



ELEONORA TRAJANO  
MYLÈNE BERBERT-BORN  
HEROS AUGUSTO SANTOS LOBO



Memorial

# Importância do Patrimônio Espeleológico Brasileiro



## SOBRE A OBRA

Por que o carste e as cavernas são importantes? Esta é a questão central desta obra, que cumpre o duplo papel de informar e sensibilizar a sociedade brasileira acerca destes frágeis ecossistemas. Com conteúdo rico e acessível, estas páginas discutem questões que vão da morfogênese da paisagem à ocupação pré-histórica das cavernas, da dinâmica hidrológica desses peculiares aquíferos à colonização dos espaços subterrâneos por uma fauna muito especializada, a dos animais troglóbiontes. Embora seu conteúdo seja claramente técnico, este trabalho emerge em um momento em que o uso deste importante patrimônio começa a ser rediscutido dentro do Governo Federal. Apesar das inúmeras tentativas de desregulação do setor ambiental, o Brasil segue sendo um país de vanguarda no que diz respeito a proteção de suas riquezas naturais, e é nesta perspectiva, a de compatibilizar o uso e a conservação do carste e das cavernas brasileiras, que estes três grandes pesquisadores trazem suas contribuições.

Allan Silas Calux  
Sociedade Brasileira de Espeleologia

Eleonora Trajano  
Mylène Berbert-Born  
Heros Augusto Santos Lobo

Memorial

# Importância do Patrimônio Espeleológico Brasileiro



2024

## Capa



## Contracapa



1. Rio Peruaçu e claraboias na Gruta do Janelão, Itacarambi, Minas Gerais. Foto: Luciana Alt.
2. Helictite do salão Taquepa, Caverna de Santana, Iporanga, São Paulo. Foto: Allan Silas Calux.
3. Conduto com rio subterrâneo. Gruta do Éden, Arcos, Minas Gerais. Foto: Mylène Berbert-Born
4. Bagrinho troglóbico altamente especializado, gênero *Rhamdiopsis*, endêmico de caverna do norte da Bahia. Foto: Dante Fenoglio.
5. Pequeno gastrópode troglóbico de caverna do norte do Brasil. Foto: Dante Fenolio.



® Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE  
Gestão 2023-2025

Elizandra Goldoni Gomig - *Presidente*  
Tatiane Monteiro da Silva - *Vice-presidente*  
Kelly Sandra Ramos Santos Silva - *Primeira secretária*  
Cláudia de Cássia Pessoa - *Segundo secretário*  
Pâmela Lima do Carmo Saviato - *Primeira tesoureira*  
Therys Midori Sato - *Segunda tesoureira*

Projeto gráfico e editoração: Mylène Berbert-Born

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Trajano, Eleonora  
Memorial importância do patrimônio espeleológico brasileiro [livro eletrônico] / Eleonora Trajano, Mylène Berbert-Born, Heros Augusto Santos Lobo. -- Campinas, SP : Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2024.

PDF

Bibliografia.  
ISBN 978-65-994449-4-4

1. Cavernas - Brasil 2. Espeleologia 3. Meio ambiente - Conservação e Proteção I. Berbert-Born, Mylène. II. Lobo, Heros Augusto Santos. III. Título.

24-210640

CDD-551.4470981

### Índices para catálogo sistemático:

1. Brasil : Espeleologia 551.4470981  
Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

# Apresentação

A idéia deste Memorial surgiu em 2011, quando o então Deputado Federal Fábio Feldmann demandou um texto que pudesse esclarecer e sensibilizar políticos, governantes, promotores, jornalistas e repórteres, técnicos de órgãos governamentais, empresários e o público em geral, sobre a importância do patrimônio espeleológico brasileiro e a decorrente necessidade de sua conservação. O conteúdo deveria ser concebido com base em argumentos sólidos, racionais, científicos. A primeira versão foi um texto curto e focado principalmente em espeleobiologia, especialidade da primeira autora, que sentiu a necessidade de abranger outros campos do conhecimento, convidando os demais autores desta obra. O resultado foi um texto muito mais completo, abordando também aspectos do meio físico, a importância científica das cavernas com destaque para o conhecimento do passado climático do planeta, e ainda sobre o uso sustentável do carste e das cavernas na perspectiva da fragilidade, limitações e potencialidades desses ambientes.

É fundamental ressaltar que este não é um livro puramente acadêmico de espeleologia. Informações e conceitos são aqui oferecidos aos diferentes setores da sociedade com uma visão pragmática e fundamental sobre o patrimônio espeleológico sem, no entanto, esgotar os diversos temas que convergem para o estudo das cavernas e das áreas cársticas, que são os ambientes onde elas se desenvolvem. Uma bibliografia inicial é oferecida ao final do livro, para o aprofundamento em temas mais específicos.

Deixamos aqui registrados nossos profundos agradecimentos aos espeleólogos, pesquisadores, guias e mateiros que, ao longo de décadas de dedicação a um trabalho incansável, competente e abnegado, formaram o corpo de conhecimento que possibilitou a elaboração desta obra. Agradecemos também às agências de fomento à pesquisa, que viabilizaram recursos para as investigações de campo e laboratório. Somos igualmente gratos às associações espeleológicas, que dão o suporte essencial a esta que é, sempre e fundamentalmente, uma atividade de equipe. Por fim, agradecemos a todos que enriqueceram e embelezaram este livro com as fotos emprestadas às suas páginas, e ao amigo Allan Silas Calux, nosso maior cúmplice.

Dedicamos este Memorial a Michel Le Bret, Pierre Martin e Guy Collet, grandes propulsores da espeleologia brasileira.





Caverna Buenos IV, Núcleo Bulha D'água.  
Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira  
PETAR. Iporanga, SP.  
Foto: Daniel Menin

## Sumário

PRÓLOGO	6
INTRODUÇÃO	
Patrimônio espeleológico	10
CAVERNAS	
Paisagem e habitat	13
AMBIENTE CÁRSTICO	
Introdução ao meio físico	20
CARSTIFICAÇÃO	
A dissolução da rocha	22
ESPELEOGÊNESE	
A formação de cavernas	24
ESPELEOTEMAS	
Uma beleza à parte	31
PRESENTE E PASSADO	
Conteúdo abiótico das cavernas	38
Espeleoclima	45
TERRITÓRIOS CÁRSTICOS	
Fragilidade e vulnerabilidade	50
CAVERNAS E SERES HUMANOS	
Vivendo um ambiente especial	58
ECOSSISTEMAS SUBTERRÂNEOS	
Singularidades e fragilidades	68
Importância dos troglóbios	74
CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	84

# Prólogo

O meio subterrâneo e feições de superfície associadas distinguem-se por suas singularidades e fragilidades. As singularidades resultam em uma expressiva contribuição para a geo e biodiversidade do planeta, enquanto as fragilidades tornam esse importante ambiente extremamente vulnerável a impactos, tanto naturais como antrópicos. Por esses motivos, todos os componentes desse meio, incluindo habitats subterrâneos não restritos a cavernas em seu sentido antropocêntrico (espaços da sub-superfície acessíveis a humanos), feições geológicas subterrâneas e as epígeas a elas integradas, assim como todas as áreas de influência sobre esse ambiente, são prioridade para conservação em todo o mundo.

No Brasil, cavidades naturais subterrâneas, referidas genericamente como “cavernas”, assim como os sítios arqueológicos e pré-históricos associados, integram o elenco dos bens da União instituídos pela Constituição Federal de 1988 (art.20, inciso X). Assim sendo, o uso de cavernas, incluindo sua exploração econômica, as ações visando a sua conservação, o licenciamento de atividades que possam lhes causar danos e a compensação de eventuais perdas do patrimônio espeleológico seguem um conjunto de regulamentos envolvendo decretos presidenciais, resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), portarias e instruções normativas do Ministério do Meio Ambiente (MMA) e de órgãos públicos vinculados que compõem o Sistema Nacional do Meio Ambiente, o SISNAMA.

O atual arcabouço jurídico, baseado em uma classificação de cavernas de acordo com sua “relevância” (máxima, alta, média e baixa), é marcado por importantes falhas de lógica interna, conceituais e metodológicas, que comprometem os objetivos da Conservação – preservar amostras representativas da bio e geo diversidade, seus processos e padrões. Esse arcabouço peca pelo simplismo e antropocentrismo, reduzindo o foco a cavernas (no sentido humano, desprovido de real significado biológico e geológico), de modo a desvinculá-las de seu contexto geológico e ecossistêmico. Em decorrência desse problema central, outra grave falha normativa refere-se à frouxidão das exigências mínimas para estudos ambientais que sustentam a classificação do grau de relevância das cavernas, utilizada como base para decisões quanto ao uso de cavernas.

A falta de critérios científicos robustos compromete a confiabilidade de tais estudos e, conseqüentemente, da classificação em si. Não estão previstos testes de suficiência amostral espacial e temporal, subordinando esses

estudos ao tempo da economia de mercado, significativamente mais curto que o dos processos e ciclos naturais, os únicos que deveriam nortear os objetivos e metodologia desses estudos. Sob a perspectiva da temporalidade efetivamente praticada nos estudos espeleológicos, sua curtíssima abrangência obrigatória – um ciclo anual – acaba por admitir, por força de graves lapsos em informações tempo-dependentes, que uma eventual “ausência de evidências” para determinado aspecto potencialmente relevante seja tomada como “evidência da sua ausência”. Com essa falha basal, abre-se um cenário de classificações potencialmente precárias, que abrem caminho para perdas importantes da diversidade subterrânea brasileira e mundial.

Nessas bases de complexidade, relativa incerteza e gravames de imprecisão conceitual associam-se os critérios que instruem o processo de licenciamento ambiental quanto a vedações – cavernas de máxima relevância não podem sofrer impactos irreversíveis – e, onde mais residem as preocupações: quanto às possibilidades e regras de compensação dos danos causados a elementos de alta relevância do patrimônio espeleológico, irreparavelmente perdidos.

Diante do acima exposto, torna-se clara a existência de importantes lacunas no conhecimento espeleológico dos não-especialistas interessados na conservação do meio subterrâneo, sobretudo das autoridades responsáveis pela criação e implementação das normas que regulamentam seu uso.

A presente obra não tem cunho estritamente científico mas, baseada no atual estado-da-arte da espeleologia como campo de estudo do meio subterrâneo, pretende contribuir para o preenchimento dessas lacunas, com vistas a uma revisão total do atual arcabouço jurídico voltado não só à conservação desse ambiente de valor inestimável, como também, e principalmente, à elaboração de um programa nacional do patrimônio espeleológico, transparente e cientificamente robusto.

Gruta do Lago Azul (Monumento Natural  
Gruta do Lago Azul), Bonito, MS  
Foto: Daniel de Granville





# Introdução

## Patrimônio Espeleológico

Cavernas sempre habitaram o imaginário humano, remetendo ao mistério, ao misticismo e religião, ao mundo das sombras (como no mito da caverna, de Platão) e da morte (o Hades da mitologia Greco-romana). Bem mais recentemente, pelo menos há cinco séculos e no espírito da filosofia natural de Aristóteles e da observação factual de Averrois, cavernas passaram ao olhar do naturalista, preocupado em registrar fatos observáveis, mas sem perder o encantamento pelas singularidades desses sistemas naturais únicos.

Em função dessas singularidades, cavernas estão presentes nos principais campos de interesse humano: científico, místico-religioso, esportivo (de aventura), estético e, em decorrência dos três últimos, econômico - o espeleoturismo é importante fonte de renda para muitas comunidades.

Com o ingresso da observação factual e da experimentação no âmbito da Ciência, as cavernas passaram a ser compreendidas como componentes de um contexto físico e biológico muito mais amplo - o meio subterrâneo, ou hipógeo, em oposição ao meio superficial, ou epígeo. O meio subterrâneo compreende toda a rede de interstícios conectados em subsuperfície, preenchidos por água ou ar, abrangendo espaços milimétricos (poros, conjuntos de fissuras e canalículos) até condutos articulados com algumas dezenas de metros de diâmetro e quilômetros de extensão (cavernas). Tal rede pode ocorrer em diferentes tipos de rochas, como resultado da erosão e da dissolução do seu

conteúdo mineral. Mas ela é particularmente desenvolvida em rochas formadas por minerais carbonáticos, como a calcita e a dolomita, que são lentamente dissolvidos pela água da chuva e por outras soluções que percolam a rocha.

Os processos de dissolução carbonática também se manifestam na superfície, retratadas em formas de corrosão bem marcantes sobre a rocha exposta à atmosfera ou em contato com o solo úmido sobrejacente. As fissuras que se formam com a dissolução da rocha aumentam progressivamente a capacidade de infiltração (permeabilidade) da água, resultando numa hidrografia mal definida ou fragmentada à superfície, porém estruturada em canais subterrâneos de escoamento. Essa configuração e dinâmica favorecem a movimentação de materiais da superfície para dentro dos vazios subterrâneos. Na maioria das situações, o resultado é um relevo bastante irregular e complexo, com geoformas peculiares como torres de pedra, cânions, vales cegos e as dolinas, que são depressões circulares com importante função na convergência de água, sedimentos e nutrientes para o meio sub-terrâneo.

O **carste**, como chamado esse tipo relevo, é, portanto, um ambiente em que os compartimentos hipógeos (o endocarste) e epígeos (o exocarste) estão francamente conectados e integrados de modo especialmente dinâmico, comparativamente a outros tipos de ambientes. Essa condição o torna mais sensível e vulnerável, com requisitos diferenciados para a gestão do território. As cavernas devem ser sempre observadas nesse universo interdependente, dinâmico e vulnerável.

A despeito disso, a definição jurídica formal abrange apenas os componentes do meio subterrâneo acessíveis aos humanos. É um conceito essencialmente antropocêntrico, biologicamente artificial, à medida que organismos menores – que constituem a imensa maioria das espécies – ocupam diferentes conjuntos de espaços conforme seu tamanho e requerimentos biológicos. Cavernas são, no entanto, janelas que permitem o olhar humano direto para uma parte de um mundo muito maior, complexo e pobremente conhecido pelas dificuldades de estudo.

No Brasil, o reconhecimento da importância das cavernas está expresso em nossa carta maior, a Constituição Federal, que as coloca entre os Bens da União (artigo 20), além de integrar o patrimônio cultural quando compreendem sítios de valor histórico, paisagístico, arqueológico, paleontológico, ecológico e científico (art. 216).

As cavernas também são reconhecidas como Patrimônio Espeleológico nacional, definido como “*o conjunto de elementos bióticos e abióticos, socioeconômicos e histórico-culturais, subterrâneos ou superficiais, representados pelas cavidades naturais subterrâneas ou a estas associadas*”, conforme a Resolução nº 347/2004 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Esta concepção patrimonial de conjunto tem a pretensão de destacar uma associação de elementos típicos de determinada condição ambiental e social, e por isso

Cavernas são verdadeiras janelas para a compreensão do meio subterrâneo.  
Gruna Poço Mocambo, Santa Maria da Vitória, BA.  
Foto: Mylène Berbert-Born.

mesmo destacadamente especiais. Esse é um tratamento importante na medida que amplia o foco para os ecossistemas cársticos, reconhecendo a sua relevância ecológica, cultural e econômica.

Esses aspectos nem sempre são monetizáveis ou balizados pelo seu valor para os seres humanos, dado que sua importância é intrínseca para o sistema ambiental, cujo foco é voltado para as próprias cavernas e o ambiente em que estão inseridas. Neste contexto, o Patrimônio Espeleológico destaca-se por

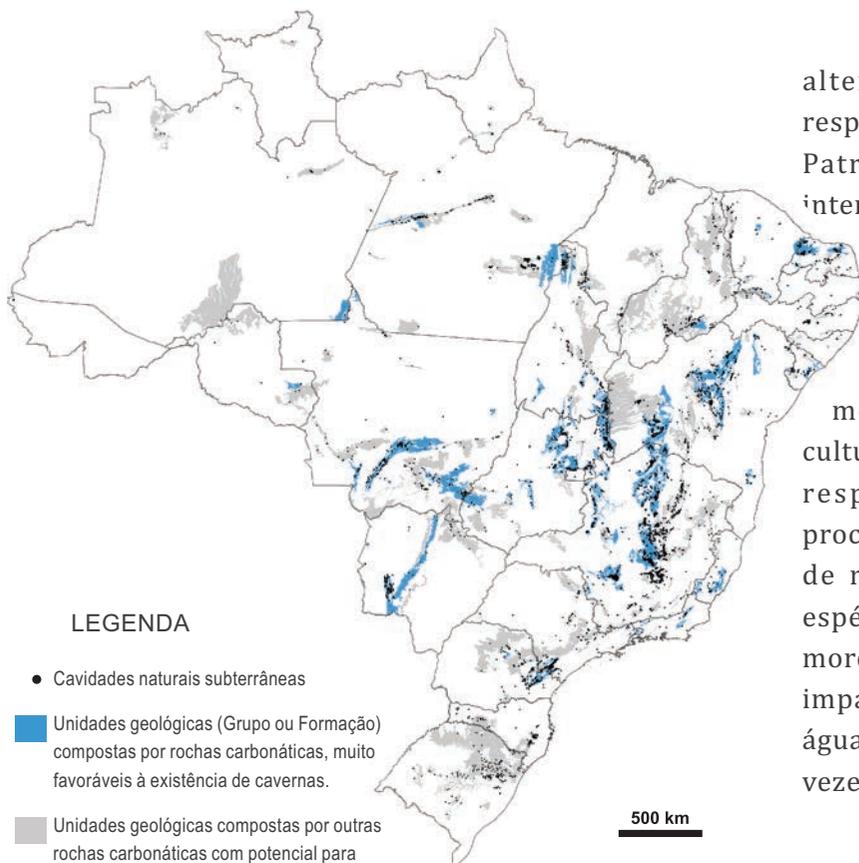


# Mapa do Patrimônio Espeleológico Brasileiro

sua importância científica, seja pela fonte de conhecimento básico e aplicações práticas, seja pelo teste de modelos em diversas áreas, incluindo cronobiologia, evolução, história humana, climas etc.

Por outro lado, a capacidade de destruição e alteração severa dos seres humanos suscita a responsabilidade sobre a preservação e proteção do Patrimônio Espeleológico. É nesse cenário, de interface com o modo de produção humano, que se encontram benefícios da conservação do patrimônio espeleológico para as sociedades humanas, os chamados “serviços ambientais”. Tratam-se de aspectos mensuráveis sob a ótica econômica, social ou cultural, traduzidos em elementos palpáveis de uso responsável das cavernas, seus elementos e processos. Alguns exemplos são o turismo, o controle de roedores e insetos, a polinização de várias espécies vegetais e a dispersão de sementes por morcegos, que auxiliam na recuperação de habitats impactados. Aquíferos subterrâneos são fonte de água potável para humanos e não-humanos, muitas vezes a única disponível na região.

A partir deste contexto inicial de reconhecimento da importância intrínseca e socioeconômica das cavernas e seu ambiente, apresentamos um detalhamento dos principais elementos e processos do patrimônio espeleológico, de forma a permitir o seu reconhecimento e valorização, não somente por especialistas e entusiastas do mundo subterrâneo, mas pela totalidade da sociedade.



## LEGENDA

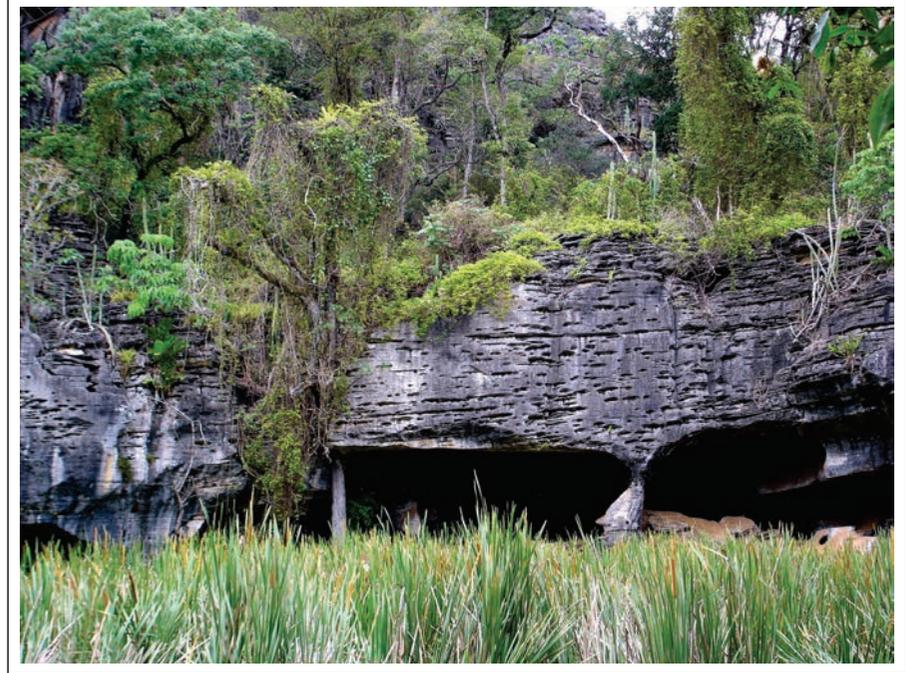
- Cavidades naturais subterrâneas
- Unidades geológicas (Grupo ou Formação) compostas por rochas carbonáticas, muito favoráveis à existência de cavernas.
- Unidades geológicas compostas por outras rochas carbonáticas com potencial para ocorrência de cavernas.

## Fontes:

- Base de Dados Geoespacializados de Cavidades Naturais Subterrâneas do CECAV, situação em 05/04/2022.
- Mapa das Regiões Cársticas do Brasil (CECAV, 2013), dados digitais manipulados.

*Arquivos geoespacializados manipulados do original obtido em 05/04/2022 a partir do sítio [www.icmbio.gov.br/cecav](http://www.icmbio.gov.br/cecav).*

Na paisagem cárstica há forte interação entre a superfície e o subterrâneo, por isso a sua abordagem deve ser sistêmica. Maciço Experiência da Jaguará, Matozinhos, MG.  
Foto: Mylène Berbert-Born



## Cavernas

### Paisagem e habitat

As rochas carbonáticas, principalmente os calcários, são as mais propícias ao desenvolvimento de extensas e volumosas redes de espaços subterrâneos. A maior caverna do mundo, Mammoth-Flint, EUA, soma mais de 640 km de condutos mapeados, e o maior desnível ultrapassa 2 km de profundidade, no Abismo Krubera, Georgia.

Mas habitats subterrâneos geo e biologicamente relevantes também podem se formar em outros tipos de rocha, como arenitos, quartzitos, granitos e litologias ferruginosas (formações ferríferas, lateritas), em gesso e até mesmo em gelo. Cavernas quartzíticas com centenas de metros e até quilômetros de extensão são relativamente frequentes no Brasil; em rochas ferríferas, costumam ocorrer densos conjuntos de

cavernas menores que retratam janelas de um habitat poroso muito desenvolvido. O meio subterrâneo em terrenos não cársticos inclui ainda habitats porosos em sedimentos inconsolidados, acessíveis através de poços artificiais, como por exemplo a região em torno do delta do Amazonas, onde são encontrados bagres únicos do gênero *Phreatobius*.

Todos esses ambientes de subsuperfície compartilham algumas características especiais, com destaque para o confinamento físico, clima particularizado, ausência permanente de luz e ainda a “fragmentação” - habitats subterrâneos separados por terrenos de rochas insolúveis que não apresentam redes de espaços interconectados.



Maciços e torres calcárias se destacam na paisagem cárstica. Dolinas (à direita no detalhe) são depressões fechadas circulares que direcionam a água da chuva para o meio subterrâneo. Regiões cársticas de São Desidério (grande), BA; Arcos (pequena, à esquerda) e Prudente de Moraes (pequena, à direita), MG. Fotos: Mylène Berbert-Born



A existência das cavernas e da paisagem cárstica se deve à combinação de fatores geológicos, climáticos e biológicos muito específicos. Esse tipo de ambiente ganha atenção científica porque existem importantes mananciais subterrâneos associados, e ainda por causa das condições favoráveis à conservação de registros da história climática, biológica, ambiental e humana de determinado território geográfico.

As cavernas também são importantes nos aspectos turístico, recreativo, desportivo e religioso, pois constituem cenários de irresistível apelo estético e místico.

Caverna arenítica Aroe Jari,  
Chapada dos Guimarães, MT.  
Foto: Daniel Menin



Essas características condicionam processos e padrões geológicos e biológicos que, embora individualmente não sejam exclusivos do meio subterrâneo, ao interagir produzem feições geológicas e ecossistemas únicos, singulares, de imenso valor intrínseco. Todo esse conjunto de habitats (incluindo ainda o exocarste), distribuídos de forma descontínua, constitui o já mencionado Patrimônio Espeleológico. Em função da complexidade dos processos envolvidos, que contam com um número muito grande de variáveis interagindo entre si (cavernas são únicas, não existem duas iguais), destruir uma caverna é destruir um patrimônio que representa milhões de anos de história geológica e biológica, sem possibilidade de mitigação na escala humana de tempo.





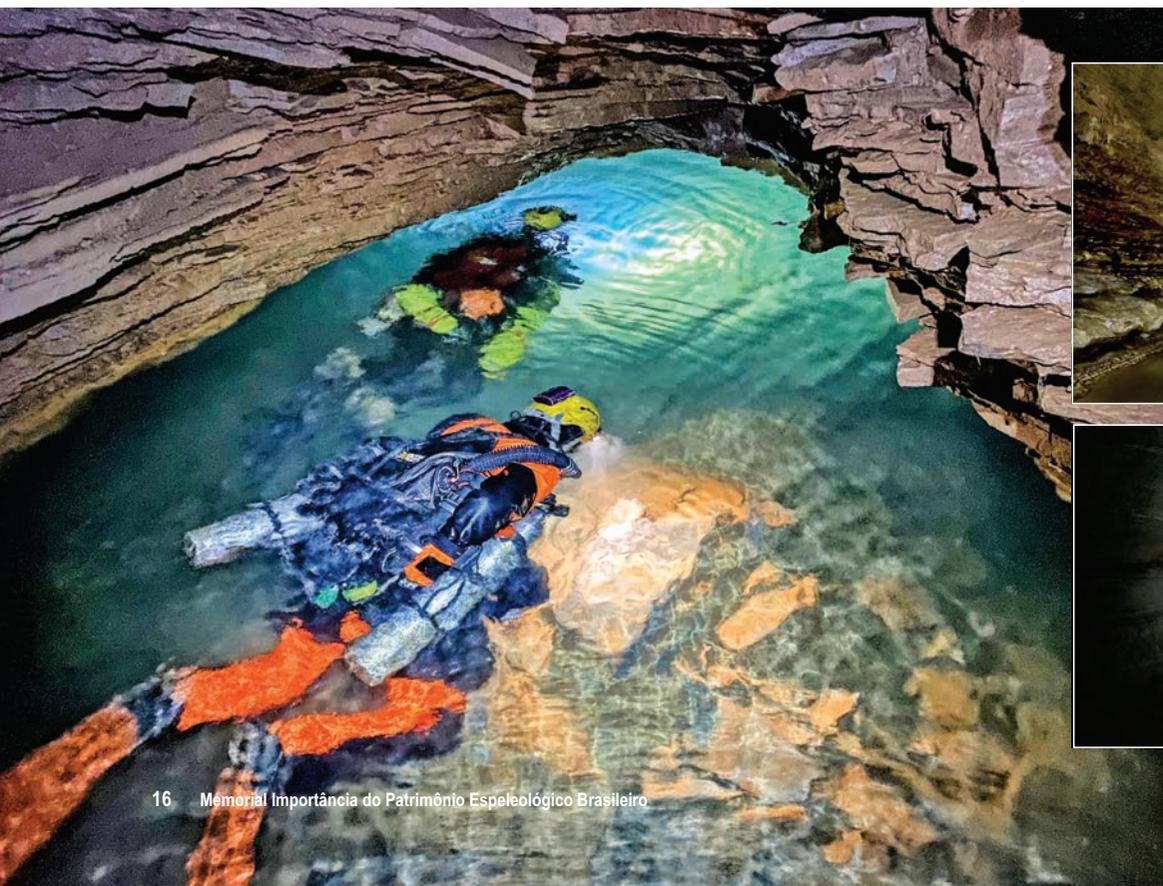
Ao lado, mapeamento de conduto subterrâneo (leitura de instrumentos e croqui topográfico), uma etapa importante da exploração e registro de uma cavidade natural subterrânea. Gruna Estrada da Mamona, Coribe, BA.  
Fotos: Mylène Berbert-Born



No destaque abaixo, iniciando mergulho de exploração e mapeamento na região de Pains, MG (Espeleo Mergulho Brasil - EMB).

Ao lado abaixo: percurso sobre bóias em rio subterrâneo. Gruta do Padre, Santana/Santa Maria da Vitória, BA.  
Foto: Rafael Camargo.

Rastejo em estreitamento de conduto. Gruna Estrada da Mamona, Coribe, BA.  
Foto: Rafael Costa da Silva.

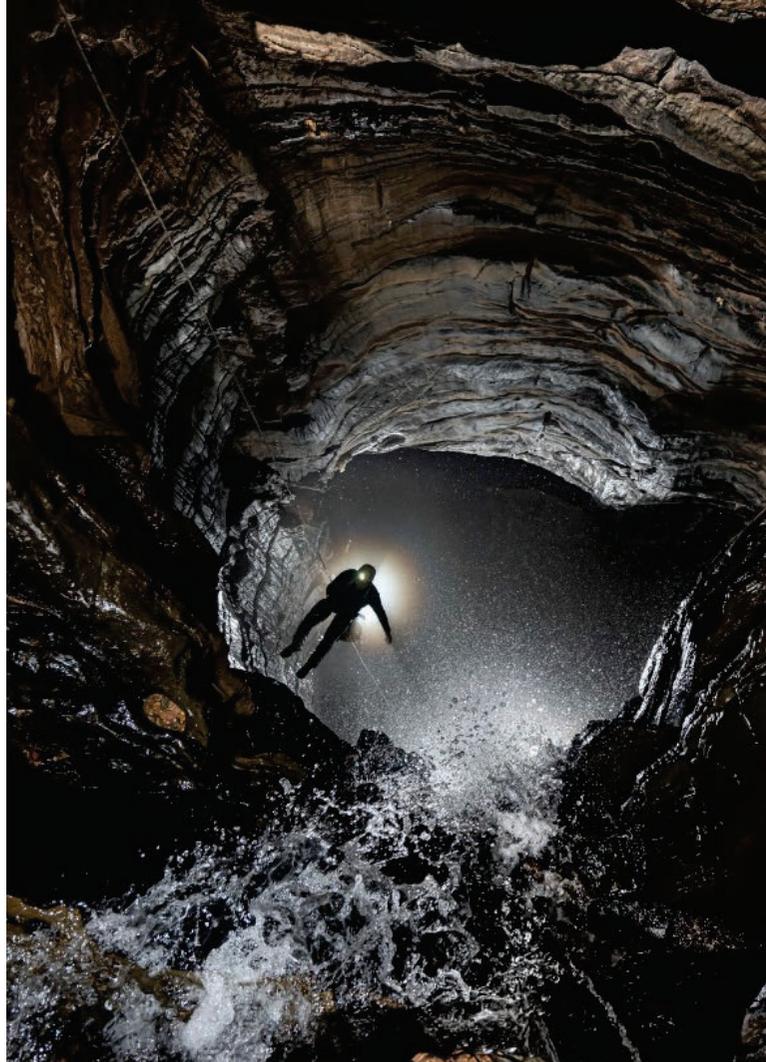


Por outro lado, o Patrimônio Espeleológico também tem grande importância no contexto da vida humana, no âmbito da apreciação estética, da espiritualidade, da educação, do esporte e lazer, da economia e até mesmo da saúde. Há feições consideradas da mais extrema beleza associadas a cavernas e exocarste. A associação dessa beleza com a escuridão pode proporcionar, aos adeptos, experiências místicas únicas – não é a toa que tantas cavernas são locais de devoção. Além disso, as dificuldades técnicas da progressão em cavernas e abismos constituem grandes atrações para esportistas em busca de novos desafios: topografia acidentada, condições climáticas por vezes adversas tais como umidade excessivamente alta ou baixa e temperaturas extremas, frequentes trechos de natação e mergulho, passagens muito estreitas, estão entre os aspectos adversos que mais geram sensações de risco para os visitantes de cavernas, instigando-os à superação.

Várias cavernas no Brasil, a exemplo de Bom Jesus da Lapa na Bahia, apresentam um turismo regular, gerando oportunidades fixas de emprego e renda, formais e informais, atendendo assim parcelas importantes de comunidades carentes. Estas e outras experiências, descritas mais à frente, se não são básicas para a sobrevivência dos seres humanos, certamente contribuem significativamente para a sua qualidade de vida.

Imagens à direita: acima, a exploração de abismos subterrâneos é uma das atividades mais instigantes para os adeptos de esportes radicais, requerendo o domínio de técnicas avançadas de progressão vertical - Caverna Ouro Grosso, PETAR -Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, Iporanga, SP.

Abaixo, caverna de turismo de massa, preparada com estruturas (escadas, corrimãos e luzes artificiais) para viabilizar o acesso do público em geral - Caverna do Diabo, Eldorado, SP.  
Fotos: Daniel Menin e Heros Lobo respectivamente



Desfiladeiro cárstico do vale do rio Jacaré (Cânion Boca da Manga), com destaque da dolina e Gruta do Espelho no canto inferior direito da imagem.

Divisa entre Morro do Chapéu e São Gabriel, centro-norte da Bahia.

Foto: Aloísio Cardoso







## Ambiente cárstico

### Introdução ao meio físico

Entre os diversos tipos de ambientes geológicos continentais existentes no planeta, o ambiente cárstico certamente é um dos mais espetaculares, por suas paisagens e dinâmica. É, também, um dos ecossistemas mais frágeis.

Isso decorre de uma peculiaridade: a existência de rochas mais solúveis, ou seja, rochas constituídas por minerais que são mais facilmente dissolvidos pela água (intemperismo químico por dissolução). A água da chuva infiltra o solo, percola e é estocada em fraturas e outras discontinuidades da rocha, alargando-as progressivamente por dissolução. Uma rede de espaços subterrâneos vai sendo organizada, tornando-se cada vez mais extensa e volumosa. A água passa a fluir rapidamente da superfície para os aquíferos através dos canais formados dentro da rocha, carreando solo, matéria orgânica e compostos químicos associados.

Galeria subterrânea desenvolvida a partir de uma fratura da rocha. Na parte baixa há marcas na parede sinalizando um nível submerso, pretérito ou periódico.

Foto: Mylène Berbert-Born

Um relevo fortemente ondulado e irregular evolui com esse processo, formando-se depressões em bacias que concentram o escoamento superficial e a infiltração, favorecendo a organização de rotas preferenciais de fluxo subterrâneo. Vales íngremes contrapostos a rochedos esculturais modelados por uma grande diversidade de pequenas formas entalhadas pela corrosão da chuva, chamadas lapiás, são outras feições também muito comuns.

A grande permeabilidade da água em razão do aumento da porosidade da rocha pela dissolução é um aspecto diagnóstico dos ambientes cársticos. Por essa natureza, conseqüentemente há menor disponibilidade hídrica em superfície e maior vulnerabilidade à contaminação dos mananciais (fontes de água), pois poluentes são transportados com maior facilidade e

rapidez para os reservatórios subterrâneos, havendo baixa capacidade de autodepuração. Além disso, a superfície está naturalmente sujeita a afundamentos bruscos, seja pelo desabamento súbito das camadas de rochas assentadas sobre vazios que se formam no subsolo, seja pelo deslocamento de grandes massas de solo úmido para dentro desses vãos. Ainda que sejam fenômenos naturais próprios aos ambientes cársticos, esses processos podem ser disparados, acelerados ou intensificados se as condições momentâneas de equilíbrio forem perturbadas. Isso pode ocorrer, por exemplo, pelo rebaixamento do aquífero quando sobre-explotado pelo bombeamento de água para algum tipo de uso, ou pela sobrecarga de estruturas urbanas, ou ainda pela modificação do perfil da cobertura, por exemplo, cortes em vertentes e aterros.



Afloramento calcário lapiezado (exocarste) em Serra do Ramalho, BA.  
Foto: Mylène Berbert-Born.

# Carstificação

## A dissolução da rocha

O processo de dissolução da rocha responsável pela formação dos clássicos relevos cársticos - chamado “carstificação epigênica” - envolve necessariamente três componentes básicos: uma rocha de composição predominantemente carbonática, a água da chuva e o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), este naturalmente disponível no ar e no solo. Contrapondo-se à epigênese, cujo agente da dissolução (a água) provém da superfície, a dissolução por fluidos mineralizados ou soluções termais provenientes do próprio bloco rochoso, em maior profundidade, é chamada de hipogênese. Por ser bem menos frequente, embora extremamente significativa quando atuante, a dissolução hipogênica não será abordada aqui.

Na epigênese, a água meteórica fica levemente acidificada ao absorver gás carbônico da atmosfera e da biomassa superficial ( $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{H}_2\text{CO}_3$ , ácido carbônico), sendo então capaz de dissolver as rochas carbonáticas. Estas rochas em geral são calcários, compostos por mais de 50% de minerais de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ , a calcita), mas também dolomitos ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , a dolomita), margas (carbonatos com grande proporção de minerais de argila) e seus variantes metamórficos (mármore, metacalcilutitos etc.). Quando o carbonato de cálcio é dissolvido, tem-se uma solução composta de íons de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e carbonato ( $\text{CO}_3^{-2}$ ) cuja proporção, ou equilíbrio químico, é determinada pela concentração do  $\text{CO}_2$  (pressão do gás na solução), pelo pH e pela temperatura da água. Quando a solução chega ao ponto de saturar em relação à calcita dissolvida, ela perde o poder de dissolver a rocha.



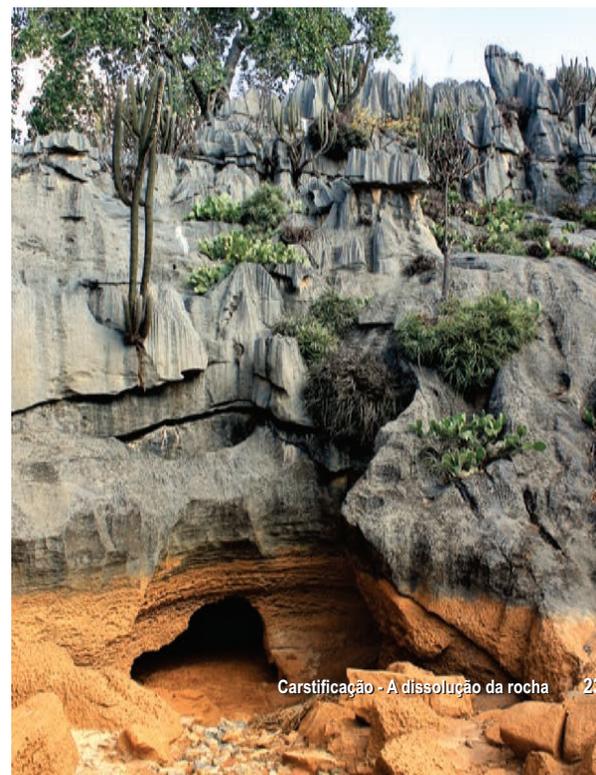
Isso significa que o processo de dissolução e a formação das feições cársticas subterrâneas estão fortemente relacionados à capacidade de renovação de águas ainda insaturadas. Por isso a dissolução normalmente é mais intensa nas cabeceiras dos sistemas de drenagem subterrânea e nas porções mais superficiais do pacote rochoso, pois nesses locais a água ainda não circulou pelas rochas o suficiente para ficar saturada em calcita dissolvida. Sistemas de drenagem que consigam escoar mais facilmente o fluxo que circula pelas fissuras do pacote rochoso, desaguardo por exemplo em surgências ou “olhos d’água”, acabam sendo mais favoráveis à configuração de grandes redes de condutos relativamente àqueles em que a água permanece muito tempo confinada à rocha, já que no primeiro caso a água tem maior chance de ser renovada.

Há outros fatores que influem nas taxas de dissolução, ou seja, na velocidade e intensidade em que a carstificação ocorre: o padrão climático, considerando o volume e a distribuição temporal das chuvas, bem como a temperatura, a insolação e a intensidade dos ventos. Os ventos interferem nas taxas de evaporação da água precipitada e, assim, na própria disponibilidade de água para a infiltração. O solo e a cobertura vegetal por sua vez contribuem na disponibilização de  $\text{CO}_2$  para a solução, tornando-a mais

agressiva para a dissolução da rocha; ambos ainda condicionam o modo de infiltração e distribuição da água infiltrada, bem como a evapotranspiração, que é a perda da água no solo pela evaporação e pela transpiração das plantas. Solos mais espessos em geral atuam como armazenadores de água, distribuindo-a de maneira difusa e regular para as discontinuidades da rocha que está abaixo. Quando a região apresenta uma pluviosidade mais alta e com chuvas bem distribuídas, a água armazenada no solo tende a ser regularmente vertida para dentro do sistema rochoso; sob menor pluviosidade e má distribuição das chuvas, uma parte significativa da água pode ficar retida no solo ou se perder por capilaridade, sendo “empurrada” para a rocha abaixo em pulsos de recarga. Assim, a depender do padrão hidroclimatológico, geológico, pedológico e topográfico reinantes, as taxas de dissolução serão muito variáveis de local para local.

À esquerda, lapiás em calcário: formas de dissolução superficial, esculpidas na superfície da rocha.  
Exocarste em São Félix do Coribe, BA.

À direita, surgência ou “olho d’água” intermitente: ponto de descarga sazonal de um sistema hidrológico da Serra do Ramalho, BA.  
Fotos: Mylène Berbert-Born



## Espeleogênese

### A formação de cavernas

Em um processo genérico de espeleogênese, a água das chuvas percola por gravidade as principais descontinuidades estruturais da rocha (planos entre camadas, juntas, falhas, veios minerais etc.), alargando-as lentamente por corrosão química (dissolução carbonática). O alargamento progressivo e preferencial sobre essas estruturas rochosas estimula a infiltração cada vez mais rápida e concentrada da água, aumentando a eficiência dissolutiva e erosiva.

Toda a água que infiltra ao longo da superfície de uma região acumula a certa profundidade, onde todos os interstícios da rocha permanecem inundados. É a “zona saturada” ou freática do aquífero. A interface com a “zona não saturada” ou vadosa marca o nível do lençol freático, que costuma oscilar de acordo com o regime de chuvas.

A zona freática normalmente apresenta um fluxo laminar muito lento causado por diferenças regionais nas cargas hidráulicas. Mas, no decorrer do processo de erosão do relevo, algum fator pode facilitar o escoamento da água armazenada e o fluxo pode se tornar turbulento. Essa condição é possível quando os primeiros canalículos formados pela dissolução, chamados de protocondutos, alcançam cerca de 5 mm de diâmetro. Alguns desses pequenos canais acabam se desenvolvendo mais rapidamente do que outros por serem aqueles com maior capacidade de drenagem, ou seja, melhor condição de escoamento da água. Funcionando como drenos, esses canais mais desenvolvidos fazem convergir para si toda a água presente em poros, juntas e pequenos condutos periféricos, aumentando cada vez mais o poder de fluxo e a possibilidade de renovação das soluções insaturadas capazes de dissolver a rocha.

Quando os canais tornam-se suficientemente grandes e bem conectados, os sistemas de fluxo são



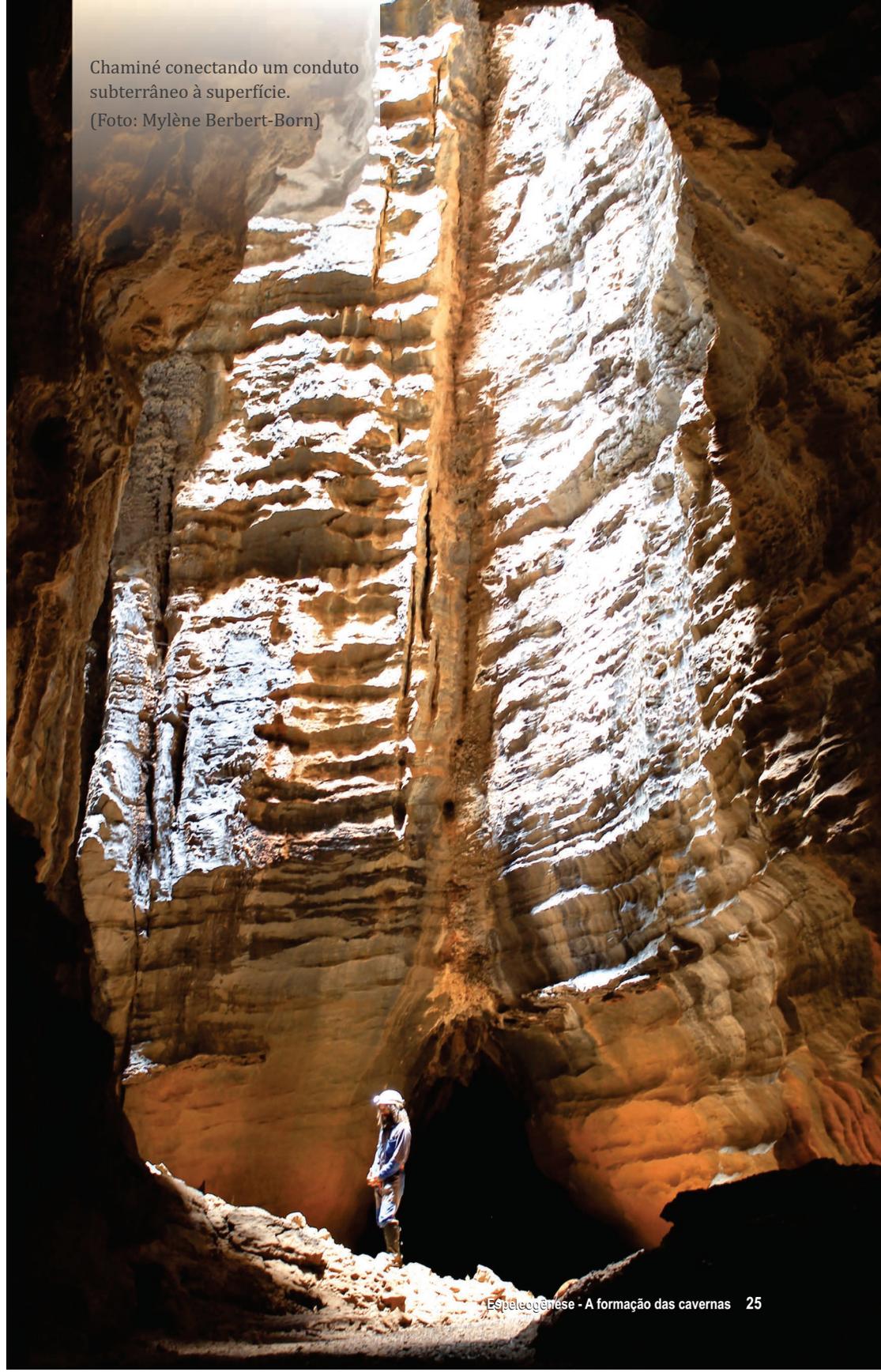
Fluxo turbulento em conduto subterrâneo.  
Gruna Boca da Lapa, Feira da Mata  
(Serra do Ramalho), BA.  
Foto: Mylène Berbert-Born

capazes de drenar a água com muita rapidez. Com o tempo, o nível da água tende a rebaixar conforme ela possa ser escoada para locais cada vez mais distantes.

Na medida em que o relevo é erodido, a superfície do terreno intercepta os condutos, estejam eles ativos ou já abandonados pela água, abrindo-se os contatos com o exterior que são as “entradas das cavernas”, locais de acesso dos humanos ao meio subterrâneo. Tendo em vista o longo processo de espeleogênese, pode-se dizer que a formação desses acessos é um evento relativamente tardio. A abertura de entradas por desmoronamento do teto da caverna pode criar feições de imensa beleza, como é o caso do Poço Encantado, na Chapada Diamantina, Bahia. Apenas quando penetráveis pelo homem, os espaços subterrâneos passam a ser considerados oficialmente como “cavernas” (“caves”, em inglês, “grottes”, em francês, “cuevas”, em espanhol). No Brasil, cavernas recebem nomes locais e de acordo com o tipo predominante de desenvolvimento: horizontal – gruta, gruna, lapa etc., ou vertical – abismo, buraco, furna.

Chaminé conectando um conduto subterrâneo à superfície.

(Foto: Mylène Berbert-Born)



Caverna Poço Encantado,  
Chapada Diamantina, BA.  
Foto: Alexandre Camargo  
“Iscoti”

Materiais da superfície do terreno, tais como argilas, areias, fragmentos de rocha e detritos orgânicos também acabam adentrando os condutos. Quando o solo sobre a rocha carstificada é espesso, o seu aporte para o meio subterrâneo conduz à formação de depressões em forma de bacias, que são as dolinas. Paralelamente, um “relevo” rochoso também vai se desenvolvendo sob o solo por causa da umidade retida nessa interface e da infiltração que ocorre preferencialmente nas fissuras da rocha. Conforme é estruturado, esse relevo encoberto ou semiencoberto exerce papel cada vez mais importante no direcionamento e na concentração da água armazenada no solo.

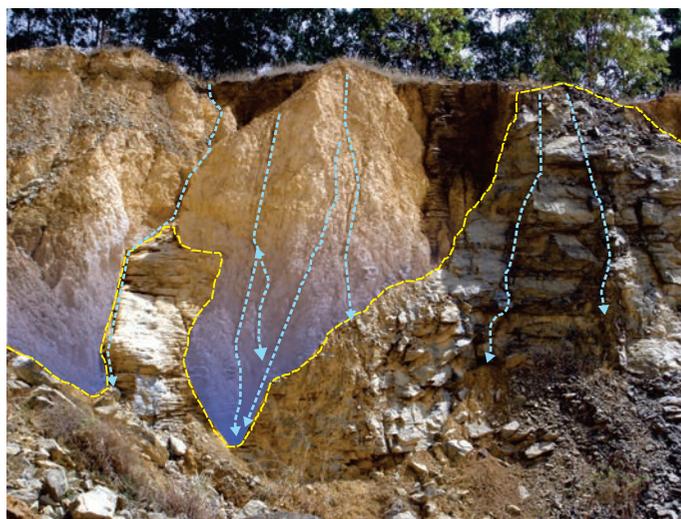
Assim, o fenômeno de dissolução da rocha, ou “denudação cárstica”, faz evoluir uma paisagem realmente muito bonita e exótica, que pode se desenvolver por dezenas de quilômetros quadrados. É comum a superfície apresentar um aspecto ruiforme, com torres, “verrugas” e bancadas de rocha que sobressaem nas encostas, entalhadas por microfeições puntiformes, estrias e canáliculos (lapiás). Paredões, desfila-deiros, vales cegos, drenagens que somem da superfície e reaparecem subitamente, abrigos sob rocha e cavernas são outras feições bem típicas.

Pela diversidade de situações possíveis, os diferentes tipos de sistemas cársticos podem receber classificações distintas, por exemplo, em vista da organização da rede hidrológica na superfície do terreno e no subterrâneo, a qual retrata o grau de carstificação. Assim, em um “fluviocarste” ainda existem rios e vales superficiais, seja por que se tratam de rios volumosos demais para serem conduzidos ao subterrâneo, seja pelo próprio estágio de evolução da topografia cárstica. Quando o fluxo subterrâneo está mais estruturado e os leitos fluviais já foram desarticulados ou desativados na superfície, prevalecendo bacias de escoamento convergente, tem-se um “holocarste”. Um “paracarste”, por sua vez, retrata situações em que há uma combinação de sistemas fluviais (canais de superfície) e cársticos (sistemas subterrâneos), devido a existência de rochas carstificáveis e não carstificáveis combinadas no mesmo território.

Outras classificações levam em consideração as relações entre rochas solúveis, não solúveis e coberturas inconsolidadas, frente à topografia atual e

Ao lado, acima: contato rocha-solo bem delimitado, com linha de fratura vertical interligando pequena cavidade (ao centro). Observa-se a dissolução preferencial da fratura e o seu preenchimento sedimentar. Havendo umidade, o solo migrará gradativamente para dentro da cavidade originando uma pequena depressão na superfície.

Abaixo: no contato rocha-solo também ocorre dissolução carbonática. Zonas que concentram a umidade do solo (destacadas por cores vivas) fazem convergir o fluxo d’água para determinados pontos, onde a carstificação torna-se mais intensa. Fotos: Mylène Berbert-Born





Em termos jurídicos, cavernas” são os espaços subterrâneos acessíveis ao homem. Exploração de caverna na região de Santa Maria da Vitória, BA. Foto: Mylène Berbert-Born

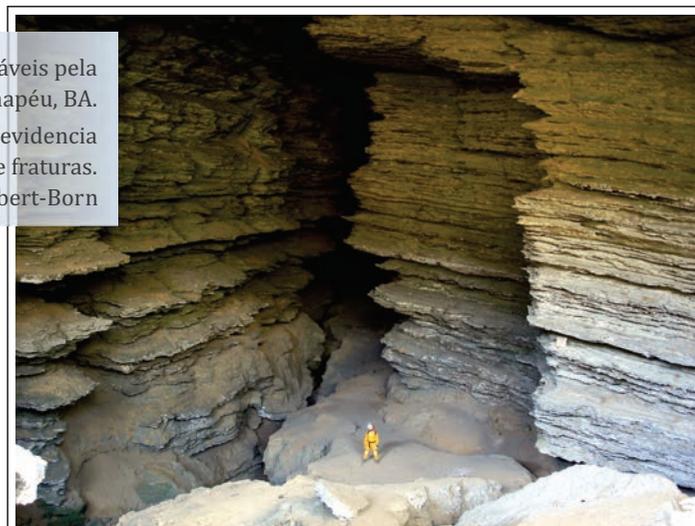
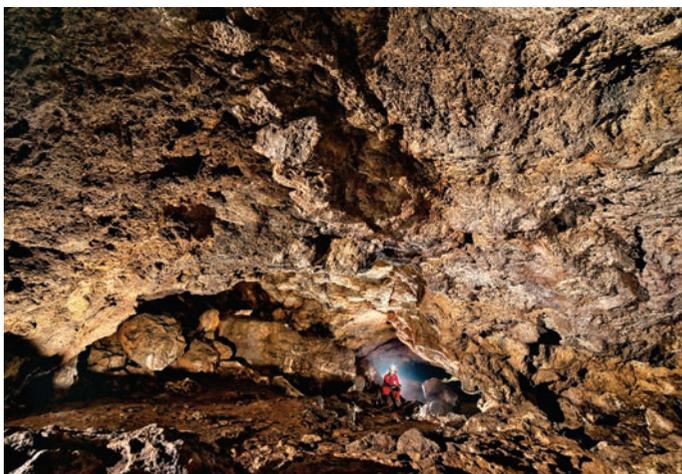
pretérita: “carste encoberto” (ou carste com manto) envolve regiões onde o processo de carstificação desenvolve-se sob espessa cobertura de materiais inconsolidados, sejam solos transportados (colúvios) ou residuais *in situ* (elúvios). Um “carste subjacente” desenvolve-se sob litologias não carstificáveis; mas algum tipo de sinal dessa carstificação subterrânea pode aparecer na superfície, por exemplo dolinas originadas pelo colapso em profundidade, ou a captura pontual de drenagens superficiais. Um “paleocarste” envolve situações em que superfícies cársticas antigas, já bem desenvolvidas, tenham sido soterradas por sedimentos mais recentes, podendo eventualmente ser reexpostas em estágios erosivos posteriores.

É importante destacar que cavidades subterrâneas também podem ser formadas em outros tipos de rochas a partir do intemperismo químico. As cavernas não carbonáticas maiores e mais comuns no Brasil desenvolvem-se em quartzitos e arenitos, que são rochas silicosas constituídas principalmente por

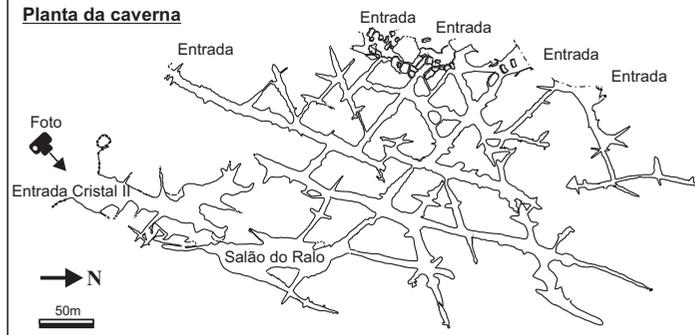
quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), com uma pequena proporção de micas, feldspatos, óxidos e hidróxidos de ferro e manganês, além de cimento silicoso. Os arenitos são rochas sedimentares (siliciclásticas) e os quartzitos a variação metamórfica dessas rochas. As cavernas formadas nessas litologias podem atingir quilômetros de extensão e desníveis de dezenas, às vezes centenas de metros, apresentando feições cársticas vadasas típicas, sendo por vezes difícil ao leigo distingui-las das calcárias. As grutas quartzíticas da região da Serra do Caraça, em Minas Gerais, são exemplos de destaque mundial pois alcançam quase 500 metros de desnível, e mais de 3 quilômetros de extensão desenhados em mapa. A gruta das Bromélias, outra ocorrência quartzítica em Minas Gerais, é mais um exemplo que sobressai no *ranking* das maiores cavernas não carbonáticas do Brasil, tendo em vista seus 2.750 metros de extensão e cerca de 80 metros de desnível. Um exemplo em arenito, muito conhecido na Chapada dos Guimarães, Mato Grosso, é a caverna Aroe Jari, com quase 1 quilômetro e meio extensão. As cavernas em rochas graníticas e em rochas ferruginosas (carste ferruginoso em formações ferríferas e canga) já são bem diferentes, geralmente pequenas e sem espeleotemas, mas também muito interessantes pela forma que adquirem e maneira como se distribuem no espaço.

Planos de acamamento horizontais e fraturas verticais são responsáveis pela morfologia do endocarste da Baixa do Cristal, Morro do Chapéu, BA. O mapa da Gruta do Cristal (CPRM / Meandros Espeleó Clube, 2011), evidencia galerias retilíneas desenvolvidas ao longo de fraturas. Foto: Mylène Berbert-Born

Abaixo, volumes significativos desenvolvidos em rocha ferrífera. Caverna S11B-94, Serra dos Carajás, PA. Foto: Ataliba Coelho

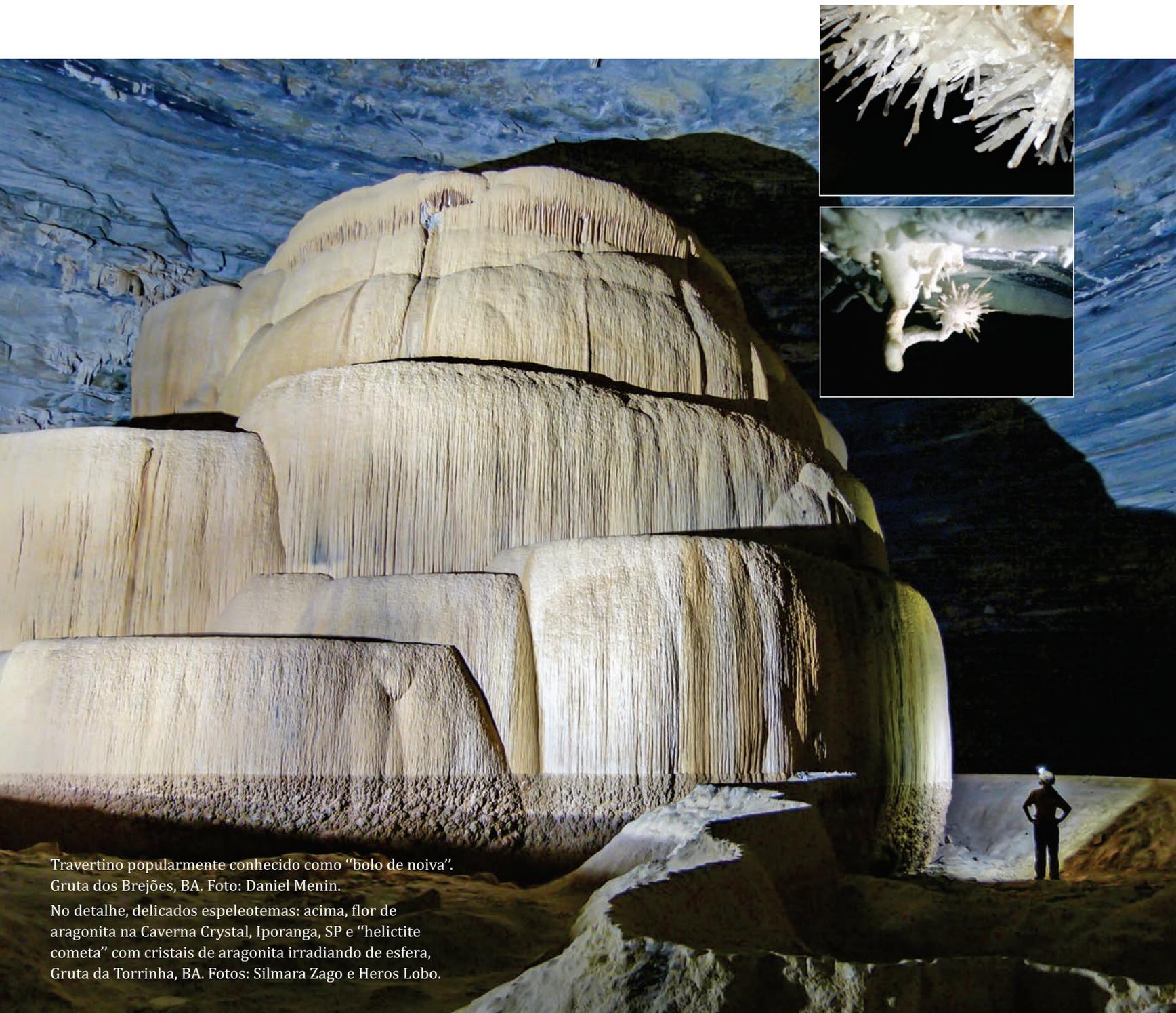


Planta da caverna



Nas litologias não carbonáticas, a formação das cavernas está geralmente associada a processos de erosão preferencial que se instalam em zonas de fraqueza estrutural do bloco rochoso, especialmente a partir de falhas ou associadas a fraturas e dobras. Como a dissolução do conteúdo mineral dessas rochas é muito mais lenta comparativamente aos carbonatos, os processos químicos tornam-se mais eficientes para a espeleogênese se estiverem combinados a agentes mecânicos, por exemplo, quando condições hidrodinâmicas favoreçam a concentração do fluxo da água. O fluxo pode ficar concentrado em determinada

descontinuidade da própria rocha, ou em razão de alguma camada impermeável, em geral havendo um alto gradiente hidráulico garantindo que a energia do fluxo seja elevada (grande diferença topográfica entre níveis de base). No caso das rochas silicosas, vale salientar que uma maior pureza em quartzo (grãos ou cimento) favorece a carstificação, pois a existência de outros minerais – que se solubilizam antes do quartzo – acaba tornando as soluções percolantes mais saturadas em relação à sílica, inibindo ainda mais a evolução de um processo já naturalmente lento.



Travertino popularmente conhecido como “bolo de noiva”.  
Gruta dos Brejões, BA. Foto: Daniel Menin.

No detalhe, delicados espeleotemas: acima, flor de  
aragonita na Caverna Crystal, Iporanga, SP e “helicite  
cometa” com cristais de aragonita irradiando de esfera,  
Gruta da Torrinha, BA. Fotos: Silmara Zago e Heros Lobo.

## Espeleotemas

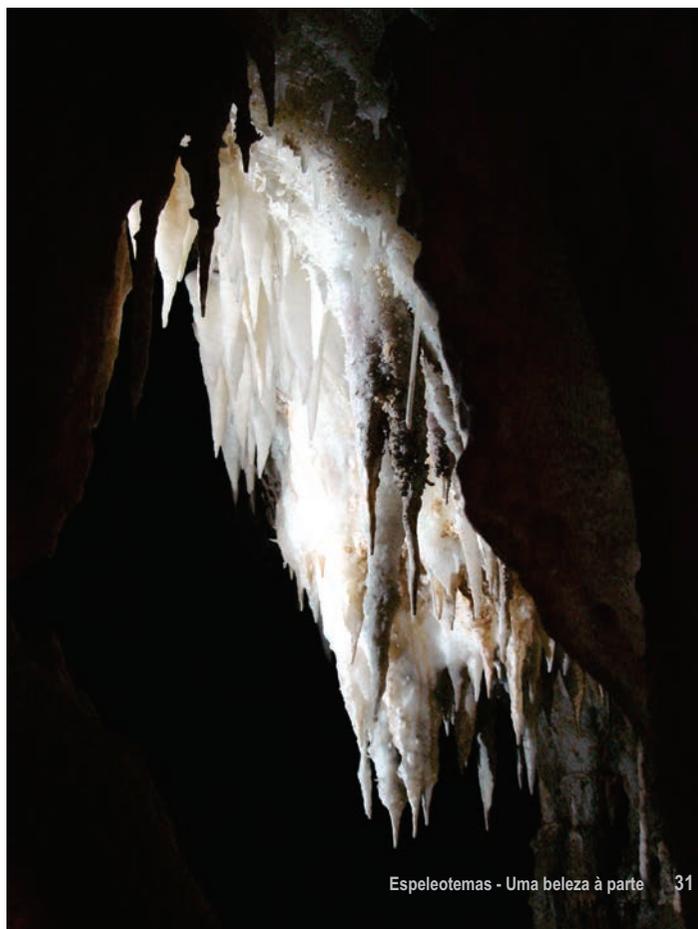
### Uma beleza à parte

Com o passar do tempo as cavidades subterrâneas tendem a ser preenchidas por diversos tipos de materiais, que vão se acumulando e formando depósitos sedimentares. Há dois tipos principais de depósitos em cavernas: os clásticos, também chamados terrígenos ou detríticos, e os químicos, mais conhecidos como espeleotemas.

Os depósitos clásticos reúnem todo tipo de detritos inorgânicos como lama, areia, cascalho e blocos maiores de rocha rolados ou trazidos da superfície por rios, enxurradas e até mesmo pelo vento, muitas vezes misturados a compostos orgânicos como folhas, galhos e dejetos animais. Os materiais provenientes do exterior são chamados “sedimentos alóctones”. Mas os depósitos clásticos também podem ser resíduos da própria dissolução da rocha, ou seja, aqueles componentes insolúveis que não puderam ser eliminados do meio subterrâneo. Nesse caso são chamados “sedimentos autóctones”, que significa da própria cavidade.

Os depósitos químicos por sua vez correspondem aos minerais cristalizados (precipitados) no interior das cavidades, principalmente a calcita e a aragonita - dois minerais de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) que se distinguem apenas pela estrutura cristalina. No contexto dos processos de carstificação, a cristalização

ou neoformação de minerais acontece pela (re)precipitação química dos carbonatos previamente dissolvidos da rocha calcária, num processo exatamente inverso à dissolução. Para haver precipitação a água deve ter elevada concentração de calcita dissolvida, ou seja, ser supersaturada em relação à calcita, e as condições ambientais devem favorecer o escape do  $\text{CO}_2$  presente nas soluções. A perda do  $\text{CO}_2$  da solução acontece por exemplo quando há evaporação ou alguma turbulência durante o fluxo da água que facilite trocas gasosas entre a solução e a atmosfera. O  $\text{CO}_2$  também pode ser removido da solução por alguma atividade orgânica que consuma esse gás dissolvido na água. Lembrando que a



À direita, conjunto de estalactites e cortinas na gruta Bart, MG.  
Foto: Mylène Berbert-Born

precipitação também pode acontecer na superfície, desde que a água tenha tido contato prévio com a rocha o suficiente para alcançar a saturação em bicarbonato. Esses depósitos de superfície são chamados de tufas calcárias, onde normalmente há participação decisiva do fitoplâncton na retirada do  $\text{CO}_2$  do sistema aquoso, através da fotossíntese.

No interior das cavernas, os espeleotemas crescem lentamente conforme os minerais são cristalizados ao longo de superfícies, muitas vezes sendo possível reconhecer finas lâminas de cristalização sequenciada. As mais variadas formas podem surgir da combinação entre a taxa ou velocidade de crescimento e o mecanismo de ação ou circulação da água. As estalactites, feições pontiagudas penduradas ao teto que se formam pelo gotejamento da água, e as estalagmites, que se projetam do piso como receptoras das gotas e seus borrifos, são os



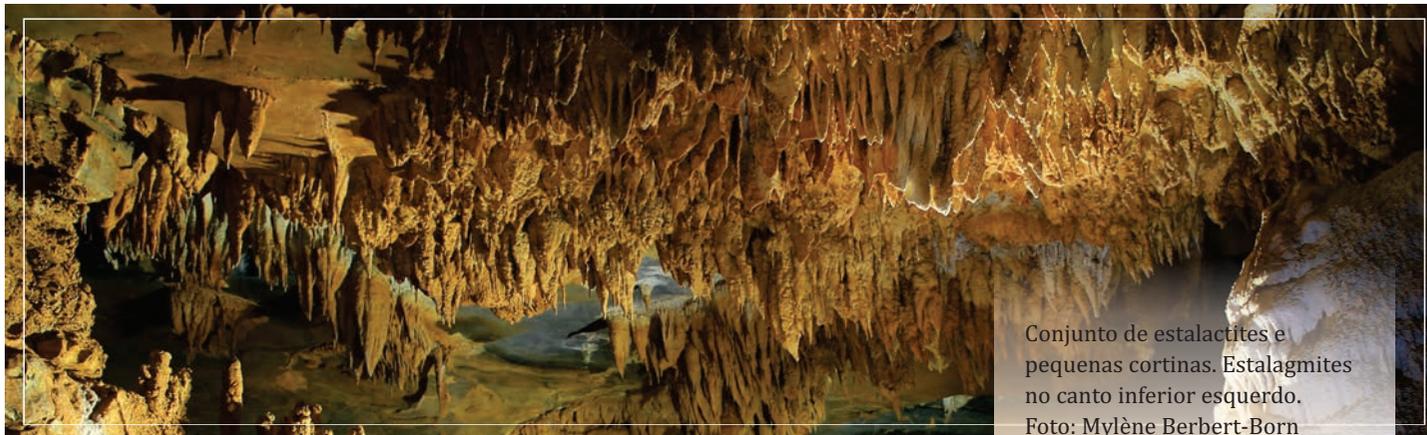
espeleotemas mais populares. Além destas formações mais famosas, conjuntos incríveis de cortinas, imensas colunas e sequências de bacias escalonadas ao longo de paredes e pisos, chamadas de travertinos, também podem se formar contrapondo delicadas formações parecidas com flores e agulhas cristalinas, e ainda estruturas bem complexas semelhantes a corais.

A forma e o tamanho dos espeleotemas são determinados basicamente pela velocidade da cristalização, que por sua vez depende de uma cadeia de condições envolvendo o grau de saturação química da água e a taxa de perda do  $\text{CO}_2$ , esta última vinculada a aspectos físicos como a velocidade de fluxo ou a estabilidade da água, os gradientes da temperatura e da composição atmosférica no meio subterrâneo, bem como às dinâmicas microclimáticas internas. Considerando esses fatores, é evidente que a morfologia da cavidade e a forma como a atmosfera interna interage com a atmosfera do exterior são parâmetros que exercem grande influência na distribuição, tipo, forma e tamanho que os espeleotemas podem adquirir.

Quanto à composição mineral, mais de 95% dos depósitos químicos são constituídos por calcita ou aragonita, com destaque também para a gipsita, um sulfato de cálcio di-hidratado [ $\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ], variante cristalino do gesso. A proporção restante de minerais

Tufa calcária em cachoeira - um depósito químico de superfície formado pela precipitação de calcita a partir de águas saturadas em carbonato. A turbulência e a atividade orgânica são fatores que induzem a precipitação química. Cachoeira Paríso do Cerrado, Damianópolis, GO.

Foto: Heros Lobo.



Conjunto de estalactites e pequenas cortinas. Estalagmites no canto inferior esquerdo.  
Foto: Mylène Berbert-Born

reúne uma enorme diversidade composicional e cristalográfica, já tendo sido identificados quase 300 diferentes tipos em todo o mundo.

Em geral os espeleotemas apresentam coloração branca, pela predominância do íon  $\text{Ca}^{2+}$  nas formações. Todavia, sua cor pode variar entre tons de vermelho, amarelo, marrom, azul, verde e preto em função de outros elementos químicos presentes como o ferro, o cobre e o manganês, ou devido a ácidos orgânicos, argilas, e mesmo pela simples diferença na espessura das camadas depositadas. Toda esta variedade confere grande valor estético aos espeleotemas, aliás, a marca registrada das cavernas para o público em geral, em todo o mundo.

É importante destacar que espeleotemas são formações secundárias resultantes de processos bem diferentes dos que deram origem às rochas carbonáticas. No processo mais comum de formação das rochas calcárias, a calcita é precipitada diretamente da água em mares geralmente rasos, normalmente cimentando diversos compostos orgânicos e inorgânicos tais como conchas e outras estruturas

biológicas também calcíticas sintetizadas por organismos no ambiente marinho, além de diversas impurezas a exemplo de argila e silte transportados por correntes e marés. Blocos rochosos de aspecto maciço ou laminado com algumas centenas de metros de espessura podem ser formados dessa maneira. No caso dos espeleotemas, não se trata mais da calcita primária, mas de uma nova geração mineral formada após a destruição total dos constituintes originais da rocha, por dissolução. Nesse novo processo de cristalização é muito comum formarem-se superfícies com profusão de cristais bem facetados que, em conjunto, conferem um bonito efeito tipo “brilho de estrelas” quando há incidência de alguma luz.

Os espeleotemas podem ser classificados segundo diferentes critérios. Um dos mais utilizados leva em conta a atuação da água ou o tipo de ambiente em que se formam: espeleotemas associados a corpos d'água estagnada, espeleotemas formados a partir de pequenos fluxos de água (gotejamento e escoamento sobre superfícies inclinadas), espeleotemas de capilaridade da água e espeleotemas formados a partir da evaporação da água.



Estalactites tipo “canudo de refresco”. Os cristais de calcita formam-se ao longo da superfície da gota, que é onde ocorre a perda do gás carbônico da solução para a atmosfera da cavidade. Os cristais vão formando pequenos anéis, deixando um canalículo interno por onde a água continua fluindo. Foto: Mylène Berbert-Born.

As águas estagnadas podem apresentar películas superficiais formadas a partir de poeiras carbonáticas acumuladas no espelho d'água. Tais películas vão se consolidando na medida que fragmentos flutuantes são soldados uns aos outros e às margens da bacia d'água. Enquanto flutuam livremente são chamadas “jangadas”, tornando-se “marquises” quando se mantêm coladas às margens, suspensas mesmo quando a água já não está mais presente. Gotas d'água que caem do teto sobre jangadas podem desestabilizá-las fazendo com que afundem. Sob tais pontos de gotejamento pode haver um acúmulo de jangadas naufragadas, que com o passar do tempo formam cones submersos, às vezes apresentando uma “marca” circular do gotejamento bem ao topo, assemelhando-se a pequenos “vulcões”. Cristais de calcita muito bem formados, com hábito semelhante a “dentes de cão”, também podem crescer lentamente dentro de pequenas bacias ou poças d'água supersaturadas em carbonato de cálcio.

Os espeleotemas que se formam a partir do gotejamento ou do escoamento sobre superfícies inclinadas têm a força da gravidade como agente modelador. Nessa categoria estão as estalactites e estalagmites que crescem verticalmente, mas que também podem se espessar lateralmente, como se



Estalagmite com sobrecrecimento de coralóides. Borrifos de água e difusão por capilaridade podem explicar a formação de superfícies muito rugosas, que às vezes lembram couves-flores. Gruta São Geraldo, Santana, BA. Foto: Mylène Berbert-Born.

estivessem “engordando”, por causa de algum estreitamento do duto central de fluxo da água. Quando estalactites crescem apenas no comprimento tomam a forma de longos “canudos de refresco”, enquanto as estalagmites podem se assemelhar a velas; estalactites e estalagmites podem se unir formando então colunas. Cortinas crescem a partir de pequenos trajetos da água em superfícies inclinadas, camada por camada pela repetição do mesmo trajeto. Verdadeiras cascatas de pedra também podem se formar a partir de fluxo laminar vertendo sobre um declive, alcançando dimensões significativas no interior de cavernas. Um tipo de espeleotema muito curioso, peculiar à precipitação associada ao gotejamento, são as “pérolas de caverna”: o gotejamento incide sobre alguma impureza, por exemplo um pequeno seixo ou uma concha, e esta se torna o núcleo para a precipitação de camadas concêntricas de calcita – processo análogo à formação das pérolas de moluscos bivalves. O gotejamento pode causar movimentação permanente da estrutura em formação, que pode crescer sem se soldar ao substrato.

A água também pode se “movimentar” nos ambientes subterrâneos por capilaridade. Nesse caso, gradientes de temperatura e umidade entre dois meios podem forçar a movimentação de moléculas de água em nível intersticial, no sentido de equilibrar as diferenças entre os meios. Na interface entre eles, processos de evaporação podem ser supervenientes e as soluções mineralizadas acabam concentrando precipitados junto às superfícies. Algumas concreções ou crostas sobre pisos e bancadas sedimentares formam-se dessa maneira, às vezes tomando aspecto

de coralóides ou massas disformes recobrimdo superfícies. A própria força da cristalização seguindo determinadas direções dos retículos cristalinos pode suplantar a força da gravidade, de modo que espeleotemas podem crescer horizontalmente ou em qualquer outra direção. As bordas de represas de travertinos podem ser construídas de baixo para cima por cristalização auxiliada pela tensão entre a



Estalagmite gigante no primeiro plano da imagem. Morro Furado, Coribe, BA. Foto: Rafael Costa da Silva.



Acima, seqüência de pequenas represas de travertino ao longo de um declive. As bordas são construídas de baixo para cima por cristalização auxiliada pela tensão entre a superfície da água represada e as superfícies dos rebordos, como mostra o detalhe.

Abaixo, espeleotemas desenvolvidos sob influência de gradientes atmosféricos no interior da Lapa Vermelha de Confins, MG.

Fotos: Mylène Berbert-Born



superfície da água represada e as superfícies dos rebordos. Todas essas formações estão entre as que mais chamam a atenção por sua delicadeza e aparente bizarrice, como as helictites, flores de calcita e de aragonita e as agulhas de gipsita.

Enfim, há um elenco enorme de possíveis formas que ainda podem estar associadas a respingos e borrifos d'água e todo tipo de dinâmica que a água pode ter no meio subterrâneo. Foram citados apenas alguns, entre os mais comuns e mais atraentes.

Mas a estética não é o único atributo dos espeleotemas. Muitos desses depósitos químicos são cientificamente valiosos porque registram informações sobre o clima e o ambiente de épocas passadas. Por exemplo, o estudo de pólenes e outros microfósseis, incorporados nos espeleotemas quando eles estão se formando, ajudam a entender como era a vegetação local e, assim, como era o clima. O uso de espeleotemas para entender a dinâmica de circulação atmosférica ao longo do tempo é uma outra linha de pesquisa que se consolidou no Brasil nas últimas duas décadas. As estalagmites, formadas no piso das cavernas, costumam ser o principal alvo desses estudos porque, conforme vão crescendo, as suas delgadas camadas de cristalização mineral vão “arquivando” as características químicas da água oriunda da superfície e das soluções que se formam no seu trajeto através do solo e rocha. Esses arquivos incluem evidências sobre a proveniência dos vapores que originaram as chuvas, a intensidade das precipitações, além de outros sinais relacionados à temperatura e cobertura vegetal.

Com a tecnologia atualmente disponível, é possível fazer a discriminação química vertical das



À esquerda, pérolas de calcita no interior de represas de travertino; à direita, conchas recobertas por calcita. Gotas caem sobre algum particulado, como um grão, um pequeno seixo ou uma concha, e esta se torna o núcleo para a precipitação de camadas concêntricas de calcita. Cada gota causa um pequeno movimento no núcleo, e assim a precipitação não “solda” a pérola no substrato em que está crescendo. Fotos: Mylène Berbert-Born

lâminas de crescimento com um grande nível de detalhe e precisão, e assim formular uma linha temporal minuciosa de mudanças ambientais, como por exemplo a alternância entre períodos secos e úmidos.

A escala do tempo é estabelecida graças à presença de elementos radioativos nos compostos carbonáticos, que se decompõem (“pai”) em novos elementos (“filho”) em um intervalo de tempo previamente conhecido. Os depósitos mais cristalinos e livres de impurezas podem ser datados em até 600 mil anos pelo método geocronológico urânio-tório (U-Th), pelo qual são verificadas as quantidades relativas (“razões”) entre o isótopo-pai, o Urânio-234 ( $^{234}\text{U}$ ), e o produto do seu decaimento radioativo, o isótopo-filho Tório-230 ( $^{230}\text{Th}$ ), presentes no material.

Estudos paleoclimáticos orientados por esse tipo de datação já foram realizados em cavernas localizadas

em várias regiões do país, enfocando longos períodos que remontam 210 mil anos antes do presente, ou intervalos milenares mais específicos que puderam ser detalhados com resolução de anos, décadas e séculos, como se verá adiante.

Além de trazer informações sobre o clima pretérito, os espeleotemas ainda podem ser usados para inferir padrões de circulação atmosférica atuais. Alguns tipos de coralóides são formados a partir da evaporação de filmes d’água sobre a rocha. Na presença de uma circulação atmosférica constante ou cíclica, a face de um corpo rochoso em contato direto com o fluxo de ar estará mais sujeita à evaporação da água, com a liberação do  $\text{CO}_2$  e a precipitação de minerais. É dessa maneira que a posição de coralóides e a inclinação de estalactites nos falam sobre as condições de fluxo de ar em uma caverna.

## Presente e passado

### Conteúdo abiótico das cavernas

Cavidades naturais subterrâneas são espaços em geral bastante confinados, que no entanto podem ter maior ou menor grau de conexão com a superfície dependendo do tamanho e número de entradas existentes, da sua situação em relação às formas de relevo superficiais, da sua posição no pacote rochoso e o grau de carstificação que este apresenta. Mesmo quando não existam aberturas aparentes na superfície e se tratem de cavidades em maior profundidade, deve-se levar em consideração que o agente responsável pela sua formação - a água - perfaz um ciclo prévio altamente dinâmico envolvendo a atmosfera, o solo e a biota superficial (o “ciclo hidrológico”), retratando assim algum tipo de interação com a superfície.

Enquanto circula pelo meio subterrâneo, a água deixa muitas marcas da sua ação, até mesmo sinais da sua composição química, que pode ser muito variável com o tempo e de lugar para lugar em função de fatores predominantes na superfície. Dependendo da energia de fluxo da água, sedimentos tão grossos e pesados como grandes seixos poderão ser transportados por longas distâncias, e todo o material carreado da superfície pode acabar acumulado de maneira organizada em determinados locais das cavernas, registrando a história das condições de fluxo no local do depósito. Mesmo quando a água não traz consigo materiais particulados, como no caso de águas que infiltram lentamente percolando longos trajetos pelas fraturas da rocha, a sua composição química se refletirá na composição dos minerais que

cristalizam no ambiente subterrâneo a partir dela. Os espeleotemas e concreções calcíticas (*flowstones*) formados lentamente no interior das cavernas são verdadeiros livros que contam como o clima se comportou no decorrer do tempo, já que o volume e a frequência do trânsito da água no ambiente subterrâneo, assim como a sua composição química, são ditados essencialmente pelo clima e por fatores que derivam dele, como a cobertura vegetal, a espessura do solo e a atividade orgânica.

Alguns espeleotemas são particularmente privilegiados como registros paleoclimáticos e paleoambientais porque apresentam um crescimento longo e muitas vezes contínuo no tempo, abrangendo períodos que podem alcançar dezenas e até centenas de milhares de anos. É o caso das estalagmites, que crescem no piso de cavernas a partir de gotejamentos no teto. O crescimento é caracterizado por finas camadas minerais sequenciadas com espessuras e tons variáveis, às vezes bem sutis a olho nu.

As fases ou ciclos de crescimento mineral das estalagmites muitas vezes podem ser contados, tal como se faz com anéis de crescimento de árvores, obtendo-se daí uma boa idéia do tempo em que prevaleceram certas condições de cristalização. Taxas de crescimento mais aceleradas, por exemplo, resultarão camadas mais espessas; alternância no tom das camadas pode indicar maior ou menor contribuição orgânica bem como a presença de outros elementos químicos, ou mesmo mudanças na cristalização mineral determinadas pelo modo como a solução interage com a atmosfera interna da caverna, tendo em vista variações nas condições de tempera-

tura, umidade e ventilação que podem ocorrer no interior da caverna. E mesmo interrupções na cristalização, sinalizadas por mudanças abruptas no padrão do crescimento, podem ser também preciosos indicadores de alguma mudança significativa no ambiente tal como um período de indisponibilidade total de água.

Dessa forma, a pura constatação visual dos padrões de organização de lâminas de crescimento mineral já permite várias suposições sobre a dinâmica de circulação da água pela caverna ao longo do tempo. Mas a análise pode ir muito além, pois os minerais também apresentam variações químicas que conseguem ser detectadas por instrumentos analíticos de alta sensibilidade. Os estudos podem focar, por exemplo, a proporção entre elementos químicos presentes (cálcio, magnésio, estrôncio, fósforo, sódio, bário, enxofre, urânio), que ajudam a entender melhor a proveniência da água, eventuais condições de armazenagem na rocha, a atividade orgânica, e outras questões que vão desde a formação dos vapores da chuva e os padrões em que ela precipita, sua percolação através do solo, possíveis efeitos de evaporação, tempo de contato da água com a rocha e trajetórias mineralizantes, entre vários outros aspectos.

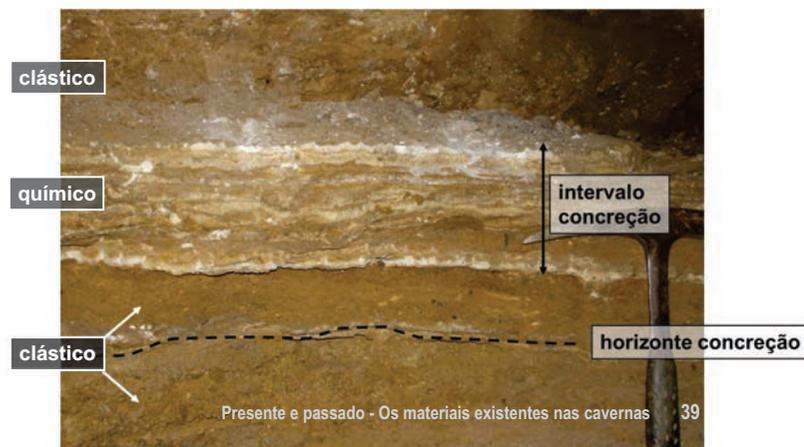
Assim, da base para o topo, das mais antigas para as mais jovens, as lâminas vão evidenciando mudanças no padrão do gotejamento ao longo do seu eixo de crescimento. Quando tomadas em conjunto, especialmente na perspectiva química, as lâminas permitem observar padrões cíclicos decenais, seculares e, principalmente, variações temporalmente mais longas, da ordem de milhares de anos, que só poderiam



Acima, cascalho grosso com seixos bem arredondados em matriz arenosa é abruptamente sobreposto por argila finamente laminada. Essa sequência presente no interior de uma caverna mostra que as condições de energia da água mudaram de modo drástico, talvez um canal fluvial para uma planície de inundação ou mesmo para um alagamento. Nota-se que a parte superficial do nível do cascalho apresenta um filme de oxidação, evidenciado um tempo em que esse material ficou exposto à atmosfera antes de ser encoberto pela argila, o que sugere uma fase de estiagem significativa, ou então mudança na rota hídrica. Gruta dos Poções ou Curral de Pedra, MG.

Abaixo, depósito sedimentar preservado no interior de caverna com alternância de sedimentos clásticos e químicos. Essa alternância sugere mudanças nas condições climáticas da superfície no momento da deposição: sedimentos clásticos estão geralmente relacionados a climas mais secos com menor cobertura de vegetação, predominando a desagregação do solo e o escoamento superficial da água; sedimentos químicos em geral estão relacionados a climas mais úmidos com maior densidade de vegetação, onde a infiltração e a percolação pela rocha prevalecem sobre o escoamento superficial. Gruta da Escada, MG.

Fotos: Mylène Berbert-Born

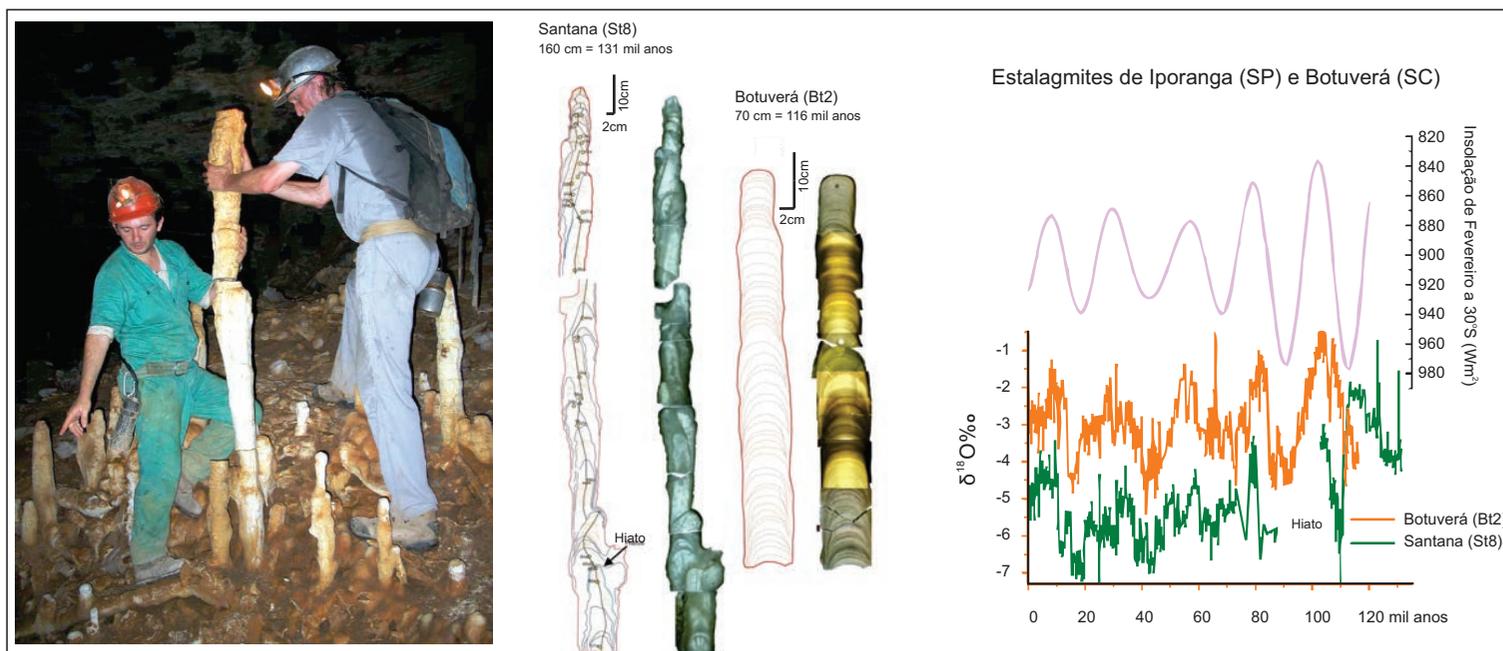


ser notadas em um marcador suficientemente longo e contínuo. Dessa forma é possível saber aspectos detalhados (de alta resolução temporal) e de longo termo (períodos amplos) relativos ao regime pluvial, tais como o volume ou intensidade de chuvas, a sua frequência, periodicidade, sua origem e tempo de permanência numa região. Esses padrões podem assinalar condições meteorológicas locais e regionais sob influência de grandes sistemas de circulação oceano-atmosfera e fenômenos climáticos continentais e globais, cuja configuração por sua vez está atrelada a parâmetros de escala orbital (astronômica), como a dinâmica de insolação planetária.

Estalagmites estudadas nas regiões sudeste, centro-leste e nordeste do Brasil, por exemplo, mostraram períodos mais úmidos que os atuais ao longo do último período glacial (em torno de 110 mil a 12 mil

anos atrás). São fases de incremento de chuvas relacionadas especialmente ao deslocamento latitudinal e fortalecimento das chamadas “monções de verão”, sistemas convectivos envolvendo a Amazônia, que atravessam a América do Sul carregando vapores originados nas regiões intertropicais. Algumas áreas atualmente ocupadas por vegetação de cerrado e caatinga passaram por períodos de expansão vegetacional, com corredores de ligação estabelecidos entre a Mata Atlântica e a Amazônia. Os estudos também mostram como as extensas calotas polares que cobriram o hemisfério norte durante o último máximo glacial (cerca de 25 mil a 20 mil anos atrás) influenciaram o clima do hemisfério sul, retratando assim aspectos da dinâmica climática do planeta.

Todas essas conclusões fundamentam-se especialmente na proporção, abundância relativa ou



“razão” entre alguns isótopos presentes na composição da calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) dos espeleotemas, mais especificamente a razão entre isótopos leves e pesados de oxigênio e carbono derivados da água.

Isótopo é o termo para um elemento químico que pode apresentar diferentes massas atômicas ou seja, mesmo número de prótons mas diferentes números de nêutrons no núcleo. O oxigênio, por exemplo, pode ter massa atômica 16 ( $^{16}\text{O}$  = 8 prótons e 8 nêutrons), 17 ( $^{17}\text{O}$  = 8 prótons e 9 nêutrons) e 18 ( $^{18}\text{O}$  = 8 prótons e 10 nêutrons). O  $^{16}\text{O}$  é o mais leve e de longe o isótopo de oxigênio mais comum na natureza, com uma abundância relativa de 99,76% contra 0,20% de  $^{18}\text{O}$ , o mais pesado. Por causa da diferença da massa atômica, os isótopos de um elemento podem ter um comportamento distinto sob determinadas condições ambientais, em que a temperatura pode ser um fator importante; ou em certas reações físicoquímicas, como por exemplo as mudanças de fase da água – evaporação e condensação. Podem ocorrer diferentes taxas nas reações químicas e diferenças na velocidade das difusões moleculares,

Pesquisa paleoclimática baseada em estalagmites datadas pelo método U-Th: à esquerda, espeleotemas no ambiente natural; ao centro, estalagmites de Iporanga (SP) e Botuverá (SC) cortadas longitudinalmente evidenciando lâminas de crescimento, as quais foram destacadas nos desenhos esquemáticos; à direita, gráficos demonstrando a correlação entre os valores isotópicos de oxigênio\* encontrados nas duas estalagmites na escala dos últimos 120 mil anos, e os ciclos de insolação de verão ao longo do mesmo período. O deslocamento entre as curvas das duas estalagmites retrata padrões pluviométricos regionais distintos.

\* $(\delta^{18}\text{O} = [({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{amostra}} / ({}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O})_{\text{padrão VPDB}}] - 1) \times 1000$

Fonte: Cruz Jr. et al. 2006, modificado.

resultando numa variação das abundâncias relativas entre cada isótopo presente, chamada de “fracionamento isotópico”.

Tomando-se o exemplo do processo de evaporação da água num sistema fechado, em que todo o vapor formado deriva de certo volume líquido, o que se observa é que a razão entre o isótopo pesado/isótopo leve de oxigênio ( $R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ ) tem um valor menor na fase vapor e valor maior na fase líquida. Ou seja, quando ocorre a evaporação, o vapor é enriquecido no isótopo leve ( $^{16}\text{O}$ ) relativamente ao pesado ( $^{18}\text{O}$ ), enquanto o líquido fica relativamente enriquecimento no isótopo pesado. É como se a evaporação do isótopo pesado de oxigênio fosse mais lenta do que o isótopo leve ou requeresse mais energia. Seguindo este mesmo princípio, quando há condensação do vapor, as primeiras moléculas líquidas estarão inicialmente enriquecidas em  $^{18}\text{O}$  (pesado) e o vapor residual cada vez mais enriquecido em  $^{16}\text{O}$  (leve) relativamente ao  $^{18}\text{O}$ . Isso acontece justamente porque as razões de troca (fracionamento termodinâmico) entre as fases líquido-vapor são diferentes para cada espécie isotópica.

Para entender os sinais isotópicos presentes nos espeleotemas, especialmente quanto ao oxigênio, é necessário compreender muito bem o conceito do fracionamento isotópico vapor-líquido abordado anteriormente, extrapolando-o para os modelos globais de circulação da água, em que o ciclo começa pela evaporação nos oceanos, formação de nuvens e migração com precipitação ao longo do seu trajeto rumo ao interior dos continentes. De acordo com esse modelo natural, espera-se que a chuva tenha

diferentes razões isotópicas conforme transcorra a precipitação e conforme os volumes precipitados. Pelos conceitos apresentados, as primeiras chuvas de uma massa de vapor terão uma razão  $R = {}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$  maior (mais positiva) uma vez que os isótopos pesados condensam mais facilmente; a razão na fase vapor restante já se torna um pouco menor em decorrência da relativa perda do  ${}^{18}\text{O}$ . Quanto maior o trajeto da massa de vapor residual, ou maior o volume de chuvas precipitadas, será cada vez menor a razão  $R$  da chuva (“mais negativa” quando comparada a certos padrões conhecidos). Em resumo: as “primeiras chuvas” de uma massa de vapor são mais ricas em  ${}^{18}\text{O}$  (mais “pesadas”) enquanto as “últimas chuvas” dessa massa de vapor são mais pobres em  ${}^{18}\text{O}$  (mais “leves”); e, chuvas mais intensas ou volumosas serão sempre mais “leves”.

Entre outros efeitos isotópicos, estes são os chamados efeitos “da continentalidade” e da “quantidade ou volume” refletidos na composição das chuvas e que também poderão ser “transferidos” para a composição dos espeleotemas ( $\text{CaCO}_3$ ) formados ao longo do tempo. É dessa maneira que, ao longo do crescimento das estalagmites tem-se o registro sequenciado bastante confiável de relações entre períodos com maior e menor pluviosidade e até mesmo sobre distância da fonte e origem dos vapores de chuva.

Outras situações que expressam muito bem a prevalência de cada isótopo a determinado meio, composto, material ou condição ambiental envolve processos biológicos, que “forçam” ou discriminam o fracionamento entre os tipos de isótopos em razão de alguma afinidade ou ganho energético resultante (fracionamento cinético). É o caso dos processos de

fotossíntese em relação aos isótopos de carbono ( $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ , razão isótopo pesado/leve). Tipos diferentes de plantas realizam a fotossíntese por diferentes vias metabólicas/enzimáticas: durante o processamento enzimático do  $\text{CO}_2$  da fonte (atmosfera) as plantas terrestres arbóreas e arbustivas, chamadas “C3”, apresentam forte preferência pelo carbono leve ( ${}^{12}\text{C}$ ), resultando numa razão  $R = {}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  significativamente menor do que a resultante do fracionamento fotossintético das plantas chamadas “C4”, comumente gramíneas que têm fotossíntese “menos discriminatória”. Assim, o carbono que é finalmente incorporado na composição dos espeleotemas ( $\text{CaCO}_3$ ), a partir de soluções que derivam da interação da água da chuva com a biomassa vegetal, solo e rocha, acaba por preservar as diferenças mais expressivas de sinais isotópicos e, por conseguinte, os indícios da prevalência de uma condição ambiental sobre outra.

Para todos os casos, o valor da razão isotópica de um material ( $R_{\text{amostra}}$ ) costuma ser apresentado pela notação “ $\delta$ ” (delta), que na verdade indica o quanto o valor desse material se desvia de padrões de referência conhecidos ( $R_{\text{padrão}}$ ), como o VSMOW (média da mistura de vários oceanos) e o VPDB (fóssil de molusco da Formação PeeDee, EUA), sempre expresso em ‰ (valor multiplicado por mil).

Todas essas informações químicas e isotópicas tornam-se particularmente interessantes e úteis se também for possível saber a sua cronologia exata, ou seja, o seu momento exato na escala de tempo real. Aqui reside a outra qualidade especial dos materiais carbonáticos precipitados no interior das cavidades subterrâneas, já destacada anteriormente: os

intervalos de deposição podem ser datados com um erro irrelevante, através do método geocronológico U-Th. Como já visto, considera-se o tempo que um elemento leva para se desintegrar por decaimento radioativo formando outro elemento mais estável, desde a sua cristalização; no caso, o decaimento do urânio U-238 para U-234 e deste para tório Th-230. Na prática, é medida a proporção entre o isótopo pai (U-234) e o filho (Th-230) no material analisado, conhecendo-se de antemão quanto tempo demora para que a metade da massa inicial do pai existente se transforme no filho (tempo de meia-vida). De acordo

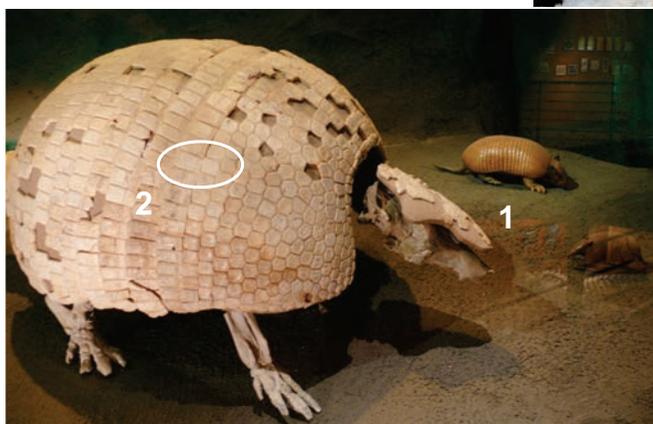
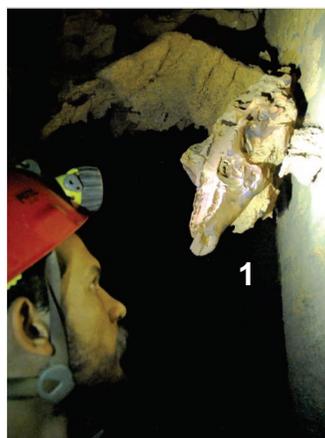
com o método, isso é possível porque o urânio está presente na composição dos calcários em proporções consideráveis e é um elemento muito solúvel, tornando-se um dos componentes das soluções que se formam pela dissolução da rocha. O mesmo não acontece com o Th-230, que é bastante insolúvel e geralmente está ausente da solução. Por isso, quando os minerais se cristalizam novamente a partir das soluções, o urânio volta a ser incorporado à fase cristalina e o tório porventura encontrado no mineral só poderá ser resultante da transformação radioativa do urânio. Para que o método seja eficiente é preciso, no entanto, ter

Ao lado, sedimento com fósseis numa fenda de caverna: crânio (1) e placas de carapaça (2) de um pampatério, animal já extinto parecido com um grande tatu.

Fotos: Rafael Costa da Silva

Abaixo, fóssil de pampatério exposto em museu, junto a espécies atuais para comparação das suas dimensões. Museu da PUC-Minas, imagem obtida de:

<http://it.wikipedia.org/wiki/Pampatherium#mediaviewer/File:Pleistocenomcnpucminas.jpg>  
(Maio de 2014)



segurança de que nenhum tório detrítico tenha sido incorporado na amostra a partir de impurezas. Por isso a escolha do espeleotema de estudo deve ser muito criteriosa, sendo sempre necessária a avaliação prévia da presença de possíveis impurezas.

No que diz respeito à sedimentação clástica, ou detrítica, as cavidades subterrâneas são como verdadeiras armadilhas ou “peneiras”, e junto aos sedimentos também podem ser acumulados restos animais que permanecem em condições favoráveis de conservação frente ao intemperismo. Cavernas são, portanto, jazigosossilíferos privilegiados em termos de organização e conservação. Estudos centrados nesses sítios têm permitido levantar muitas informações sobre a fauna quaternária, em que se destaca a megafauna extinta composta por grandes tatus, preguiças terrestres gigantes, o grande tigre dente de sabre, mastodontes e outros animais que não têm correspondentes atuais vivos.

Atualmente as cavernas estão situadas em diferentes biomas e regiões climáticas do país. A partir de fósseis presentes nessas cavernas tem sido possível reconstruir a distribuição geográfica das espécies ao longo do tempo e, com base em seus hábitos alimentares e habitats preferenciais, reconstruir a configuração pretérita dos ambientes e modelar a história de transformações regionais e locais ocorridas ao longo de boa parte do período geológico Quaternário (Pleistoceno e Holoceno).

Em apoio aos estudos paleontológicos, vale mais uma vez destacar um dos aspectos mais importantes dos sistemas deposicionais cársticos: a deposição alternada entre camadas detríticas e os horizontes

calcíticos potencialmente datáveis pelo método U-Th. Na sequência de eventos sedimentares, os horizontes calcíticos representam épocas favoráveis à percolação da água retratando períodos úmidos com disponibilidade hídrica e boa drenagem. Volumes de sedimentos clásticos por sua vez costumam ser transportados para o interior das cavidades quando o escoamento superficial da água é intenso e de alto poder erosivo, geralmente favorecido quando há pouca cobertura vegetal sobre o solo, situação típica de climas mais áridos.

A propósito do carreamento de sedimentos da superfície para o meio subterrâneo, tem-se marcado um momento em que cessa a incidência solar e a interação de radiação cósmica com esses materiais. Essas radiações induzem à transformação de alguns elementos que constituem minerais como o quartzo, por exemplo. Os novos constituintes (como o  $^{26}\text{Al}$  a partir do  $^{28}\text{Si}$ , e  $^{10}\text{Be}$  a partir do  $^{16}\text{O}$ ), chamados “cosmogênicos”, param de ser formados com o soterramento no interior das cavernas, e o que resta é fruto do tempo de decaimento radioativo dos elementos formados na superfície. Essa é uma técnica para se medir a idade em que os materiais foram depositados na caverna, relacionando-se a processos erosivos que modelaram o relevo.

Em síntese, em meio a tantas particularidades dos materiais presentes nas cavernas, o grande diferencial em relação a outros tipos de ambientes está na forma como os depósitos clásticos e químicos se organizam, com estratigrafia e microestratigrafia que permitem visualizar os padrões de atividade da água com altíssima resolução temporal, o que significa ter

A photograph showing the interior of a cave looking out through a large opening. A person is standing on a rock ledge in the center, looking out at a dense, sunlit forest. The cave walls are dark and textured, with some light-colored mineral deposits. The forest outside is vibrant green with sunlight filtering through the trees.

Uma das entradas do sistema das grutas Morro Preto e Couto, com vapores gerados pelo choque térmico de massas de ar, evidenciando elevada umidade relativa. Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, Iporanga, SP. Foto: Heros Lobo.

acesso ao registro de episódios de curto espaço temporal. Paralelamente, muitos são registros bastante longos, contínuos e precisamente datáveis, que permitem remontar amplos intervalos de tempo. Nenhum outro tipo de testemunho permite tamanha resolução aliada à precisão cronológica, o que faz das cavernas sítios ímpares para a coleta de informações paleoclimáticas.

## Espeleoclima

Afora as pesquisas paleoclimáticas, cavernas também são importantes para os estudos do clima atual. Os estudos atmosféricos em cavernas, ou espeleoclimáticos, são desenvolvidos mundialmente com distintos enfoques. O maior interesse no estudo do espeleoclima esteve inicialmente focado na compreensão dos padrões gerais de circulação atmosférica em espaços confinados, muitas vezes para aplicação similar em obras humanas, como casas,

prédios e galpões de estocagem. Com o passar dos anos, os estudos espeleoclimáticos vêm sendo focados em aspectos mais intrínsecos do ambiente, motivados tanto pelas consequências do turismo quanto pela interação entre a atmosfera, as rochas e a vida nas cavernas.

O conhecimento do espeleoclima depende de um conjunto de fatores físicos e químicos, que estão em constante variação em função da movimentação de massa gasosa (ar) e da interação com as rochas, os corpos d'água e sob influência da radiação solar, ainda que em espaços subterrâneos. Mesmo em cavidades naturais sem acesso direto à superfície, esta influência pode ocorrer indiretamente através de ciclos de massas d'água que, guardando uma elevada

conservação térmica, trariam eventuais influências epígeas (externas) para espaços subterrâneos. Também é possível que haja a transferência de calor por condução pela própria rocha, da superfície para os espaços subterrâneos, o que varia muito em função da espessura da cobertura rochosa e mesmo da presença e densidade da vegetação sobrejacente.

As variáveis fundamentais para a análise do espeleoclima são a temperatura (do ar, da água – quando presente – e das rochas), a pressão atmosférica, a intensidade e direção do vento, a umidade relativa do ar e a concentração de gás carbônico (CO<sub>2</sub>). Cada uma dessas variáveis ocupa um papel fundamental para o espeleoclima, para a bio e a geoconservação, e, em alguns casos, para as relações entre o ambiente cavernícola e os seres humanos que nele adentram.

A temperatura e a umidade relativa do ar são as variáveis mais evidentes deste sistema atmosférico, pela sua importância para o equilíbrio de microprocessos de dissolução e deposição de rochas – sobretudo em cavidades formadas por matrizes mais solúveis, onde o CO<sub>2</sub> atmosférico também ocupa papel fundamental – e mesmo para a manutenção das condições habituais de vida das espécies da biota cavernícola. Em função de aspectos como confinamento espacial, quantidade, dimensão e posição dos acessos ao ambiente externo, eixo de desenvolvimento da caverna em relação ao horizonte (para cima ou para baixo) e mesmo da espessura da matriz rochosa, diferentes padrões de variação higrotérmica (da umidade e da temperatura) serão identificados em uma caverna, gerando tanto gradientes que constituem verdadeiras “zonas espeleoclimáticas” quanto padrões mais cumulativos

ou dispersivos dos fluxos atmosféricos.

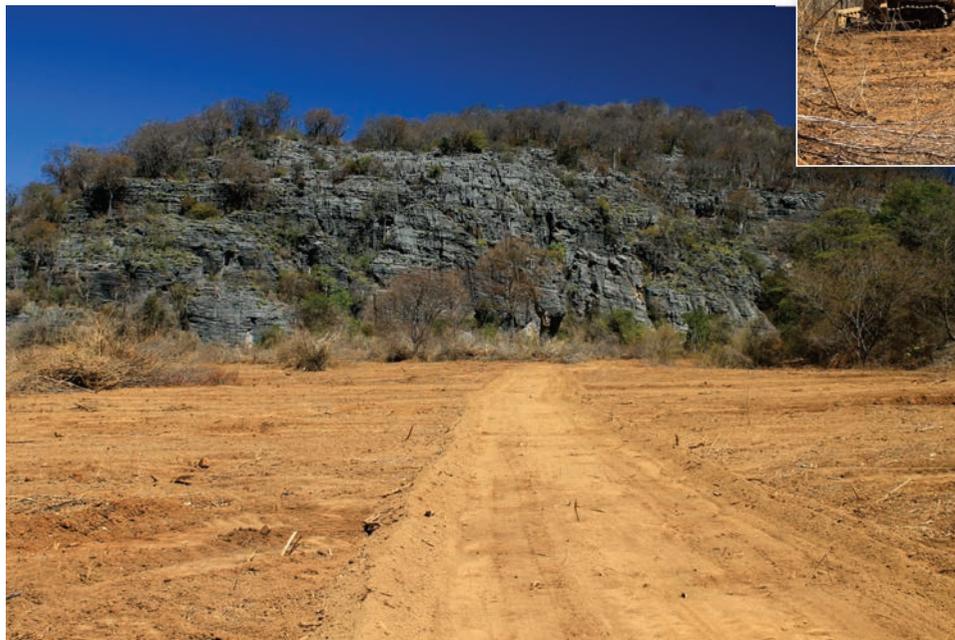
A manutenção desses padrões locais (zonas) é importante para o meio subterrâneo, pois em função de zonas mais dinâmicas ou estáveis poderão ser encontrados tipos distintos de espeleotemas, ou ainda, maior ou menor fluxo de energia e matéria (que inclui nutrientes para os organismos) entre o meio externo e interno. Outro aspecto relevante é o tipo de deposição mineral a ser formado em determinado local da caverna (calcita, aragonita), também influenciado pela temperatura do ambiente vadoso.

Nesse contexto, a manutenção das condições ambientais de uma caverna depende de cuidados a serem tomados quando há qualquer tipo de intervenção humana, como por exemplo a desobstrução forçada de acessos ao meio externo ou alargamento de condutos. Blocos de rochas ou conjuntos de espeleotemas existentes em condutos subterrâneos muitas vezes são divisores naturais para as zonas espeleoclimáticas.

Exemplo prático pode ser visto na região de um conjunto de espeleotemas na caverna de Santana (PETAR-SP) que os condutores de turistas chamam de “bolo de noiva”, o qual obstruiu parcialmente o conduto do rio Roncador, formando um estreitamento. Os padrões de penetração das massas gasosas originadas no exterior são notavelmente diferentes antes e depois desse estreitamento, a ponto de alterar o processo de condensação induzida pelo choque térmico na zona que antecede o conjunto de espeleotemas, deixando gotículas depositadas nas paredes e teto do conduto. Estas gotículas servem como indicadores de determinados limites de troca gasosa em diversas

cavernas, formando ou acentuando diversas feições de corrosão por condensação.

O próprio uso conservacionista das cavernas para fins turísticos pode interferir neste equilíbrio se não houver limites estabelecidos com base na variação e capacidade de retorno ao estado estacionário desses parâmetros. O problema, neste caso, está no aporte exacerbado de energia em sistemas relativamente fechados, por meio do calor humano, CO<sub>2</sub> expelido na respiração e, principalmente, em função de sistemas de iluminação mal planejados – sejam fixos na caverna ou móveis e carregados com os visitantes. Nesse sentido, já foram relatadas situações de perda total de espeleotemas frágeis em cavernas do Vale do Ribeira (SP), pela simples respiração constante de pessoas em suas proximidades, alterando pontualmente o equilíbrio entre temperatura, umidade relativa do ar e concentração de CO<sub>2</sub>, levando à sua dissolução.



A cobertura vegetal na superfície também interfere nos processos espeleoclimáticos por gerar, conforme a sua composição e espessura, os chamados microclimas. A supressão da vegetação aumenta a exposição solar direta nas imediações dos acessos da caverna e na sua área projetada em superfície, causando significativas interferências nos mecanismos de circulação do ar e da água no ambiente subterrâneo.

Igualmente importante é a cobertura rochosa na manutenção do espeleoclima, o que interfere na chamada área de influência da caverna. Em cavernas com espessas coberturas rochosas (e.g. Vale do Ribeira-SP), a influência direta da radiação solar é de magnitude



A remoção ou alteração da cobertura vegetal no entorno de maciços rochosos pode modificar as condições microclimáticas da atmosfera subterrânea, com impactos potenciais sobre componentes bióticos e abióticos das cavernas existentes.

Região da Serra do Ramalho, BA.

Fotos: Mylène Berbert-Born



Vale cárstico do rio Jacaré (BA) na travessia da gruta da Igrejinha, cujo pórtico tem 60 metros de altura (ver pessoa ao centro do pórtico, na foto menor). As cavernas e os paredões cársticos íngremes ajudam a conservar a umidade do vale, constituindo um ecossistema particular contrastante à caatinga.

Fotos: Aloísio Cardoso

muito menor do que em cavernas como as localizadas em algumas regiões da Bahia ou Goiás (e.g. Mambaí), onde estão mais próximas da superfície e, portanto, mais sujeitas à transmissão de calor por condução. Além disso, deve-se considerar a posição da caverna no compartimento de relevo (topo, meia vertente, fundo de vale, planície, fundo de dolina, cânion etc.) para se estabelecer, para efeito do espeleoclima, um limite adequado de raio de influência perto das entradas.

Por exemplo, algumas cavernas com a temperatura monitorada na Serra da Bodoquena, MS, localizadas em meia vertente, em meio a florestas e com entradas pequenas (aprox. 3 a 4 m<sup>2</sup>), apresentaram um raio de influência mais direta do microclima externo da ordem de dezenas de metros. Por outro lado, em cavernas monitoradas em São Desidério-BA, localizadas no fundo de dolinas com 40 a 80 metros de profundidade e diâmetro superior a 100 metros, toda a dolina e parte do ambiente epígeo adjacente têm influência direta sobre o espeleoclima, elevando para centenas de metros quadrados a área de influência sobre essas cavernas. Todavia, esses fatores têm sido negligenciados, tanto em estudos de manejo conservacionista para fins de delimitação de áreas de influência, quanto em estudos de avaliação de relevância para supressão de cavernas.

Os estudos espeleoclimáticos também são fundamentais para o conhecimento amplo dos habitats subterrâneos. As condições específicas de temperatura e umidade relativa do ar de um sistema subterrâneo estão intimamente ligadas à conservação da fauna, que muitas vezes depende desta baixa variação no médio prazo como estratégia para o baixo consumo

energético, sob condição de carência alimentar. Além disso, as espécies animais que usam as cavernas em algum estágio de suas vidas ali encontram um excelente abrigo contra flutuações climáticas, em virtude da temperatura menos variável que a externa e umidade do ar normalmente mais alta que o meio externo e com pouca variação ao longo do ano (anfíbios e vários invertebrados brasileiros aí sobrevivem durante épocas mais secas e quentes).

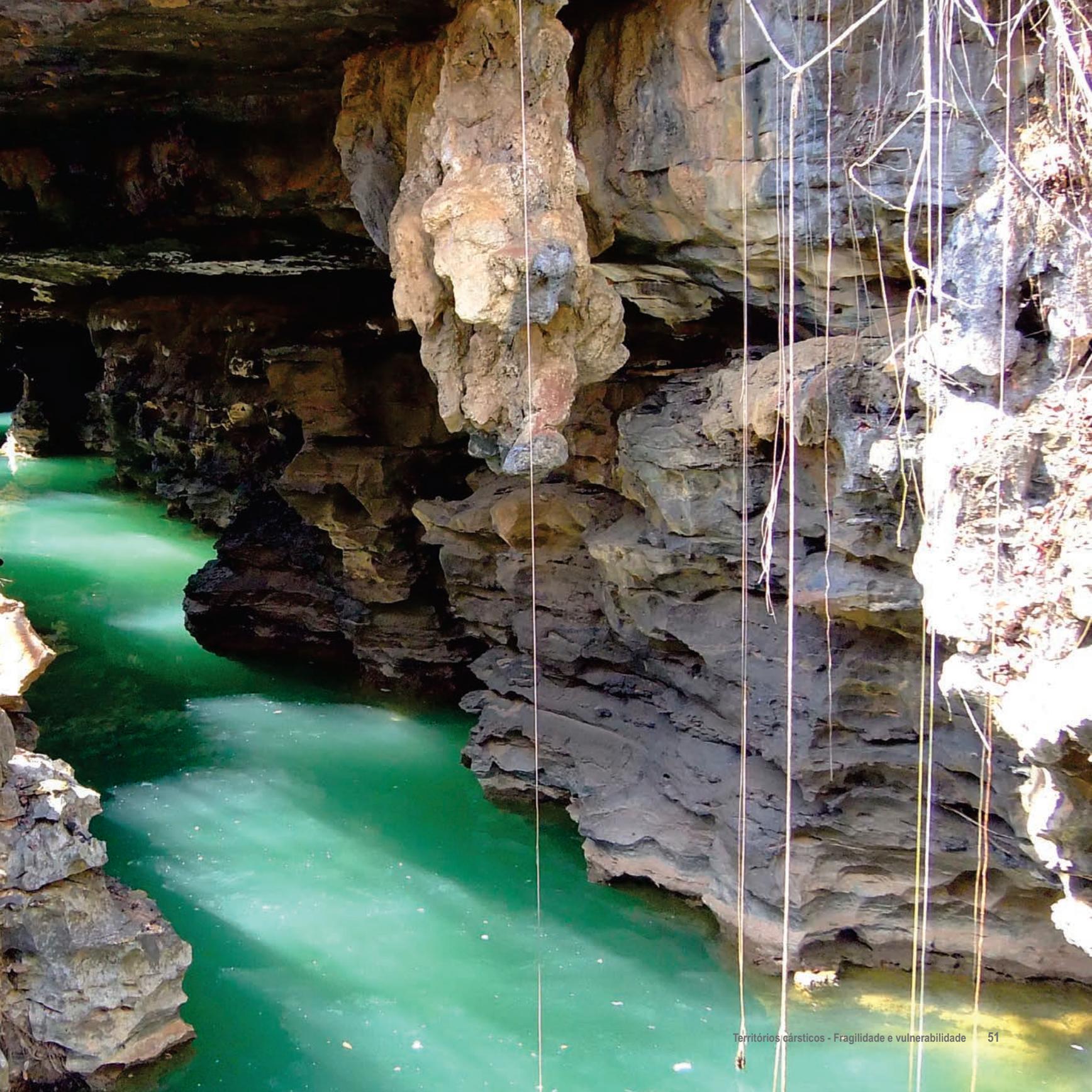
Sob a ótica antropocêntrica, a manutenção da estabilidade do espeleoclima é fundamental para comparações de médio/longo prazo com monitoramentos climáticos de superfície, permitindo traçar modelos tendenciais focados tanto em fenômenos climáticos sazonais (como por exemplo, o El Niño) quanto em hipóteses de variação climática em escala local/regional.

A maior precisão nas reconstituições paleoclimáticas a partir da datação de espeleotemas, com eventual calibração baseada em padrões atuais de variabilidade espeleoclimática, adquire especial interesse e importância na medida em que fornece bases sólidas para o aprimoramento e detalhamento de modelos aplicáveis às alterações nas sucessões climáticas do presente, com crescente poder de previsão. O valor desse “serviço” é inquestionável em vista da necessidade de embasamento científico robusto para os grandes debates sobre causas, agentes, efeitos e duração das mudanças climáticas observadas atualmente, visando a programas eficazes e sustentáveis, em nível local, regional e global, para fazer frente a tais mudanças.

Ressurgência de córrego subterrâneo na região  
cárstica de Santa Maria da Vitória (BA).

Foto: Rafael Costa da Silva





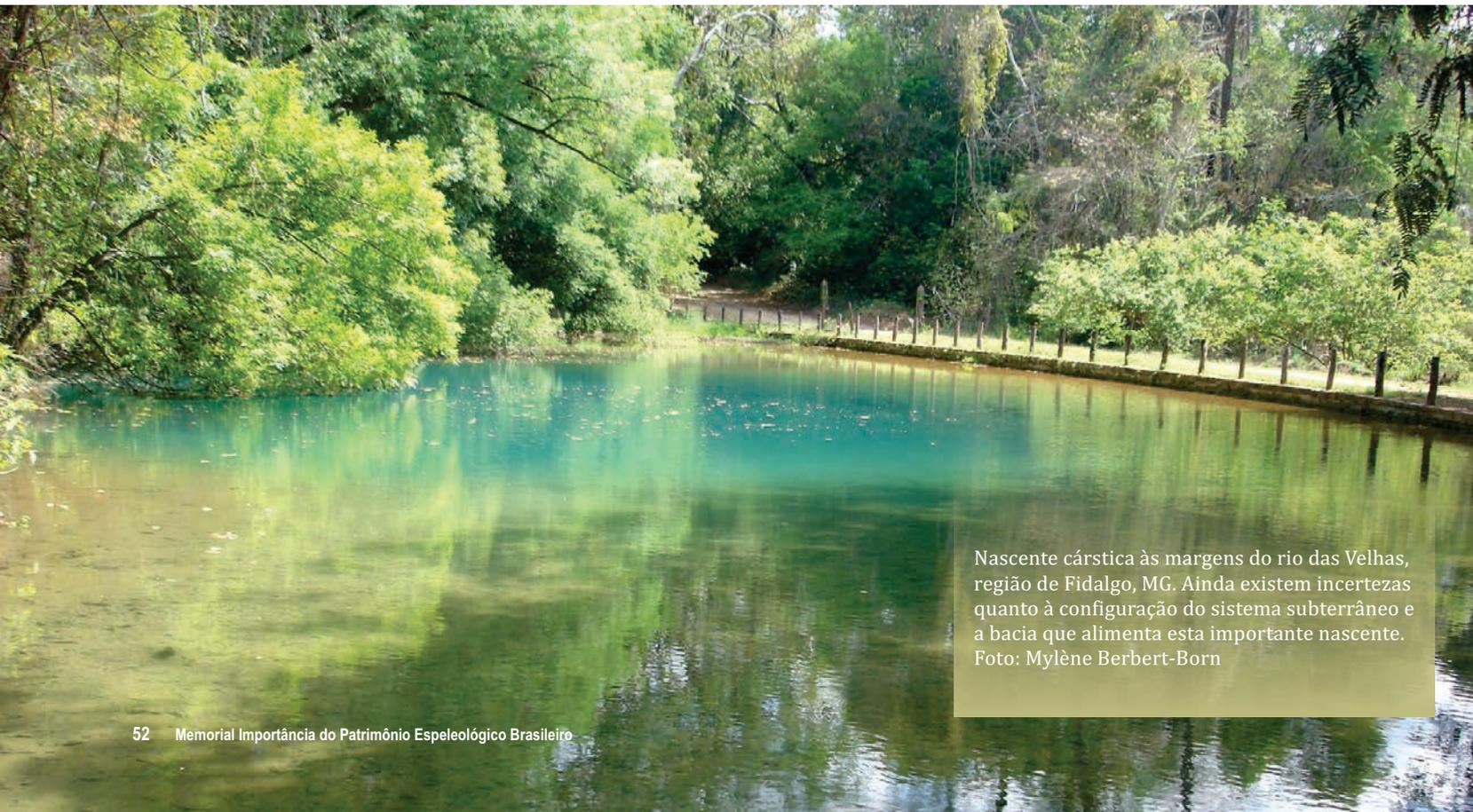
## Territórios cársticos

### Fragilidade e vulnerabilidade

Como visto, o fenômeno de dissolução da rocha leva à progressiva ampliação de espaços subterrâneos e isso conduz uma cadeia de outros processos que modelam o relevo de modo altamente dinâmico, na medida em que os materiais superficiais são remanejados para o ambiente subterrâneo. A paisagem transforma-se mais rapidamente se comparada a outros contextos geológicos por causa dessa conectividade e maior interação entre o meio superficial e o meio subterrâneo, que está em permanente expansão. A rápida infiltração da água

pelos poros, fraturas e canais de dissolução, e o transporte de sedimentos e detritos orgânicos produzidos na superfície são os principais fatores que elevam a vulnerabilidade do ambiente frente à ocupação do território e à utilização dos recursos naturais.

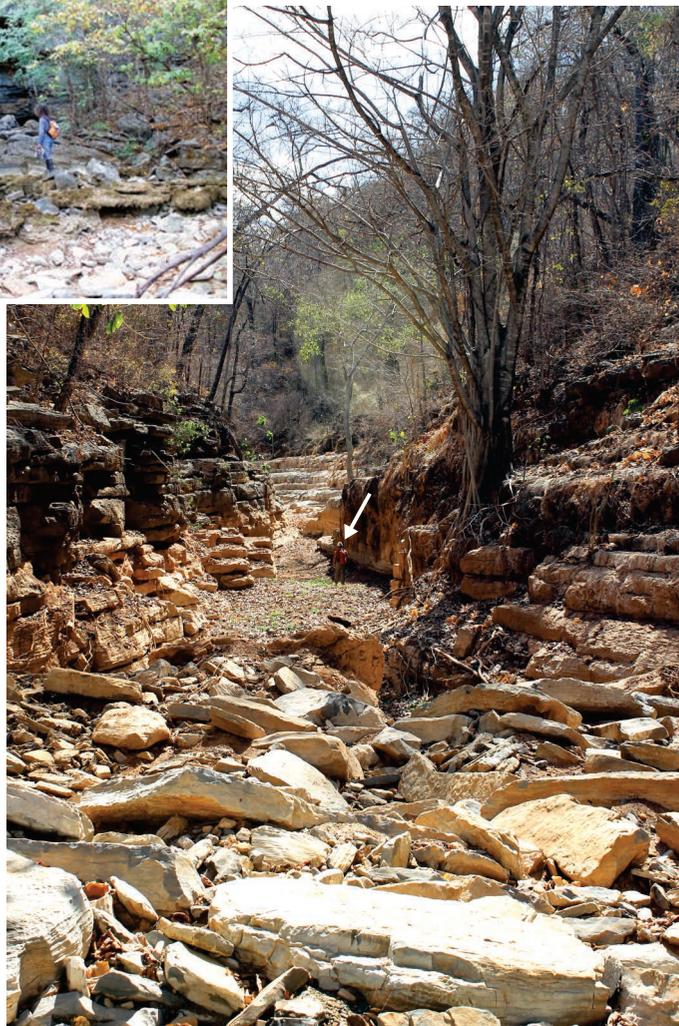
Por sua configuração, esses sistemas naturais encontram-se em condições de equilíbrio instável, em que pequenos “estímulos” podem ser o gatilho para grandes mudanças no seu estado. Por isso os ambientes cársticos são muito sensíveis a interferências artificiais, uma vez que distúrbios de pequena intensidade podem desencadear processos de grande magnitude e de expressão em escala



Nascente cárstica às margens do rio das Velhas, região de Fidalgo, MG. Ainda existem incertezas quanto à configuração do sistema subterrâneo e a bacia que alimenta esta importante nascente. Foto: Mylène Berbert-Born

geográfica regional. O assoreamento ou entupimento de um conduto subterrâneo importante para o escoamento de determinada rede de drenagem pode ter como consequência, por exemplo, a inundação de amplas áreas à montante. Bombeamento excessivo de água subterrânea é um outro exemplo de ação que pode desencadear uma série de consequências, como alterações na rota de cursos subterrâneos, rebaixamento do nível estático com inviabilização de poços tubulares, esgotamento de nascentes e até processos de colapso da superfície do terreno. Os ambientes cársticos são também particularmente suscetíveis à contaminação irremediável de recursos hídricos e extinção de espécies. Por isso são compreendidos como terrenos de alta fragilidade natural.

Ocorre que a maior facilidade de infiltração da água em geral conduz a um déficit hídrico superficial, crítico em regiões com baixos índices de precipitação ou má distribuição temporal das chuvas, onde as estações secas sejam muito pronunciadas e longas. Em face da carência hídrica superficial, a ocupação humana nessas áreas depende dos recursos do meio subterrâneo. Os recursos hídricos subterrâneos de aquíferos cársticos por sua vez podem ter boa ou má capacidade de renovação, dependendo de fatores como a geomorfologia e a organização hidrográfica regional, as quais são condicionadas pela geologia e pelo clima.



Leito rochoso seco (imagem grande, pessoa junto à seta) e ressurgência intermitente (foto pequena) na região de Serra do Ramalho, BA. Grande parte das calhas fluviais e condutos subterrâneos dessa região cárstica só ficam ativos por curto intervalo de tempo após chuvas torrenciais ou longos períodos chuvosos. Há grande carência de recursos hídricos superficiais.

Fotos: Mylène Berbert-Born



Os aquíferos cársticos são mais vulneráveis às modificações que ocorrem na superfície porque, diferentemente dos aquíferos granulares ou dos aquíferos puramente fissurais, a água não se distribui de maneira regular e homogênea pelos poros ou por estruturas com certa distribuição sistemática no espaço, sendo difícil delimitar os seus limites e saber exatamente as rotas, conexões e a velocidade do fluxo da água. Em função do relevo, a recarga da água muitas vezes ocorre de maneira concentrada com rápida infiltração em pontos de sumidouro ou onde há concentração de fissuras, situações que prejudicam a capacidade de depuração natural que existe quando a infiltração é difusa e mais lenta, através de um solo mais espesso.



Na zona vadosa ou insaturada, que está acima do nível freático, o tamanho dos condutos resultantes da dissolução e as conexões diretas com a superfície permitem que a água circule com rapidez da superfície para o subterrâneo. Esta é uma condição muito eficaz no transporte e difusão de poluentes. Nas zonas aquíferas mais profundas, e especialmente sob condições confinantes ou de isolamento (por exemplo devido a intercalação de camadas impermeáveis), a água pode ficar armazenada por períodos muito longos de tempo, na ordem de dezenas e até centenas de anos. Quando a água não tem condições de ser renovada rapidamente, qualquer contaminação será dificilmente sanada.



Assim, a poluição do solo, alterações na vegetação, mudanças no perfil de encostas, enfim, tudo que modifique de alguma maneira as condições de recarga do aquífero em termos da quantidade, temporalidade e da qualidade da água que o alimenta implica riscos diretos e indiretos à saúde ou bem estar da população. É um cenário onde estruturas urbanas requerem um meticuloso planejamento, pois qualquer contaminante, inclusive biológico, tenderá a uma difusão rápida e de difícil controle, com prognósticos muito ruins de recuperação ou mitigação.

A compreensão da dinâmica natural desses ambientes e o controle dos riscos do uso e ocupação do solo em geral requer o emprego de técnicas especiais de investigação e estudos mais detalhados e abrangentes, em espaço e tempo. Ensaios com traçadores químicos atóxicos, visando a delimitação de bacias hidrológicas, o desenho de rotas de fluxo, conexões hidrológicas e tempo de trânsito hídrico, estão entre os procedimentos muitas vezes necessários.

A retirada da vegetação traz consequências desastrosas aos ambientes cársticos. O solo exposto é facilmente erodido e os sedimentos são transportados para os condutos subterrâneos, entupindo-os (foto ao centro). A capacidade de escoamento da água pelos canais diminui e podem ocorrer inundações remontantes, ampliando a erosão local. Com o assoreamento dos canais, muitas nascentes acabam secando.

A foto ao lado ilustra um espesso pacote de areia no interior de uma caverna, com uma diferenciação do material que está mais ao topo. Esse horizonte indica que houve uma mudança da fonte sedimentar, ou de taxas erosivas na fonte, que podem estar relacionadas a uma alteração na cobertura vegetal. Cavernas na região da Serra do Ramalho, BA.

Fotos: Mylène Berbert-Born

Além disso, a utilização da água sem critérios e monitoramento adequados, que cause rebaixamento ou oscilações induzidas do nível freático, não só leva ao comprometimento da própria captação e uso da água ao longo do tempo, como também potencializa a contaminação e com frequência conduz à desestabilização e colapso da cobertura superficial, com riscos às estruturas urbanas instaladas e à própria vida. Fenômenos de subsidência são conhecidos em diversas regiões cársticas mundo afora. Um caso de óbito na Flórida, EUA (Seffner, Tampa Bay, 28/02/2013), teve intensa repercussão na imprensa norte-americana e promovendo discussões sobre a natureza dos territórios cársticos e os riscos inerentes à sua ocupação. Ver em:

<https://blogs.scientificamerican.com/rosetta-stones/living-and-sometimes-dying-with-karst/>).

Os casos brasileiros ocorridos em áreas urbanas de Cajamar, SP (1986, 1999), Sete Lagoas, MG (1988), Almirante Tamandaré, PR (1992, 2007), Teresina, PI (1999, 2008), Bocaiuva do Sul, PR (2007), Vazante (2018) felizmente não registram óbitos mas sinalizam o risco efetivo e as dimensões econômicas envolvidas nesse tipo de fenômeno. No primeiro episódio, registrado em 1986 na cidade de Cajamar, região Metropolitana de São Paulo, o aparecimento de uma cratera com mais de 30 metros de diâmetro e quase 15 metros de profundidade fez três casas desabarem, causando recalques e trincas em edificações num raio de até 400 metros de distância.

Portanto, dadas suas propriedades intrínsecas, os terrenos cársticos devem ser caracterizados sempre em maior nível de detalhe, quando se trata de

observar as suas restrições e potencialidades. É preciso compreender as suas feições superficiais – afloramentos rochosos, solo, água, vegetação e fauna – e as feições subterrâneas – cavernas e protocavernas (rede de canalículos) – como elementos interdependentes. Mesmo quando o foco parece isolar o interesse sobre uma caverna em particular, não se exime sua inserção no contexto geoambiental e ecológico como um todo.



Traçador químico fluorescente (Uranina) é derramado em sumidouro para verificação de trajeto e tempo de fluxo subterrâneo. Receptores sensíveis à substância são distribuídos nos possíveis pontos de ressurgência e em poços tubulares ao longo dos prováveis trajetos, sendo capazes de detectar a presença do traçador mesmo quando a sua concentração está muito diluída.

Foto: Mylène Berbert-Born



Colapso da superfície e formação de dolinas são fenômenos naturais muito comuns nos terrenos cársticos, decorrentes da desestabilização natural de grandes vazios subterrâneos. Mas a sobrecarga de estruturas urbanas e o bombeamento excessivo de água subterrânea também podem desencadear processos de subsidência brusca ou gradativa, com graves consequências em áreas urbanas. Na grande imagem, clarabóia (dolina) na gruta dos Brejões (BA), desabamento natural de trechos do teto da caverna. Nas imagens pequenas, buraco aberto subitamente numa estrada rural em Morro do Chapéu (BA) e o famoso caso de afundamento de solo (dolina de subsidência) ocorrido na cidade de Cajamar (SP) em 1986, com novos desdobramentos em 1999.

Fotos da Bahia: Mylène Berbert-Born;  
Buraco de Cajamar: página da Câmara Municipal de Cajamar - consulta em 17/04/2022, <https://www.cmdc.sp.gov.br/newsimg/img14.jpg>





Além dos aspectos intrínsecos que caracterizam a importância das cavernas no contexto ambiental, é preciso considerar também o seu significado para os seres humanos. Esta relação de importância é ancestral, iniciando-se na pré-história, quando as cavernas exerciam papel fundamental como abrigo ou local sagrado para as primeiras populações. Estas duas formas de uso primordiais continuaram fazendo parte do cotidiano de algumas populações na história da humanidade, como no caso dos povos trogloditas do planalto da Anatólia (atualmente, Turquia, na região da Capadócia), que desenvolveram verdadeiras cidades subterrâneas, em conjuntos de cavernas naturais e escavadas. Se no Brasil este tipo de uso não faz parte de nossa cultura ancestral mais notória, a despeito de fortes vínculos culturais que algumas etnias indígenas do Mato Grosso mantém com cavernas em suas adjacências (e.g. Nhambiquaras, Parecis, Bororos e Xavantes), o uso religioso por sua

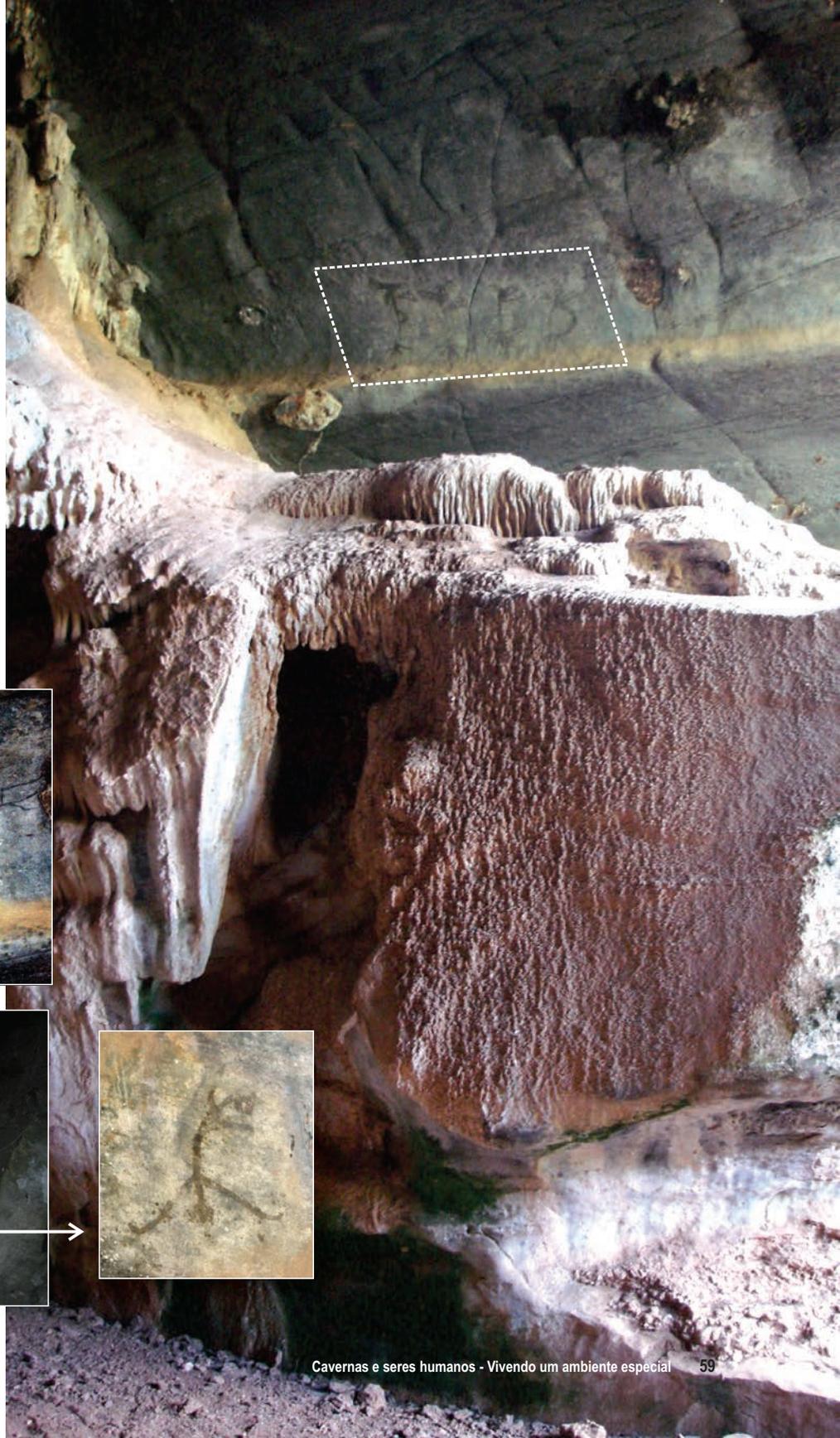
vez se expressa nas mais diversas correntes religiosas e formas de culto.

As cavernas utilizadas no todo ou em parte como santuários católicos são as mais evidentes deste tipo de uso. Exemplos clássicos no país são a Lapa da Igreja, em Bom Jesus da Lapa (BA), e a Lapa Nova, em Vazante (MG), entre muitas outras. São cavernas que foram adaptadas para uso religioso, atraindo milhares de fiéis em eventos religiosos e peregrinações movidas pela fé.

Mas outras formas de religião também precisam ser consideradas nesta perspectiva, sobretudo em um estado laico e que aceita a diversidade de opiniões. As religiões de matriz africana, por exemplo, também estabelecem relações sagradas com elementos da natureza como as águas e as cavernas, assim como algumas tribos indígenas. Existem ainda as pessoas que se dedicam à elevação espiritual, muitas vezes sob

Na página ao lado, evento místico na Gruta de Santa Terezinha - “Vibrações de Cura”. Serra do Roncador, MT. Foto: Mylène Berbert-Born

Pinturas rupestres em patamar da gruta do Ballet, MG. Um painel interpretativo do sítio arqueológico explica que as figuras podem ser representativas de um “ritual de fecundidade”, com mulheres, crianças e homens enfileirados, entre os quais uma suposta mulher grávida e uma cena de parto. Fotos: Mylène Berbert-Born



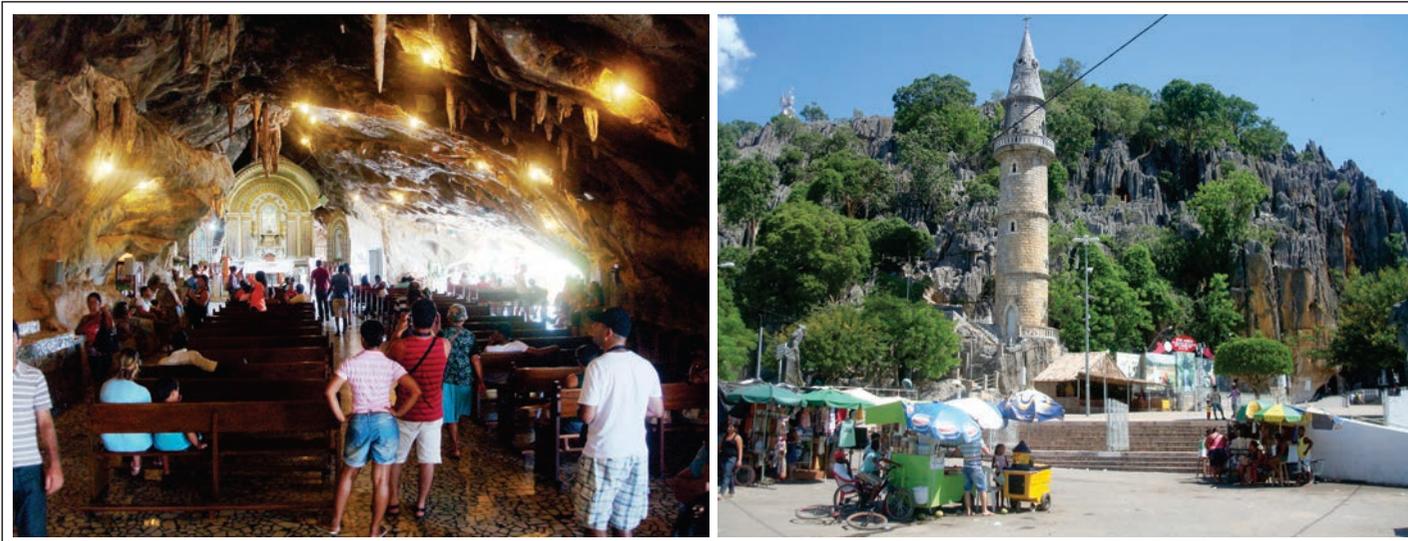
orientação de religiões e filosofias orientais e esotéricas, utilizando as cavernas – com destaque especial para seus pórticos e salões iniciais – como locais sagrados para a meditação e rituais de cura. No Brasil, estas formas de uso das cavernas estão extensamente pulverizadas pelo território, de modo que se torna impossível definir, de antemão, todas as cavernas que são utilizadas para tais fins. Até mesmo porque, muitas vezes, estes locais sagrados adquirem importância local, fazendo parte do cotidiano simples de pequenas populações com caráter mais tradicional e cultura menos massificada.

Além do uso religioso, que possui caráter social marcante em alguns grupos da sociedade, existe outro uso para as cavernas que afeta diretamente a vida de muitas pessoas: o turismo. O turismo em cavernas, ou

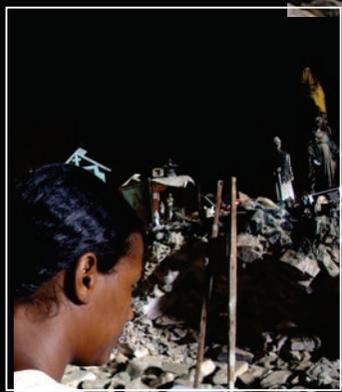
espeleoturismo, possui como principal característica a geração e ampla distribuição de renda, mesmo a longo prazo, o que é muito importante especialmente em comunidades e municípios com poucas oportunidades de desenvolvimento econômico e social. Por ser uma atividade formada por uma cadeia de prestação de serviços conjugados entre si, o turismo viabiliza o sustento de várias famílias, com uma melhor distribuição de renda relativamente a outras atividades econômicas tradicionais, como agricultura, pecuária e mineração. Em outras palavras, o turismo nem sempre é a atividade economicamente mais rentável em curto prazo, mas o dinheiro gerado por ele pode sustentar a vida de muitas pessoas e por tempo indefinido, ao contrário de outras atividades que concentram os ganhos em grandes investidores e podem esgotar os recursos em algumas décadas.

Devoção católica em Bom Jesus da Lapa, BA.

O turismo religioso em torno da caverna é muito importante para a economia do município. Foto: Heros Lobo



No Brasil existem aproximadamente 50 cavernas com algum grau de adaptação formal para o espeleoturismo, distribuídas nos Estados de Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Ceará, Paraná, Amazonas e Santa Catarina. Mas, se considerados os fluxos regionais e locais de visitação sem adaptação formal, este número sobe para mais 200 cavernas onde o espeleoturismo se desenvolve.



Gruta dos Brejões, BA. Sob o imenso pórtico acontece anualmente uma importante festa religiosa regional. Ao fundo do salão, um altar rudimentar acolhe a celebração de missas e os ex-votos dos fiéis.

Foto: Myl ne Berbert-Born



Atividade contemplativa: flutuação em bote no interior do Abismo Anhumas, Bonito, MS.

Foto: Caio Vilela 2009, Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.

Além disso, é preciso considerar também o potencial turístico da paisagem cárstica em sua amplitude, que vai além das cavernas. Alguns dos mais importantes polos receptivos ecoturísticos brasileiros estão localizados em áreas cársticas, como a Serra da Bodoquena (MS), a Chapada Diamantina (BA) e a região de Nobres (MT). Nestes locais, além das cavernas, encontra-se um belo conjunto paisagístico, com águas límpidas, cachoeiras e incríveis formas de relevo que, em conjunto com elementos da paisagem natural, fauna e mesmo o modo de vida típico sertanejo, permitem a criação de produtos turísticos únicos, inusitados e com poucos comparativos no

mundo. Sem dúvida, o carste e as cavernas estão entre as bases de uma economia sustentável que tenha no turismo de natureza um de seus elementos de sustento de comunidades locais e mesmo municípios.

Mas a economia da sustentabilidade também pode encontrar outros rumos nas áreas cársticas e cavernas, além do turismo. Na atualidade, estão em alta os mecanismos relacionados à identificação de ativos ambientais, que podem ser qualificados como prestadores de serviços para o ambiente (Pagamento por Serviços Ambientais, os PSAs) e, consequentemente, para a sociedade.

Os serviços ambientais prestados pela natureza são muitos e, em sua maioria, negligenciados pela sociedade. Entram na carteira de serviços prestados a manutenção da qualidade de nossas águas (depuração de poluentes), do ar (produção de oxigênio e sequestro de carbono), conservação da biodiversidade (que ainda é pouco estudada, e pode apresentar soluções, por exemplo, para doenças humanas, à medida que as pesquisas avançam) e as belezas cênicas (que contribuem para nosso deleite, paz interior e mesmo amenização do estresse causado, sobretudo, nos grandes centros urbanos).

Deste pequeno rol de possibilidades, há o exemplo emblemático dos morcegos. Esses mamíferos são consagrados pela literatura e no imaginário popular ocidental como criaturas maléficas, com destaque para a menção ao vampiro - embora apenas três espécies sejam hematófagas, ou seja, alimentam-se de sangue - e associação a aspectos negativos da vida. No entanto, os morcegos estão entre os mais

Acima: Além das cavernas e formas de relevo incríveis, terrenos cársticos oferecem conjuntos paisagísticos muito bonitos envolvendo águas límpidas, que os tornam balneáveis irresistíveis e ótimos locais para a prática de flutuação. Rio Itaguari, Côcos, BA. Foto: Mylène Berbert-Born.

Ao meio: Nascente Azul, Bonito, MS. Foto: Jamiledsp 2020, Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.

Abaixo: As cavernas não estão isoladas do meio cárstico que as cerca. A percepção da paisagem cárstica superficial é essencial para compreender a existência e o desenvolvimento do ambiente subterrâneo. Caminhada imersiva no vale do rio Betari, paisagem cárstica do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, Iporanga, SP. Foto: Heros Lobo.



eficientes prestadores de serviços “voluntários” para a nossa vida, atuando tanto na polinização de plantas quanto no controle de pragas. Desta forma, esses seres contribuem para o desenvolvimento da agricultura e ajudam a evitar o desequilíbrio natural.

Mesmo em cavernas onde não existam colônias de morcegos, esta perspectiva de serviços ambientais pode ser identificada e bem aproveitada. Em cavernas onde existam processos ativos de dissolução e deposição de rochas, também podem ser identificados processos benéficos para a vida na terra, por meio da fixação de carbono. Isto porque, como já explicado anteriormente, no processo de formação das cavernas ocorre a dissolução da rocha matriz, que depende da acidez gerada na relação entre a água das chuvas e o gás carbônico da atmosfera e do solo. Esta reação química produz o ácido carbônico, que por sua vez dissolve a rocha matriz, vindo posteriormente a se depositar na forma de espeleotemas, que aprisionam em sua estrutura mineral uma parte do carbono capturado na atmosfera e nos solos. Pesquisas focadas em quantificar os volumes de CO<sub>2</sub> aprisionados nos sistemas cársticos por meio deste processo poderão verificar o seu potencial de pagamento de serviços ambientais, de forma a validá-los em mecanismos internacionais de créditos de carbono.

Outras formas de uso econômico que não envolvam a supressão das cavernas também deveriam ser consideradas no Brasil pois, ainda que possam ser eventualmente causadoras de outros tipos de impactos no ambiente, a manutenção das cavernas e da paisagem associada pode, a longo prazo, oportunizar o sustento e dignidade de populações humanas. Em

outros países, o armazenamento e cultivos alimentares, bem como tratamentos de saúde preventivos e remediadores são alguns exemplos de práticas difundidas.

Nos cultivos alimentares, destaque para a produção de cogumelos comestíveis, que precisam de condições bastante controladas de umidade e temperatura, bem como da exposição de luz, o que faz das cavernas um ambiente ideal para seu aproveitamento. De igual modo, a estocagem de vinhos, que são fotossensíveis e requerem condições climáticas específicas para sua maturação. Em ambos os casos, ou outros a exemplo da maturação de queijos, as cavernas podem trazer benefícios econômicos diretos significativos. Afora o uso indireto, pois certamente estes processos, se implantados no Brasil, despertariam a curiosidade de muitos (como ocorre em outros países), servindo de suporte para o desenvolvimento de atividades turísticas mesmo em cavernas cujos atributos naturais não sejam suficientes para suscitar atratividade por si.



temperaturas amenas, observadas na grande maioria das cavernas, fornecem um meio propício para o desenvolvimento de fungos e vários tipos de bactérias. Com poucas exceções, esses organismos são inofensivos e até mesmo benéficos aos humanos, pois alguns produzem antibióticos, como os do grupo das penicilinas. Devido à isto, aliado à ausência de substâncias alergênicas, diversas cavernas da Europa Central e Oriental vêm sendo utilizadas com sucesso e comprovação científica para o tratamento de doenças respiratórias. Esta prática, ainda não realizada no Brasil, é conhecida como espeleoterapia. Aqui mais uma vez emergem os benefícios indiretos, além dos benefícios diretos de conservação e tratamento da saúde: as oportunidades de geração de cadeias de serviços e, portanto, emprego e renda em bases sustentáveis, sem o consumo direto dos recursos naturais.

Enigmática entrada de caverna, penetrada por raízes de gameleira.  
Foto: Mylène Berbert-Born



Na página ao lado: *Anoura caudifer*, espécie de morcego nectatívor/polinívoro comum em cavernas brasileiras. Notar o focinho alongado e a língua distensível típica desses animais.

Nesta página: Morcego da família Vespertilionidae, predadores de insetos em voo.  
Fotos: Wilson Uieda e Shirley Silva respectivamente.

*Stygichthys typhlops*, peixe altamente especializado e o único caraciforme troglóbio da América do Sul, ameaçado por rebaixamento do lençol freático por uso não sustentável de águas subterrâneas.

Foto: Dante Fenolio





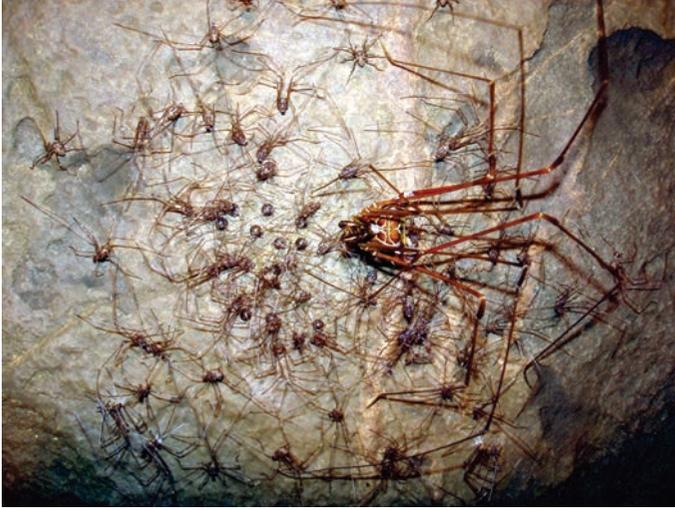


## Ecosistemas subterrâneos Singularidades e fragilidades

Como consequência das interações especiais de processos e padrões históricos, as comunidades subterrâneas apresentam aspectos singulares de grande interesse, entre os quais se destaca a coexistência de populações com diferentes tipos de relações ecológico-evolutivas com o meio hipógeo. A presença de animais muito distintos dos observados no meio epígeo, considerados altamente bizarros ou mesmos filhotes de dragões – caso das primeiras salamandras troglóbias, *Proteus anguinus*, registradas em 1689 – foi uma das primeiras constatações daqueles primeiros visitantes naturalistas de cavernas. O primeiro registro escrito de um animal exclusivamente cavernícola é de 1541 e refere-se a um peixe hialino vivendo em cavernas de Yunnan, China.

Assim, não é surpresa que tais animais tenham chamado a atenção já nos primórdios da Espeleobiologia, sendo classificados de acordo com suas relações com o meio hipógeo, em adição à classificação taxonômica (em ordem, família, gênero, até espécie). A primeira classificação estável desse tipo, proposta inicialmente em 1854 e aceita até hoje em suas categorias básicas, é conhecida amplamente por classificação de Schiner-Racovitza, em reconhecimento por seus propositores, abrangendo três categorias:





Trogloxenos:

À esquerda, colônia maternidade de morcegos hematófagos, *Desmodus rotundus*, o vampiro comum.

No destaque ao centro, morcego Phyllostomidae *Lonchorhina aurita*, em vôo.

Acima, trogloxeno obrigatório: opilião *Goniosoma spelaum*.

Fotos: Luís Fábio Silveira, Nicoleta Moracchioli e Heros Lobo, respectivamente

**Trogloxenos** - Animais regularmente encontrados em habitats subterrâneos, plenamente adaptados para nele viver parte de suas vidas, mas que precisam retornar periodicamente para o meio epígeo a fim de poder completar seu ciclo de vida. Geralmente isto ocorre porque os recursos alimentares hipógeos são insuficientes diante dos requerimentos da espécie. Essa saída pode ser diária, como no caso dos trogloxenos mais conhecidos, os morcegos; a cada alguns dias ou semanas, como fazem certos grilos e opiliões; ou mesmo sazonal, no caso daqueles que hibernam ou estavam em cavidades subterrâneas. Por outro lado, alguns trogloxenos também precisam passar parte de seu ciclo de vida no meio subterrâneo, portanto são dependentes da integridade de ambos ambientes – são os chamados trogloxenos obrigatórios.

**Troglófilos:** populações subterrâneas de espécies adaptadas para viver tanto no meio epígeo como no hipógeo, de modo que os indivíduos podem completar seu ciclo de vida em qualquer dos dois meios, sendo que, se estiverem próximos à sua transição, podem deslocar-se entre os mesmos. Isto proporciona condições para fluxo gênico (conectividade genética) entre as populações da superfície e as subterrâneas, de modo que os indivíduos dessas populações são taxonomicamente indistinguíveis, ou seja, reconhecidos como pertencendo à mesma espécie. No entanto, as populações troglófilas podem ser ecologicamente bem distintas das epígeas, com parâmetros populacionais (estrutura e densidade populacionais, taxas de crescimento, áreas de vida etc.) próprios, em resposta às condições especiais do meio hipógeo.

A maioria dos cavernícolas brasileiros são troglófilos, que incluem representantes de diversos grupos taxonômicos, como várias ordens de insetos, crustáceos, aracnídeos, miriápodes, oligoquetos, planárias etc., tanto aquáticos como terrestres.

**Troglóbios:** espécies exclusivamente subterrâneas, endêmicas de sistemas hidrológicos ou áreas contínuas de carste, uma vez que os indivíduos, altamente especializados para a vida hipógea, já não sobrevivem por muito tempo no meio epígeo, não conseguindo dispersar-se via superfície. Essas espécies são geralmente derivadas de populações troglófilas isoladas (frequentemente por extinção local da população epígea devida, por exemplo, a alterações climáticas muito acentuadas), as quais, submetidas exclusivamente ao regime seletivo



Troglófilos: crustáceo *Aegla* e aranha *Ctenus*, da área cárstica do Alto Ribeira, SP.

Fotos: Alexandre Camargo “Iscoti” e Renata Nunes, respectivamente

subterrâneo, sem fluxo de genes de fora, diferenciam-se até originar uma nova espécie. Esta diferenciação abrange vários caracteres que sofrem evolução regressiva, responsáveis pelas características mais espetaculares dos troglóbios, com destaque para a redução até perda total de olhos e da pigmentação escura (melânica) da pele. Características especializadas como estas últimas, exclusivas de espécies troglóbias, que surgiram após o isolamento no meio subterrâneo, são denominadas troglomorismos.

Como no caso dos troglófilos, há representantes troglóbios em praticamente todos os grandes grupos animais, de peixes e salamandras a planárias, passando por diversos grupos de artrópodes. Encontra-se troglóbios em diversos tipos de habitats subterrâneos (incluindo cavernas), em ambientes cársticos e, em alguns casos, até mesmo não cársticos, como é o caso dos já mencionado bagrinhos amazônicos, gênero *Phreatobius*.

Os animais classificados conforme as classes acima compartilham a condição de subterrâneos (ou cavernícolas, no caso dos que habitam cavernas propriamente ditas) “verdadeiros”, por exemplo, animais que tem uma relação ecológica definida com esse ambiente, que constitui parte ou todo o habitat da espécie, sendo capazes, no mínimo, de se orientar topograficamente na escuridão.

Em uma visita a qualquer caverna, podem ainda ser encontrados organismos que estão nela por acidente, sejam arrastados por água, que caíram por aberturas superiores, ou mesmo que entraram em busca de um ambiente ameno, mas que não conseguem se orientar para retornar ao habitat à que estão



Bagres freatóbios do delta do rio Amazonas, *Phreatobius cisternarum*.  
Foto: Janice Muriel Cunha

adaptados, não sobrevivendo por muito tempo – podem ser importantes como alimento ou mesmo substrato para os cavernícolas, mas não fazem parte da biodiversidade subterrânea em termos taxonômicos (com foco nas espécies).

Taxonomicamente, os únicos organismos definitivamente excluídos da vida subterrânea são as plantas e outros seres obrigatoriamente fotossintetizadores (alguns protistas e bactérias), que se restringem às zonas semi-iluminadas próximas às entradas, além dos animais totalmente dependentes destas para a sua alimentação e da luz para a orientação. Exceto no caso de habitats subterrâneos

com cadeias alimentares baseadas em microorganismos quimiossintetizantes (raras cavernas no mundo, nenhuma conhecida no Brasil), os ecossistemas hipógeos são basicamente dependentes de nutrientes importados do exterior, de origens diversas em termos de tipo e de proveniência. Exceto no caso de cavernas com muitos morcegos depositando grandes quantidades de guano de forma contínua, o aporte de nutrientes vem de fontes diversas, pouco abundantes, que se complementam na dieta dos cavernícolas.



Troglóbios: bagrinho cego, *Rhamdiopsis krugi*, da Chapada Diamantina, BA; e anfípode *Megagidiella azul*, da Serra da Bodoquena, MS.

Fotos: Dante Fenolio e Nicoletta Moracchioli, respectivamente

Os ecossistemas subterrâneos em geral caracterizam-se pela grande dependência de nutrientes externos, que podem provir de áreas mais ou menos extensas, por vezes distantes da caverna ou sistema em questão – por exemplo, morcegos, produtores do guano que constitui fonte alimentar e substrato importantes para muitos cavernícolas, podem ter áreas de forrageio bastante extensas e variáveis sazonalmente. Consequentemente, a determinação das áreas de influência sobre sistemas hipógeos não é de modo algum trivial, devendo incluir estudos sobre teias alimentares subterrâneas e suas conexões com variáveis externas, incluindo hidrologia, clima, ecologia populacional de troglóxenos etc., que variam anual e infra-anualmente (abrangendo vários ciclos anuais, uma vez que podem existir diferenças significativas entre anos sucessivos). Como os fatores são muitos, não é possível estabelecer o tamanho de áreas de influência *a priori*, sendo sempre necessários estudos caso-a-caso. Em situações em que isto é absolutamente necessário, pelo Princípio de Precaução tomar-se-ia as maiores áreas domiciliares conhecidas para morcegos brasileiros, com raio de 3+ km a partir de cada uma das entradas utilizadas por morcegos, superposta e somada ao contorno da microbacia ou aquífero onde a caverna se insere, desde sua(s) cabeceira(s) e/ou área(s) de recargas.

O sombreamento, umidade e características do solo no exocarste criam condições para o estabelecimento de comunidades vegetais e animais associadas, contribuindo significativamente para a biodiversidade local e regional. Em suma, a destruição de áreas com cavernas implica na perda de parcelas de

biodiversidade subterrânea e epígea. Neste caso, note-se que biodiversidade não se restringe a conjuntos de espécies expressas em números e índices – listas arrolando espécies de uma região são apenas o primeiro passo, necessário, para o conhecimento da diversidade. Para fins de comparação entre ecossistemas, é necessário abordar também a chamada biodiversidade beta, que inclui a diversidade filogenética, a diversidade funcional e a diversidade negra (que leva em consideração os grupos que se esperaria estarem representados nas comunidades, mas não o estão). No caso dos habitats subterrâneos, que funcionam como um filtro da fauna epígea, esta última é de grande importância para a compreensão da dinâmica dos ecossistemas hipógeos, mas sua determinação depende de esforço amostral extenso espacial e temporalmente.

É importante ressaltar que troglóxenos, troglóbios e troglófilos interagem entre si, sendo interdependentes e igualmente importantes do ponto de vista ecológico. Portanto, devem ser objeto de atenção e cuidados para fins de preservação no seu todo, já que representam o resultado de processos e padrões ecológicos especiais – ou seja, mesmo na ausência de troglóbios, comunidades subterrâneas devem ser objetos de cuidados para preservação. Nunca é demais ressaltar que todos os organismos subterrâneos “verdadeiros” (conforme os conceitos anteriormente expostos) contribuem para a biodiversidade, não apenas taxonômica como também genética, morfológica, ecológica etc.

## Importância dos troglóbios

Devido à fragmentação dos habitats subterrâneos, com restrição geográfica à dispersão (daí o alto grau de endemismo), associada à baixa disponibilidade de nutrientes, as populações subterrâneas são em geral pequenas. Ora, populações pequenas evoluindo em isolamento, sobretudo sob um regime seletivo muito discordante do da população de origem, tendem a diferenciar-se muito e rapidamente – o que é chamado, em Biologia, de efeito-gargalo. A consequência são animais que acumulam muitas especializações (estados autapomórficos de caracteres), como é o caso dos troglóbios.

A relativa estabilidade ambiental característica dos habitats subterrâneos confere-lhes a condição de refúgio, onde populações podem manter-se por longos períodos, chegando a muitos milhões de anos, enquanto grupos epígeos inteiros podem desaparecer por completo, deixando como únicos sobreviventes seus derivados troglóbios. Estes são os chamados “relictos”, de alta relevância científica por serem testemunhas (por vezes as únicas) de partes importantes da história evolutiva passada dos organismos. No Brasil, há vários exemplos de relictos subterrâneos, os quais vêm despertando grande interesse de pesquisadores. Entre os casos mais marcantes estão os pequenos crustáceos da ordem



Relictos: *Stygichthys typhlops* e, no detalhe, *Potiicoara brasiliensis*  
Fotos: Cristiano Moreira e Nicoletta Moracchioli, respectivamente

Spelaeagriphacea, atualmente com espécies exclusivamente subterrâneas em regiões do antigo supercontinente Gondwana: Austrália, África do Sul e Brasil (Mato Grosso e Mato Grosso do Sul), e os igualmente minúsculos isópodes Calabozoa, exclusivos de habitat subterrâneos na América do Sul (Venezuela e Brasil, na Bahia e Mato Grosso). Podem, ainda, ser mencionados os crustáceos anfípodos troglóbios *Megagidiella* (Mato Grosso do Sul) e *Spelaeogammarus* (leste do Brasil); bagrinhos *Rhamdiopsis*, da Toca do Gonçalo (BA); e *Stygichthys typhlops*, o único Characiformes troglóbio da América do Sul, tão modificado que sua posição taxonômica na família dos lambaris ainda não está bem estabelecida.

*Stygichthys typhlops*, que ocorre no lençol freático da região de Jaíba (MG), atualmente acessível somente através de poços artificiais, está altamente ameaçado por bombeamento de água para uso em agricultura extensiva. Este é um claro exemplo da inadequação da legislação ambiental, que só leva em consideração cavernas, deixando totalmente desprotegidos habitats subterrâneos não cavernícolas ameaçados. Como já mencionado, a característica mais marcante dos troglóbios (embora não seja exclusiva destes, aparecendo também em animais de outros habitats afóticos, como solo profundo, fundo de grandes rios turvos etc.) é a regressão dos olhos e da pigmentação melânica, chegando à despigmentação

Bagrinhos *Ituglanis bambui* (à esquerda), de São Domingos, GO, com olhos e pigmentação reduzidos, mas ainda presentes; e *Rhamdiopsis* sp. (à direita) da Toca do Gonçalo, BA, totalmente anoftálmico e despigmentado.

Fotos: Dante Fenolio e José Sabino respectivamente



total e à completa ausência de estruturas fotorreceptoras. Como a evolução é um processo contínuo e o tempo desde o início do isolamento, assim como as taxas de divergência, variam de acordo com a população, encontram-se, na natureza, espécies troglóbias em diferentes estágios evolutivos de regressão ocular e pigmentar, desde relictos tão diferenciados que é difícil incluí-los nos táxons atuais (e.g., *Stygichthys typhlops*), até espécies com pequena redução, ainda que significativa, de olhos e pigmentação, passando por populações com grande variabilidade nesses caracteres, incluindo desde indivíduos com olhos pouco reduzidos àqueles totalmente despigmentados e sem olhos. Mesmo não tão espetaculares quanto os troglóbios mais especializados, espécies em estágios intermediários são fundamentais para estudos comparativos e têm igual valor científico, portanto também devem ser objeto de ações conservacionistas. Por outro lado, em resposta a regimes seletivos semelhantes, pelo menos no que diz respeito à ausência permanente de luz, organismos distantemente aparentados, como planárias, crustáceos e peixes de diferentes famílias, podem convergir no que diz respeito aos troglomorismos, que se originam independentemente em cada grupo, levando a aparências superficialmente semelhantes.

Não é de surpreender que a regressão de caracteres seja um dos problemas mais estudados na Espeleobiologia. Note-se que a rudimentação de estruturas não é exclusiva dos troglóbios, sendo de fato relativamente comum entre os seres vivos. São exemplos bem conhecidos a perda das patas nas serpentes e em alguns grupos de lagartos e anfíbios, de

várias estruturas em parasitas internos, e mesmo da melanina na pele dos humanos europeus. Esse fenômeno chamou, inclusive, a atenção do naturalista Charles Darwin, que admitiu não compreender muito bem como a redução das asas dos cormorões de Galápagos, incapazes de voar, poderia se encaixar em sua teoria da seleção natural.

Há décadas, estudos genéticos baseados em troglóbios vem buscando explicações para a regressão de caracteres, e atualmente há duas teorias principais. A primeira, Teoria das Mutações Neutras, que se mantém desde a década de 1950, defende que, na ausência de luz, mutações que afetam negativamente essas estruturas e que seriam eliminadas por seleção natural no meio epígeo, não o são nos habitats subterrâneos, afóticos, onde não faz diferença ter ou não olhos e pigmentação melânica (que protege contra a luz). Esta teoria explicaria a redução de qualquer característica que perde sua função em um novo ambiente ou pela adoção de um novo modo de vida, aplicando-se, entre outros, ao caso que tanto intrigou Darwin. Por outro lado, baseados em estudos sofisticados, porém com poucas espécies, alguns autores propõem que tal perda compensaria outro caráter que poderia, assim, se desenvolver (por exemplo, a perda dos olhos em lambaris mexicanos favoreceria o aumento de botões gustativos). Seu problema é tratar-se de uma teoria que carece da necessária generalidade para explicar qualquer tipo de regressão.

A importância dos troglóbios em estudos que visam processos evolutivos gerais, os quais afetam, inclusive, a compreensão da própria evolução humana

- p. ex., o que significa a perda da melanina, que caracteriza a evolução dos paleoeuropeus? É um caráter neutro, ou foi selecionado, e para quê? E mais, esta característica confere algum tipo de superioridade para essas populações, ou é simplesmente parte de um mosaico de especializações para um novo ambiente?

Outros caracteres regressivos dos troglóbios enquadrar-se-iam igualmente no modelo neutralista, à medida que podem ser explicados pela ausência de seleção de adaptações à luz e a fotoperíodos, aliadas ao afrouxamento da pressão de predação. É o caso da perda da capacidade de tolerar flutuações ambientais, da fotofobia (a grande maioria dos troglóbios tem ancestrais noturnos, fotonegativos) e das reações fóbicas em geral, do hábito de se esconder – o que os torna particularmente vulneráveis a perturbações como a coleta –, da regressão dos mecanismos de controle temporal interno (conhecido como “relógio interno”) etc.. Troglóbios são modelos privilegiados para estudos sobre ritmicidade, aspecto com sérias repercussões na fisiologia e comportamento humanos, cujo conhecimento é importante para a qualidade de vida pelos seus desdobramentos na Medicina, Psicologia etc.

Ao mesmo tempo, troglóbios podem apresentar características claramente adaptativas, com destaque para aquelas que aparecem em consequência à denominada “compensação sensorial”: na impossibilidade da orientação visual, outros sistemas sensoriais, químicos (olfação/ gosto), mecânicos (tato, percepção de vibrações na água, audição) e mesmo eletrorreceptoras tendem a desenvolver. Assim sendo, as estruturas com receptores não-visuais

podem ser alongadas (perna e antenas de artrópodes, barbilhões de bagres) ou ter sua área aumentada (régio do focinho de alguns peixes e salamandas).

Como é de se esperar, tendo em vista as particularidades do meio subterrâneo, populações troglóbias apresentam uma ecologia toda especial, com densidades populacionais geralmente baixas e ciclos de vida muito mais lentos que dos parentes epígeos, tendendo ao que é denominado de estratégia K: a reprodução é infrequente (em geral os indivíduos não se reproduzem todos os anos), a fecundidade (número de descendentes produzidos) é muito baixa, o crescimento individual é muito lento e a expectativa de vida é muito alta. Por exemplo, enquanto bagres

Compensação sensorial: pseudoscorpião com apêndices (palpos e pernas) alongados.

Foto: Renata de Andrade



epígeos de porte médio, como os mandis, vivem por volta de 5-7 anos, derivados troglóbios tem longevidade média estimada em 15 ou mais anos, chegando, em alguns casos, a mais de 30 anos, que é uma longevidade de animais muito maiores. Consequentemente, a reposição populacional em caso de declínios, como os causados por perturbações humanas, é muito lenta e, se o fator de perturbação persistir, pode levar à sua rápida extinção. Por essa e outras razões, como a intolerância a flutuações ambientais, troglóbios são intrinsecamente organismos muito frágeis, enquadrando-se nos

critérios usados para a elaboração de listas de espécies ameaçadas, entrando todos, pelo menos, na categoria Vulnerável.

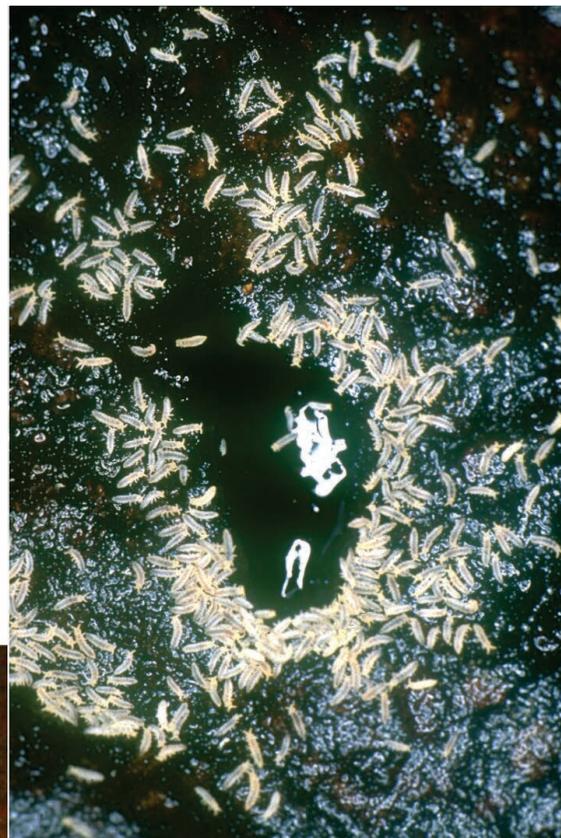
A fragmentação, o alto grau de endemismo das espécies, as taxas evolutivas inicialmente altas, levando à rápida divergência em relação aos parentes epígeos, aliadas à evolução convergente recorrente em relação a caracteres sujeitos a troglomorfismo, observados na fauna troglóbia tem poucos paralelos na natureza – o mais próximo que se tem são os arquipélagos, que sempre chamaram a atenção pela singularidade de sua fauna e necessidade de proteção especial. Devido

Espeleobióloga em trabalho de campo: coleta de invertebrados em guano de morcegos.  
(Foto: Abel Pérez González)



aos processos de efeito do fundador e deriva genética que sucedem isolamento, diferentes populações subterrâneas derivadas de uma mesma espécie epígea acabam por divergir, não só com relação ao ancestral epígeo mas também entre si, de modo que os resultados são sempre populações distintas.

Concluindo, a diversidade biológica contida mesmo em pequenos fragmentos de habitat subterrâneo pode ser muito alta em termos dos processos e padrões que produzem esses elementos, devendo ser priorizada nas ações nacionais de valorização e proteção dos ambientes naturais brasileiros.



Colêmbolos e guano de morcegos hematófagos  
Foto: Ricardo Pinto Coelho



Paisagem cárstica: escarpas calcárias na margem  
direita do rio Corrente, municípios de Santa  
Maria da Vitória e São Félix do Coribe, BA;  
Foto: Mylène Berbert-Born





## Considerações finais

No território brasileiro existem diversas e extensas áreas cársticas, assim como habitats subterrâneos não cársticos, compondo paisagens de grande importância por seus elementos físicos, biológicos, cênicos e culturais, que alcançam destaque em nível internacional. Sua diversidade e singularidade resultam de processos e padrões que vêm se desenrolando em uma escala de tempo que foge à percepção humana e cuja complexidade é de difícil compreensão, mesmo com a ajuda de métodos científicos robustos. Isso confere a tais elementos um elevado valor intrínseco, não mensurável na perspectiva das prioridades humanas.

A apreciação e o uso do carste e dos seus componentes pelos humanos conferem-lhes um caráter de patrimônio, um bem. Tratando-se de elementos naturais e culturais, dentro da ordenação jurídica brasileira eles são considerados bens difusos (de fruição comum a toda a coletividade), inalienáveis (de valor imaterial) e de natureza holística (indissociáveis do meio em que estão inseridos). É importante ressaltar que, segundo a Constituição Brasileira, os bens naturais são *res communes omnium* (coisa de todos) e não *res nullius* (coisa de ninguém) nem *res publica* (coisa pública, do Estado). Portanto, a geração que usufrui o direito de seu uso, ou seja, cada um de nós, tem o dever de garantir o usufruto, em igual medida, às gerações vindouras. Esse direito é uma garantia da nossa Carta Magna, segundo o princípio do acesso equitativo aos recursos naturais e da equidade intergeracional (art. 225 da

Constituição Brasileira).

Infelizmente e à despeito de sua inquestionável importância, até o momento não existe lei específica tratando da proteção e conservação do meio subterrâneo. Esse assunto vem sendo normatizado através de decretos, instáveis e dependentes da vontade política dos dirigentes do país, estados e municípios, além de vulneráveis às pressões de interesses alheios à perpetuação destes bens. É urgente que sejam abertas discussões no âmbito do Congresso Nacional, providas de critérios lógicos, científicos e éticos, visando lei específica para a proteção do patrimônio espeleológico e a conservação dos habitats subterrâneos e ambientes epígeos associados.

Temos o grande privilégio de viver em um país com uma rica geodiversidade e biodiversidade e valiosíssimo patrimônio natural, onde se pode usufruir cavernas e paisagens cársticas que estão entre as mais belas do mundo. Além de propiciarem locais de contemplação, crescimento econômico em bases sustentáveis e manifestações culturais, essa natureza traz oportunidades únicas para pesquisa científica. Tão grande privilégio vem com uma responsabilidade ainda maior, que é de toda a sociedade brasileira, portanto de cada um de nós, em conjunto com toda a humanidade, desta e de todas as gerações. Cada caverna, sistema ou habitat subterrâneo impactado de forma irreversível, cada geo-ecossistema perdido, é responsabilidade de cada um de nós, seja por ação, seja por omissão.

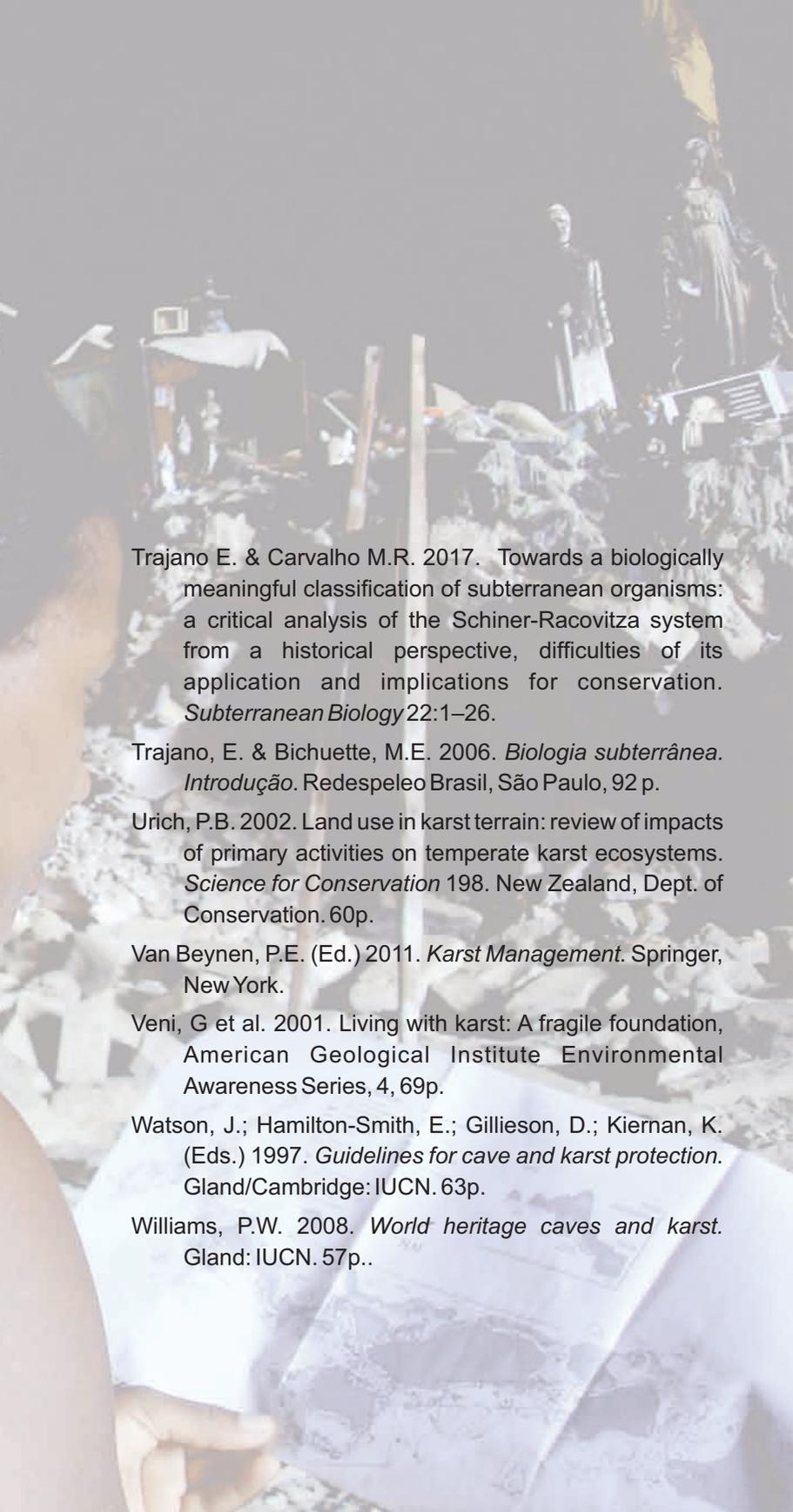


Caverna Pobe Jari, Chapada dos Guimarães, MT  
Foto: Ataliba Coelho

## Bibliografia recomendada

Listamos abaixo um pequeno elenco de referências que ampliam a abordagem de temas apresentados neste Memorial. Pela relevância dos assuntos relativos aos ambientes cársticos, uma vasta literatura tem sido produzida sob diferentes abordagens. A lista aqui oferecida é apenas um ponto de partida para aqueles que desejarem mergulhar a fundo no fascinante mundo subterrâneo. Sugerimos também um passeio pelo portal da Sociedade Brasileira de Espeleologia na internet e acesso às publicações ali disponíveis: [www.cavernas.org.br](http://www.cavernas.org.br).

- Anson, C. 2004. Aspectos jurídicos concernentes à proteção do patrimônio espeleológico brasileiro. O *Carste*, Belo Horizonte, 16 (4).
- Auler, A.S.; Piló, L.B.; Saadi, A. 2005. Ambientes cársticos. In: Souza, CRG; Suguio, K; Oliveira, AMS; Oliveira, PE. (Org.). *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos Editora, 2005, v. , p. 321-342.
- Auler, A.S. & Zogbi, L. 2005. *Espeleologia. Noções Básicas*. Redespeleo Brasil, São Paulo, 102 p.
- Cruz Jr., F.W.; Burns, S.J.; Karmann, I.; Sharp, W.D.; Vuille, M. 2006. Reconstruction of regional atmospheric circulation features during the late Pleistocene in subtropical Brazil from oxygen isotope composition or speleothems. *Earth Planet. Sci. Lett.* 248: 495-507.
- Ford, D. & Williams, P.D. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. 2nd.ed. John Wiley & Sons, England. 562p..
- Gunn, J. (Ed.) 2004. *Encyclopedia of Caves and Karst Science*. London: Taylor & Francis.
- Laureano, F.V.; Karmann, I. 2013. Sedimentos clásticos em sistemas de cavernas e suas contribuições em estudos geomorfológicos: uma revisão. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 14: 23-33,
- Palmer, A.N. 2007. *Cave Geology*. Cave Books, U.S.A, 454p..
- REDESPELEOBRASIL, 2009. *Conexão Subterrânea*, São Paulo, 73 (Especial Decreto 6640/2008).
- Rubbioli E., Auler A., Menin D. & Brandi R. 2019. Cavernas. Atlas do Brasil subterrâneo. ICMBio, Brasília, 340 pp.
- Sallun Filho, W.. Subsidência e colapso em terrenos cársticos. In: Tominaga, L.K; Santoro, J.; Amaral, R.. (Org.). *Desastres naturais - Conhecer para prevenir*. São Paulo: Instituto Geológico, 2009, v. , p. 99-110.
- Sifeddine, A.; Chiessi, C.; Cruz, F.W. 2014. Informações Paleoclimáticas Brasileiras. In: Ambrizzi, T.; Araujo, M. (Org.). *Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas..* 1ed.Rio de Janeiro: COPPE, v. 1, p. 126-180.
- Trajano E. 2019. Biodiversity in South America, p. 177-186. In: White W.B., Culver D.C. & Pipan T. (eds.), *Encyclopedia of Caves* (3rd ed.), Academic Press, London.
- Trajano E, 2020. Legislação ambiental ameaça o patrimônio espeleológico brasileiro: quando interesses econômicos se sobrepõem à sustentabilidade. *Boletim da Sociedade Brasileira de Ictiologia*, 132: 4-12.

A person is shown from the side, looking at a map of karst terrain. The map is held in their hands and shows various geographical features. In the background, there is a blurred image of a cave interior with stalactites and stalagmites, and a person standing in the distance.

Trajano E. & Carvalho M.R. 2017. Towards a biologically meaningful classification of subterranean organisms: a critical analysis of the Schiner-Racovitza system from a historical perspective, difficulties of its application and implications for conservation. *Subterranean Biology* 22:1–26.

Trajano, E. & Bichuette, M.E. 2006. *Biologia subterrânea. Introdução*. Redespeleo Brasil, São Paulo, 92 p.

Urich, P.B. 2002. Land use in karst terrain: review of impacts of primary activities on temperate karst ecosystems. *Science for Conservation* 198. New Zealand, Dept. of Conservation. 60p.

Van Beynen, P.E. (Ed.) 2011. *Karst Management*. Springer, New York.

Veni, G et al. 2001. Living with karst: A fragile foundation, American Geological Institute Environmental Awareness Series, 4, 69p.

Watson, J.; Hamilton-Smith, E.; Gillieson, D.; Kiernan, K. (Eds.) 1997. *Guidelines for cave and karst protection*. Gland/Cambridge: IUCN. 63p.

Williams, P.W. 2008. *World heritage caves and karst*. Gland: IUCN. 57p..



## SOBRE OS AUTORES

### ELEONORA TRAJANO

Graduada em Ciências Biológicas (1977), Mestrado em Zoologia (1981), Doutorado em Ciências Biológicas (1987) e Livre-Docência (1996), pelo Instituto de Biociências da USP. Docente do Departamento de Zoologia do IBUSP a partir de junho/1981, Professor Titular em julho/2006, aposentada em outubro/2012. Orientadora do programa de pós-graduação em Zoologia de 1989 a 2014. Experiência nas áreas de bio-diversidade subterrânea, taxonomia, ecologia, comportamento e evolução de peixes subterrâneos, biologia de invertebrados cavernícolas, ecologia de morcegos, conservação de ecossistemas subterrâneos, e ética.

### MYLÈNE BERBERT-BORN

Graduada em Geologia pela Universidade de Brasília (1990), Mestre em Geoquímica Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto (1998). Pesquisadora em Geociências do Serviço Geológico do Brasil SGB-CPRM desde 1994 e Pesquisadora do Museu de Ciências da Terra - MCTer. Atua na espeleologia desde 1984.

### HEROSAUGUSTO SANTOS LOBO

Bacharel em Turismo (UAM-SP, 1999). Especialista em Gestão e Manejo Ambiental em Sistemas Florestais (UFLA-MG, 2004). Mestre em Geografia (UFMS-MS, 2006). Doutor em Geociências e Meio Ambiente (Unesp/Rio Claro-SP, 2011). Professor no Departamento de Geografia, Turismo e Humanidades da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Membro do Quadro de Diretores da *International Show Caves Association* (ISCA) desde 2011. Atua em docência, pesquisa, orientações de pós-graduação e projetos conservacionistas aplicados ao carste e cavernas.

## BREVE DESCRIÇÃO DA OBRA

As cavernas estão entre os mais diferenciados e delicados ambientes do planeta Terra, em função de suas características geológicas hidrogeológicas, atmosféricas, ecológicas e biológicas. Sua relação com o ser humano é primordial, havendo registros de dezenas de milhares de anos que demonstram o quanto estes ambientes foram importantes para a proteção e para a vida na pré-história.

Na atualidade, as cavernas continuam exercendo um importante papel para a vida no planeta, embora sejam alvo de preconceitos e vítimas da desinformação sobre sua importância. É nesse contexto que o Memorial Importância do Patrimônio Espeleológico Brasileiro busca contribuir: desmistificando, eliminando preconceitos e demonstrando a ampla importância das áreas cársticas e cavernas na construção de uma sociedade responsável, para o progresso da ciência e para a conservação ambiental.



