis and its interpretation, together with technical support. RP designed maps and photography figures. RPM drew models of Figures 5 and 9. RP wrote the manuscript with inputs, contributions, and reviews from all co-authors.

## REFERENCES

- Acauã, B.M.S., 1855. Memoria sobre os terrenos diamantinos da provincia da Bahia: Descrição dos terrenos diamantinos (1847). In: Ferreira, F.I. (Org.), Dicionario Geographico das Minas do Brazil, Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, p. 209–217.
- Algeo, K., 2004. Mammoth Cave and the making of place. *Southeastern Geographer*, 44(1), 27–47. <https://doi.org/10.1353/sgo.2004.0002>
- Alkmim, F.F., Chemale, J.R.F., Endo, I. A., 1996. A deformação das coberturas proterozóicas do Cráton do São Francisco. *Revista Escola de Minas*, 1, 22–38.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A, 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, eastern Brazil. *Marine Petroleum Geology*, 33, 127–139. <https://doi:10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>
- Almeida, F.F.M. de., 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7, 349–364.
- Andrade, C., 2008. Lugar de memória... memórias de um lugar: patrimônio imaterial de Igatu, Andaraí, BA. *Revista de Turismo e Patrimônio Cultural*, 6(3), 569–590. <https://doi.org/10.25145/j.pasos.2008.06.042>

- Auler, A., 2004. Quartzite caves of South America. In: Gunn, J. (Ed.), *Encyclopedia of cave and karst science*. Fitzroy Dearborn, New York, p. 1306–1311.
- Auler, A.S., Meus, P., Pessoa, P.F.P., 2020. Water tracing experiments in low-pH quartzite karst water, Chapada Diamantina, northeastern Brazil. In: Bertrand, C., Denimal, S., Steinmann, M., Renard, P. (Eds.), *Eurokarst 2018, Besançon. Advances in karst science*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14015-1\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14015-1_21)
- Auler, A.S., Sauro, F., 2019. Quartzite and quartz sandstone caves of South America. In: White, W.B., Culver, D.C., Pipan, T. (Eds.), *Encyclopedia of caves*. Academic Press, London, p. 850–860.
- Babinski, M., Van Schmus, W.R., Chemale, F. Jr., Brito Neves, B.B., Rocha, A.J.D., 1993. Idade isocrônica Pb/Pb em rochas carbonáticas da Formação Caboclo, em Morro do Chapéu. *Proceedings of the 2nd Simpósio do Cráton do São Francisco, Salvador*, 160–163.
- Baeta, A., 2018. A exploração do “ouro branco” nas Gerais e nas cavernas – um breve histórico sobre degradação ambiental. *Centro de Documentação Eloy Ferreira da Silva*. <https://www.cedefes.org.br/a-exploracao-do-ouro-branco-nas-gerais-e-nas-cavernas-um-breve-historico-sobre-degradacao-ambiental/> [accessed: April 02, 2024].
- Barbosa, O., 1991. Diamante no Brasil: Histórico, ocorrência, prospecção e lavra. *Boletim CPRM, Brasília, DF*, 136 p.
- Battilani, G.A., Gomes, N.S., Guerra, W.J., 2007. The occurrence of microdiamonds in Mesoproterozoic Chapada Diamantina intrusive rocks – Bahia/Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79(2), 321–332.
- Battilani, G.A., Varajão, A.D., Gomes, N.S., 1999. Metamorphic degree variation in proterozoic sandstones of the Tombador Formation, Bahia State, Brazil. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 7–8, 917–926.
- Beauvais, A., Bertaux, J., 2002. In situ characterization and differentiation of kaolinites in lateritic weathering profiles using infrared microspectroscopy. *Clays and Clay Minerals*, 50(3), 314–330. [https://doi.org/10.1346/0009860026\\_0358076](https://doi.org/10.1346/0009860026_0358076)
- Bonfim, L.F.C., Pedreira, A.J., 1990. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Carta geológica, carta metalogenética/previsional. Scale 1:100.000 (Folha SD.24-V-A-V Lençóis) Estado da Bahia. *DNPM/CPRM, Salvador*, 130 p.
- Brasil. Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências. *Diário Oficial da União. Brasília, DF*, 1, 18836 (Publicação Original).
- Carvalho, L.M., 2010. Recursos minerais: aspectos econômicos e áreas de relevante interesse mineral. In: Carvalho, L.M. Ramos, M.A.B. (Eds.), *Geodiversidade do Estado da Bahia. Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade*. CPRM, Salvador, p. 27–58.
- Carvalho, H.D.S., Nolasco, M.C.N., 2007. Potencial turístico de antigas trilhas garimpeiras em Igatu, Parque Nacional da Chapada Diamantina – BA. *Global Turismo*, 3(2), 1–21.
- Castro, P.T.A., Nascimento, S.T., De Paula, S.F., 2021. Classification of geo-mining heritage based on anthropogenic geomorphology. *Journal of the Geological Survey of Brazil*, 4, Special Issue 1, 13–20.
- Caxito, F.A., Frei, R., Sial, A.N., Uhlein, G.J., Moura, W.A.L., Pereira, E., Rodrigues, R., 2022. Chromium isotopes track redox fluctuations in Proterozoic successions of the Chapada Diamantina, São Francisco craton, Brazil. *Geology*, 51, 69–74. <https://doi.org/10.1130/G50344.1>
- Chin, P.K.F., Mills, G.L., 1991. Kinetics and mechanisms of kaolinite dissolution: Effects of organic ligands. *Chemical Geology*, 90, 307–317. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(91\)90106-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90106-2)
- Couto, J.V., 1809. *Memória sobre as salitreiras naturais de Monte Rorigo; Maneira de as auxiliar por meio das artificiaes; Refinaria do nitrato de potassa, ou salitre; Escrita no ano de 1803*. Imprensa Régia, Rio de Janeiro, 61 p.
- Crothers, G.M., Pappas, A.C., Mittendorf, C.D., 2013. The history and conservation of saltpeter works in Mammoth Cave, Kentucky. *Proceedings of the Mammoth Cave National Park’s 10th Research Symposia*. Paper 2, 103–108. [http://digitalcommons.wku.edu/mc\\_research\\_symposium/10th\\_Research\\_Symposium\\_2013/Day\\_one/2](http://digitalcommons.wku.edu/mc_research_symposium/10th_Research_Symposium_2013/Day_one/2)
- Cruz, S.C.P., Alkmim, F.F., 2006. The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí Belt, São Francisco Craton region, Eastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 78(1), 151–173. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652006000100014>
- Cruz, S.C.P., Alkmim, F.F., 2007. A história de inversão do aulacógeno do Paramirim contada pela Sinclinal de Ituaçu, extremo sul da Chapada Diamantina. *Revista Brasileira de Geociências*, 37, 92–110.
- Cruz, S.C.P., Alkmim, F.F., 2017. The Paramirim Aulacogen. In: Heilbron, M., Cordani, U.G., Alkmim, F.F. (Eds.), *São Francisco Craton, eastern Brazil: Tectonic genealogy of a miniature continent*. *Regional Geology Reviews*, Springer, Cham, p. 97–115.
- Cruz, V.A., Cruz, S.C.P., Lobato, L.M., Rios, F.J., Santos, J.S., Lima, G.M.P., 2018. Structural control and hydrothermal evolution model of unusual, high-grade metasandstone-hosted iron deposits, Mesoproterozoic eastern Chapada Diamantina, Brazil. *Ore Geology Reviews*, 101, 221–272. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.06.003>
- Danderfer, A., 1990. Análise descritiva e cinemática do Supergrupo Espinhaço na região da Chapada Diamantina, BA. Unpublished MSc Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 99 p.
- Danderfer, A., De Waele, B., Pedreira, A.J., Nalini, H.A., 2009. New geochronological constraints on the geological evolution of Espinhaço Basin within the São Francisco Craton – Brazil. *Precambrian Research*, 170, 116–128. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2009.01.002>
- Derby, O.A., 1906. The Serra do Espinhaço, Brazil. *The Journal of Geology*, 14(5), 374–401.
- Eschwege, W.L.V., 1833. *Pluto brasiliensis*. G. Reimer, Berlin, 622 p.
- Eberl, D., Hower, J., 1975. Kaolinite synthesis: The role of the Si/Al and (Alkali)/(H<sup>+</sup>) Ratio in hydrothermal systems. *Clays and Clay Minerals*, 23, 301–309.
- Faria, L.E., Filgueiras, C.A.L., 2019. A Serra de Baldim (MG): Um capítulo à parte na história da exploração do salitre brasileiro. In: Zampaulo, R.A. (Eds.), *Proceedings of the 35th Congresso Brasileiro de Espeleologia, Bonito*, 474–484.
- Faria, L.E., Filgueiras, C.A.L., 2021. Salitre: O produto químico estratégico no passado do Brasil. *Química Nova*, 44(4), 519–535. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.201706955>
- Ferronato, J.P.F., Scherer, C.M. dos S., Drago, G.B., Rodrigues, A.G., de Souza, E.G., Reis, A.D., Bállico, M.B., Kifumbi, C., Cazarin, C.L., 2021. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in a

- mesoproterozoic storm-dominated ramp: Depositional processes and stromatolite development. *Precambrian Research*, 361, 106240.  
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106240>
- Filho, E.L., Loureiro, H.S.C., Pedreira, A.J., 1999. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB. Seabra, Folha SD.24-V-A. Estado da Bahia. Scale 1:250.000. CPRM, Brasília.
- Frank, E.F., 1998. History of the guano mining industry, Isla de Mona, Puerto Rico. *Journal of Cave and Karst Studies*, 60(2), 121–125.
- Ganor, J., Lasaga, A.C., 1994. The effects of oxalic acid on kaolinite dissolution rate. *Mineralogical Magazine*, 58, 315–316.
- Gázquez, F., Calaforra, J.M., Rull, F., Forti, P., García-Casco, A., 2012. Organic matter of fossil origin in the amberine speleothems from El Soplao Cave (Cantabria, Northern Spain). *International Journal of Speleology*, 41(1), 113–123.  
<http://dx.doi.org/10.5038/1827-806X.41.1.12>
- Giudice, D.S., Souza, R.M., 2009. As cidades da mineração na Chapada Diamantina – Bahia. *Revista GeoNordeste*, 1, 109–215.
- Gomes, M.C.A., Piló, L.B., 1992. As minas de salitre: A exploração econômica das cavernas em Minas Gerais nos fins do período colonial. *Espelo-Tema*, 16, 83–93.
- Gruber, L., Pimentel, M.M., Neves, B.B.B., Armstrong, R., Fuck, R.A., 2011. Proveniência U-Pb em zircão (SHRIMP) da Formação Tombador, Grupo Chapada Diamantina, BA. *Proceedings of 13rd Congresso Brasileiro de Geoquímica*, Gramado, 1155–1158.
- Guadagnin, F., Chemale, F., Jr., Magalhães, A.J.C., Santana, A., Dussin, I., and Takehara, L., 2015. Age constraints on crystal-tuff from the Espinhaço Supergroup: Insight into the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic intracratonic basin cycles of the Congo – São Francisco Craton. *Gondwana Research*, 27, 363–376,  
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.10.009>
- Guanaes, S.A., 2001. Nas trilhas dos garimpeiros de serra: Garimpo e turismo em áreas naturais na Chapada Diamantina. Unpublished MSc Dissertation. Universidade Estadual de Campinas, 213 p.
- Guanaes, S.A., 2006. Meu quintal não é Parque! Populações locais e gestão ambiental no Parque Nacional da Chapada Diamantina-BA. Unpublished PhD Thesis. Universidade Estadual de Campinas, 337 p.
- Guimarães, J.T., Alkmin, F.F., Cruz, S.C.P., 2012. Supergrupos Espinhaço e São Francisco. In: Barbosa, J.S.F., Mascarenhas, J.F., Correa-Gomes, L.C., Dominguez, L.M., Santos de Souza, J. (Eds.), *Geologia da Bahia: Pesquisa e atualização, Série Publicações Especiais*, 2. CBPM, Salvador, p. 33–85.
- Guimarães, J.T., Misi, A., Pedreira, A.J., Dominguez, J.M.L., 2011. The Bebedouro Formation, Una Group, Bahia (Brazil). In: Arnaud, E., Halverson, G.P., Shields-Zhou, G. (Eds.), *The geological record of Neoproterozoic glaciations*. Geological Society, London, *Memoirs*, 36, 503–508.
- Guimarães, J.T., Santos, R.A.S., Melo, R.C., 2008. *Geologia da Chapada Diamantina Ocidental (Projeto Ibitiara – Rio de Contas)*. Série Arquivos Abertos, 31. CBPM/CPRM, Salvador, 69 p.
- Haggerty, S.E., 2014. Carbonado: Physical and chemical properties, a critical evaluation of proposed origins, and a revised genetic model. *Earth Science Reviews*, 130, 49–72.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.12.008>
- Hardt, R., 2011. Da carstificação em arenitos: Aproximação com o suporte de geotecnologias. Unpublished PhD Thesis, Universidade Estadual Paulista – Université de Rouen, 224 p.
- Hemley, J.J., Montoya, J.W., Marinenko, J.W., Luce, R.W., 1980. Equilibria in the system  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ - $H_2O$  and some general implication/mineralization processes. *Economic Geology*, 75, 210–228.  
<https://doi.org/10.2113/gsecongeo.75.2.210>
- Huang, W.H., Keller, W.D., 1970. Dissolution of rock-forming silicate minerals in organic acids: Simulated first-stage weathering of fresh mineral surfaces. *The American Mineralogist*, 55, 2076–2094.
- Hurst, A., Bjorkum, P.A., 1986. Thin section and SEM textural criteria for the recognition of cement-dissolution porosity in sandstones. *Sedimentology*, 33(4), 605–608.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1986.tb00764.x>
- Hurst, V.J., Kunkle, A.C., 1985. Dehydroxylation, rehydroxylation, and stability of kaolinite. *Clays and Clay Minerals*, 33(1), 1–14.  
<https://doi.org/10.1346/CCMN.1985.0330101>
- INMET, 2022. Normal Climatológica do Brasil (1991-2020). Report of the Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Agropecuária e Abastecimento. INMET, Brasília, DF, 27 p.
- Jardim de Sá, E.F., Bartels, R.L., Brito Neves, B.B., McCreath, I., 1976. Geocronologia e o modelo tectono-magmático da Chapada Diamantina e Espinhaço Setentrional, Bahia. *Proceedings of the 29th Congresso Brasileiro de Geologia*, 4, 205–257.
- Jennings, J.N., 1983. Sandstone pseudokarst or karst? In: Young, R.W., Nanson, G.C. (Eds.), *Aspects of Australian sandstone landscapes*. Wollongong: Australian and New Zealand Geomorphology Group Special Publication, 1, 21–30.
- Jesus, D.S.S., 2019. Garimpo de silêncios: Experiências do trabalho de mulheres nas lavras diamantinas (Igatú/Andaraí-BA, décadas de 1930 a 1970). Unpublished MSc Thesis, Universidade Federal de Sergipe, 178 p.
- Keller, W.D., 1978. Kaolinization of feldspar as displayed in scanning electron micrographs. *Geology*, 6, 184–188.  
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1978\)6<184:KOFADI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1978)6<184:KOFADI>2.0.CO;2)
- King, L.C., 1956. A geomorfologia do Brasil Oriental. *Revista Brasileira de Geografia*, 18, 147–265.
- Lima, A., Lima, C.C.U., Nolasco, M.C., Januario, L.H.N., Moreira, E.I.N., 2022. Caracterização textural, mineralógica e a lavra de aluviões diamantíferos nos garimpos da Chapada Diamantina, Bahia. *Brazilian Journal of Development*, 8(6), 44535–44550.  
<http://dx.doi.org/10.34117/bjdv8n6-126>
- Lima, C.C.U., Nolasco, M.C., 2015. Chapada Diamantina: A remarkable landscape dominated by mountains and plateaus. In: Vieira, B.C., Salgado, A.A.R., Dos Santos, L.J.C. (Eds.), *Landscape and landforms of Brazil*. Springer, New York, p. 211–220.
- Lima, G.M.P., Macário, K.C.D., Alves, E.Q., 2023. O garimpo na Chapada Diamantina e a origem do Pantanal Marimbus. *GeoTextos*, 19(1), 149–168.
- Loureiro, H.S.C., Bahiense, I.C., Neves, J.P., Guimarães, J.T., Teixeira, L.R., Santos, R.A.; Melo, R.C., 2009. *Geologia e recursos minerais da parte norte do corredor de deformação do Paramirim (Projeto Barra-Oliveira dos Brejinhos)*: Salvador, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral – CBPM, Companhia Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. Série Arquivos Abertos, 33, 122 p.
- Loureiro, M.R., Nolasco, M.C., Chaves, J.M., 2021. Educação ambiental e o Rio de Água Boa: Experiência didática em Igatú na Chapada Diamantina-Bahia. *Revista*

- Sergipana de Educação Ambiental, 8, 2359–4993.
- Magalhães, A.J.C., Raja Gabaglia, G.P., Scherer, C.M.S., Bállico, M.B., Guadagnin, F., Bento Freire, E., Silva Born, L.R., Catuneanu, O., 2016. Sequence hierarchy in a Mesoproterozoic interior sag basin: from basin fill to reservoir scale, the Tombador Formation, Chapada Diamantina Basin, Brazil. *Basin Research*, 28, 393–432. <https://doi.org/10.1111/bre.12117>
- Magalhães, A.J.C., Scherer, C.M.S., Raja Gabaglia, G.P., Bállico, M.B., 2014. Uncised fluvial and tide-dominated estuarine systems from the Mesoproterozoic lower Tombador Formation, Chapada Diamantina basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 56, 68–90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2014.07.010>
- Magalhães, A.J.C., Scherer, C.M.S., Raja Gabaglia, G.P., Catuneanu, O., 2015. Mesoproterozoic delta systems of the Açuruá Formation, Chapada Diamantina, Brazil. *Precambrian Research*, 257, 1–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.016>
- Martini, J.E.J., 1979. Karst in black reef quartzite near kaapsehoop, eastern transvaal. *Annals of the South Africa Geological Survey*, 13, 115–128.
- Martini, J.E.J., 1982. Karst in Black Reef and Wollenberg Group quartzite of the Eastern Transvaal Escarpment. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, 10, 99–114.
- Martini, J.E.J., 2000. Dissolution of quartz and silicate minerals. In: Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (Eds.), *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society, Huntsville, AL, 171–174.
- Mattos, A.P., 1938. Pré-história brasileira: Vários estudos. *Brasiliana/Biblioteca Pedagógica Brasileira*, 5, 137, 324 p.
- Matsuda, T., Kurosaki, M., Henmi, K., 1992. Equilibrium boundary between kaolinite and pyrophyllite. *Clay Science*, 8, 297–308. <https://doi.org/10.11362/jcssjclayscience1960.8.297>
- Mecchia, M., Sauro, F., Piccini, L., De Waele, J., Sanna, L., Tisato, N., Lira, J., Vergara, F., 2014. Geochemistry of surface and subsurface waters in quartz-sandstones: Significance for the geomorphic evolution of tepui table mountains (Gran Sabana, Venezuela). *Journal of Hydrology*, 511, 117–138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.029>
- Melo, M.S., Guimarães, G.B., Chinelatto, A.L., Giannini, P.C., Pontes, H.S., Chinelatto, A.C.A., Atencio, D., 2015. Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Paraná Basin, Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 63, 20–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2015.06.011>
- Melo, M.S., Giannini, P.C.F., 2007. Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 2149–2164. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1520>
- Mickelson, A.M., 2008. Mammoth Cave's nineteenth-century saltpeter works. In: Dya, D.H. (Ed.), *Cave archaeology of the eastern woodlands: Essays in Honor of Patty Jo Watson (1st Ed.)*, p. 235–260.
- Nannini, F., Neto, I.C., Silveira, F.V., Cunha, L.M., Oliveira, R.G., 2017. Programa Geologia do Brasil: Áreas kimberlíticas e diamantíferas do Estado da Bahia. Brasília: CPRM. Série Pedras Preciosas, 13, 29 p.
- Neves, B.B.B., Sá, J.M.de, Nilson, A.A., Botelho, N.F., 1995. A Tafrogênese Estateriana nos blocos paleoproterozoicos da América do Sul e processos subsequentes. *Geonomos*, 3(2), 1–21.
- Nolasco, M.C., Macedo, A., 2005. Registros geológicos garimpeiros a diamantes – chaves de identificação de cicatrizes erosivas e depósitos tecnogênicos. *Proceedings of the 10th Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Guarapari*, 1–7.
- Nolasco, M.C., Medeiros, R.A., Oliveira, A.M., 2001. Depósitos diamantíferos garimpáveis das lavras diamantinas, BA: A geologia do olhar garimpeiro. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(4), 457–470.
- Nolasco, M.C., Silvestre, P., Torlay, R., Rochas, A.J.D., 2017. Patrimônio garimpeiro: Memória do diamante. In: Pereira, R.G.F. de A., Rocha, A.J.D., Pedreira, A.J. (Eds.) *Geoparque Serra do Sincorá (BA) – Proposta. SGB/CPRM. Anexo II*, 30 p.
- Onac, B.P., 2019. Caves discovered by mining activities and mined caves. In: Ponta, G.M.L., Onac, B.P. (Eds.), *Cave and karst system of Romania*, Springer, Cham, p. 475–483. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-90747-5>
- Pagliara, A., De Waele, J., Forti, P., Galli, E., Rossi, A., 2010. Speleothems and speleogenesis of the hypogenic Santa Barbara cave system (South-West Sardinia, Italy). *Acta Carsologica*, 39(3), 551–564.
- Palmer, A.N., 1991. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103, 1–21.
- Parra, R., Pereira, R.G.F.A., Purificação, C.G.C., 2023. Caves, karst features and speleological heritage in Chapada Diamantina, Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 24(4), e2402. <https://doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v24i4.2402>
- Pedreira, A.J., 1994. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia: Sedimentologia, estratigrafia e tectônica. Unpublished PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 174 p.
- Pedreira, A.J., 1997. Sistemas deposicionais da Chapada Diamantina centro-oriental, Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, 27(3), 229–240.
- Pedreira, A.J., Margalho, R.S.F.X.M., 1990. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Carta geológica, carta metalogenético/previsional: Escala 1:100.000 (Folha Mucugê SD.24-V-C-II). Estado da Bahia. Brasília, DNPM/CPRM, 112 p.
- Pereira, G.A., 1937. Memória histórica e descritiva do Município de Andaraí. Bahia: Imprensa Oficial do Estado, 39 p.
- Pereira, R.S., 2007. Cráton do São Francisco, kimberlitos e diamantes. Unpublished PhD Thesis, Universidade de Brasília, 104 p.
- Pereira, R.G.F. de A., 2010. Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia-Brasil). Unpublished PhD Thesis, Universidade do Minho, 295 p.
- Pimentel, S.G.C., 2014. O diamante é o pilho da Terra: Relações socioambientais no garimpo de draga da Chapada Diamantina. Unpublished MSc Dissertation. Universidade Estadual de Feira de Santana. 245 p.
- Pontes, H.S., Fernandes, L.A., Melo, M.S., Guimarães, G.B., Massuqueto, L.L., 2022. Características litofaciológicas e aspectos genéticos de feições cársticas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha no município de Ponta Grossa (Paraná, Brasil). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(1). <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v23i1.2085>
- Quinif, Y., 1999. Fantômisation, cryptoaltération et altération sur roche nue, le triptyque de la karstification. *Etudes de géographie physique, Travaux - Supplement 18*. University of Provence, 159–164.

- Quinif, Y. 2010. Fantomes de roche et fantomisation. *Karstologia Mémoires*, 18, 1–184.
- Rabassa, J. 2014. Some concepts on Gondwana landscapes: Long-term landscape evolution, genesis, distribution and age. In: Rabassa, J., Ollier, C. (Eds.), *Gondwana landscapes in Southern America*. Springer Earth System Sciences. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-7702-6\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7702-6_2)
- Ribeiro, L.F.B., Cruz, F.R.S., Ribeiro, M.C.S., Godoy, D.F., 2005. Origem e controle estrutural e estratigráfico das cavernas, tocas, abrigos de Ipeúna e Itirapina – SP. *Proceedings of the 28th Congresso Brasileiro de Espeleologia*, Campinas, 205–211.
- Rodet, J., 1996. Une nouvelle organisation géométrique du drainage karstique des craies: Le labyrinthe d'altération, l'exemple de la grotte de la Mansionnière (Bellou-sur-Huisne, Orne, France). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 322(12), 1039–1045.
- Rodrigues, D.P., Nolasco, M.C., Jesus, T.B., 2011. Geoprocessamento aplicado ao estudo da análise morfométrica: O caso da microbacia do Rio Coisa Boa – Igatu – Chapada Diamantina – Ba. *Proceedings of the 15th Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Curitiba, 3947–3954.
- Russ, B.R., 2012. Avaliação do potencial do uso educacional da Gleba Manga do Céu. Unpublished MSc. Dissertation, Universidade Estadual de Feira de Santana, 136 p.
- Russ, B.R., Nolasco, M.C., 2012. Revelando a geodiversidade através da educação ambiental: Percepção de estudantes sobre o Geossítio Manga do Céu. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, 35(1), 271–280. [https://doi.org/10.11137/2012\\_1\\_271\\_280](https://doi.org/10.11137/2012_1_271_280)
- Sampaio, D.R., Costa, E.D.A., Araújo Neto, M.C., 1994. Diamantes e carbonados do alto Rio Paraguaçu: geologia e potencialidade econômica. *Série Arquivos Abertos*, CBPM, Salvador, 24 p.
- Santana, A., Chemale, F., Sherer, C., Guadagnin, F., Pereira, C., Santos, J.O.S., 2021. Paleogeographic constraints on source area and depositional systems in the Neoproterozoic Irecê Basin, São Francisco Craton. *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103330. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103330>
- Santos, J.S., Leite, C.M.M., Magalhães, A.J.C., 2012. Análise cinemática e dinâmica das estruturas das formações Tombador e Açuruá na porção sul da Serra do Sincorá, nos arredores das cidades de Barra da Estiva e Ibicoara/Chapada Diamantina, Bahia. *Proceedings of the 46° Congresso Brasileiro de Geologia*, Santos.
- Santos, L.T.S.O., Vasconcelos, M.P., Rodrigues, D.P., Nolasco, M.C., Jesus, T.B., 2010. Consequências da atividade garimpeira de diamante na Bacia do rio Coisa Boa, Vila de Igatu – Andaraí – BA. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, 10(2), 1–11.
- Sarmiento, J.C., 1731. A letter from Jacob de Castro Sarmiento, M.D. and F.R.S., to Cromwell Mortimer, M.D. and Sec. R.S., concerning diamonds found in Brazil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 37, 199–201.
- Sauro, F., 2014. Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone: Evidence of the arenisation process. *Geomorphology*, 226, 106–123. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.033>
- Schobbenhaus, C., 1996. As tafrogêneses superpostas Espinhaço e Santo Onofre, Estado da Bahia: Revisão e novas propostas. *Revista Brasileira de Geociências*, 26, 265–276.
- SEI, 2023. Mapa de tipologia climática Koppen & Geiger – Estado da Bahia. Scale 1:6.500.000. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, Salvador, Bahia.
- Silva, M.B., Maia, R.P., 2024. Aspectos morfoestruturais do carste em arenitos no NE brasileiro: Exemplo da Serra da Capivara – PI. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 25(1), e2392. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v25i1.2392>
- Simons, J.W., 1998. Guano mining in Kenyan lava tunnel caves. *International Journal of Speleology*, 27(1), 33–51. <https://digitalcommons.usf.edu/ij/s/vol27/iss1/4>
- Souza, A.S., 2017. Estudo petrográfico e petrológico da Formação Tombador, Mesoproterozoico da Chapada Diamantina, Bahia. Unpublished MSc. Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 86 p.
- Souza, T., Auler, A., 2015. Cavernas em mármore. In: Auler, A., Alt, L., Moura, V., Leão, M. (Eds.) *Cavernas da Serra do Espinhaço Meridional. Carste Ciência e Meio Ambiente*, Belo Horizonte, p. 71–105.
- Souza, J.D., Kosin, M., Melo, R.C.; Santos, R.A., Teixeira, L.R., Sampaio, A.R., Guimarães, J.T., Vieira Bento, R., Borges, V.P., Martins, A.A.M., Arcanjo, J.B., Loureiro, H.S.C., Angelim, L.A.A., 2003. Geological Map of the State of Bahia. Scale 1: 1.000.000. CPRM, Salvador.
- Spix, J.B., Martius, C.F.P., 1824. *Travels in Brazil, in the years 1817-1820*. London: Longman, Hurst, Rees, Orme, Brown, and Green, Vol. I and II.
- Svisero, D.P., 1995. Distribution and origin of diamonds in Brazil: An overview. *Journal of Geodynamics*, 20(4), 493–514. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00017-4](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00017-4)
- Svisero, D.P., Shigley, J.E., Weldon, R., 2017. Brazilian diamonds: A historical and recent perspective. *Gems & Gemology*, 53(1), 2–32.
- Varajão, A.D., Gomes, N.S., 1997. Petrological significance of illitic clays in Proterozoic sandstones of the Tombador Formation, Chapada Diamantina, Brazil. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 3–6, 767–778.
- Wray, R.A.L., Sauro, F., 2017. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews*, 171, 520–557. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.008>



# ANAIS do 37º Congresso Brasileiro de Espeleologia

## Curitiba - Paraná, 26 a 29 de julho de 2023



O artigo a seguir é parte integrante dos Anais do 37º Congresso Brasileiro de Espeleologia, disponível gratuitamente em [www.cavernas.org.br](http://www.cavernas.org.br).

Sugerimos a seguinte citação para este artigo:

PARRA, R.; PEREIRA, R. G. F. A.; VIEIRA, L. F.. Carste siliciclástico de Igatu, Chapada Diamantina (BA): panorama geral. In: MISE, K. M.; GUIMARÃES, G. B.. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 37, 2023. Curitiba. *Anais...* Campinas: SBE, 2023. p.396-401. Disponível em: <[http://www.cavernas.org.br/anais37cbe/37cbe\\_396-401.pdf](http://www.cavernas.org.br/anais37cbe/37cbe_396-401.pdf)>. Acesso em: *data do acesso*.

Esta é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia.  
Consulte outras obras disponíveis em [www.cavernas.org.br](http://www.cavernas.org.br)

## CARSTE SILICICLÁSTICO DE IGATU, CHAPADA DIAMANTINA (BA): PANORAMA GERAL

*SILICICLASTIC KARST OF IGATU, CHAPADA DIAMANTINA (BA): A GENERAL VIEW*

Raphael PARRA (1,2), Ricardo Galeno Fraga de Araújo PEREIRA (1,2), Leonardo Fortes VIEIRA (2)

(1) Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGGeo), Instituto de Geociências, UFBA

(2) Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA) / UFBA

Contatos: [raphaelparra95@gmail.com](mailto:raphaelparra95@gmail.com); [fraga.pereira@ufba.br](mailto:fraga.pereira@ufba.br).

### Resumo

A Vila de Igatu, no município de Andaraí, Chapada Diamantina (BA), abriga um patrimônio espeleológico singular e ainda pouco conhecido, sob a perspectiva das geociências. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados iniciais do projeto de caracterização geológica dos sistemas cársticos siliciclásticos da Formação Tombador, na Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa. Foi realizada campanha de campo, visando o reconhecimento da área de estudo e identificação de cavernas. Identificou-se um relevo acidentado, marcado por fraturas profundas e padrão ruiforme. Foram reconhecidas 12 cavidades, algumas das quais já cadastradas e topografadas, para além de uma série de outras feições cársticas, tais como sumidouros, ressurgência, dolinas e vales cegos. As cavernas são, geralmente, associadas a cursos fluviais em baixas profundidades e exibem uma diversidade de espeleotemas. Na área, as grutas se apresentam impactadas pela ação antrópica, ocorrida durante a atividade de extração de diamante nos séculos XIX e XX.

**Palavras-Chave:** Cavernas, Geoespeleologia, Metarenito, Espeleotema, Serra do Sincorá.

### Abstract

*The Igatu Village, municipality of Andaraí, Chapada Diamantina (BA), houses an important speleological heritage that is relatively unknown from the perspective of geosciences. This work aims to present the initial results obtained in the geological characterization project of the siliciclastic karst systems of the Tombador Formation, in the Coisa Boa River Basin. A field campaign was carried out, aiming at recognizing the study area and identifying caves. A rugged relief was identified, marked by deep fractures and a ruiform pattern. 12 cavities were recognized, some of which were already registered and surveyed, in addition to a series of other karst features, such as sinkholes, resurgences, sinkholes and blind valleys. Caves are generally associated with river courses at low depths and exhibit a variety of speleothems. In the area, the caves are impacted by anthropic action, which occurred during the diamond extraction activity, in the 19th and 20th centuries.*

**Keywords:** Caves, Geospeleology, Metasandstone, Speleothem, Sincorá Ridge.

## 1. INTRODUÇÃO

A Chapada Diamantina é, em termos de cavernas e sistemas cársticos, uma das mais notórias regiões do estado da Bahia e provavelmente também do Brasil.

Nas últimas décadas muito se estudou e conheceu sobre cavidades desenvolvidas em rochas carbonáticas da Formação Salitre, datada do Neoproterozoico, sobretudo nos municípios de Iraquara, Campo Formoso e Morro do Chapéu. Por outro lado, relevos cársticos em outras litologias foram pouco explorados na região, resultando em uma lacuna de conhecimento nestas áreas.

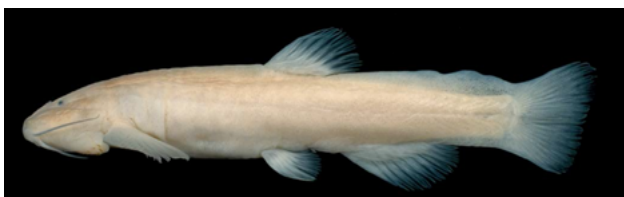
As rochas siliciclásticas que sustentam o relevo de serras e platôs da Chapada, por exemplo, apresentam um grande potencial espeleológico, ainda pouco reconhecido. A ocorrência de cavernas im-

portantes, tais como a Gruta do Lapão, no município de Lençóis e a Gruta do Castelo, no Vale do Pati, atestam este potencial (FERREIRA, 2009; SOUZA, 2019). Ambas se desenvolvem em metarenitos e/ou metaconglomerados da Formação Tombador, de idade Mesoproterozoica.

A região da Vila de Igatu, município de Andaraí, está neste contexto e é ainda menos conhecida sobre perspectiva das geociências. Surpreende tal desconhecimento, uma vez que a área abriga a Gruta das Torras, a oitava maior da América do Sul em rochas areníticas e quartzíticas (Auler; Sauro, 2019).

Por outro lado, felizmente, em termos de biodiversidade subterrânea a região já é amplamente estudada, sendo reconhecida como importante *hotspot* brasileiro (GALLÃO; BICHUETTE, 2015), contendo espécies troglóbias de escorpião (LOURENÇO

*et al.*, 2004), aranha (BERTANI *et al.*, 2013) e peixe (BICHUETTE *et al.*, 2008) (Figura 1). Devido a isso, algumas das cavernas já são registradas e topografadas.



**Figura 1:** *Glaphyropoma spinosum*, primeira espécie de peixe troglóbio descrita em cavernas em arenitos no país, encontrado na Gruta das Torras, Igatu (BICHUETTE *et al.*, 2008).

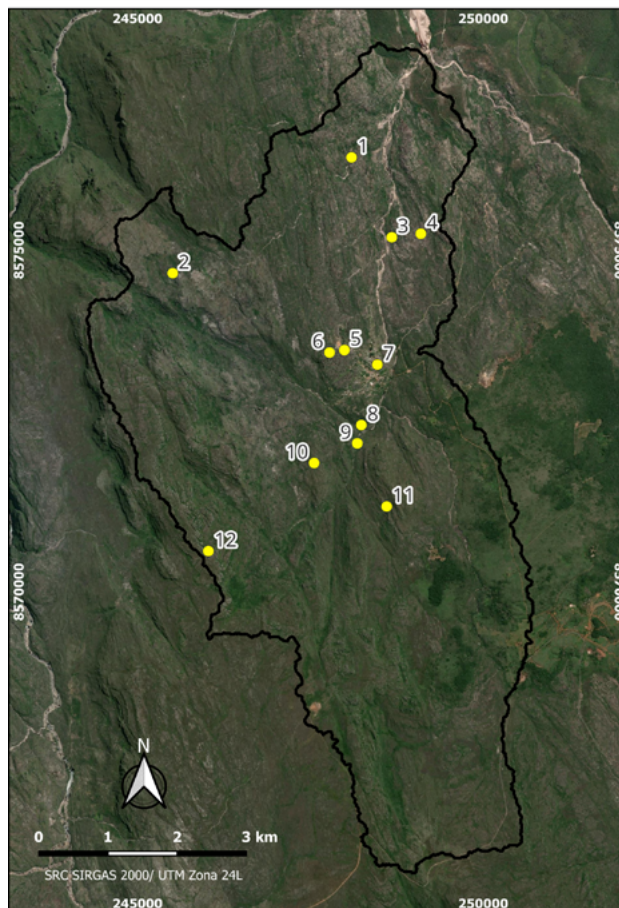
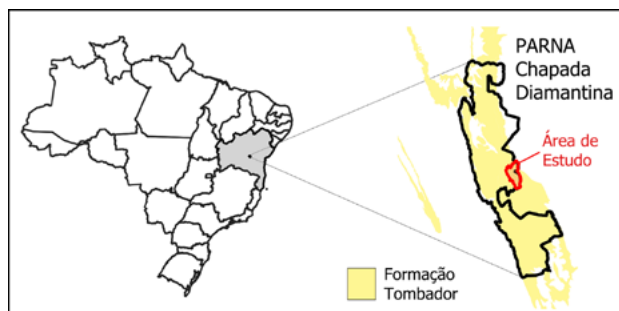
O presente trabalho integra um projeto que visa à caracterização geológica dos sistemas cársticos siliciclásticos da Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa, na região de Igatu, buscando compreender os processos de gênese e evolução deste relevo. Dessa forma, serão aqui apresentados os resultados parciais deste projeto, com destaque para a descrição das principais feições cársticas reconhecidas até o momento.

### Contextualização da Área de Estudo

A área de estudo compreende a região da Bacia do Rio Coisa Boa (Figura 2), um dos afluentes do Rio Paraguaçu. Esta bacia possui 43,8 km<sup>2</sup> de área e 43 km de perímetro. Suas altitudes mínima e máxima são de 326 m e 1.220 m, respectivamente. Assim, sua altitude média é de 773 m, enquanto sua amplitude altimétrica equivale a 894 m. Suas águas são ácidas (pH = 4-5) e fluem, em parte, por uma série de canais subterrâneos (AULER *et al.*, 2020).

Em termos geológicos, a região está inserida no domínio do Supergrupo Espinhaço, precisamente no Grupo Chapada Diamantina, de idade Mesoproterozoica. Compõem a área metarenitos com estruturas sedimentares bem preservadas, bem como metaconglomerados, pertencentes à Formação Tombador (BOMFIM; PEDREIRA, 1990). Estas rochas são afetadas por grandes lineamentos de orientação NW-SE, relacionados ao ciclo orogênico Brasileiro, que afetam estas unidades em deformações dúcteis, como anticlinais e sinclinais abertas e rúpteis, como falhas reversas (PEDREIRA, 1994).

Este arcabouço condiciona um relevo de morros e serras acidentado e com vertentes escarpadas, estando inserido nos terrenos da Serra do Sincorá (LIMA; NOLASCO, 2015). Estes são marcados por uma série de fendas e vales encaixados com forte controle estrutural, de orientação NW-SE, NNW-SSE, NNE-SSW, N-S e ENE-WSW.



**Figura 2:** Mapa de localização da área de estudo, com posição das cavernas cadastradas no CANIE. 1. Criminoso; 2. Lobo; 3. Parede Vermelha; 4. Torras; 5. Canal da Fumaça; 6. Brejo de Igatu; 7. Lava Pé; 8. Rio dos Pombos; 9. Ressurg. Morro de Alvo; 10. Trianglim; 11. Morro do Alvo; 12. Teté.

## 2. METODOLOGIA

Este trabalho contou com uma revisão bibliográfica acerca de carste em rochas siliciclásticas, bem como de publicações referentes à área de estudo em relação ao meio físico, biótico e socioeconômico.

Foram empregadas ferramentas de SIG para o desenvolvimento da cartografia da área, incluindo a elaboração de mapas topográfico, geológico, hipsométrico e hidrográfico.

Além disso, foi realizada campanha de campo com objetivo de reconhecimento das cavernas já cadastradas.

das e identificação de novas cavidades. Descreveram-se os pontos de interesse com relação aos aspectos hídricos, litológicos, estruturais e morfológicos. Registro fotográfico foi realizado através de câmera manual e VANT.

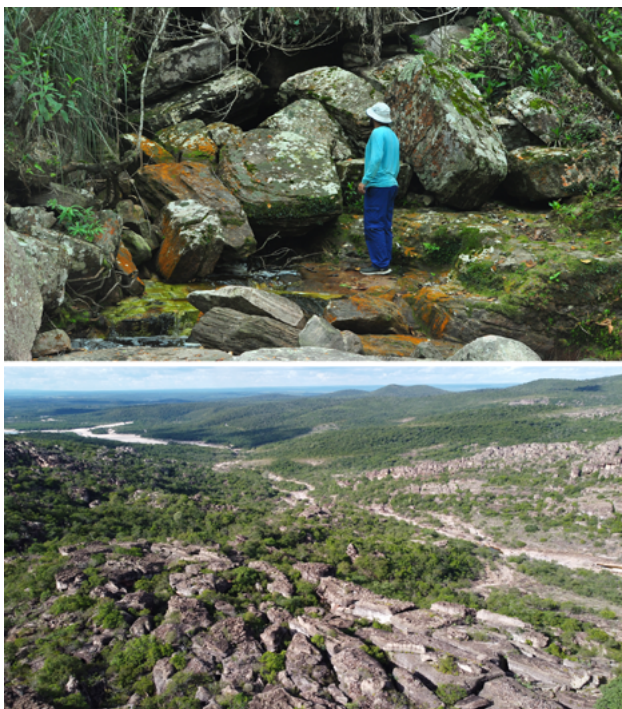
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 O Relevo Cárstico

A Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa é caracterizada pela presença de uma série de feições cársticas, tais como sumidouros e ressurgências (Figura 3A), dolinas, vales cegos e vales cársticos, além das próprias cavernas.

O alto grau de fraturamento, marcado por fendas verticais profundas, juntamente aos planos de acamamento sub-horizontais das rochas da Formação Tombador, condicionam os processos de erosão e, conseqüentemente, a evolução do relevo ruiforme (Figura 3B), típico de carste em rochas siliciclásticas (WRAY; SAURO, 2017).

As altas declividades da área resultam em um elevado gradiente hídrico, conferindo alta energia para o fluxo de água subterrânea, o que contribui para a formação de uma complexa rede de condutos. Dessa forma, tem-se a evolução do relevo do meio interno (ambiente subterrâneo), em direção ao meio externo.



**Figura 3:** A) Ressurgência de afluente do Rio dos Pombos. B) Relevo ruiforme da Bacia do Rio Coisa Boa, na região da Caverna do Criminoso.

#### 3.2 As Cavernas

Em se tratando de espeleologia, são reconhecidas atualmente 12 cavernas na área de estudo. Dentre elas, apenas nove constam registradas, atualmente, em bancos de dados espeleológicos, tais como CANIE e CNC. Parte destas cavidades foram alvo de campanhas de topografia entre os anos de 2007 e 2012, nas quais colaboraram os grupos de espeleologia: Meandros Espele Clube, Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas (GBPE), Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE), Grupo Pierre Martin de Espeleologia (GPME), e Instituto do Carste. (Tabela 1).

A Gruta das Torras, cuja topografia apontou um desenvolvimento de 3,6 km e desnível de 213 m, se destaca dentre as cavidades conhecidas pela sua extensão, já que ela figura na lista das dez maiores cavernas da América do Sul, em litologias siliciclásticas (AULER; SAURO, 2019). Com um padrão de morfologia muito linear, a cavidade constitui o canal de escoamento da microbacia de um afluente do Rio Coisa Boa.

Também bastante relevante, em termos espeleométricos, é a Gruta Parede Vermelha. Os mapeamentos anteriores alcançaram 386 m de desenvolvimento linear e 54 m de desnível. Porém, novas campanhas de topografia, estas ainda não finalizadas, identificaram grandes condutos que indicam que a cavidade deve aumentar, em extensão, de forma muito considerável.

As cavernas Morro do Alvo, Gruta do Criminoso, e Gruta do Lobo também foram, anteriormente, alvos de campanhas de topografia. Alcançam, em desenvolvimento linear, 160m, 202 m e 313 m, respectivamente. Entretanto, entre estas apenas a última teve seu mapeamento concluído.

Por sua vez, três outras cavernas não cadastradas foram identificadas durante a primeira campanha de campo deste projeto. São elas: Gruta do Trianglim, Gruta do Teté e Canal da Fumaça.

A Gruta do Trianglim está localizada a sudoeste do vilarejo, a uma altitude de 862 m. A cavidade, cujos processos de formação se encontram ativos, conta com um curso fluvial no seu interior, além de intenso deslocamento de blocos. O destaque desta caverna está na riqueza em ornamentação das paredes, teto e piso, grande parte revestidos por precipitações esbranquiçadas (Figura 4A), além de crostas, coraloides, concreções, estalactites e colunas, pouco comuns, nesta magnitude, para cavernas em rochas siliciclásticas.

**Tabela 1:** Lista de cavidades conhecidas na Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa, Igatu (BA).

Cavidade	Coord. X	Coord. Y	Cota	Registro	Topografia
Gr. do Criminoso	248097,0	8576358,0	513	CANIE	Incompleta
Gr. do Lobo	245510,9	8574663,3	889	CANIE	Completa
Gr. Parede Vermelha	248678,5	8575189,2	586	CANIE	Incompleta
Gr. das Torras	249097,7	8575241,1	610	CANIE/CNC	Completa
Gruna do Brejo de Igatu	247778,0	8573502,6	758	CANIE/CNC	Incompleta
Gr. Lava Pés	248468,6	8573324,6	709	CANIE	Inexistente
Gr. Rio dos Pombos	248237,8	8572441,0	716	CANIE	Inexistente
Ressurg. Morro de Alvo	248179,5	8572173,8	737	CANIE	Inexistente
Gr. Morro do Alvo	248603,8	8571249,3	886	CANIE	Incompleta
Gr. do Trianglim	247555,5	8571886,1	862	N/A	Inexistente
Gr. do Teté	246025,8	8570596,1	1140	N/A	Inexistente
Canal da Fumaça	247992,2	8573538,7	743	N/A	Incompleta

Por sua vez, o Canal da Fumaça, localizado em área de expansão urbana, a noroeste da Vila, é caracterizado por uma rede labiríntica de condutos estreitos e retificados. Desenvolve-se em fácies de rocha alterada e friável (arenizada/fantomizada) e possui em alguns de seus condutos pequenos cursos d'água, que correm sobre níveis de metarenitos frescos. Seu acesso é realizado por fendas profundas, que rasgam o solo e ameaçam, inclusive, as construções que ali se instalam.

### 3.3 As Heranças do Garimpo

Ao longo dos séculos XIX e XX, a região foi palco de importantes corridas de exploração de diamantes. A vila de Xique-Xique (hoje Igatu) foi um dos principais focos de garimpo, atividade que deixou marcas profundas ainda hoje visíveis (SANTOS *et al.*, 2010; NOLASCO *et al.*, 2017).

Um dos ambientes alvo de busca pelos diamantes eram as cavernas, que funcionam como armadilhas de sedimentos e, junto a eles, das pedras preciosas.

Garimpeiros removiam estes depósitos clásticos (popularmente conhecidos como “cascalho”) de dentro da cavidade, para lavar e separar as gemas. Este processo é visível na Gruta do Teté, onde algumas bancadas destes depósitos ainda estão preservadas (Figura 4B).

Em outros casos, os garimpeiros escavavam a própria rocha (alterada ou não) para abrir ou ampliar condutos, possibilitando a atividade mineira. O Canal da Fumaça é um exemplo onde as intervenções foram profundas, visíveis nas marcas de talhadeira nas paredes e no teto (Figura 5A), pilares de escoramento (Figura 5B) e represas de água.

Na linguagem garimpeira, as cavernas exploradas na extração do diamante eram denominadas “grunas” (NOLASCO *et al.*, 2001). Esta denomi-



**Figura 4:** A) Salão na Gruta do Trianglim, com revestimento das paredes e piso por material precipitado de coloração branca. Foto: Leda Zogbi. B) Conduto da Gruta do Teté, com bancadas laterais de depósitos siliciclásticos.

nação perdura no vocabulário da comunidade ainda hoje. Importante exemplar é a Gruna do Brejo, que foi um ponto de garimpo e hoje funciona como projeto de turismo e educação, divulgando e conscientizando os visitantes sobre a história da corrida pelo diamante em Igatu e região.



**Figura 5:** Gruta Canal da Fumaça. A) Conduto com marcas de talhadeira, indicando abertura ou alargamento; B) Pilar de escoramento, para evitar abatimento do teto e mangueira para captação de água. Fotos: Leda Zogbi.

#### 4. CONCLUSÕES

As pesquisas na região de Igatu têm se mostrado muito promissoras. Um dos desafios deste projeto é justamente a distinção entre os processos naturais de carstificação, daqueles processos antrópicos, resultantes da corrida pelo diamante, que tanto alteraram estes ambientes.

Além disso, houve dificuldade para localizar

#### REFERÊNCIAS

- AULER, A.S.; MEUS, P.; PESSOA, P. F. P. Water Tracing Experiments in Low-pH Quartzite Karst Water, Chapada Diamantina, Northeastern Brazil. In: Bertrand, C., Denimal, S., Steinmann, M., Renard, P. (Eds.), Eurokarst, 2018 - Advances in Karst Science, Springer. 2020. p. 183-191.
- AULER, A.S.; SAURO F. Quartzite and quartz sandstone caves of South America, in: White, W.B., Culver, D.C., Pipan, T. (Eds.), **Encyclopedia of Caves**. Academic Press, London, 2019. p. 850-860.
- BERTANI R.; BICHUETTE, M. E.; PEDROSO, D. R. *Tmesiphantes hypogeus* sp. nov. (Araneae, Theraphosidae), the first troglobitic tarantula from Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, v. 85, p. 235-243, 2013.

as cavidades. Um dos fatores relevantes é o relevo altamente acidentado, que dificulta o caminhamento pela área. As bocas estreitas, geralmente por entre blocos, em grande parte das cavernas, são difíceis de identificar. Já as trilhas de acesso às cavidades foram tomadas pela vegetação, devido à baixa circulação de pessoas, sobretudo durante a pandemia de Covid-19. Dessa forma, foi imprescindível o apoio de moradores locais, cujo conhecimento das grutas advém, também, da experiência em atividades de garimpo, comuns até o final do século XX.

Os trabalhos seguem em curso, tendo como próximos passos, dentre outras coisas, o cadastramento das novas cavidades nos bancos de dados de informações espeleológicas e a conclusão das topografias não finalizadas. Também serão coletadas amostras para análises laboratoriais que deverão indicar as características da composição mineral, textura, porosidade e permeabilidade, além das transformações do cimento e arcabouço a partir do processo da carstificação nos metarenitos da Formação Tombador.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV-ICMBio), ao Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e a Vale S.A., pelo apoio logístico e financeiro prestado ao projeto, através do Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica TCCE ICM-Bio/ Vale II, de 2022.

À Leda Zogbi, Rodrigo Severo e Renata de Andrade, pela imensa contribuição nos trabalhos de topografia das cavernas e à Oli Miranda, pelos registros audiovisuais da primeira campanha de campo do projeto.

Por fim, aos moradores de Igatu, pelo acolhimento e apoio, sobretudo na figura de Chiquinho, Adenilson, Badega, Guina, Rafael, Luara, Dona Áurea, Dona Lita e Conceição.

- BICHUETTE, M. E.; de PINNA, M. C. C.; TRAJANO, E. A new species of Glaphyropoma: the first subterranean copionodontine catfish and the first occurrence of opercular odontodes in the subfamily (Siluriformes: Trichomycteridae). **Neotropical Ichthyology**, v. 6, n.3, p. 301-306, 2008.
- BOMFIM, L. F. C.; PEDREIRA, A. J. F. Lençóis: Folha SD.24-V-A-V, Estado da Bahia, Texto Explicativo. Brasília, DNPM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (Convênio DNPM-CPRM), 1990.
- FERREIRA, C. F. Levantamento espeleológico e considerações relativas ao manejo do patrimônio espeleológico em unidades de conservação federais. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 30, 2009. Montes Claros. **Anais**. SBE, 2009. p. 69-75.
- GALLÃO, J. E.; BICHUETTE, M. E. Taxonomic distinctness and conservation of a new high biodiversity subterranean área in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciência**, v. 87, n. 1, p. 209-217, 2015.
- LIMA, C. C. U.; NOLASCO, M. C. Chapada Diamantina: a remarkable landscape dominated by mountains and plateaus. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; DOS SANTOS, L. J. C. (Eds) Landscape and Landforms of Brazil. Springer, New York, 2015, p. 211-220.
- LOURENÇO, W. R.; BAPTISTA, R. L.; GIUPPONI, A. P. L. Troglotic Scorpions: a new genus and species from Brazil. **C R Biol**, 327, p. 1151-1156, 2004.
- NOLASCO, M. C.; MEDEIROS, R. A.; OLIVEIRA, A. M. Depósitos Diamantíferos Garimpáveis das Lavras Diamantinas, BA: A Geologia do Olhar Garimpeiro. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 4, p. 457-470, 2001.
- NOLASCO, M. C.; SILVESTRE, P.; TORLAY, R.; ROCHA, A. J. D. Patrimônio Garimpeiro – Memória do Diamante. In: PEREIRA, R. G. F. A.; ROCHA, A. J. D.; PEDREIRA, A. J. **Geoparque Serra do Sincorá (BA): Proposta**, 2017. CPRM. Anexo III.
- PEDREIRA, A. J. O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina Centro-Oriental, Bahia: Sedimentologia, Estratigrafia e Tectônica. Tese de Doutorado em Geotectônica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- SANTOS, L. T. S. de O.; VASCONCELOS, M. P.; RODRIGUES, D. da P.; NOLASCO, M. C.; DE JESUS, T. B. Consequências da atividade garimpeira de diamante na Bacia do Rio Coisa Boa, Vila de Igatu – Andaraí – BA. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 10, n. 2, p. 1-11, 2010.
- SOUZA, C. E. F. Caracterização geológica e topografia espeleológica da gruta do castelo, Vale do Pati, Chapada Diamantina (BA). 2019. Trabalho final de graduação em geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2019.
- WRAY, R. A. L.; SAURO, F. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites, **Earth Science Reviews** vol. 171, p. 520 -558, 2017.

# Silicilastic cave or diamond mine? The case of Canal da Fumaça, Igatu Village, Chapada Diamantina - Bahia, Brazil

Raphael Parra (1), Ricardo Pereira (2), Leonardo Vieira (3), Rubson Maia (4)

(1) Geosciences Institute, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil, raphaelparra95@gmail.com

(2) Geosciences Institute, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil, fraga.pereira@ufba.br

(3) Geosciences Institute, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil, lefortesvieira@hotmail.com

(4) Geography Department, Federal University of Ceará, Fortaleza, Ceará, Brazil, rubsonpinheiro@yahoo.com.br

## Abstract

The Igatu Village is a remanescent of the diamond mining period that covered the Chapada Diamantina, center of Bahia state, northeast of Brazil, during the XIX and XX centuries. Caves and other geological features, developed in Mesoproterozoic siliciclastic rocks, acted as traps for diamond-bearing sediments and, therefore, were severely impacted by mine activity. The Canal da Fumaça Cave, probably the first and richest mine in Igatu, was so modified that raises the doubt: is it trully a cave or an artificial diamond mine? Aiming to answer this question, we developed speleological and geological analysis, in order to recognize natural and anthropogenic factor that may have influenced the system development.

## Résumé

A Vila de Igatu é remanescente do período de mineração de diamantes que recobriu a Chapada Diamantina, região central do estado da Bahia, nordeste do Brasil, durante os séculos XIX e XX. Cavernas e outras feições geológicas, desenvolvidas em rochas siliciclasticas mesoproterozoicas, agiram como armadilhas para os sedimentos diamantíferos e, assim, foram severamente impactadas pela atividade mineira. O Canal da Fumaça, possivelmente o primeiro e mais rico garimpo em Igatu, foi tão modificado que levanta a dúvida: se trata realmente de uma caverna ou de uma mina artificial de diamante? Para responder a essa pergunta, foram desenvolvidas análises espeleológicas e geológicas, visando reconhecer os fatores naturais e antropogênicos que podem ter influenciado no desenvolvimento desse sistema.

## 1. Introduction

The diamond rush in Chapada Diamantina (Bahia, Brazil) during the XIX and XX centuries, attracted thousands of people in search for wealth, leading to a populational boom followed by profound social and ambiental issues. The Igatu Village, at the east part, emerged during this period and, today, preserves the building and living history of the mining era.

The Canal da Fumaça was the richest and, possibly, the first mine site in Igatu (PEREIRA, 1937). Together with eleven other cavities (according to national databases, such as the CANIE and CNC), it composes the knowed subterranean heritage of Igatu. Significant cave occurrences were recognized in the last years, involving one of the longest caves of South America in siliciclastic lithologies (AULER & SAURO, 2019), and other systems with a great diversity of chemical and clastic deposits (PARRA et al., 2023a, 2023b). The rich subterranean biodiversity is also highlighted and the area is considered a biodiversity's hotspot (GALLÃO, BICHUETTE, 2015).

This karst features are hosted in Mesoproterozoic rocks of Tom-

bador Formation, Chapada Diamantina Group. They are constituted by metasandstones and metaconglomerates, mainly (BONFIM & PEDREIRA, 1990; PEDREIRA, 1994). Those resistant lithologies result in a mountainous relief, knowed as Sincorá Ridge (LIMA & NOLASCO, 2015).

Diamond deposits come from the conglomerates erosion, whose sandy to pebbly sediments are deposited as colluvium and alluvium, often filling fractures or "channels", as called by miners (NOLASCO et al., 2001), and in some cases, inside the caves.

Due to it, caves were significant targets to miners prospect, leading to heavily mischaracterization of this environments. In this context, the Canal da Fumaça was one of the most affected cavities, raising doubts even whether it is a natural cave, or an artificial mine. In order to answer this question, this study introduces geological and speleological data, aiming to identify the main natural or anthropogenic processes that led to its development.

## 2. Materials and methods

Work development involved field campaigns and laboratory analysis. Cave survey and geological assesment were carried out. Morphological aspects were described inside the cave and surroundings, looking for identify and diferentiate natural features, crated by karst processes, from those artificials, resulted of human impact during mining activity.

Host rock and clastic deposits were described, searching for structural, lithological, and stratigraphic guidances of cave development. Structural measurements of fractures and bedding planes were carried, following strike-dip notation.

Fresh and weathered rock were collected (samples A34, A35, A36, A37,

A38, and A40) and sent to laboratory analysis. Thin and polished sections were prepared, aiming the microscopic assessment. Weathered samples were impregnated with a hardener resin and blue dye, allowing the observation of the porosity evolution at optical microscope. Furthermore,

polished and carbon-metalized sections were described at scanning electronic microscope (SEM), equipped with a detector for energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). Whole rock chemical compositions – mayor and minor elements – were obtained by X-ray fluorescence (XRF).

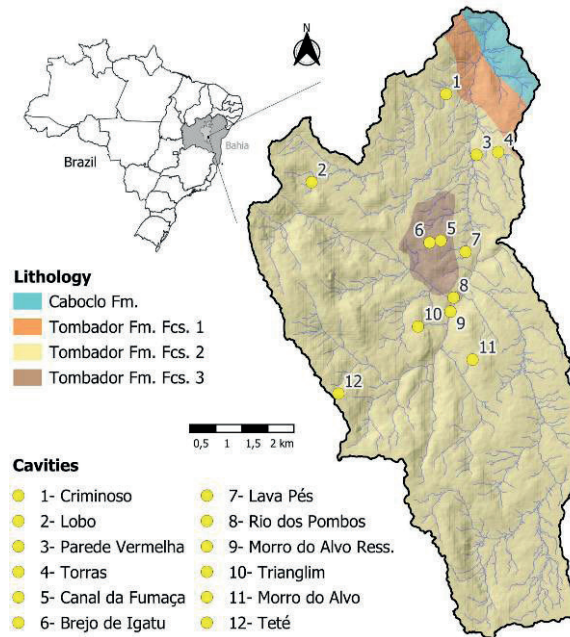


Figure 1: Lithological map of the Coisa Boa River basin and location of caves registered in Igatu Village.

### 3. Results

Cave survey covered, to date, 644m in linear development and 624m in horizontal projection, such as 29m in vertical range. However, mapping was not completed yet, and this values must increase, specially for secondary conduits. With the speleometry data, distance between extremes was measured as 172m and the overall slope calculated as 17% or 9.6°, with dip from SSW to NNE. Conduits are straight and main elongations follow the NNE-SSW, ENE-WSW and NNW-SSE directions. Passage connectivity is high (around 90 connections), resulting in a network pattern at floor plan map (Fig. 2A).

The structural measurement indicates a close correlation between cave morphology and structures (see diagrams in Fig. 2A). Subvertical fracture planes occur parallel both to the primary (NNE-SSW) and secondaries (ENE-WSW and NNW-SSE) orientations of cave elongation. This planes occur in some cases as dense fracturing zones with cataclastic aspect, guiding the block falling from the ceiling and contributing to larger galleries development (Fig. 2B). Sub-horizontal fractures were also identified, at times, filled by quartz veins.

At the surface relief, fracture planes mark fissures and channels that reach up to 15m in depth and 8m wide, creating a ruiniform relief

(Fig. 2C) and, in some cases, connecting the surface with underground conduits (Fig. 2D). Bedding planes show N dip trend, with gentle angles close to 10°, conducting water flow in that direction.

The predominant lithology of host rock is sandy, composed by quartz and rare feldspar grains at an advanced level of alteration. Textural maturity is low and the grains are surrounded by a phyllosilicate matrix (pyrophyllite and kaolinite), which occurs as fine-grained aggregates in the cave rock facies (sample A34, Fig. 3A) and as brownish masses of well-crystalized pyrophyllite in upper cave strata. Quartz grains often occur corroded at the boundaries and, in some cases, in the whole grain, where they appear replaced by pyrophyllite. XRF analysis indicate, to samples A36, A37 and A38, the predominance of silica (80-87%), and aluminum (12-18%), varying according to grain/matrix proportion (Table 1).

A clayey layer was also identified (sample A35), with a thickness varying from 10 to 20 cm (Fig. 2E). XRF pointed to higher amounts of aluminum and potassium, indicating the presence of clay minerals (e.g. kaolinite, illite). This stratum occurs bounding a lower fresh rock sandy facies (A34) and an upper weathered one (A36).

wt%	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	MnO
<b>A35</b>	70.01	24.75	3.73	0.68	0.40	0.00	0.10	0.12	0.06	0.00
<b>A36</b>	86.97	12.04	0.22	0.49	0.13	0.01	0.07	0.00	0.00	0.00
<b>A37</b>	86.98	12.51	0.01	0.24	0.11	< 0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
<b>A38</b>	80.97	18.33	0.02	0.48	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table 1: Whole-rock chemical compositions (mayor and minor elements) obtained by XRF analysis.

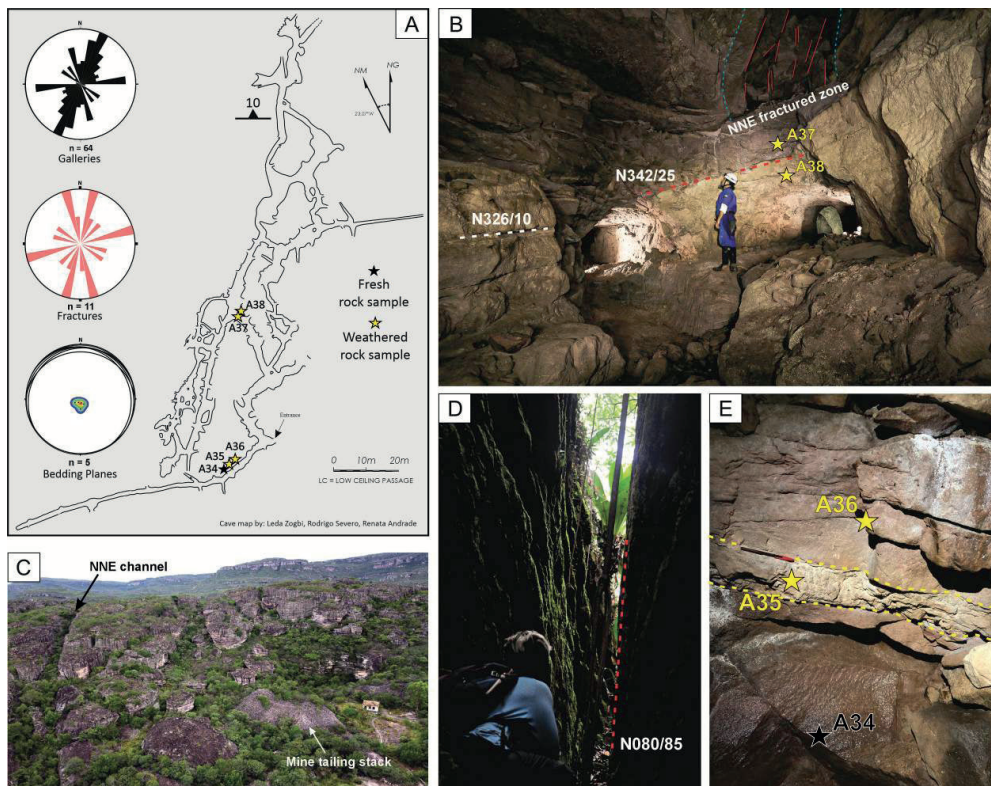
Fresh rocks are cohesive and low porous, while weathered rock assume friable aspect, has depositional structures partial or totally effaced, and the porosity increased comparing to fresh one. Thin section of sample A36 impregnated with hardener resin and blue dye, showed the intra and intergranular secondary porosity enhancing (Fig. 3B). Intergranular pores are spread through the matrix and, in some cases, at the quartz grain contacts or overgrowth cement.

SEM images highlight the corrosion and crack of quartz grains boundaries, such as the presence of pyrophyllite filling the voids between grains (Fig. 3C). Frequently, this pyrophyllite replaced by kaolinite with booklet pattern (Fig. 3D).

Clastic deposits are rarely preserved inside the cavity. They cons-

titute coarse-grained sediments, with pebble levels and discordances with the host rock, in some cases preserving the paleoconduit morphologies (Fig. 4A).

Cave passages and galleries morphology varies from natural to anthropogenic origin, predominanting the artificial ones (Fig. 4B). The floor is smoothed, possibly due to high energy floods wear, although often carved by a linear perennial water flow. On the other hand, passages in weathered and friable rock seems to be excavated, sometimes in a low arch format and, in other times, rectified from fractures and bedding planes (Fig. 4C). Fresh rock were also impacted, with marks of gunpowder detonations (Fig. 4D). Stone buildings, walls and pillars are present all over the cavity.



**Figure 2:** A) Floor plan map of the Canal da Fumaça positioning the rock samples collected and rose diagrams of galleries, fractures and bedding dip direction. B) Largest gallery of the cavity, where subvertical fractures planes guide the block falling. C) Ruiniform relief above the cavity. D) Deep fissures (channels) that connect surface to underground. E) Clay layer limiting upper altered and lower fresh metasandstone strata. Stars represents the rock samples collected, yellow for weathered rock and black for fresh rock.

## 4. Discussion

The correlation between structures measured in the field and the elongation direction of the cave conduits suggests the structural as a important factor guiding its development. Subvertical fractures planes were recognized setting the water percolation and block falling, evidencing that they act as weathering and mechanical erosion fronts, simililar with described by MELO et al. (2007) and SAURO (2014).

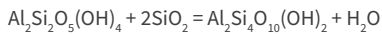
As the meteoric waters infiltrate mainly through this planes, minerals are more exposed to chemical weathering, leading to a higher rock alteration, which is notable by the friable rocks at the fractures walls.

Furthermore, bedding planes dip conducts the water flow to N, contributing to the cave N to NNE-SSW elongation. Water flows along the bedding dip tend to be fast (AULER et al., 2020), which increases the erosion potential and, thus, the enlargement of galleries and channels. Similarity between bedding inclination (~10°) and overall calculated cave slope (9,6°) reinforce this correlation.

Lithology was also identified as a guiding factor for the cave formation. The presence of the clayey layer limiting an upper altered sandy facies from a lower unweathered one (Fig. 2E), suggests that this impermeable stratum could play a sealant role, holding the percolation of meteoric water and, thus, retaining weathering in superficial levels.

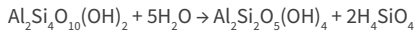
In turn, contrast in matrix crystallization degree can also contribute to limit stratigraphic development of the cave. Low-crystalline pyrophyllite of the cave facies (A34) are more susceptible to weathering in comparison to well crystallized pyrophyllite of cave upper strata (A40).

Petrographic analysis demonstrated that the occurrence of pyrophyllite is due to the regional anchi-metamorphism that affected the east Chapada Diamantina (VARAJÃO & GOMES, 1997; BATTILANI et al., 1999; SOUZA, 2017). Therefore, lithology can be defined as metasandstone. Phyrophyllite formation is given by the anchi-metamorphism reaction of deposicional kaolinite and quartz, through the HEMLEY et al. (1980) equation:



This reaction explains the quartz corrosion and cracks (Fig. 3A and 3D). Although these features are not products of weathering processes, these minerals weakness sites increase the microporosity and act as starting points for chemical attack.

On the other hand, the pyrophyllite shows alteration stains, where neoformed kaolinite occurs, interpreted as a product of recent chemical weathering. Incongruent dissolution of pyrophyllite and neoformation of kaolinite is ruled by the hydroxylation-desilication reaction, described by HEMLEY et al. (1980) and HURST & KUNKLE (1985):

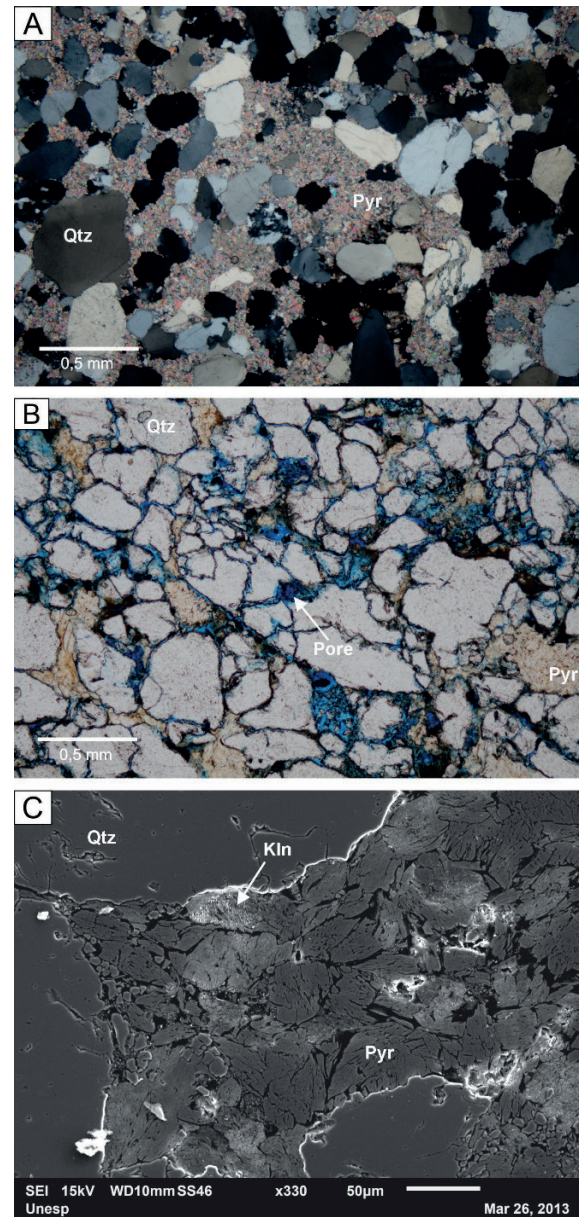


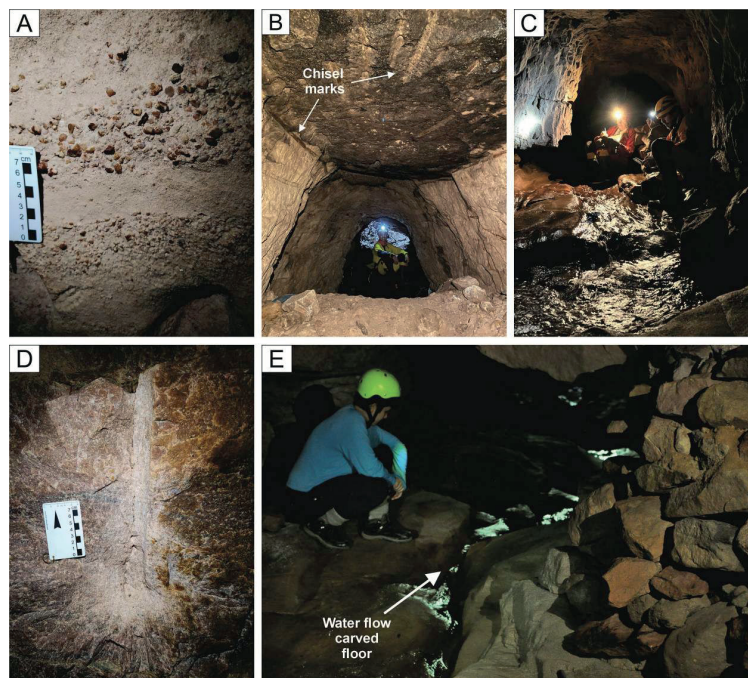
Thus, it suggests that weathering transformation that affect the rock occurs mainly on aluminous phyllosilicate matrix, instead of quartz grains. The acid water pH (4-5), common in the study area (AULER et al., 2020), corroborates with this hypothesis, once aluminosilicates have considerably higher solubility than quartz in acid medium.

This chemical attack over the metasandstone matrix dissociates the quartz grains and reduces the rock strength. This process can be classified as phantomization, and represents an important mechanism to siliciclastic rocks karstification (QUINIF, 2010; HARDT, 2011; WRAY & SAURO, 2017). With the cohesion decrease, grains are susceptible to mechanical erosion, which takes place through water flow, in piping process, leading to the conduit opening.

On the other hand, several anthropogenic modifications are notable in the cave interior. In search of diamonds, miners removed most of the clastic deposits, emptying the galleries once filled by them. In addition, due to friable aspect of the predominant rocks in the cave, miners were allowed to excavate, enlarging existing conduits and creating new ones. This process possibly obliterated natural features of the cave, such as speleogens and speleothems, and certainly increase considerably the conduits area and volume.

**Figure 3:** A) Thin section (at crossed nicols) of fresh sample A34, evidencing the immature texture, with the fine-grained phyllosilicate matrix surrounding poor sorted grains, some of them corroded by anchi-metamorphism reaction. B) Thin section (at parallel nicols) of weathered rock sample A36 impregnated with resin and dye, highlighting intra and intergranular porosity. Cracks and corrosions increase the microporosity, and the metamorphic reaction sites act as preferential weathering targets. C) SEM image from sample A40, showing pyrophyllite matrix and consumed quartz grains boundaries. Neoformed kaolinite with booklet pattern occurs replacing initial weathered pyrophyllite, increasing the porosity where the reaction is advanced.





**Figure 4:** A) Clastic diamond-bearing gravel explored by the miners. B) Excavated passage, with morphology varying from straight to arch. Note the chisel marks. C) Contrast between water eroded floor and excavated ceiling and walls. D) Gunpowder detonation in fresh rock. E) Water flow carved floor and stonewall built inside cave gallery.

## 5. Conclusion

This work aimed to present and discuss studies developed at the Canal da Fumaça Cave, a siliciclastic karst system hosted in metasandstone rocks of the Tombador Formation, which was strongly affected by diamond miner activity that ruled the Chapada Diamantina during 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries.

Natural processes of karstification were recognized, which are in consonance with those consolidated in literature. Structural and lithology are important factors guiding the cave development, conditioning the chemical weathering that leads to the metasandstone matrix dissolution, in a process of phantomization. Thus, mechanical piping removed loose grains and enlarged voids, creating conduits, channels and galleries. Later, fluvial sedimentation processes filled the cave conduits with diamond-rich deposits.

Contrasting with these natural processes, anthropogenic modifications by mine activity took place and left several marks in the cave system. Existing conduits were enlarged, new galleries were excavated in

weathered rocks, fresh rocks were detonated with gunpowder, and most of clastic sediments were removed. Main impact of the modifications were the increase of the conduits area and volume.

Thus, the Canal da Fumaça were originally a cave and then transformed in a mine. So, it can be classified as a mined cave, in consonance with the descriptions of Onac (2019).

This research can be a contribution both to karst system in non-carbonate rocks literature and to the study of mined caves, which are common in the Chapada Diamantina and other regions of the Espinhaço Ridge. Future studies at this system must evolve water analysis, aiming to better understand the mobility of elements. Furthermore, researches should be expanded to other cave systems in Igatu Village, providing a complete view of this speleological and historical region and also supporting advances in the implementation of the Serra do Sincorá Geopark Project as a UNESCO territory.

## Acknowledgments

This research was funded by a Term of Commitment and Speleological Compensation, signed between the ICMBio, through its speleological section, the CECAV, and the mining company Vale S.A. (TCCE ICMBio/Vale III, 2022). Financial and logistical management were mediated by the IABS. Master's and scientific initiation scholarships were funded, respectively, by the CAPES and the PRPPG-UFBA. We kindly thank those who supported the field campaigns: Leda Zogbi, Renata Andrade, Rodrigo

Severo, Fabio Dal Gallo, Cristina Macedo, Oli Marsiglia, Leo Linke, and Fabiano Ferreira. We are grateful to professors, technicians, and students who supported the execution of laboratory analyzes at the UNESPetro and the DeGeo-UNESP, the CIENAM-IQ, and Igeo-UFBA. We also thank LES/UFSCar for research support. Finally, we thank residents of the Igatu Village, who opened their homes and minds to us.

## References

AULER A.S., SAURO F. (2019) Quartzite and quartz sandstone caves of South America. In: White W.B., CULVER D.C., PIPAN T. (Eds.) Encyclopedia of Caves. Academic Press, London : 850-860.

AULER A.S., MEUS P., PESSOA, P.F.P. (2020) Water tracing experiments in low-pH quartzite karst water, Chapada Diamantina, Northeastern Brazil. In: BERTRAND C., DENIMAL S., STEINMANN M., RENAR P. (Eds.) Eurokarst

- 2018, Besançon. *Advances in Karst Science*. Springer, Cham : 183-191.
- BATTILANI G.A., VARAJÃO A.D., GOMES N.S. (1999) Metamorphic degree variation in Proterozoic sandstones of the Tombador Formation, Chapada Diamantina, Brazil. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 7-8 : 917-926.
- BONFIM L.F.C., PEDREIRA A.J. (1990) Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil : carta geológica, carta metalogenética/previsional. Scale 1 : 100.000 (Folha SD.24-V-A-V (Lençóis)) Estado da Bahia. DNPM/CPRM, Salvador, 130 p.
- GALLÃO J.E., BICHUETTE, M.E. Taxonomic distinctness and conservation of a new high biodiversity subterranean area in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciência*, 87(1) : 209-217.
- HARDT R. (2011) Da carstificação em arenitos. Aproximação com o suporte de geotecnologias. Unpublished PhD dissertation, Universidade Estadual Paulista – Université de Rouen, 224 p.
- HEMLEY J.J., MONTOYA J.W., MARINENKO J.W., LUCE R.W. (1980) Equilibria in the system Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and some general implication/mineralization processes. *Economic Geology* 75 : 210-228.
- HURST V.J., KUNKLE A.C. (1985) Dehydroxylation, rehydroxylation and stability of kaolinite. *Clays and Clay Minerals* 33(1) : 1-14.
- LIMA C.C.U., NOLASCO M.C. (2015) Chapada Diamantina : a remarkable landscape dominated by mountains and plateaus. In : VIEIRA B.C., SALGADO A.A.R., DOS SANTOS L.J.C. (Eds.) *Landscapes and Landforms of Brazil*. Springer, New York : 211-220.
- MELO M.S., GIANNINI P.C.F. (2007) Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32: 2149-2164.
- NOLASCO M.C., MEDEIROS R.A., OLIVEIRA A.M. (2001) Depósitos diamantíferos garimpáveis das lavras diamantinas, BA : A geologia do olhar garimpeiro. *Revista Brasileira de Geociências* 31(4) : 457-470.
- ONAC B.P. (2019) Caves discovered by mining activities and mined caves. In : PONTA G.M.L., ONAC B.P. (Eds.) *Cave and Karst Systems of Romania*, Springer : 475-483.
- PARRA R., PEREIRA R.G.F.A., PURIFICAÇÃO C.G.C. (2023a) Caves, karst features and speleological heritage in Chapada Diamantina, Bahia, Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 24(4).
- PARRA R., PEREIRA R.G.F.A., VIEIRA L.F. (2023b) Carste Siliciclástico de Igatu, Chapada Diamantina (BA) : Panorama Geral. In : *Proceedings of 37<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Espeleologia* : 396-401.
- PEDREIRA A.J. (1994) O Supergrupo Espinhaço na Chapada Diamantina Centro-Oriental, Bahia : sedimentologia, estratigrafia e tectônica. Unpublished PhD Dissertation, Universidade de São Paulo, 174 p.
- PEREIRA G.A. (1937) *Memória histórica e descritiva do Município de Andaraí*. Bahia : Imprensa Oficial do Estado, 39 p.
- QUINIF Y. (2010) Fantomes de roche et fantomisation. *Karstologia Mémoires* 18. 184 p.
- SAURO, F. (2014) Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone : Evidence of the arenisation process. *Geomorphology*, 226 : 106-123.
- SOUZA A.S. (2017) Estudo petrográfico e petrológico da Formação Tombador, Mesoproterozoico da Chapada Diamantina, Bahia, Unpublished Msc Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 86 p.
- VARAJÃO A.D., GOMES N.S. (1997) Petrological significance of illitic clays in Proterozoic sandstones of the Tombador Formation, Chapada Diamantina, Brazil. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Teil I*, 3-6 : 767-778.
- WRAY R.A.L., SAURO F. (2017) An update global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews*, 171 : 520-557.

# CARSTE SILICICLÁSTICO DA FORMAÇÃO TOMBADOR NA VILA DE IGATU, CHAPADA DIAMANTINA (BA) – CAVERNAS OU MINAS SUBTERRÂNEAS DE DIAMANTES?

*Parra, R.<sup>1,2</sup>; Pereira, R. G. F. de A.<sup>1,2</sup>; Vieira, L. F.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências/UFBA

<sup>2</sup>Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente - NEHMA

**RESUMO:** A formação de relevos cársticos em rochas siliciclásticas (arenitos/metarenitos/quartzitos) é fato já reconhecido e estudado pela ciência nas últimas décadas. Neste sentido, a região da Chapada Diamantina, no centro do Estado da Bahia, que é notória pela presença de amplos sistemas de cavernas instalados em rochas carbonáticas, atualmente vem ganhando visibilidade também para terrenos cársticos siliciclásticos, sobretudo na Serra do Sincorá. Esta unidade de relevo montanhoso, que alcança os 1.700 m, é sustentada pelos metarenitos e metaconglomerados da Formação Tombador (Grupo Chapada Diamantina, Supergrupo Espinhaço), de idade Mesoproterozoica. Nela, destacam-se a Gruta do Lapão, no município de Lençóis, com 1,6 km de desenvolvimento e a Gruta do Castelo, no Vale do Pati, município de Mucugê, com 383 m de desenvolvimento. Ambas são pontos de visita turística dentro do Parque Nacional da Chapada Diamantina e, por isso, têm maior visibilidade no meio acadêmico e no público em geral. Por sua vez, a Vila de Igatu, no município de Andaraí, abriga valiosos sistemas cársticos, com complexas redes de condutos subterrâneos e relevo ruiforme, ainda pouco estudados e compreendidos. Na área da Bacia Hidrográfica do Rio Coisa Boa, um dos afluentes do Rio Paraguaçu, são reconhecidas 12 cavernas, algumas das quais já cadastradas nos bancos de dados espeleológicos nacionais. Dentre elas, a mais relevante, em dimensões, é a Gruta das Torras, com 3,6 km de desenvolvimento, sendo considerada a segunda maior do Brasil e oitava maior do mundo em rochas siliciclásticas. Estão presentes também vales cegos, sumidouros e ressurgências, a exemplo do Sistema Rio dos Pombos, que percorre cerca de 250 m em subsuperfície. Depósitos químicos secundários variados são encontrados, sobretudo na Gruta do Trianglim, tais como: estalactites, coraloides, crostas, precipitações concêntricas e colunas de material argiloso do tipo “barro rojo”. Por sua vez, a Gruta do Teté exibe volumosos depósitos clásticos, registros da fase de preenchimento da cavidade, os quais eram alvo de exploração pelos garimpeiros de diamante nos séculos XIX e XX, sendo denominados, por estes, de “cascalhos”. A atividade mineira foi de tamanha intensidade que modificou toda a paisagem da área, incluindo as cavernas. Em alguns casos, torna-se um desafio discernir as feições e processos naturais das intervenções e impactos antrópicos. No entanto, avaliações iniciais permitem sugerir que os condutos subterrâneos se desenvolvam segundo os processos de arenização/fantomização, nos quais o intemperismo químico, incluindo a dissolução, atuam no cimento silicoso e/ou na matriz argilosa dos metarenitos da Formação Tombador. Estes processos são condicionados por planos de fraturas subverticais, de orientações predominantes N000, N010, N060, N125 e N330, bem como pelos planos sub-horizontais de acamamento, com direção predominante N280/10, que condicionam o fluxo de água superficial da bacia no sentido NNE. As próximas etapas de investigação consistem na caracterização detalhada da petrografia, mineralogia, composição química e porosidade da rocha em que se desenvolvem estes sistemas, identificando quais e como estes fatores contribuem para a existência deste relevo cárstico. Além disso, a área se investigada, posteriormente, sob a ótica do patrimônio geológico e mineiro.

**PALAVRAS-CHAVE:** GEOESPELEOLOGIA; METARENITOS; SERRA DO SINCORÁ