

ESPELEOLOGIA E LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Organizadores

Jocy Brandão Cruz e Luís B. Piló



ESPELEOLOGIA E LICENCIAMENTO AMBIENTAL

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Presidente

Jair Messias Bolsonaro

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

Ministro

Ricardo Salles

Secretário Executivo

Luis Gustavo Biagioni

Secretaria de Biodiversidade

Eduardo Serra Negra Camerini

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Presidente

Homero de George Cerqueira

Diretor de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade

Marcos Aurélio Venancio

Coordenador do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

Jocy Brandão Cruz

ANGLO AMERICAN MINÉRIO DE FERRO BRASIL S.A.

Presidente

Wilfred Bruijn

Diretor de Saúde, Segurança e Desenvolvimento Sustentável

Aldo Aparecido de Souza Júnior

Gerente Corporativo de Meio Ambiente

Tiago Moreira Alves

© ICMBio 2019. O material contido nesta publicação não pode ser reproduzido, guardado pelo sistema "retrieval" ou transmitido de qualquer modo por qualquer outro meio, seja eletrônico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros, sem mencionar a fonte.

© dos autores 2019. Os direitos autorais das fotografias contidas nesta publicação são de propriedade de seus fotógrafos.

Ministério do Meio Ambiente
Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

ESPELEOLOGIA E LICENCIAMENTO AMBIENTAL

ICMBio

BRASÍLIA
AGOSTO DE 2019

ORGANIZADORES

Jocy Brandão Cruz e Luís B. Piló

AUTORES

André Afonso Ribeiro
Augusto S. Auler
Cristiano Fernandes Ferreira
Ezio Luiz Rubbioli
Jocy Brandão Cruz
José Carlos Ribeiro Reino
Luís B. Piló
Rodrigo Lopes Ferreira
Vitor Moura

REVISÃO TÉCNICA

André Afonso Ribeiro
Cristiano Fernandes Ferreira
Jocy Brandão Cruz
José Carlos Ribeiro Reino

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Sônia Rigueira

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Nélío Ribeiro e Sérgio Luciano

REVISÃO

Trema Textos

FOTOS DE ABERTURA CAPÍTULOS**FOTOS MACRO DE ABERTURA E****FECHAMENTO CAPÍTULOS**

Luciana Alt e Vitor Moura

FOTO CAPA:

Daniel de Stefano Menin - Luzes na Escuridão

FOTO CONTRACAPA:

Allan Calux

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Instituto Terra Brasilis
de Desenvolvimento Socioambiental

CATALOGAÇÃO NA FONTE**Instituto Chico Mendes de Conservação Da Biodiversidade**

-
- 159s Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
Espeleologia e Licenciamento Ambiental / Jocy Brandão Cruz e Luís Beethoven Piló. [org]
– Brasília: ICMBio, 2019.
262 p. ; Il. Color.
ISBN 978-65-5024-005-9
1. Caverna. 2. Espeleologia. 3. Estudos ambientais. 4. Licenciamento ambiental. I. Ribeiro, André Afonso. II. Auler, Augusto Sarreiro. III. Ferreira, Cristiano Fernandes. IV. Rubbioli, Ezio Luiz. V. Cruz, Jocy Brandão. VI. Reino, José Carlos Ribeiro. VII. Piló, Luís Beethoven. VIII. Ferreira, Rodrigo Lopes. IX. Moura, Vitor. X. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. XI. Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade. XII. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/Cecav. XIII. Título.

CDU: 551.44

A reprodução total ou parcial desta obra é permitida desde que citada a fonte.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
Rodovia BR 450, km 8,5 via Epia, Parque Nacional de Brasília
CEP 70635-800 - Brasília/DF - - Tel: 61 2028-9792
<http://www.icmbio.gov.br/CECAV>

©ICMBio 2019.
©dos Autores 2019.

SUMÁRIO

1 Introdução à espeleologia 9

Introdução	11
Conceitos e definições	11
Breve histórico da espeleologia	13
Potencialidades das cavernas no Brasil	17
Principais áreas contendo cavernas no Brasil	18
A importância das cavernas e do carste	25
Fragilidades das cavernas e do carste	32
As cavernas e os estudos de impacto ambiental	33
Referências	35

2 Geologia de cavernas e sua interpretação à luz da legislação ambiental espeleológica 39

Introdução	41
O Relevo Cárstico	41
As cavernas	47
Hidrologia	62
Sedimentação em cavernas	66
Paleontologia	72
Outros atributos. Inter-relação da cavidade com alguma cavidade de relevância máxima	74
Considerações finais	74
Referências	75

3 Prospeção espeleológica 77

Introdução	79
Metodologia da prospeção espeleológica	81
Conclusões e recomendações	95
Referências	96

4 Topografia e espeleometria de cavidades naturais 97

Introdução	100
Conceitos	100
Instrumentos	102
A equipe	106
Metodologias	107
O trabalho pós-campo e a confecção de mapas	110
Analisando o mapa	112
Referências	127

5 Biologia subterrânea: conceitos gerais e aplicação na interpretação e análise de estudos de impacto ambiental 128

Os ambientes subterrâneos 130

O aporte de alimento e a dinâmica trófica em sistemas subterrâneos 133

A fauna encontrada em cavernas e outros habitats e subterrâneos 136

Troglomorismos 142

Evolução em ambientes subterrâneos 146

Raros, endêmicos e relictos: como estes conceitos podem ser aplicados às espécies troglóbias? 148

Atributos de interesse biológico na atual legislação espeleológica: compreendendo melhor alguns conceitos 154

Diretrizes gerais para o inventário da fauna em cavernas 159

Considerações finais 161

Referências 162

6 Fragilidades e impactos ambientais no carste e nas cavernas 167

Introdução 169

A natureza diferenciada do carste 170

O epicarste – zona de especial interesse da conservação 172

As cavernas – importância e fragilidades 173

Problemas ambientais no carste – com exemplos no Brasil 175

Avaliação ambiental em áreas cársticas e algumas medidas preventivas 203

Monitoramento 207

Protocolo 210

Referências 212

7 Histórico e fundamentação legal 217

Histórico sobre a legislação e a conservação do patrimônio espeleológico 219

Legislação ambiental aplicada à conservação do patrimônio espeleológico 224

A Conservação do Patrimônio Espeleológico no Rito do Licenciamento Ambiental 228

Compensação Espeleológica 237

Compensação Ambiental 243

Pesquisa Científica em Cavernas Naturais Subterrâneas 245

Plano de Manejo Espeleológico 248

Mergulho em Cavernas 253

Referências 254

8 Conclusão 258

Referências 262



APRESENTAÇÃO

A expansão das atividades econômicas no Brasil e o consequente aumento da pressão sobre os recursos naturais apontou para a necessidade de um aparato legal para garantir a proteção do patrimônio espeleológico nacional e normatizar seu uso. Desde a Constituição Federal de 1988, que em seu Art. 20 inciso X instituiu as cavidades naturais subterrâneas como bens da união, foram editados diferentes atos legais pelo poder público visando a ordenar as atividades potencialmente impactantes ao patrimônio espeleológico do Brasil.

Diante das diretrizes do Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico (PNCPE), verificou-se a necessidade de aprimorar os instrumentos de gestão de cavidades naturais no âmbito do licenciamento ambiental, principalmente no que se refere ao fortalecimento da ação governamental. Assim, por meio da formação de recursos humanos e do desenvolvimento da espeleologia nos órgãos ambientais (Componente 6 do PNCPE), o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, por meio do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/CECAV), promoveu a qualificação dos profissionais de instituições pertencentes ao Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) responsáveis pela análise dos processos de licenciamento ambiental de atividades potencialmente poluidoras ou degradadoras de cavidades naturais subterrâneas, ou de sua área de influência, ministrando diversos cursos de espeleologia aplicada ao rito do licenciamento ambiental.

Com a experiência acumulada ao longo desse processo de qualificação profissional, aprimoramos o conteúdo

programático dos cursos para a publicação deste livro, cujo diferencial inicia-se pela linha editorial adotada. A abordagem é voltada ao tratamento dos atributos determinados na legislação espeleológica atual durante o rito do licenciamento ambiental. Os capítulos trazem a fundamentação teórica de forma a subsidiar a compreensão básica dos atributos correspondentes a cada tema para a devida aplicação da legislação.

O intuito é trazer um guia básico sobre o tema para auxiliar os usuários do livro na adequada avaliação de estudos espeleológicos no processo de licenciamento ambiental. Assim, iniciamos apresentando um breve histórico da espeleologia no Brasil e os seus principais conceitos e definições, seguido pelos temas fundamentais para a compreensão dos ambientes cársticos, além de conteúdos específicos do ambiente cavernícola: geoespeleologia, biologia subterrânea, prospecção espeleológica e espeleometria. Passamos então a discussões essenciais a respeito da importância, da fragilidade, das formas de controle e de monitoramento ambiental dos ambientes cavernícolas, destacando a importância da avaliação de impactos ambientais de forma sistêmica.

Partimos então para uma abordagem sobre a legislação espeleológica. Abordamos a aplicação direta da legislação tecendo considerações e recomendações acerca das mais diversas situações recorrentes na análise dos estudos necessários para a avaliação dos impactos ao patrimônio espeleológico: estudos prévios de impactos ambientais, área de influência sobre o patrimônio espeleológico, mergulho subterrâneo, pesquisa científica, compensação espeleológica, plano de manejo, entre outros.

Por fim, cabe destacar a vasta referência bibliográfica propositalmente ampliada visando a oferecer uma ampla fonte de pesquisa para os usuários do livro, transformando-o em um importante instrumento de apoio técnico e um referencial para a elaboração e a análise de estudos espeleológicos.

Jocy Brandão Cruz

Coordenador do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV/ICMBIO)

1

Introdução à espeleologia

Luís B. Piló

Augusto S. Auler





1.1 Introdução

As paisagens cársticas são caracterizadas pela presença de cavernas, rios subterrâneos, minerais raros, fauna singular, como também pela ocorrência frequente de sítios arqueológicos e paleontológicos. Em decorrência desses atributos, a espeleologia atualmente tem grande importância nos processos de licenciamento ambiental, que visam a exercer controle prévio e acompanhamento de atividades que utilizem recursos naturais, potencialmente poluidoras ou que possam causar degradação ambiental.

Temas como prospecção espeleológica, topografia de cavernas, geoespeleologia, biologia subterrânea, arqueologia, paleontologia, legislação vigente e avaliação de impactos ambientais são etapas fundamentais nos Estudos de Impactos Ambientais, definindo, juntamente com outros temas, as diretrizes de prevenção, mitigação, monitoramento e compensação ambiental.

Neste capítulo introdutório são apresentados os principais conceitos e definições sobre espeleologia e um breve histórico sobre o tema. Em seguida, as potencialidades e estimativas de cavernas no Brasil são expostas, como também as principais áreas contendo cavernas no país. A importância das cavernas e dos ambientes cársticos e suas fragilidades também são destacadas. O capítulo é finalizado introduzindo a espeleologia nos estudos de impactos ambientais.

1.2 Conceitos e definições

O termo espeleologia é derivado do grego: *spêlaion* – caverna – e *logos* – estudo. A criação do termo é creditada ao

francês Émile Rivière (1835-1922), em 1890 (GOODRUM, 2015). Rivière foi um arqueólogo que realizou importantes descobertas sobre o homem pré-histórico e sobre a arte parietal nas cavernas da França, sendo decisivo na criação da Sociedade Pré-Histórica Francesa.

Definições mais completas surgiram ao longo do tempo para o termo, merecendo destaque a definição do grande explorador e geoespeleólogo francês Bernard Gèze (1913-1996): “Espeleologia é a disciplina consagrada ao estudo das cavernas, sua gênese e evolução do meio físico que elas representam, de seu povoamento biológico atual ou passado, bem como os meios ou técnicas que são próprias ao seu estudo” (GÈZE, 1968).

No glossário de termos sobre caverna e carste da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, a Espeleologia é definida das seguintes formas: i) estudo científico de cavernas, incluindo aspectos das ciências como a geomorfologia, geologia, hidrologia, química e biologia; ii) o estudo científico, a exploração e a descrição das cavernas, de seus organismos e recursos associados; iii) ramo do conhecimento que abrange o estudo e a exploração de cavernas (EPA, 2002).

Nessas definições fica clara a interdisciplinaridade da espeleologia, a qual abrange disciplinas como: geologia, geografia física, biologia, arqueologia, paleontologia, meteorologia e hidrogeologia. Por outro lado, para a realização de estudos no ambiente subterrâneo é necessário o conhecimento de técnicas específicas, envolvendo exploração e mapeamento de cavernas.

Para o termo caverna, a definição mais utilizada internacionalmente consiste em uma abertura natural formada em rocha abaixo da superfície do terreno, larga o suficiente para a entrada do homem. Essa definição é adotada pela União Internacional de Espeleologia – UIS, órgão que congrega as instituições nacionais de espeleologia. Trata-se de uma definição claramente antropogênica. Em abordagens científicas adotam-se, muitas vezes, definições distintas. Sob o ponto de vista de um pequeno invertebrado de caverna, um reduzido canal pode constituir-se em uma caverna. O mesmo ocorre sob o ponto de vista da hidrogeologia, já que grandes volumes de água podem fluir por condutos muito estreitos para serem acessados pelo ser humano.

Segundo o Decreto Federal nº 6.640, de 7/11/2008:

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

As cavernas não são vazios isolados no ambiente subterrâneo, mas integram, em grande parte, uma paisagem denominada carste, ou seja, terrenos onde predominam rochas solúveis, a exemplo do calcário. Mas em outras paisagens, que não as cársticas, também podem ocorrer cavernas. As principais características dessas paisagens serão apresentadas no capítulo seguinte, de Geoespeleologia.

1.3 Breve histórico da espeleologia

Embora houvesse relatos anteriores sobre as cavernas, coube ao francês Édouard-Alfred Martel (1859-1938) (FIGURA 1) o título de fundador da espeleologia moderna. Embora E. Martel fosse um membro do Tribunal de Comércio de Paris, entre 1886 e 1898, passou a maior parte de sua vida envolvido com a exploração e o estudo das cavernas. Além de suas explorações, E. Martel era bem versado em observações científicas. De 1890 a 1936 ele publicou centenas de artigos e mais de uma dezena de livros, dentre os quais *Les Cévennes*, *Les Abîmes*, *Explications sur Mammoth Cave*, *Nouveau Traité des Eaux Souterraines*, dentre outros.

Em 1895 ele fundou a Sociedade de Espeleologia, que se tornou, mais tarde, a Federação Francesa de Espeleologia (FFS), que visa à exploração, ao estudo e à proteção das cavernas, cujos trabalhos são publicados em um boletim informativo chamado *Spelunca* (ainda publicado pela FFS). Ele também visitou as regiões calcárias da França, Irlanda, Áustria, dos Estados Unidos, da Espanha e da Inglaterra.

Seus trabalhos pioneiros em hidrogeologia indicaram que as águas subterrâneas apresentavam grande suscetibilidade à poluição, pois muitas vezes não eram filtradas pelo solo, o que poderia gerar problemas de contaminação. A partir de suas observações E. Martel propôs medidas para preservar a qualidade das águas subterrâneas da França. Em 15 de fevereiro de 1902 a "Lei Martel" foi promulgada pelo parlamento francês. A lei estabeleceu zonas de proteção, proibindo o lançamento de animais mortos e lixo nos abismos e sumidouros, medida que contribuiu de forma decisiva para o declínio dos casos de febre tifoide na França. Em 1899, Martel deu o que foi possivelmente o primeiro curso livre de espeleologia na conceituada Universidade de Sorbonne (FOURNIER, 1981).

Nas primeiras décadas do século XX, outros pesquisadores europeus contribuíram para a formação dos fundamentos iniciais da espeleologia, dentre os quais Emil Racovitza (FIGURA 2), romeno considerado o pai da biologia subterrânea moderna, assim como os pesquisadores da Escola de Viena, incluindo Grund e Cvijic, que formularam as primeiras ideias sobre a evolução do relevo cárstico, onde se incluíam as cavernas. Na América do Norte podemos destacar os trabalhos de William M. Davis sobre a origem das cavernas calcárias, dentro de uma perspectiva cíclica (DAVIS, 1930).

No Brasil, o aumento do interesse pelas cavernas é marcado pelo auge da exploração da terra salitrosa do interior das cavernas para produção do salitre e fabricação da pólvora no século XVIII e, particularmente, no século XIX (GOMES; PILÓ, 1992), assim como pelos inúmeros relatos de naturalistas que vasculharam o país a partir do século XVIII.

Um dos primeiros e mais importantes foi o baiano Alexandre Rodrigues Ferreira, que em sua *Viagem Philosophica* descreveu cavernas na fronteira oeste do

Figura 1 – E. Martel. Foto de Georges Pénabert (1887)



Fonte: Bibliothèque Nationale de France, Département Société de Géographie, SG PORTRAIT-1852. (<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b84533094/f1.item>)

Figura 2 – Emil Racovitza na Academia Romena



Fonte: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Emil_Racovita)

país, além de ter elaborado o primeiro mapeamento de caverna conhecido no Brasil, efetuado em 1790, na gruta da Onça, no Mato Grosso (AULER; ZOGBI, 2005).

Numerosos naturalistas e viajantes, em sua maioria, europeus, descreveram cavernas no Brasil, entre eles Saint Hilaire, Eschwege, Pohl, Spix e Martius, Liais, Halfeld, Gardner, Burmeister, Burton, merecendo destaque o dinamarquês Peter Wilhelm Lund (FIGURA 3) e o alemão Richard Krone.

Peter Lund lançou as primeiras ideias sobre a espeleologia brasileira durante suas pesquisas nas cavernas da região de Lagoa Santa, em Minas Gerais, de 1834 a 1844. Lund explorou mais de 800 cavernas em busca particularmente de ossos fósseis (FIGURA 4). Ele contratou o norueguês Peter Andreas Brandt, um comerciante transformado em cartógrafo e pintor, que era responsável por examinar as cavernas e desenhar mapas, fósseis e outros aspectos da região. Lund discutiu, em suas memórias, a gênese das cavernas, os depósitos sedimentares clásticos e químicos, os sedimentos fossilíferos, questões tafonômicas (AULER; PILÓ, 2016), como também foi um dos pioneiros a propor a convivência entre o homem e os grandes mamíferos extintos (LUND, 1844).



Figura 3 – Foto de Peter W. Lund, com chapéu, tirada por E. Warming



Fonte: Documentação de E. Warming da Biblioteca de Botânica do Museu de História Natural da Dinamarca. Cópia digital cedida pela biógrafa de Peter W. Lund, Birgitte Holten

Figura 4 – Caixa contendo pequenos fósseis enviados das cavernas de Lagoa Santa (MG) para o Museu da Dinamarca por Peter Lund. Alguns fósseis ainda estão embrulhados em folhas do Jornal do Commercio (RJ), de 1839

Foto: Luís B. Piló

Já o engenheiro-agrimensor Richard Krone realizou um importante trabalho nas cavernas da região de Iporanga, no estado de São Paulo, entre 1897 e 1909. Essas investigações visavam à prospecção de grutas contendo material

paleontológico, tal como Lund, e culminaram com um levantamento sistemático e cadastramento de cavernas. Artigos sobre as grutas calcárias do Alto Ribeira foram publicados contendo descrições detalhadas, mapa de localização e croquis das mesmas (KRONE, 1898). Em suas explorações, R. Krone localizou e divulgou a presença de um peixe despigmentado raro, conhecido como bagre-cego, na gruta das Areias. R. Krone também recomendou a preservação de um conjunto de oito cavernas na região, que posteriormente foram adquiridas pelo Patrimônio Imobiliário do Estado de São Paulo, em 1910 (FIGUEIREDO, 2011).

Em seguida, podemos destacar a criação da Sociedade Excursionista Espeleológica dos Alunos da Escola Minas de Ouro Preto - SEE. Através de publicações lidas na revista francesa *La Nature*, estudantes da Escola de Minas de Ouro Preto mantiveram contato com a *Société Spéléologique de France*. Após várias correspondências e troca de informações, os estudantes ouro-pretanos fundaram, no dia 12 de outubro de 1937, o primeiro grupo espeleológico das Américas. A SEE, liderada pelo espeleólogo Victor Dequech (FIGURA 5), atuou de maneira intensa, mapeando e elaborando relatórios de importantes cavernas brasileiras, sendo ainda instituição bastante atuante no cenário espeleológico brasileiro. Vale ainda destacar a criação, pela SEE, da pioneira revista *Espeleologia*.

Já no final da década de 1950, foi criada uma seção de espeleologia no Clube Alpino Paulista - CAP, formado particularmente por espeleólogos europeus, merecendo destaque o espeleólogo francês Michel Le Bret (FIGURA 5). Também podemos ressaltar os franceses Pierre Martin e Guy Collet, amigos de Le Bret, que atuaram em várias explorações no Vale do Ribeira, no sul de São Paulo. Esses espeleólogos, juntamente com os espeleólogos brasileiros José E. Guimarães, Pedro Comério, Luís Alcântara Marinho e Salvador Licco Haim, foram os responsáveis pela idealização e pela realização do primeiro Congresso Brasileiro de Espeleologia, em 1964, na gruta Casa de Pedra, no Vale do Ribeira (LINO, 1989; AULER; ZOGBI, 2005).

A integração com a SEE permitiu a realização de mais três congressos de espeleologia em Ouro Preto (MG), gerando uma grande motivação para a criação de uma entidade nacional. Em 1º de novembro de 1969, durante o IV Congresso Brasileiro, foi fundada a Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE, tendo Michel Le Bret como primeiro presidente.

A partir da década de 1970 foram surgindo alguns grupos espeleológicos, dentre os quais o Centro Excursionista



Figura 5 – Dois expoentes da espeleologia brasileira. À esquerda, Michel Le Bret, um dos fundadores da SBE e, à direita, Victor Dequech, um dos fundadores da SEE, primeira sociedade espeleológica das Américas. **Foto:** Leda Zogbi

Universitário – CEU, em São Paulo (SP), o Espeleo Grupo de Brasília – EGB, no Distrito Federal, e o Centro de Pesquisas Geológicas – CPG, em Belo Horizonte (MG). Na década de 1980 novos grupos surgiram, destacando-se o Núcleo de Pesquisas Espeleológicas – NAE, o Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas – GBPE, e o Espelo Grupo de Monte Sião, em Minas Gerais; o Grupo de Estudos Espeleológicos do Paraná – GEEP/Açungui, o Grupo Espeleológico Paraense – GEP e o Grupo Espeleológico Marabá – GEM, no Pará; além do Grupo Pierre Martin de Espeleologia – GPME e da União Paulista de Espeleologia - UPE, em São Paulo.

Na década de 1980 também teve início a consolidação da ciência espeleológica brasileira no meio acadêmico, com a formação de grupos de pesquisas nas áreas de bioespeleologia e geoespeleologia, particularmente na Universidade de São Paulo - USP. Diversas dissertações e teses foram defendidas, incrementando o conhecimento das cavernas brasileiras. Nessa década também tiveram início as primeiras manifestações legais sobre o interesse do poder público pela conservação e proteção de cavernas. A partir da promulgação da Constituição Federal de 1988, as cavernas do País ganharam um *status* importante. Em seu Artigo 20, a Constituição definiu as cavernas brasileiras como “bens da união”. O Estado passaria a ter o direito de possuir, usar, gozar e dispor das cavernas.

A partir da década de 1990 a espeleologia avançou consideravelmente, tanto em termos técnicos como científicos. As maiores e mais profundas cavernas brasileiras foram exploradas, destacando-se a Toca da Boa Vista (BA) e a Gruta Centenário (MG), em expedições conduzidas pelo Grupo Bambuí e colaboradores. Várias dissertações e teses foram defendidas no Brasil e no exterior. Cooperações técnicas com grupos estrangeiros foram firmadas para explorações conjuntas, destacando-se a topografia detalhada da gruta do Janelão, em Minas Gerais, coordenada pelo espeleólogo francês Claude Chabert. O Decreto Federal nº 99.556, de 1990, foi publicado, definindo pela primeira vez as diretrizes para a proteção e o manejo das cavernas brasileiras, como também a exigência de elaboração de Estudos de Impacto Ambiental – EIA/RIMA em áreas de ocorrência de cavernas ou de potencial espeleológico. Em 1997 é criado, dentro da estrutura do IBAMA, o Centro Nacional de Proteção, Manejo e Estudos de Cavernas – CECAV, responsável pela política de conservação, proteção e manejo das cavernas brasileiras. Atualmente o CECAV é um Centro de Pesquisa e Conservação ligado ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio.

No início do século XXI merece destaque a “descoberta” das cavernas ferríferas. Com o advento da expansão da exploração do minério de ferro, em grande parte estimulada pela demanda desta matéria-prima pela China, ocorreu uma nova fase no cenário espeleológico brasileiro. Aliada a novos instrumentos jurídicos sobre as cavernas, estruturados através do Decreto Federal nº 6.640/2008 e pela Instrução Normativa nº 2/2009 do Ministério do Meio Ambiente - MMA, amplos trabalhos foram elaborados dentro dos estudos de impacto ambiental. Dezenas de prospecções espeleológicas foram realizadas nos terrenos ferríferos, gerando a descoberta de mais de 3.000 cavernas, principalmente nos estados do Pará e Minas Gerais, originando dados físicos e biológicos surpreendentes. A espeleologia brasileira viveu um *boom* até 2014, em grande parte decorrente da expansão da exploração do minério de ferro e do bom momento da economia brasileira, o que fez surgir várias empresas de consultoria especializadas em espeleologia e uma profissionalização do espeleólogo.

Atualmente, a espeleologia brasileira, em termos técnicos e científicos, se encontra no mesmo nível do que é praticado em países desenvolvidos. A legislação vem sendo aperfeiçoada no sentido de garantir a conservação e a proteção das cavernas relevantes, como também de prever perdas de cavernas que não apresentam atributos dignos de valoração diante da compensação ambiental.

1.4 Potencialidades das cavernas no Brasil

Cerca de 90% das cavernas reconhecidas em todo o mundo desenvolvem-se em rochas carbonáticas, destacando-se os calcários e dolomitos. O Brasil, país dominado por clima tropical úmido (equatorial) e subúmido (savânico), possui uma extensa área de ocorrência de rochas carbonáticas, estimada por Auler *et al.* (2001) em cerca de 190.000km². No entanto, devido a fatores envolvendo variáveis geológicas, geomorfológicas e climáticas, arenitos e quartzitos são também muito susceptíveis à formação de cavernas. Mais recentemente, com a constatação de que formações ferríferas e canga são extremamente favoráveis à formação de cavernas, foi adicionado mais um componente ao mosaico espeleológico brasileiro. Ocorrem também, embora em menor escala, cavernas em granito, gnaiss, rochas metamórficas variadas, como micaxistos e filitos, além de coberturas de solos.

Até o momento, cerca de 17.000 cavernas encontram-se registradas no cadastro federal brasileiro. Minas Gerais, com 6.300 cavernas, representando 39% do total das ocorrências, e Pará, com 2.473 ocorrências, representando 15% do total, são os estados com a maior quantidade de cavernas cadastradas (CECAV, 2017) (FIGURA 6).

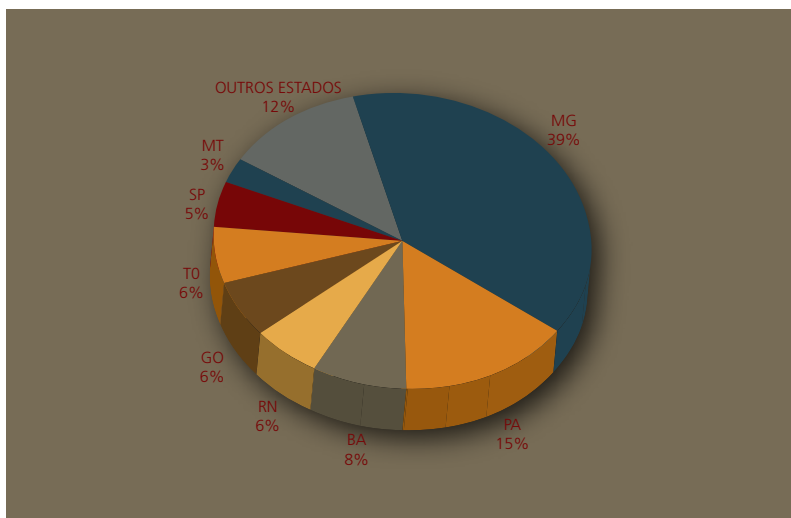


Figura 6 – Distribuição percentual de cavernas cadastradas por estado no CANIE (CECAV, 2017)

Fonte: Figura elaborada pelos autores

Esse cadastro abrange principalmente informações coletadas por grupos de espeleologia, como também aquelas geradas por empresas que efetuaram estudos espeleológicos durante o processo de licenciamento ambiental. No entanto, dados de cavernas gerados por muitas empresas ainda não foram incluídos nos cadastros espeleológicos, incluindo-se, aqui, o Cadastro Nacional de Cavernas (CNC) da SBE, encontrando-se arquivado nas próprias empresas executoras ou nos órgãos ambientais.

No caso dos grupos espeleológicos ou de espeleólogos amadores, muitos dados não foram cadastrados por falta de interesse. O número total de cavernas identificadas até o momento no Brasil deve ser superior ao referido número, com um incremento provavelmente da ordem de algumas centenas de novas cavernas por ano.

De acordo com o Artigo 3, § 4o, da Resolução CONAMA/2004, o empreendedor que vier a requerer licenciamento ambiental deverá realizar o cadastramento prévio dos dados mencionados no processo de licenciamento, independentemente do cadastro ou registro existente em outros órgãos, no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, gerenciado pelo CECAV.

A Tabela 1 apresenta, de forma preliminar, com base no conhecimento atual e na experiência pessoal dos autores, o número de cavernas identificadas até o momento em cada litologia e o provável potencial espeleológico (cavernas existentes, porém ainda não identificadas). Essa tabela deve ser considerada apenas como um referencial, uma ordem de grandeza de valores a servirem de parâmetro para a construção de um modelo de potencial espeleológico para nosso país.

Tabela 1 – Estimativa (ordem de grandeza) do potencial espeleológico brasileiro por litologia em relação a cavernas conhecidas

Litologia	Número de cavernas conhecidas	Provável potencial (cavernas ainda não conhecidas)	Porcentagem de cavernas conhecidas
Carbonatos	11.000	>150.000	7%
Quartzitos	600	>50.000	1%
Arenitos	400	>50.000	>1%
F. Ferrífera/Canga	3.000	>5.000	60%
Outras Litologias	200	>50.000	>1%

Fonte: Tabela elaborada pelos autores

O potencial espeleológico do Brasil é, ainda, enorme. Parece seguro afirmar que, hoje, menos de 5% das cavernas existentes tenham sido identificadas. Nosso potencial espeleológico situa-se seguramente na faixa de algumas centenas de milhares de cavernas. Apenas a título comparativo, em países mais desenvolvidos na identificação e exploração de cavernas, como Itália e França, com áreas equivalentes ao Estado de Minas Gerais, cerca de 40 mil cavernas são conhecidas. A ausência de pesquisa, o pequeno número de espeleólogos, as dificuldades de acesso, dentre outros motivos, justificam o reduzido conhecimento que ainda temos do potencial espeleológico brasileiro.

1.5 Principais áreas contendo cavernas no Brasil

A maior ocorrência de rochas favoráveis à formação de cavernas no Brasil é representada pelos calcários e dolomitos do Grupo Bambuí, que se desenvolvem desde o sul de Minas Gerais até o centro-oeste da Bahia, passando também pelo leste de Goiás. Inserida nos calcários do Grupo Bambuí

encontra-se, entre outras, a região de Lagoa Santa (MG), berço da espeleologia brasileira, com mais de 1.000 grutas registradas; a região de Arcos e Pains, também com centenas de cavernas conhecidas, e a região do Vale do Rio Peruaçu, com a magnífica Gruta do Janelão (FIGURA 7) e vários sítios arqueológicos (PILÓ; RUBBIOLI, 2002).

Figura 7 – Gruta do Janelão (MG) percorrida pelo Rio Peruaçu, no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. Observe, no centro da foto, a escala humana de referência da altura da galeria, que pode em alguns setores atingir mais de 100m



Foto: Ataliba Coelho

No Estado de Goiás destaca-se a região de São Domingos (FIGURA 8), com grandes cavernas percorridas por rios caudalosos, e a região de Mambáí, também com um grande número de cavidades importantes. No Estado da Bahia destacam-se a Serra do Ramalho e seus arredores, com várias cavernas importantes, entre elas a Gruta do Padre, com 16,3km de extensão, a terceira maior caverna do país, e a região de São Desidério, comportando algumas das cavernas com maior espaço interno do país.



Figura 8 - Galeria bem ornamentada com travertinos na Caverna de São Mateus (GO), no Parque Estadual de Terra Ronca

Foto: Daniel Menin

Os calcários e dolomitos do Grupo Una ocorrem a partir da região central da Bahia, estendendo-se até o norte do estado. Duas áreas concentram as principais cavernas de interesse: a região da Chapada Diamantina, com várias cavernas de grande extensão e beleza, como a Lapa Doce (FIGURA 9), e a região de Campo Formoso, que abriga as duas maiores cavernas do País, a Toca da Boa Vista (FIGURA 10) e a Toca da Barriguda, respectivamente com 114km e 35km de extensão (para saber mais sobre a Toca da Boa Vista ver AULER; SMART, 2002). Muito próximo a essas duas cavernas existem afloramentos do calcário da Formação Caatinga, que apresentam algumas cavernas importantes, entre as quais a ampla Gruta do Convento.

Figura 9 - Afloramento do lençol freático no interior da Lapa Doce (BA), na região da Chapada Diamantina

Foto: Ataliba Coelho



Figura 10 – Salão da Toca da Boa Vista (BA), maior caverna do Brasil, com mais de 114km de condutos interligados



Foto: Ataliba Coelho

No sul do Estado de São Paulo e no nordeste do Paraná afloram os calcários e dolomitos do Grupo Açungui. É uma região de grande beleza, que contém mais de 300 cavernas. No lado paulista, a maior concentração está no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), com algumas das cavernas mais ornamentadas do país, como a Caverna Santana e a caverna *Los Tres Amigos* (FIGURA 11). Próximo ao PETAR, o Parque Estadual Caverna do Diabo abriga a Caverna do Diabo, parcialmente adaptada para o turismo, com amplos salões extremamente ornamentados. O lado paranaense do Grupo Açungui possui muitas grutas, embora de menores dimensões. Em Santa Catarina ocorrem os calcários do Grupo Brusque, apresentando como principal caverna a Gruta de Botuverá, no município de mesmo nome.

Figura 11 – Salão ornamentado da caverna *Los Tres Amigos* (SP), no Parque Estadual Turístico Alto Ribeira



Foto: Daniel Menin

No oeste do país, ocorrem calcários e dolomitos do Grupo Corumbá e do Grupo Araras. Os primeiros ocorrem principalmente no Estado do Mato Grosso do Sul, nos arredores da Serra da Bodoquena, apresentando belas cavernas alagadas, principalmente nas proximidades da cidade de Bonito. O Grupo Araras, por sua vez, predomina no Mato Grosso e também apresenta muitas grutas, principalmente próximo a Nobres. Em Rondônia, no Pará e no Amazonas ocorrem alguns afloramentos de calcário. Os mais importantes situam-se próximo a Itaituba, no Pará, onde a recente colonização tem levado à descoberta de algumas cavernas importantes.

Nos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará afloram os calcários do Grupo Apodi, que, apresentam muitas cavernas, a maior parte de pequena dimensão. Ainda no Estado do Ceará, os calcários do Grupo Ubajara possuem ocorrência restrita, apresentando poucas cavernas conhecidas, entre

elas a famosa Gruta de Ubajara. Várias ocorrências de menor porte de calcários e dolomitos existem em todo o Brasil. Algumas aparentam possuir pouco potencial, ao passo que outras, em locais mais remotos, ainda não foram adequadamente exploradas por espeleólogos.

O potencial brasileiro em termos de cavernas em quartzito é enorme. O Brasil possui algumas das maiores e mais profundas cavernas do mundo nesse tipo de rocha. Numa pequena área na porção centro-sul de Minas Gerais, o Pico do Inficionado, encontram-se as mais profundas cavernas conhecidas nesse tipo de rocha. A Gruta do Centenário (FIGURA 12), com 484m de desnível e 3.800m de extensão é a mais profunda do País. A segunda e a terceira cavernas mais profundas do país, a Gruta da Bocaina e a Gruta Alaouf, respectivamente com 404m e 294m de desnível, também se localizam na mesma região.

As regiões do Parque Estadual de Ibitipoca, de Carrancas e de Luminares, no sul de Minas Gerais, também apresentam um rico acervo de cavernas quartzíticas. Outra área de importante concentração de cavernas desse tipo é a região da Chapada Diamantina, na Bahia. Várias regiões, principalmente no Nordeste e no Sudeste, apresentam cavernas quartzíticas de importância. Cavernas areníticas são bastante frequentes em todo o território nacional. Existem importantes concentrações na Chapada dos Guimarães (Mato Grosso), em São Paulo, no Paraná e no interior do Piauí, além de muitas cavernas de grande porte dispersas em várias regiões da Amazônia.

Um grande número de cavernas foi recentemente registrado em rochas ferríferas (formação ferrífera e canga), nas regiões ao sul de Belo Horizonte (Quadrilátero Ferrífero), da Serra do Espinhaço (Minas Gerais e Bahia) e na Serra dos Carajás, no Pará. São cavernas, em sua maior parte, pequenas, com média em torno dos 25m de projeção horizontal.

Figura 12 – Gruta do Centenário (MG), o maior desnível em cavernas do Brasil



Foto: Ezio Rubbioli

No entanto, já foram registradas cavernas em minério de ferro com mais de 300m, além de importantes volumes subterrâneos, tanto em Carajás como no Quadrilátero Ferrífero (FIGURA 13).

No Brasil ainda ocorrem cavernas em granito, gnaiss e bauxita, entre outras. São em geral cavernas de pequeno porte. Dentre as exceções está a Gruta dos Ecos, em Cocalzinho, Goiás (GO), inserida em sua maior parte em micaxistos, e que possui 1.600m de extensão.

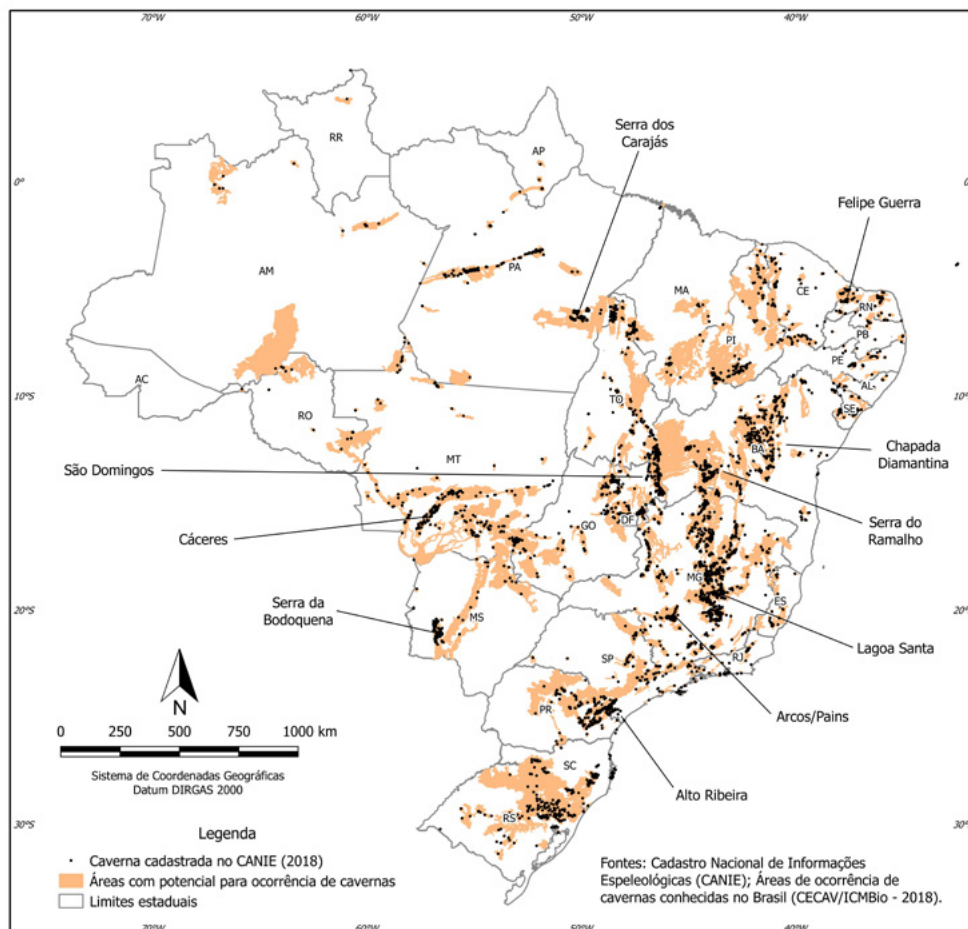
A Figura 14 apresenta as áreas com potencial para ocorrência de cavernas no Brasil e também as cavernas já inventariadas no CANIE até dezembro de 2018.

Figura 13 – Salão principal da Gruta RM-33 (MG), localizada no Parque Estadual da Serra do Rola-Moça, na região do Quadrilátero Ferrífero



Foto: Ataliba Coelho

Figura 14 – Mapa mostrando as áreas com potencial para ocorrência de cavernas, as cavernas já cadastradas no CANIE até 2018 e algumas das principais áreas espeleológicas do Brasil



Fontes: Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE); Áreas de ocorrência de cavernas conhecidas no Brasil (CECAV/ICMBio – 2018).

1.6 A importância das cavernas e do carste

Desde o trabalho pioneiro do naturalista dinamarquês Peter Wilhelm Lund, na primeira metade do século XIX, as cavernas têm fornecido importantes registros fossilíferos, os quais têm formado a base das pesquisas sobre a paleontologia de vertebrados do Pleistoceno brasileiro. Esses documentos paleobiológicos revelam-se fundamentais para o conhecimento taxonômico, anatômico e paleoecológico dos mamíferos do Brasil.

Cavernas com depósitos fossilíferos são frequentes em diversas regiões brasileiras, dentre as quais Lagoa Santa, em Minas Gerais, São Raimundo Nonato, no Piauí, sertão e região central da Bahia, região do Ribeira, em São Paulo, e na região de Bonito, no Mato Grosso do Sul. Nesses sítios jazem ossadas de animais como preguiça-gigante, mastodonte, gliptodonte, tigre dente-de-sabre (FIGURA 15), tatu-gigante e paleolhama.

Figura 15 – Crânio de tigre dente-de-sabre (*S. populator*) descoberto por Peter Lund em caverna da região de Lagoa Santa (MG); acervo do Museu de História Natural de Paris



Foto: Luís B. Piló

As idades obtidas tanto pelo C-14 quanto pelo método U/Th demonstram uma grande variabilidade temporal dos fósseis encontrados nas cavernas, que se estende do Pleistoceno Médio ao limiar do Holoceno (AULER *et al.*, 2006). Ossadas mais recentes de animais extintos datadas na região de Lagoa Santa (preguiça e tigre dente-de-sabre) acusaram idades em torno de nove mil anos. Contrariamente

ao que se pensava até recentemente, a deposição dos fósseis nas cavernas não se deu em apenas um momento específico. Muito pelo contrário, foram vários os episódios de deposição de fósseis nas cavernas brasileiras. Uma importante bibliografia sobre o tema já se encontra disponível: Auler *et al.* (2006), Cartelle (2012) e Hubbe *et al.* (2013). A Tabela 2 apresenta a idade de algumas espécies extintas registradas nas cavernas de Lagoa Santa.

Tabela 2 – Idades de alguns animais da megafauna pleistocênica identificados nas cavernas da região de Lagoa Santa, Minas Gerais

Caverna	Fóssil	Material/Método	Idade
Escrivânia	Tigre dente-de-sabre	Osso / C^{14} AMS	9.130 ± 150 anos AP
Cuvieri	Preguiça-gigante	Osso / C^{14} AMS	9.960 ± 40 anos AP
Escrivânia	Cervídeo	Osso / C^{14} AMS	16.900 ± 70 anos AP
Baú	Tatu-gigante e Glyptodonte	Calcita / $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$> 77.700 \pm 6.100$ anos
Caanga	Porco-do-mato	Calcita / $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$> 251.600 \pm 32.000$ anos
Lagoa dos Cochós	Paleolhama	Calcita / $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	$> 360.000 \pm 23.000$ anos

Fonte: Piló; Neves (2003); Auler *et al.* (2006).

A relação entre arqueologia e as cavernas também é evidente, tendo em vista que este meio é favorável à preservação de vestígios arqueológicos (menor umidade, menor iluminação e temperaturas mais estáveis). São inúmeros os paredões e entradas de cavernas que registram usos diferenciados como abrigo, moradia, palco de rituais, cemitério e suporte para a arte (FIGURA 16), destacando-se as regiões de Lagoa Santa, em Minas Gerais, São Raimundo Nonato, no Piauí, Médio São Francisco (Januária até Montalvânia), Monte Alegre e Serra dos Carajás, no Pará, dentre outras áreas.

Salienta-se, ainda, que a contemporaneidade do homem pré-histórico com os megamamíferos extintos foi aventada nas cavernas de Lagoa Santa, inicialmente, por Peter Lund, em 1844. Importantes datações mais recentes revelaram que as idades dos mais antigos vestígios humanos e as datações obtidas para a megafauna da região confirmam a coexistência do homem com, pelo menos, duas espécies da megamastofauna em Lagoa Santa: *Catonyx* e *Smilodon* (NEVES; PILÓ, 2003; HUBBE *et al.*, 2009; ARAÚJO *et al.*, 2012; HUBBE *et al.*, 2013).

As possíveis relações entre o homem pré-histórico e os grandes mamíferos extintos ainda não estão claras. Até o momento, embora haja evidência de coexistência, não há no registro arqueológico da região qualquer evidência de que os primeiros humanos a ocuparem o carste de Lagoa Santa fizeram uso, como recurso alimentar, ou como fonte de matéria-prima, dos grandes mamíferos extintos (NEVES; PILÓ, 2003; ARAÚJO *et al.*, 2012).

Figura 16 – Painel de pinturas rupestres no Abrigo Piolho de Urubu (MG), no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu



Foto: Ataliba Coelho

Foi também nas cavernas que se concentraram as ossadas dos mais antigos brasileiros. O esqueleto de “Luzia”, exumado no abrigo rochoso de Lapa Vermelha IV, em Lagoa Santa, encontrava-se posicionado em camadas sedimentares superiores a 11.000 anos A.P., sendo considerado um dos esqueletos mais antigos das Américas. Restos antigos de esqueletos humanos enterrados na entrada da Lapa do Santo, na mesma região, têm fornecido uma visão incomum da vida das comunidades de caçadores-coletores na América do Sul, incluindo os seus rituais para lidar com os mortos. Esses rituais incluíam a redução do corpo por meio de mutilação, descarnadura, remoção de dentes, exposição ao fogo e possivelmente canibalismo, seguido pelo sepultamento secundário (FIGURAS 17 e 18). Em um período posterior, poços foram preenchidos com ossos desarticulados de um único indivíduo, sem sinais de manipulação do corpo, demonstrando que a região era habitada por grupos dinâmicos em constante transformação ao longo de séculos (STRAUSS *et al.*, 2016).

Podemos destacar que o ambiente cavernícola apresenta algumas particularidades: ausência total de luz, determinando a inexistência de plantas clorofiladas e a impossibilidade do uso da visão, assim como a tendência

à estabilidade ambiental. Grande parte do alimento é importada da superfície, gerando muitas vezes um ambiente com poucos recursos alimentares.

Organismos capazes de viver em tais condições colonizaram o hábitat hipógeo e, uma vez isolados da superfície (meio epígeo) por algum evento geológico ou climático, se especializaram a ponto de se tornarem incapazes de retornar à vida epígea de seus ancestrais. Tais organismos são chamados



Figura 17 – Sepultamento primário na Lapa do Santo (MG), no carste de Lagoa Santa, com mais de 8 mil anos AP **Foto:** Danilo Vicensotto Bernardo **Acervo:** Laboratório de Estudos Evolutivos Humanos/USP

Figura 18 – Sepultamento secundário na Lapa do Santo (MG), no carste de Lagoa Santa **Foto:** Ataliba Coelho



troglóbios ou cavernícolas obrigatórios. Dentre as várias modificações morfológicas, fisiológicas e comportamentais que apresentam, destacam-se a redução da pigmentação melânica e dos órgãos visuais (TRAJANO, 2002).

Em várias regiões do Brasil já foi registrada alta diversidade de troglóbios (principalmente invertebrados e peixes), incluindo o Vale do Ribeira, no estado de São Paulo, a região de São Domingos, em Goiás, a região da Serra da Bodoquena, no Mato Grosso do Sul, regiões da Serra do Ramalho, São Desidério e Chapada Diamantina, no Estado da Bahia, e na Serra dos Carajás, no Pará (FIGURA 19). Vários trabalhos têm revelado a fauna das cavernas brasileiras, destacando-se os trabalhos de síntese de Pinto-da-Rocha (1995), Trajano (2003), Trajano e Bichuete (2010) e Ferreira *et al.* (2015), dentre outros.

Figura 19 - Troglóbio (*Charinus ferreus*) descoberto nas cavernas da Serra dos Carajás (PA)



Foto: Marcus Paulo Alves de Azevedo

Merece destaque, entre os crustáceos cavernícolas brasileiros, o *Potiicoara brasiliensis*, que ocorre no lençol freático aflorando em cavernas do Mato Grosso do Sul e Mato Grosso. Essa espécie pertence à Ordem Spelaeogriphacea, cujos aparentados vivos apresentam uma distribuição gondwânica em cavernas da África do Sul e do oeste da Austrália. Uma hipótese para explicar essas ocorrências é a de que os Spelaeogriphacea constituem um grupo muito antigo, que tinha distribuição ampla na Gondwana (supercontinente do Hemisfério Sul), há mais de 70 milhões de anos (PIRES, 1987). Com a deriva continental, os ancestrais desses crustáceos teriam se separado, e as demais espécies do grupo,

se extinguido. Espécies fósseis mostram que a distribuição dos Spelaeogriphacea era ainda mais ampla, abrangendo a Laurásia (supercontinente do Hemisfério Norte), onde se extinguiu totalmente, o que daria às espécies atuais o *status* de relictos (TRAJANO, 2002).

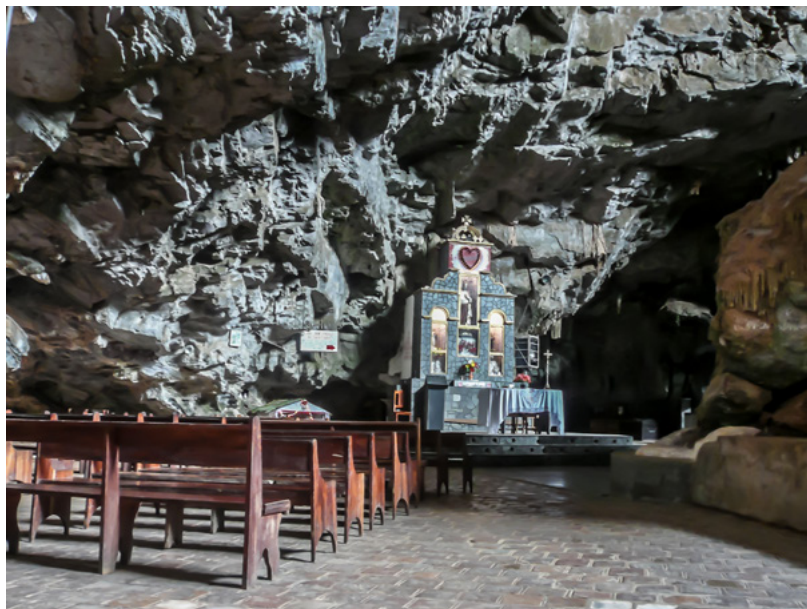
As cavernas também guardam registros paleoambientais de grande importância, principalmente aqueles obtidos por meio dos espeleotemas. Datações nesses espeleotemas pelo método U/Th, que cobre um período de poucos milhares de anos até 600 mil anos, têm colocado as estalagmites de cavernas brasileiras como verdadeiros arquivos paleoclimáticos, diante dos registros das razões isotópicas de oxigênio e carbono.

Estudo efetuado nas cavernas do Nordeste, liderado por Francisco William da Cruz Júnior, do IG-USP, tem revelado o início do clima semiárido no Nordeste há cerca de 4 mil anos. Isso ocorreu em razão de um deslocamento periódico do eixo de rotação da Terra que fez com que o hemisfério Sul começasse a receber mais radiação solar do que o hemisfério Norte. Recentemente, estudo conduzido por Wang *et al.* (2017) em estalagmite da Caverna Paraíso, no Pará, revelou que há cerca de 21 mil anos o leste da Amazônia era bem menos úmido do que hoje, com aproximadamente 58% da chuva dos tempos atuais. Mais recentemente, há cerca de 6 mil anos, o estudo detectou um período de grande umidade, com 42% a mais de chuva do que nos dias de hoje.

Quanto aos aspectos históricos, as primeiras referências sobre as formas superficiais e subterrâneas do relevo cárstico foram feitas por meio dos relatos de naturalistas e viajantes que percorreram o interior do Brasil particularmente no século XIX e limiar do século XX. Narrativas da riqueza e singularidade das grutas e formações cársticas podem ser apreciadas nos trabalhos de Peter Lund, Spix & Martius, J. W. Wells, H. Burmeister, dentre outros. O carste também tem se destacado por seu aspecto ecológico. O trabalho do botânico dinamarquês E. Warming na região cárstica de Lagoa Santa, no século XIX (1863 a 1866), é reconhecido como o primeiro tratado sobre ecologia vegetal, no qual foram analisadas e identificadas mais de 2.600 espécies vegetais.

As cavernas também vêm servindo de palco para diversas manifestações religiosas, sendo muitas vezes transformadas em verdadeiros santuários, principalmente na região central do Brasil. Dentre as mais visitadas estão a Gruta da Mangabeira (FIGURA 20), a Gruta dos Brejões, na Bahia, a Lapa de Antônio Pereira e a Lapa Nova, em Minas Gerais, e a de Terra Ronca, em Goiás. Merece destaque o Santuário de Bom Jesus da Lapa, na Bahia, que há mais de 300 anos recebe multidões de fiéis de todo o Brasil.

Figura 20 – Altar na Gruta da Mangabeira (BA), no município de Ituaçu
Foto: Daniel Menin



Mais de 50 áreas cársticas e cavernas estão atualmente listadas como Patrimônio Natural Mundial da UNESCO (FORTI, 2015), mas muitas outras áreas em todo o mundo e, particularmente, no Brasil têm potencial com base na sua biodiversidade, em seus recursos naturais, sua geomorfologia única ou suas magníficas cavernas, a exemplo da gruta do Janelão, localizada no cânion de abatimento do Rio Peruaçu, no norte de Minas Gerais (FIGURA 21).

Figura 21 – Cânion de abatimento do Rio Peruaçu, nas proximidades da Gruta Arco do André (MG), no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu



Foto: Ataliba Coelho

De acordo com a UNESCO, as águas subterrâneas de aquíferos cársticos representam a mais significativa e segura fonte de água potável (AURELI, 2010). Estima-se que os aquíferos cársticos abastecem cerca de 25% da água potável do mundo (FORD; WILLIAMS, 2007). Esse percentual certamente aumentará no futuro próximo, devido à poluição de fontes de água em áreas não cársticas (FORTI,

2015). Várias cidades brasileiras são abastecidas com águas cársticas, dentre elas Sete Lagoas, Confins, Matozinhos, em Minas Gerais, Irecê, na Bahia, e parte da região metropolitana de Curitiba, no Paraná.

Diante do exposto, nota-se que são muitos os atributos que dão às paisagens cársticas e às cavernas uma expressiva significância. Salienta-se um importante conjunto de elementos naturais e culturais digno de valorização e conservação. Por outro lado, o carste e as cavernas têm peculiaridades que os tornam mais vulneráveis às interferências humanas mal planejadas, as quais podem gerar impactos adversos e degradação ambiental.

1.7 Fragilidades das cavernas e do carste

O carste é um ambiente único na Terra, caracterizado por uma variedade de características geológicas e hidrológicas peculiares, que são expressas por típicas formas superficiais e subterrâneas. As paisagens cársticas e as cavernas têm sido consideradas como um domínio frágil e vulnerável. Realmente, esses terrenos apresentam alguns elementos que os colocam dentro de um contexto diferenciado de análise ambiental.

No carste, particularmente naqueles que já atingiram maior grau de desenvolvimento, a drenagem apresenta-se predominantemente subterrânea, sendo realizada através de condutos (cavernas). Ou seja, os cursos d'água superficiais foram capturados para sistemas (aquíferos) integrados de condutos, que atuam como drenos subterrâneos para o transporte rápido (livre) e altamente localizado da água.

Nesse contexto, são constituídas as denominadas rotas de drenagem subterrânea, muito suscetíveis às alterações ambientais. O fluxo mais rápido dessas drenagens potencializa a propagação muito mais rápida de possíveis poluentes que tenham atingido o aquífero cárstico. A conexão direta entre a superfície e o aquífero subjacente torna as águas subterrâneas extremamente vulneráveis à poluição, que pode chegar rapidamente aos poços e nascentes (COVINGTON *et al.*, 2009).

Outro aspecto importante é que as bacias de drenagem, no carste, não se limitam necessariamente aos divisores de águas superficiais, podendo se estender muito além desses limites. Um impacto pontual no sistema hidrológico pode atingir áreas mais expressivas.

Os processos de abatimento também são bem frequentes nos terrenos cársticos. As denominadas dolinas de colapso são os principais registros desses processos, sendo sua origem associada a abatimentos de tetos e paredes rochosas de condutos subterrâneos (cavernas) ou de solos posicionados sobre a rocha solúvel. Esses abatimentos são caracterizados principalmente por movimentos rápidos, verticais e, muitas vezes, catastróficos, quando incidem em áreas urbanizadas, a exemplo do ocorrido nas cidades de Sete Lagoas, em Minas Gerais, e Cajamar, no Estado de São Paulo. Em Cajamar, estudos indicaram que a superexploração de águas subterrâneas ocasionou os processos de abatimentos. A expansão de áreas urbanas sobre o carste deve ser evitada, pois traz riscos de perdas materiais e humanas, além de alto potencial de poluição do aquífero cárstico.

Estudos bioespeleológicos, por sua vez, têm revelado uma importante fauna em nossas cavernas, na qual se incluem diversos grupos taxonômicos: insetos, aracnídeos, diplópodes, crustáceos, morcegos, peixes, dentre outros. Segundo Trajano e Bichuette (2006), o ambiente subterrâneo é altamente

vulnerável a alterações ambientais, em virtude do elevado grau de endemismo de muitos de seus componentes (troglóbios), em geral pouco tolerantes a fatores de estresse (alteração de habitat, poluição química, flutuações ambientais não naturais, eutrofização), da dependência de nutrientes importados do meio externo, e do fato de as populações serem frequentemente pequenas e com baixa capacidade de recuperação, como consequência de suas estratégias de ciclo de vida.

Vale destacar ainda que o ICMBio finalizou, em dezembro de 2014, a avaliação nacional do risco de extinção da fauna brasileira. Entre 2010 e 2014 foram avaliados 12.256 táxons da fauna, incluindo todos os vertebrados descritos para o país. Considerando as portarias nº 444 e nº 445, de 17/12/2014, do MMA, foi possível constatar que várias espécies que habitam as cavernas estão na Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção, dentre as quais: as aranhas *Drymusa spelunca* (Drymusidae); *Metagonia potiguar* (Pholcidae); palpígrado *Leptokoenenia thalassophobica* (Eukoene-nidae); piolho-de-cobra *Pseudonannolene spelaea* (Pseudonannolenidae); besouros *Coarazuphium tapiaguassu* (Carabidae) e *Copelatus cessaima* (Dytiscidae); peixes *Eigenmannia vicentespela* (Stenopodidae) e *Trichomycterus rubbioli* (Trichomycteridae); morcegos *Furipterus horrens* (Furipteridae), *Natalus macrourus* (Natalidae) e *Lonchorhina aurita* (Phyllostomidae).

1.8 As cavernas e os estudos de impacto ambiental

Diante da revelação da importância das cavernas e da fragilidade de seus principais componentes, fica claro que as cavernas são uma parte única e muito especial do nosso ambiente natural, sendo de fundamental importância ações de conservação, prevenção ou mitigação dos impactos das atividades humanas nas cavernas e nas paisagens associadas. Para ler mais sobre o assunto, ver Williams (1993), Watson *et al.* (1997), Veni (1999), Ferreira e Horta (2001), van Beynen (2011), Goldscheider (2012), Sánchez e Lobo (2016), Kevei (2016).

Diante desse cenário, a legislação brasileira, a partir da década de 1990, vem buscando estabelecer normas para a conservação e o uso das cavernas, através de portarias, decretos e instruções normativas. Segundo o Decreto Federal nº 6.640/2008, no seu Artigo 5:

A localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades, considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores de cavidades naturais subterrâneas, bem como de sua área de influência, dependerão de prévio licenciamento pelo órgão ambiental competente.

O licenciamento ambiental é o procedimento administrativo realizado pelo órgão ambiental competente, que pode ser federal, estadual ou municipal, para licenciar a instalação, a ampliação, a modificação e a operação de atividades e empreendimentos que utilizam recursos naturais, ou que sejam potencialmente poluidores ou que possam causar degradação ambiental. O licenciamento é um dos instrumentos de gestão ambiental estabelecido, inicialmente, pela Resolução CONAMA nº 001, de 23 de janeiro de 1986, juntamente com vasta legislação complementar.

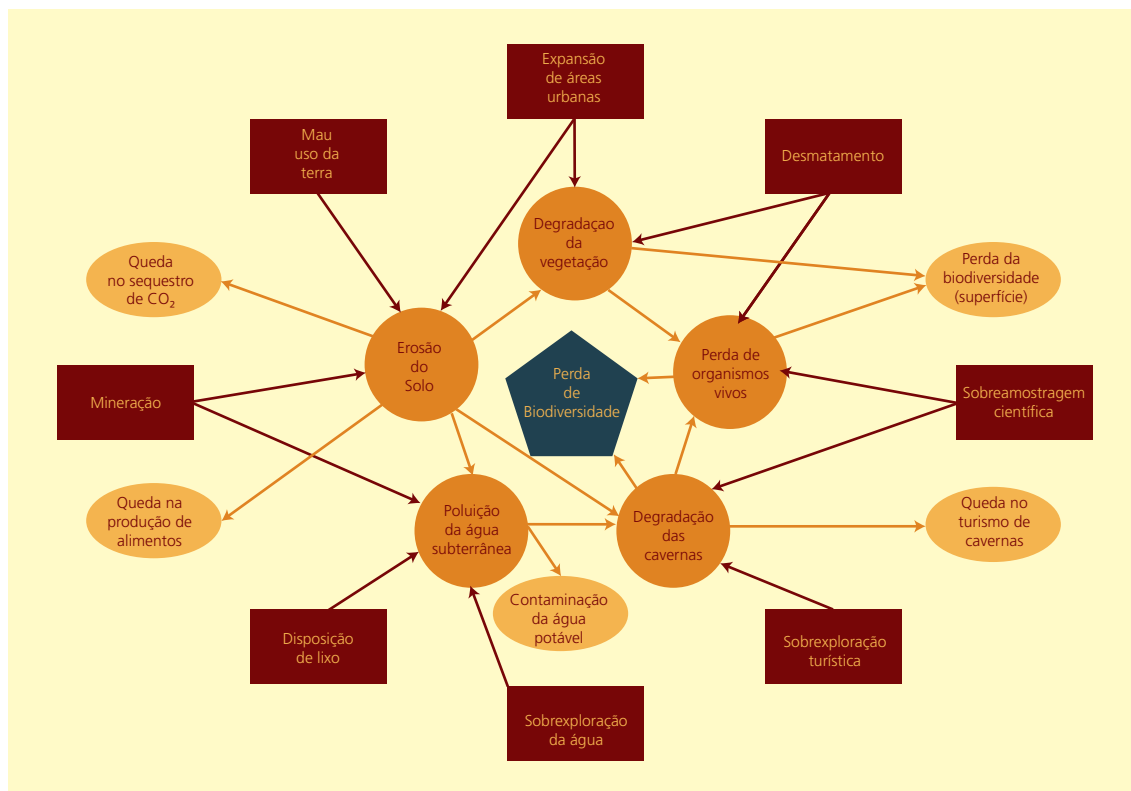
Na análise ambiental, o mais importante é compreender as peculiaridades e fragilidades do ambiente cárstico, incluindo as cavernas, dentro de uma abordagem integrada de forma a abranger os potenciais

impactos ambientais. As Diretrizes da IUCN para Proteção do Carste e das Cavernas apresenta uma lista geral dos impactos que podem resultar de atividades humanas em cavernas (WATSON *et al.*, 1997):

- Alteração da estrutura física da caverna;
- Alteração da química da água;
- Alteração da hidrologia da caverna;
- Alteração do microclima;
- Compactação ou liquefação de pisos;
- Erosão ou perturbação nos sedimentos das cavernas ou no seu conteúdo;
- Destruição de espeleotemas;
- Destruição da fauna;
- Introdução de organismos ou materiais estranhos ao ambiente subterrâneo;
- Impactos na superfície, como erosão, assoreamento, mudança na vegetação.

Todos os recursos e serviços ecossistêmicos fornecidos pelo carste e pelas cavernas não podem ser avaliados isoladamente, já que são interligados. Impactos em elementos individuais do ecossistema cárstico podem gerar impactos inesperados sobre outros elementos ou mesmo sobre o ecossistema, como pode ser constatado na Figura 22.

Figura 22 – Impactos interconectados que afetam os ecossistemas cársticos e as cavernas



Fonte: Elaborado com base em Goldscheider (2012)

Restaurar os danos já instalados no carste e nas cavernas é uma tarefa difícil, porque os componentes e os processos estão interligados, dificultando enormemente a restauração do sistema.

A análise do carste e das cavernas dentro do processo de licenciamento ambiental exige esforços multidisciplinares. É muito importante que analistas ambientais dos órgãos governamentais, empreendedores, consultores e gestores compreendam os processos dinâmicos do ambiente cárstico, assim como os princípios das melhores práticas para o gerenciamento do carste. Diversas publicações importantes têm contribuído com matrizes para identificação de impactos, além de métodos e técnicas para o manejo adequado do carste e das cavernas (VAN BEYNEN, 2011; GILLIESON, 2011; FONG, 2011; SÁNCHEZ; LOBO, 2016).

Salienta-se, também, que o monitoramento de componentes sensíveis pode fornecer informações importantes para avaliar, dimensionar e controlar impactos ambientais no carste. O microclima de cavernas, por exemplo, está entre os temas mais amplamente pesquisados e monitorados atualmente (PFLITSCH; PIASECKI, 2003; CIGNA, 2004; TOMMEY, 2009; BADINO, 2010), destacando-se ainda os monitoramentos sismográficos (PINHO *et al.*, 2016a; PINHO *et al.*, 2016b; BRANDI, 2018), os hidrogeológicos (WORTHINGTON, 2011), os faunísticos (CULVER; SKET, 2002), dentre outros.

Referências

- ARAÚJO A. G. M.; NEVES, W. A.; KIPNIS, R. *Lagoa Santa revisited: an overview of the chronology, subsistence, and material culture of paleoindian sites*. In: **Eastern Central Brazil**. Latin American Antiquity, 23:533-550, 2012.
- AULER A. S.; PILÓ, L. B. As descobertas de Lund. In: Da-Glória, P.; Neves, W. A.; Hubbe, M. (Ed.). **Lagoa Santa: História das pesquisas arqueológicas e paleontológicas**. São Paulo: AnnaBlume, 2016. 412 p.
- AULER, A.; RUBBIOLI, E. L.; BRANDI, R. **As grandes cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Rona Editora, v. 1, 2001. 230 p.
- AULER, A. S.; SMART, P. Toca da Boa Vista (Campo Formoso), Bahia. A maior caverna do hemisfério Sul. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Queiroz, E. T.; Winge, M.; Berbet-Born, M. L. C. (Ed.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: DNPM-CPRM-SIGEP, 2002:443-451.
- AULER, A. S.; ZOGBI, L. **Espeleologia – Noções Básicas**. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005. 103 p.
- AULER, A. S. *et al.* U-series dating and taphonomy of Quaternary vertebrates from Brazilian caves. **Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol. Journal** 240:508-522, 2006.
- AURELI, A. The UNESCO IHP's Shared Aquifer Resources Management Global Project. **AQUAmundi**, 1, 1-6, 2010.
- BADINO, G. Underground meteorology – "What's the weather underground?" **Acta Carsologica, Slovenia**, 39: 427-448, 2010.
- BRANDI, I. Estudos de sismografia aplicados à espeleologia. **Ciclo de Palestras Vallourec - Terra Brasilis sobre área de influência de cavernas**. p.16-17. Disponível em: http://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/images/abook/pdf/2018/VALLOUREC-TERRA%20BRASILIS_Ciclo%20de%20Palestras.pdf. Acesso em: 18 ago. 2018.
- CARTELLE, C. **Das grutas à luz**. Os mamíferos pleistocênicos de Minas Gerais. Belo Horizonte: Bicho do Mato Editora, 2012, 236 p.
- CECAV. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE**. 2017. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecv/canie.html>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

CIGNA, A. A. Climate of caves. In: GUNN, J. (Ed.). *Encyclopaedia of caves and karst science*. New York: Fitzroy Dearborn, 2004, p. 228-230.

COVINGTON, M. D.; WICKS, C. M.; SAAR, M. O. A dimensionless number describing the effects of recharge and geometry on discharge from simple karstic aquifers. *Water Resour. Res.*, 45, 1–16, 2009.

CULVER, D.C.; SKET, B. Biological monitoring in caves. *Acta Carsologica*, Slovenia, 31/1: 55-64, 2002.

DAVIS, W. M. Origin of Limesone caverns. *Geol. Soc. America Bull.* 41, 1930, p. 475-628. In: Sweeting, M. M. (Ed). *Karst Geomorphology*. London: Hutchinson Ross Publishing Company: Benchmark Papers in Geology / 59, 1983. 429 p.

EPA. Environmental Protection Agency. *A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology*. EPA/600/R-02/003. 2002. Disponível em: <https://karstwaters.org/wp-content/uploads/2015/04/lexicon-cave-karst.pdf>

FERREIRA, R. L.; HORTA, L. C. S. Natural and Human Impacts on Invertebrate communities in Brazilian Caves. *Brazilian Journal of Biology*, São Carlos (SP), 61(1): 7-17, 2001.

FERREIRA, R. L.; OLIVEIRA, M. P. A.; SILVA, M. S. Biodiversidade subterrânea em geossistemas ferruginosos. In: Carmo, F.; Kamino, L. H. (Ed.). *Geossistemas Ferruginosos do Brasil: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica, patrimônio cultural e serviços ambientais*. Belo Horizonte: 3i, 2015, p. 195-231.

FIGUEIREDO, L. A. V. de. História da Espeleologia Brasileira: protagonismo e atualização cronológica. CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31., 2011, Ponta Grossa (PR), *Anais [...]*, Ponta Grossa (PR): Grupo Universitário de Pesquisas Espeleológicas (GUPE), 2011, p.379-395.

FONG, D. W. Management of Subterranean Fauna in Karst. In: VAN BEYNEN, P. E. (Ed.). *Karst Management*. New York: Springer, 2011, Chapter 9. p.201-225.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. *Karst hydrogeology and geomorphology*. London: Unwin Hyman, 2007.

FORTI, P. *The scientific and socio-economic importance of karst and caves and their vulnerability*. Brief for GSDR, 2015.

FOURNIER, M. Edouard Martel, père de la spéléologie française. *Village de Forez*, n.7, 3p., 1981.

GÈZE, B. *La Spéléologie Scientifique*. Reed. Espanhola. Col. Cosmos. 13. Barcelona: Ed. Martínez Roca, 1968.

GILLIESON, D. S. Management of Caves. In: VAN BEYNEN, P. E. (Ed.). *Karst Management*. New York: Dordrecht – Springer, 2011, Chapter 6.

GOODRUM, M. R. Émile Rivière (1835-1922). *Online Biographical Dictionary of the History of Paleoanthropology*. 2015. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/135PFUPhwxJpsQ4zeR8ZFgWlwAjDnopYg/view>

GOLDSCHIEDER, N. A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains. *AQUAmundi*, n.3, p.117-124, 2012.

GOMES, M. do C. A.; PILÓ, L. B. As minas de salitre: a exploração econômica das cavernas em Minas Gerais nos fins do período colonial. *Espeleo-Tema*, São Paulo, SBE, n.16., p.83-93, 1992.

HUBBE, A.; HUBBE, M.; NEVES, W. A. New Late-Pleistocene Dates for the Extinct Megafauna of Lagoa Santa, Brazil. *Curr. Res. Pleistocene* 26: 154-156, 2009.

- HUBBE, A.; HUBBE, M.; NEVES, W. A. The Brazilian megamastofauna of the Pleistocene/Holocene and its relationship with the early human settlement of the continent. **Earth-Science Review**, 118: 1-10, 2013.
- LINO, C. F. **Cavernas: o fascinante brasil subterrâneo**. São Paulo: Editora Rios, 1989, 279p.
- LUND, P. W. Notícia sobre ossadas humanas fósseis achadas numa caverna do Brasil. 1844. In: PAULA COUTO, C. de. (Ed.). **Memórias sobre a paleontologia brasileira**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional do Livro, 1950, p. 465-488.
- KEVEI, I. B. Vulnerability and auto-restoration capacities of karst geoeosystems. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 60, Suppl. 2, 235-255, 2016.
- KRONE, Ricardo. As grutas calcáreas de Iporanga. **Rev. Mus. Paulista**. São Paulo: n. 3, p.477-500, 1898.
- NEVES, W. A.; PILÓ, L. B. Solving Lund's dilemma: new AMS dates confirm that humans and megafauna coexisted at Lagoa Santa. **Current Research in the Pleistocene**, Michigan, v. 20, p. 57-60, 2003.
- NEVES, W. A.; PILÓ, L. B. **O Povo de Luzia: em busca dos primeiros americanos**. São Paulo: Editora Globo, 2008. 344p.
- PFLITSCH, A.; PIASECKI, J. Detection of an airflow system in Niedzwiedzia (Bear) Cave, Kletno, Poland. **Journal of Cave and Karst Studies**, 65(3): 160-173, 2003.
- PILÓ, L. B. Ambientes cársticos de Minas Geras: valor, fragilidade e impactos ambientais decorrentes da atividade humana. In: **O Carste**, Belo Horizonte: v. 19, n. 3, p. 51-78, 1999.
- PILÓ, L. B.; RUBBIOLI, E. Cavernas do Vale do Rio Peruaçu – Obra-prima do carste brasileiro. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D. A.; Queiroz, E. T.; Winge, M.; Berbet-Born, M. L. C. (Ed.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Brasília: DNPM-CPRM-SIGEP, 2002, 453-460.
- PILÓ, L. P.; NEVES, W. A. Novas datações 14C (AMS) confirmam a tese da coexistência do homem com a megafauna pleistocênica da região cárstica de Lagoa Santa, MG. CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 27., – SBE. Januária (MG), **Anais [...]** Januária (MG), 2003, p.100-104.
- PINHO, M. et al. **Sismografia aplicada à proteção do patrimônio espeleológico: orientações básicas à realização de estudos ambientais**. 1.ed. Brasília: ICMBio, 2016a, 55p.
- PINHO, M. et al. **Sismografia aplicada à proteção do patrimônio espeleológico: contribuição técnica à análise de estudos ambientais**. 1.ed. Brasília: ICMBio, 2016b, 47p.
- PINTO-DA-ROCHA, R. Sinopse da fauna cavernícola do Brasil (1907-1994). **Papéis Avulsos de Zoologia**, 39: 61-173, 1995.
- SÁNCHEZ L. E.; LOBO, H. A. S. (Org.). **Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia - SBE, 2016. 263p.
- STRAUSS, A. Os padrões de sepultamento do sítio arqueológico Lapa do Santo (Holoceno Inicial, Brasil). **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Ciênc. Hum.** vol.11 n.1. p.1-32, 2016.
- TOOMEY, R. S. Geological monitoring of caves and associated landscapes. In: YOUNG, R.; NORBY, L. **Geological Monitoring**. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 2009, p. 27-46.
- TRAJANO, E. **Peixes e Cavernas. Habitat 72**. 2003. Disponível em: <http://editoramarcelonotare.com/page_34.html>. Acesso em: 30 jan. 2017.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. **Biologia Subterrânea**. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2006. 92p.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. Diversity of Brazilian subterranean invertebrates, with a list of troglomorphic taxa. **Subterranean Biology** 7:1-16, 2010.

VAN BEYNEN, P. E. (Ed.). **Karst Management**. New York: Dordrecht – Springer, 2011. 489 p.

VENI, G. A geomorphological strategy for conducting environmental impact assessments in karst areas. **Geomorphology**, 31, 151-180, 1999.

WANG, X. *et al.* Hydroclimate changes across the Amazon lowlands over the past 45,000 years. **Nature**, v. 541: 204-207, 2017.

WATSON, J. *et al.* (Ed.). **Guidelines for cave and karst protection**. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 1997. 63p.

WILLIAMS, P. W. Karst Terrains; Environmental Changes and Human Impacts. **Catena Supplement** 25: 286p, 1993.

WORTHINGTON, S.; R.; H. Management of carbonate aquifers. In: VAN BEYNEN, P. E. (Ed.). **Karst Management**. New York: Dordrecht – Springer, 2011, Chapter 11.



2

Geologia de cavernas e sua interpretação à luz da legislação ambiental espeleológica

Augusto S. Auler

Luís B. Piló





1 Introdução

Cavernas constituem feições subterrâneas que fazem parte de um contexto geológico e ambiental que inclui desde as rochas nas quais se inserem como também seu entorno natural, integrando um sistema que abrange e depende de múltiplas variáveis ambientais e se estende por uma área que, em geral, extrapola em muito o entorno imediato da caverna. As cavernas, em sua história evolutiva, passam por diversas fases, desde sua gênese normalmente na zona freática (onde os poros e vazios da rocha estão preenchidos por água) até o seu desenvolvimento acima do lençol freático (zona vadosa), em que as galerias se tornam secas e são submetidas a processos diversos, desde preenchimento sedimentar e químico até sua remoção da paisagem por processos erosivos. A geoespeleologia, ou geologia de cavernas, corresponde à área de estudo que descreve e interpreta as feições físicas da caverna, incluindo a rocha encaixante e suas estruturas tectônicas e sedimentares, gênese, aspectos hidrológicos e depósitos sedimentares.

Este capítulo apresenta uma síntese dos principais aspectos geoespeleológicos envolvidos na análise ambiental de cavernas. Intenciona servir como guia básico sobre o tema e documento referencial para auxiliar profissionais envolvidos em análise de processos de licenciamento ambiental em regiões cársticas.

2 O Relevo Cárstico

As cavernas não estão isoladas na paisagem. Elas se integram em um relevo bastante particular denominado cárstico. O

nome carste se origina de uma região calcária que ocorre em boa parte da Eslovênia e Croácia (mas também em países vizinhos) denominada localmente de *Kras*. Com o tempo, o termo se internacionalizou, passando a designar todas as regiões que apresentam paisagens semelhantes. O carste se caracteriza por apresentar feições geradas primordialmente por processos de dissolução. Dentre as peculiaridades das regiões cársticas, podemos mencionar a ausência de rios superficiais, já que a maior parte da água flui por condutos subterrâneos, e o fato de a rocha (normalmente calcários e dolomitos, mas também sal, gesso, arenitos e quartzitos) ser dissolvida por água ácida, gerando feições peculiares como lapiás, dolinas, sumidouros, surgências e, no ambiente subterrâneo, as cavernas.

O processo básico que provoca a geração das formas cársticas em regiões calcárias pode ser sintetizado pela equação: $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 = 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$

A água de chuva (H_2O) absorve dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera e se torna ácida devido à formação de ácido carbônico (H_2CO_3). Essa água, ao entrar em contato com a rocha, já é capaz de dissolver o calcário, gerando feições cársticas superficiais. Essa mesma água, ao penetrar no solo, absorve ainda mais dióxido de carbono associado a raízes de plantas e húmus. Ao atingir a rocha, a água estará ainda mais ácida, gerando formas de dissolução no contato solo-rocha e também cavernas.

2.1 Formas superficiais

São muitas as feições superficiais típicas de regiões cársticas. Lapiás ou *karren* correspondem a canaliculos ou estrias na rocha (FIGURA 1), por vezes pontiagudos, que são formados pela ação da água



Figura 1 – Maciço calcário intensamente lapiézado. Parque Nacional de Ubajara (CE) **Foto:** Augusto Auler

ácida da chuva sobre o calcário. Possuem diversas formas, desde pináculos e caneluras quando expostas, até formas mais arredondadas, como feições ao longo de planos de acamamento (lapiás de junta) quando iniciados sob o solo. Bacias (*kamenitzas*) correspondem a outro tipo de lapiás, que apresentam contribuição de agentes biológicos em sua formação (FIGURA 2).

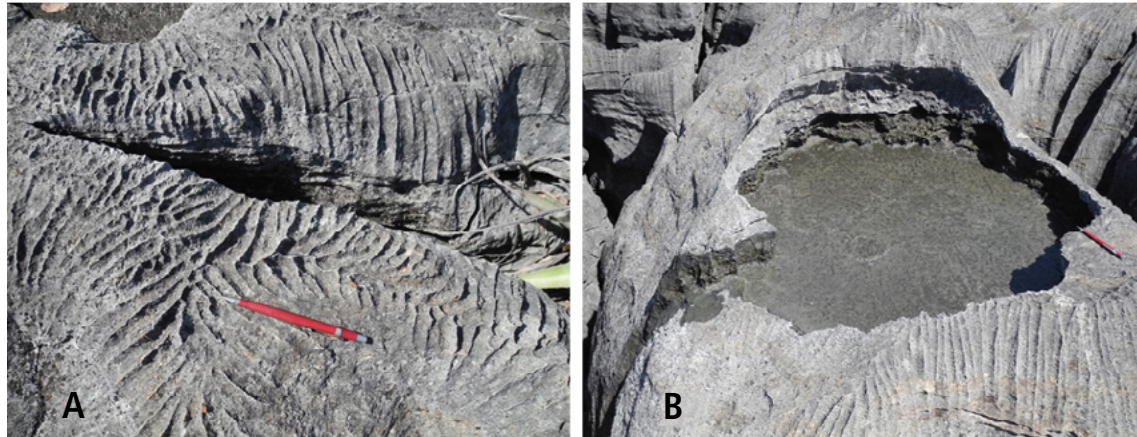


Figura 2 – Alguns tipos de lapiás no maciço conhecido como Curral de Pedras, Lagoa dos Patos (MG)
Legenda: A – *Rillenkarren*; B – *Kamenitza* **Fotos:** Augusto Auler

Dolinas estão entre as formas cársticas mais comuns. Consistem em depressões no terreno por vezes suaves, por vezes abruptas (FIGURA 3 e FIGURA 4). Podem ser formadas pela lenta dissolução de uma fratura, levando ao rebaixamento da superfície da rocha, ou mesmo pelo desmoronamento de uma caverna. Algumas dolinas são induzidas, ou seja, são provocadas por atividades humanas, em geral relacionadas ao rebaixamento do lençol freático, fazendo com que vazios, antes cheios de água, fiquem secos e percam a sustentação. Vales secos também são característicos de regiões cársticas, marcando pontos onde outrora havia uma drenagem, hoje fluindo em sub-superfície. Paredões subverticais são frequentes em muitas áreas cársticas, como em Lagoa Santa e Arcos/Pains (MG).

Figura 3 – Principais tipos de dolina

Fonte: Adaptado de Ford e Williams (2007).

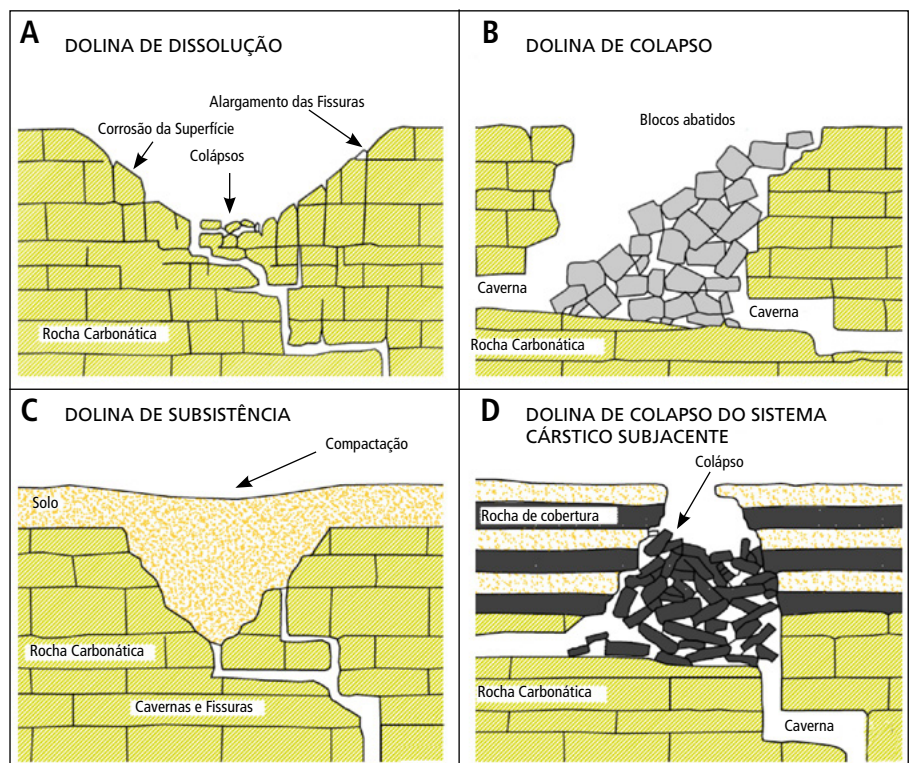




Figura 4 – Alguns tipos de dolina

Legenda: A - Dolina de dissolução com o fundo plano no Carste de Arcos/Pains (MG).

B - Dolina induzida de colapso, provavelmente de cobertura de solo, na zona urbana de Sete Lagoas (MG), 1988.

Fotos: Augusto Auler

Sumidouros e surgências marcam o local onde um rio superficial desaparece na rocha ou surge na forma de nascente. Muitas delas demarcam entradas de cavernas. Algumas dessas feições superficiais são apresentadas nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Paredão calcário com dolinamento no Carste de Lagoa Santa, Prudente de Morais (MG)



Foto: Augusto Auler

Figura 6 – Sumidouro do Rio da Lapa adentrando a Gruta de Terra Ronca I (GO), Parque Estadual de Terra Ronca, São Domingos. O portal de entrada possui cerca de 80m de altura



Foto: Augusto Auler

Já as cavernas constituem a expressão subterrânea das feições cársticas, podendo ser definidas como um conduto subterrâneo que transporta a água que se infiltra através de dolinas ou sumidouros. O conceito oficial de caverna, segundo a legislação brasileira, tem um viés antropocêntrico, definida como uma cavidade subterrânea, formada por processos naturais, que permita a entrada de um ser humano.

2.2 Unidade Geomorfológica e Unidade Espeleológica

Os conceitos de “Unidade Geomorfológica” e “Unidade Espeleológica” são essenciais para a definição da relevância de uma caverna, tendo sido introduzidos pela Instrução Normativa nº 2/2012 do MMA, relacionada ao Decreto Federal nº 6.640/2008. Esses termos dizem respeito, respectivamente, ao enfoque local e ao enfoque regional de análise. Segundo o referido decreto, esses termos são definidos como:

- Enfoque Local – Unidade espacial que engloba a cavidade e sua área de influência.
- Enfoque Regional – Unidade espacial que engloba no mínimo um grupo ou formação geológica e suas relações com o ambiente no qual se insere.

Melhor detalhamento dessa definição é fornecido pela Instrução Normativa nº 2 (2017):

- Enfoque Local (Unidade Geomorfológica) – Unidade geomorfológica que apresente continuidade espacial, podendo abranger feições como serras, morrotes ou sistema cárstico, o que for mais restritivo em termos de área, desde que contemplada a área de influência da cavidade.
- Enfoque Regional (Unidade Espeleológica) – Área com homogeneidade fisiográfica, geralmente associada à ocorrência de rochas solúveis, que pode congrega diversas formas de relevo cárstico e pseudocárstico, tais como dolinas, lapiás e cavernas, delimitada por um conjunto de fatores ambientais específicos para sua formação.

Na definição do enfoque local (Unidade Geomorfológica) é importante ater-se ao conceito de continuidade, podendo ser representado por uma serra, um vale ou uma unidade/compartimento de relevo cárstico. Já o enfoque regional (Unidade Espeleológica) guarda relação com o conceito de Províncias e Distritos Espeleológicos originalmente definidos por Karmann e Sánchez (1980), sendo normalmente balizado pela área de exposição de determinada litologia. A definição desses parâmetros deve ser efetuada caso a caso, levando-se em consideração aspectos espeleológicos e fisiográficos de cada região.

2.3 Atributos relacionados ao sistema cárstico

Influência sobre o sistema cárstico

Esse atributo diz respeito à influência da existência da cavidade e sua localização para a manutenção da dinâmica cárstica, incluindo também a própria estabilidade do sistema cárstico. Algumas cavernas estão situadas em zonas urbanas, de modo que o abatimento do teto das mesmas pode trazer sérias

consequências para as edificações do entorno. Cavidades localizadas próximas a zonas onde há intenso bombeamento de água subterrânea são particularmente sujeitas a colapso devido à remoção do suporte exercido pela água, gerando dolinas na superfície.

Conforme frisado, as cavernas fazem parte de um sistema que, em linhas gerais, faz com que a água infiltrada percorra o interior da rocha e ressurja próxima aos níveis de base, geralmente representados pelos principais rios da região. Funciona também como um sistema integrado, constituído de espaços vazios no interior do corpo rochoso, dentro do qual se incluem as cavernas. Algumas cavernas, notadamente aquelas que possuem drenagem, constituem segmentos essenciais desse sistema. Impactos ou supressão das mesmas podem afetar a integridade e a funcionalidade da dinâmica cárstica, comprometendo a manutenção do equilíbrio físico e biológico do sistema cárstico.

Para a interpretação desse item deve-se atentar à localização dos sistemas cársticos em relação a zonas urbanas e empreendimentos, além de sua importância hidrológica e ambiental para a região cárstica na qual se insere. A identificação das principais áreas de recarga (onde a água entra no sistema cárstico) e de descarga (local onde a água sai do sistema) é fundamental quando da análise de empreendimentos em áreas cársticas.

3 As cavernas

Cavernas ocorrem em vários tipos de rocha, geradas por processos diversos, apresentando grande variabilidade morfológica. De forma geral, podemos inicialmente enquadrar as cavernas como primárias ou secundárias. Cavernas **primárias** são aquelas formadas simultaneamente às rochas que as contêm. O melhor exemplo seriam os tubos de lava, frequentes em regiões vulcanicamente ativas. Durante a erupção de um vulcão, a lava (rocha em estado líquido) escorre pelas encostas da montanha. A lava tenderá a esfriar e solidificar no contato com superfícies mais frias como o ar e o piso da montanha. No entanto, no interior, a lava continuará a fluir. Quando cessar o suprimento de lava, devido ao término da erupção ou alteração da rota de escoamento, a porção lateral terá se solidificado e, com o fim do suprimento de lava, um conduto tubular será gerado. Esse tipo de caverna é muito raso e, como no Brasil as atividades vulcânicas são mais antigas, tubos de lava gerados no passado estão propensos a serem destruídos pela erosão, muito embora Waichel *et al.* (2013) tenham descrito esta feição nos derrames basálticos do Paraná. Outro exemplo de caverna primária seriam as cavernas em tálus. Tálus são zonas de desmoronamentos, muito frequentes em encostas de morros de granito ou gnaiss, mas que ocorrem também em outros tipos de rocha como quartzitos e calcários. Os recessos entre os blocos podem formar uma série de espaços vazios interconectados. Quanto maiores os blocos, mais imperfeito o encaixe e maiores os espaços entre eles. Algumas das maiores cavernas graníticas do país são na verdade cavernas em tálus, como a Gruta do Riachinho, em Itú (SP). Cavernas **secundárias** são aquelas geradas após a rocha ter sido formada. Incluem a maioria das cavernas conhecidas, como as cavernas cársticas.

Uma maneira de classificar as cavernas secundárias diz respeito à forma de atuação do agente formador. Duas grandes categorias podem ser diferenciadas. **Cavernas exógenas** são criadas por

meio de agentes que atuam no exterior do maciço rochoso, de fora para dentro. Exemplos típicos seriam as cavernas litorâneas, formadas pela erosão por ondas, bastante frequentes em todo o litoral brasileiro, como nos basaltos de Torres (RS), ou a Gruta Que Chora, em Ubatuba (SP). Cavernas geradas pela ação de ventos são comuns em áreas desérticas, não tendo sido descritas até o momento no Brasil. Outro tipo de caverna exógena são abrigos gerados por erosão lateral de rios. São normalmente de reduzidas dimensões e em litologia variada, estando descritas em vários locais do Brasil. Orifícios ou reentrâncias em rochas graníticas recebem o nome genérico de *tafone*. Os *tafoni* (forma plural de *tafone*) podem ser de grandes dimensões, chegando a formar cavernas. Na região próxima a Milagres e Itatim (BA), às margens da BR-116, existem belos exemplos de cavidades desse tipo (FIGURA 7). Sua gênese é complexa e envolve diversos fatores, como ação intempérica e alívio de cargas no maciço rochoso. Muitos *tafoni* não chegam a constituir cavernas, por serem pouco profundos em relação à altura da entrada.

Figura 7 – Tafone na região de Milagres/Itatim (BA). As letras da palavra Tyresoles possuem cerca de 6m de altura.



Foto: Augusto Auler

Cavernas **endógenas**, por outro lado, são formadas primordialmente por agentes atuantes no interior da rocha. Um exemplo seriam as cavernas tectônicas, representadas por fraturas ou falhas abertas pela movimentação natural das camadas rochosas. Outro tipo seriam as cavernas cársticas, formadas pela ação química da água ácida em rochas solúveis, que compreendem a maior parte das cavernas existentes no planeta. Devido à sua abundância, cavernas em rochas carbonáticas serão enfatizadas neste capítulo, muito embora cavidades em outros tipos de rocha, como rochas siliciclásticas (arenitos, quartzitos, conglomerados), e em rochas ferríferas serão também abordadas.

3.1 Gênese de cavernas em rochas carbonáticas

Rochas carbonáticas (calcários, dolomitos, mármore, etc.) possuem a propriedade de serem solúveis ao ataque de águas ácidas. Essas rochas irão concentrar a maior parte das cavernas. O dolomito e o mármore são menos solúveis que os calcários. Isso não impede, no entanto, que longas e amplas cavernas se formem nessas rochas. A maior caverna brasileira, a Toca da Boa Vista, em Campo Formoso (BA), com mais de 100km explorados, se insere em dolomitos. De forma geral, os processos envolvidos na gênese de cavernas em rochas carbonáticas são similares nessas três litologias, o que permite que o assunto seja tratado de forma unificada.

As cavernas são "anomalias" na massa rochosa. A maior parte dos carbonatos é essencialmente maciça, não apresentando grandes espaços vazios. Worthington (1991) estima que, em carbonatos carstificados, a porosidade devido a cavernas esteja entre 0,1-1% do volume total. As cavernas estão geralmente relacionadas a certos níveis ou horizontes de desenvolvimento. Lowe (1992) acredita que "horizontes de iniciação" na rocha condicionam a localização dos condutos e a própria existência da caverna. Esses horizontes podem ser o contato entre rochas solúveis e insolúveis, que, segundo Palmer (1991), responde pelo controle geológico de 18% de todas as cavernas conhecidas. Algumas grutas no carste do Vale do Ribeira (SP) e em Lagoa Santa (MG) se posicionam em contatos litológicos. Fraturas (planos de ruptura normalmente verticalizados de origem tectônica - FIGURA 8), falhas (planos de ruptura verticalizados com movimentação relativa entre os

Figura 8 – Galeria em arenitos orientada segundo fratura no teto. Gruta Riacho dos Bois (PI), Parque Nacional da Serra das Confusões



Foto: Augusto Auler

Figura 9 – Padrões morfológicos de cavernas
Fonte: Palmer (1991)

lados) e planos de acamamento (plano horizontalizado que divide diferentes camadas da rocha) são os horizontes de iniciação mais propícios para a espeleogênese. De acordo com Palmer (1991), 99% das galerias de cavernas estão orientadas segundo essas estruturas. Outros horizontes favoráveis podem ser níveis de minerais sulfetados, níveis de distinta granulometria, horizontes com carstificação pretérita (paleocarste), entre outros.

As diversas formas de recarga da água, a estrutura da rocha, a direção de escoamento da água subterrânea, entre outros fatores, irão influenciar o padrão das cavernas. Em planta, após o levantamento topográfico, pode-se observar que a configuração espacial das cavernas tende a adquirir determinadas formas. Palmer (1991) reconheceu cinco padrões planimétricos principais de cavernas (FIGURA 9). Cavernas *dendríticas* constituem o tipo mais comum. Consistem em um conduto de rio (ativo ou seco) principal com condutos laterais se unindo como tributários. A Gruta do Cesário, em Campo Formoso (BA), é um bom exemplo de caverna dendrítica (FIGURA 10). Cavernas *reticuladas* possuem galerias condicionadas por fraturas, que se entrecruzam em ângulos determinados pela estrutura da rocha. A Lapa Nova, em Vazante (MG), consiste em exemplo bem conhecido. Cavernas *anastomóticas* (ou *anastomosadas*) apresentam diversas galerias curvilíneas que se entrelaçam. A Gruta das Escadas, em Matozinhos (MG), exemplifica esse padrão. Cavernas *espongiformes* se caracterizam por um padrão de salas e condutos de formato irregular, unindo-se como os poros de uma esponja. Muitas das cavernas inseridas no calcário da Formação Caatinga (BA) possuem esse tipo de padrão. Setores labirínticos da Toca dos Ossos, em Ourulândia (BA), ilustram magnificamente esse tipo morfológico. Cavernas *ramiformes* mostram condutos de perfil e seção irregular, se ramificando de forma errática como os ramos de uma árvore. As cavernas no Grupo Una, na região de Campo Formoso (BA), apresentam

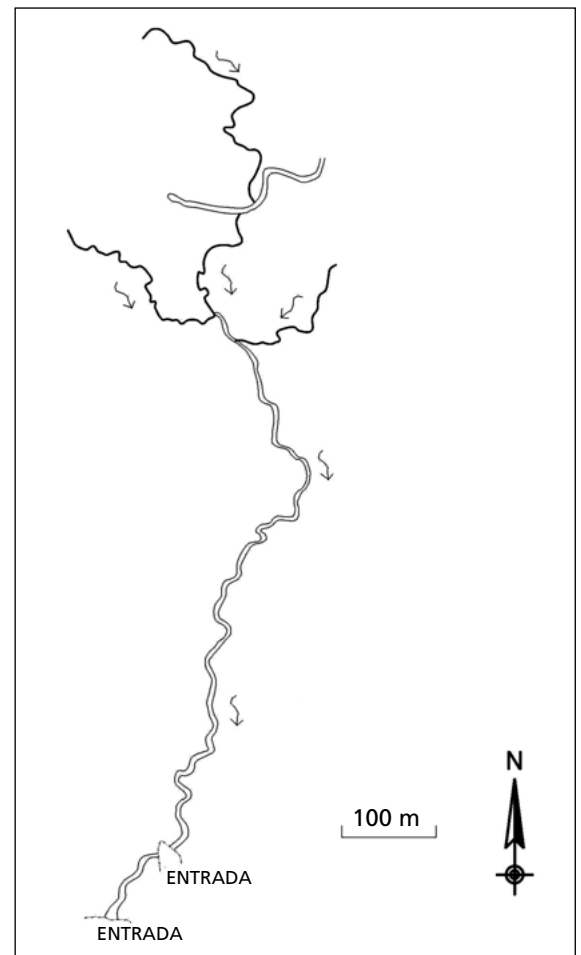
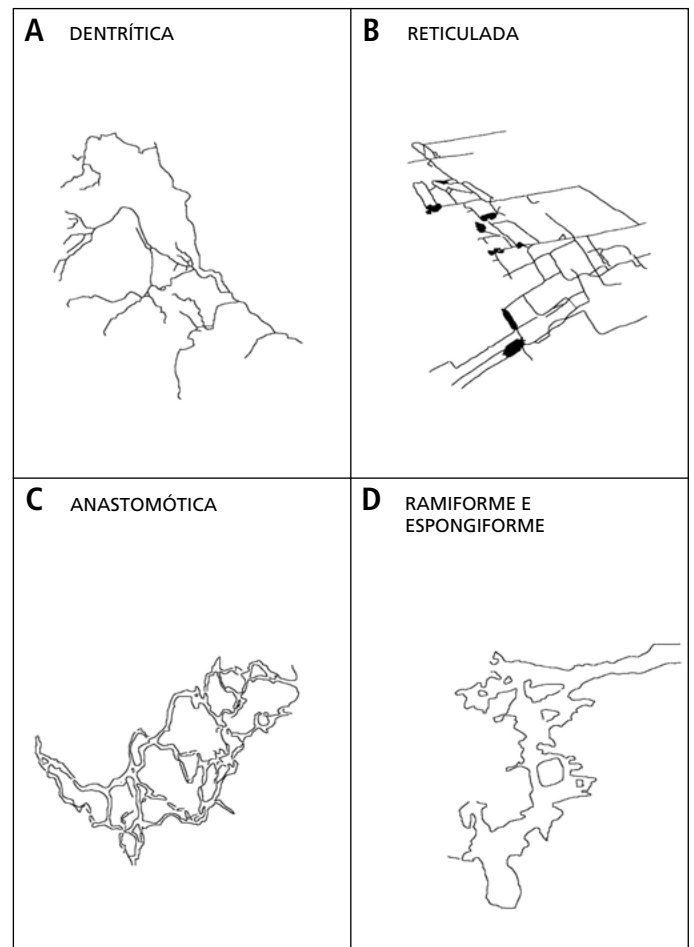


Figura 10 – Gruta do Cesário (BA), Campo Formoso, uma caverna dendrítica
Fonte: Mapa - Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas

em alguns trechos essa morfologia, como na Toca da Barriguda e na Toca da Boa Vista (FIGURA 11). Muitas cavernas mostram uma morfologia que abrange mais de um padrão, assim como a gradação entre estes padrões pode ser frequente. Da mesma forma, muitas cavernas são apenas fragmentos de grandes sistemas, nas quais um padrão morfológico não pode ser determinado com precisão. O termo genérico "caverna labiríntica", muito usado por exploradores e espeleólogos, pode indicar cavernas do tipo espongiforme, ramiforme, reticulado ou mesmo anastomótico, dependendo da densidade de galerias que se interconectam.

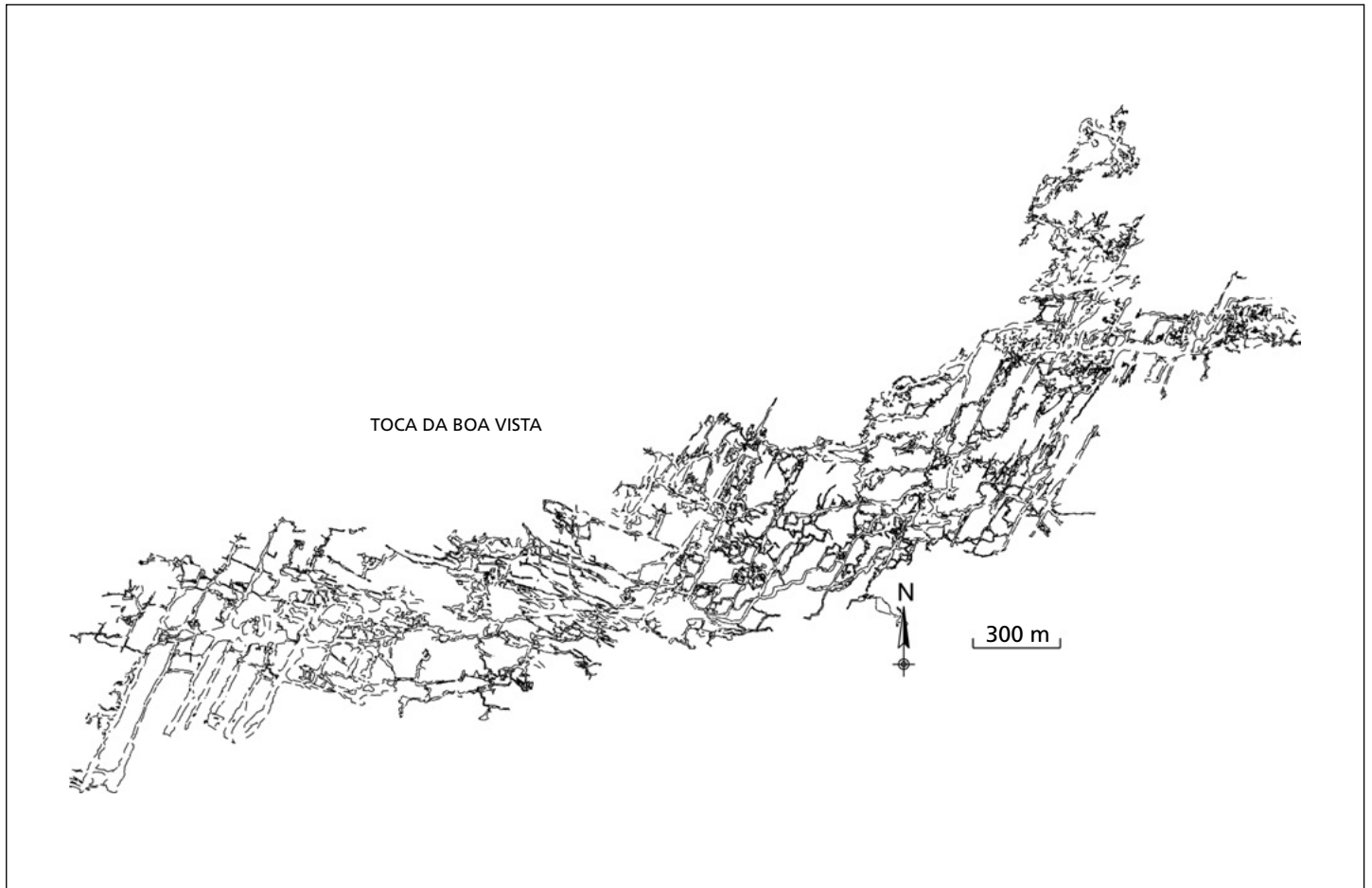


Figura 11 – Toca da Boa Vista (BA), Campo Formoso, uma caverna predominantemente reticulada, mas que apresenta também trechos ramiformes **Fonte:** Mapa - Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas

Com relação à origem da fonte de acidez é possível reconhecer dois grandes grupos de cavernas. As cavernas **epigênicas** são aquelas geradas pelo fluxo de água a partir de zonas de recarga na superfície, oriundas de águas meteóricas (de chuva ou de rios superficiais). Compreendem a maior parte das cavernas existentes. No entanto, várias cavernas, incluindo a mais extensa do Brasil e algumas das maiores do mundo, ocorrem devido à ação química de águas ascendendo de grandes profundidades, ou acidificadas no interior do maciço rochoso. Essa categoria recebe o nome de cavernas **hipogênicas**.

Cavernas epigênicas

Nas cavernas epigênicas a água se infiltra no maciço rochoso a partir da superfície. A maneira como essa infiltração se dá será importante na definição do padrão das galerias. Em locais onde a infiltração é pontual, como, por exemplo, em um sumidouro ou em fundo de dolina, a tendência será a formação de uma caverna dendrítica. No caso de uma infiltração difusa, como em uma zona de inundação, cavernas labirínticas do tipo reticulado ou anastomótico podem se formar. Auler (1995) mostrou que algumas das cavernas do carste de Lagoa Santa (MG) são labirintos reticulados formados pela infiltração difusa da água de lagos.

As cavernas epigênicas podem ocorrer em todos os tipos de zonas hidrológicas. Na zona freática, os condutos tenderão a escolher o percurso mais simples de acordo com a inclinação da superfície do lençol freático (o gradiente hidráulico), em direção à zona de descarga. Assim sendo, as fraturas e os planos de acamamento mais propícios serão utilizados. Extensas cavernas se desenvolvem totalmente na zona freática. Um exemplo seria o dos sistemas quilométricos de cavernas alagadas na região de Bonito (MS) ou na Chapada Diamantina (BA). Na zona vadosa, um tipo de caverna bastante comum é formado quando a água se infiltra em um abismo e percorre fraturas e planos de acamamento verticalmente até atingir a zona freática. Nesse tipo de caverna, o curso d'água, por vezes temporário, não está conectado ao aquífero e fluirá independentemente do nível de base até adentrar a zona freática. Diversas cavidades verticalizadas em várias regiões brasileiras seguem esse tipo de modelo, como alguns abismos no Vale do Ribeira (SP). Muitas cavernas também se desenvolvem no contato entre essas zonas hidrológicas. Em regiões de climas sazonais, como é o caso de boa parte do Brasil, diversas cavernas tornam-se alagadas quando de chuvas intensas, transicionando da zona vadosa para a freática. Um bom exemplo são os condutos e o "teto baixo" da Gruta Olhos d'Água, em Itacarambi (MG), que inundam quando de chuvas torrenciais. Outras cavernas possuem uma zona superior vadosa, atingindo o lençol freático e prosseguindo alagada na zona freática. Esses exemplos mostram que as cavernas podem existir em todas as zonas hidrológicas, possuindo frequentemente galerias em mais de uma delas.

Experimentos realizados em gesso ilustram como ocorre a propagação de galerias a partir de um ponto de infiltração. Inicialmente forma-se uma série de pequenos canais, que se propagam em direção ao ponto de saída. Quando um desses "protocondutos" consegue se conectar ao ponto de descarga, ele passará a transmitir uma quantidade maior de água, alargando-se mais rapidamente. Isso fará com que os outros condutos se desenvolvam em direção a ele, ou então sejam abandonados, formando uma caverna de padrão dendrítico. Pesquisas mostram que um importante incremento na taxa de dissolução de um protoconduto se dá quando ele ultrapassa o limite de transição entre o fluxo laminar (no qual as moléculas de água se movimentam lentamente de modo paralelo) e o fluxo turbulento (no qual a movimentação das moléculas se torna "caótica"). O fluxo passará a ser turbulento quando o protoconduto atingir um diâmetro por volta de 10mm, dependendo do gradiente hidráulico e da temperatura.

Em termos de química, é necessário que a água mantenha sua capacidade dissolutiva ao longo de todo o percurso. À medida que ela dissolve o carbonato, a água vai se tornando saturada, diminuindo, assim, a capacidade de atacar quimicamente a rocha. No entanto, essa diminuição se dá de forma bastante lenta, tornando possível que longos protocondutos sejam continuamente ampliados. Worthington e Ford (1995) acreditam que, além do ácido carbônico, o ácido sulfúrico, ainda que em pequenas quantidades, pode ser importante na iniciação de condutos.

Ford e Ewers (1978) propuseram um modelo espeleogenético que é ilustrado na Figura 12. De acordo com esse modelo, a densidade das juntas na rocha irá definir o tipo de caverna resultante. Em carbonatos dobrados com pequena densidade de juntas, o fluxo tenderá a seguir as poucas zonas de descontinuidade disponíveis, adotando um perfil com desvios verticais (*loops*) profundos. À medida que a densidade de juntas aumenta, a água poderá escolher rotas de fluxo mais retilíneas, resultando em cavernas essencialmente planas que seguem o contorno do lençol freático. No Brasil, onde muitos dos nossos carbonatos são horizontalizados, as cavernas tenderão a seguir planos de acamamento sub-horizontais, gerando uma morfologia de amplos e longos condutos com poucos desníveis. Um bom exemplo seria a extensa galeria principal da Gruta do Padre, no oeste baiano.

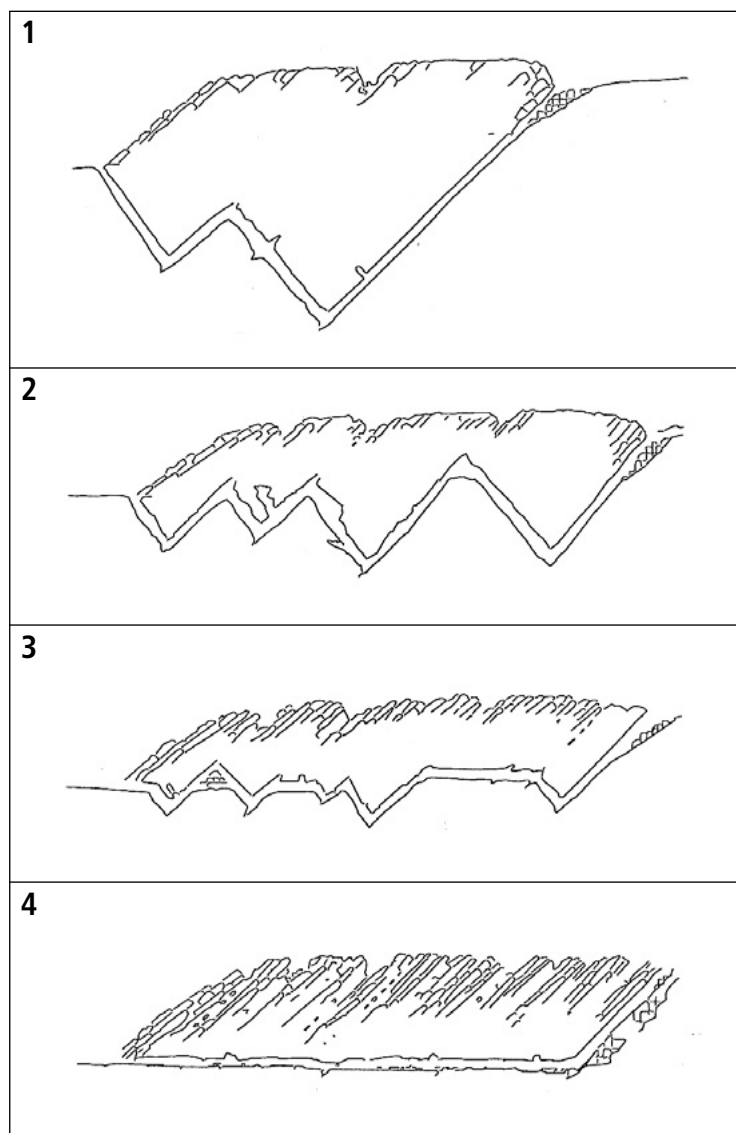


Figura 12 – Modelo de Ford e Ewers, relacionando rotas de fluxo e densidade de fraturamento. Quanto maior o número de alternativas que representem o caminho mais curto entre o ponto de entrada e saída em relação ao fluxo da água, mais horizontal será a caverna

Fonte: Ford e Williams (2007)

Segundo Worthington (1991), a extensão da bacia de drenagem e o mergulho e a direção das camadas de carbonato são os principais fatores a determinar a que profundidade em relação ao nível freático a maior parte dos condutos irá se desenvolver. Cavernas ativas existem a grande profundidade, conforme demonstrado pela exploração por submersíveis e espeleomergulhadores. Profundidades acima de 300m já foram atingidas em alguns locais. No Brasil, a Lagoa Azul, em Niquelândia (GO), foi explorada até - 260m.

Depois que o conduto passa pela fase de iniciação, ele pode evoluir de forma descendente (singênese) ou ascendente (paragênese). Em um estágio inicial de formação, com o conduto totalmente na zona freática, a água dissolve teto, paredes e piso ao mesmo tempo, favorecendo a formação de uma seção aproximadamente circular. Com o progressivo rebaixamento do nível freático, o topo do conduto passa a possuir ar e, portanto, a dissolução passará a ocorrer somente no piso, criando pouco a pouco um perfil do tipo cânion ou “fechadura” (FIGURA 13). As altas galerias de rios no carste

Figura 13 – Galeria singenética inicialmente com seção circular (freática) que posteriormente transicionou para a zona vadosa e escavou o piso. Carste de Lagoa Santa, Matozinhos (MG)



Foto: Augusto Auler

do Vale do Ribeira (SP) são cânions vadosos que evoluíram dessa maneira. Rebaixamentos abruptos do nível de base, ou juntas favoráveis, podem causar a migração da água para condutos inferiores independentes, deixando secas as galerias superiores. A evolução descendente será atenuada quando um nível impermeável for atingido. Os grandes sistemas do carste de São Domingos (GO) constituem belíssimos exemplos de cânions vadosos que atingiram (e escavaram) um embasamento ígneo.

Em uma evolução paragenética (FIGURA 14), o fluxo lento da água permite que se acumule sedimento no piso. Esse sedimento impermeabilizará a base do conduto, fazendo com que a água dissolva preferencialmente no teto. Assim, o conduto evoluirá ascendentemente, havendo um equilíbrio entre a deposição de materiais finos no piso e a dissolução no teto. O desenvolvimento paragenético cessará quando for atingido o nível freático. Esse tipo de processo é muito comum no Brasil e belos exemplos existem no Carste de Lagoa Santa (MG) (FIGURA 15).

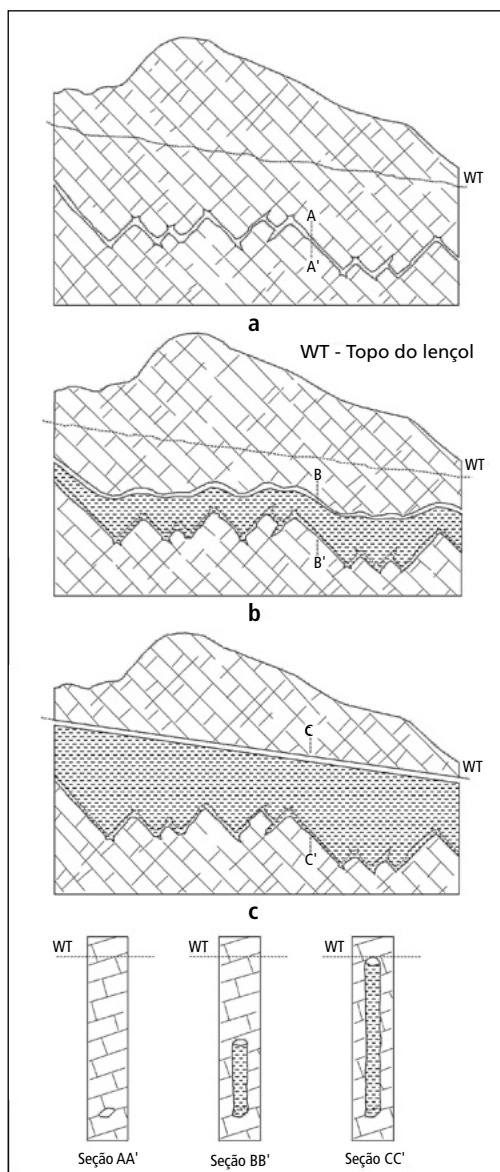


Figura 14 – Evolução paragenética de uma galeria (perfil e seções) **Fonte:** Pasini (1967)



Figura 15 – Meandro paragenético ao teto da Gruta do Morro Redondo (MG), Matozinhos. Nota-se que o teto do meandro não segue o plano de acamamento representado por variações de cor, indicando que o protoconduto não foi formado nesse local **Foto:** Augusto Auler

Numerosas formas esculpidas pelas águas nas paredes, no piso e no teto de galerias podem fornecer indícios importantes a respeito dos processos envolvidos na espeleogênese. Essas feições recebem o nome genérico de “espeleogens”. *Scallops* são concavidades nas paredes que são bastante úteis para interpretar direção de fluxo em galerias secas. Possuem um bordo mais suave e outro mais inclinado. A direção pode ser determinada facilmente, sempre do lado mais inclinado para o lado mais suave. Conhecida a largura do conduto e o comprimento da feição, com o auxílio de uma equação pode-se determinar a velocidade da água que gerou o conduto (FIGURA 16).

Figura 16 – *Scallops* na entrada da Lapa da Vargem (MG), Lagoa Santa



Foto: Augusto Auler

Cúpulas são depressões arredondadas que ocorrem em geral no teto, condicionadas por fraturas. Sua gênese admite variações. É possível que sejam geradas por corrosão de mistura entre diferentes águas de infiltração, quando do contato entre águas que descendem pela fratura com águas que preenchem totalmente o conduto da caverna. Outras hipóteses incluem dissolução por contato entre a água da fratura e o ar da caverna, ou mesmo por dissolução, devido a águas ácidas injetadas durante inundações. Cavernas hipogênicas apresentam esse tipo de feição, sendo, neste caso, interpretadas como formadas por dissolução por água ascendente sob pressão ou pelo próprio vapor associado ao ar da caverna (FIGURA 17). Anastomoses constituem um conjunto de canalículos no teto ou paredes. São bastante comuns em cavernas paragenéticas, formando-se no contato entre sedimento e solo. Anastomoses podem também evidenciar a fase inicial de espeleogênese em uma caverna. Pendentes são projeções nos tetos bastante comuns em cavernas que foram preenchidas por sedimentos. Sua gênese é provavelmente relacionada à dissolução diferencial na interface sedimento-rocha (FIGURA 18).

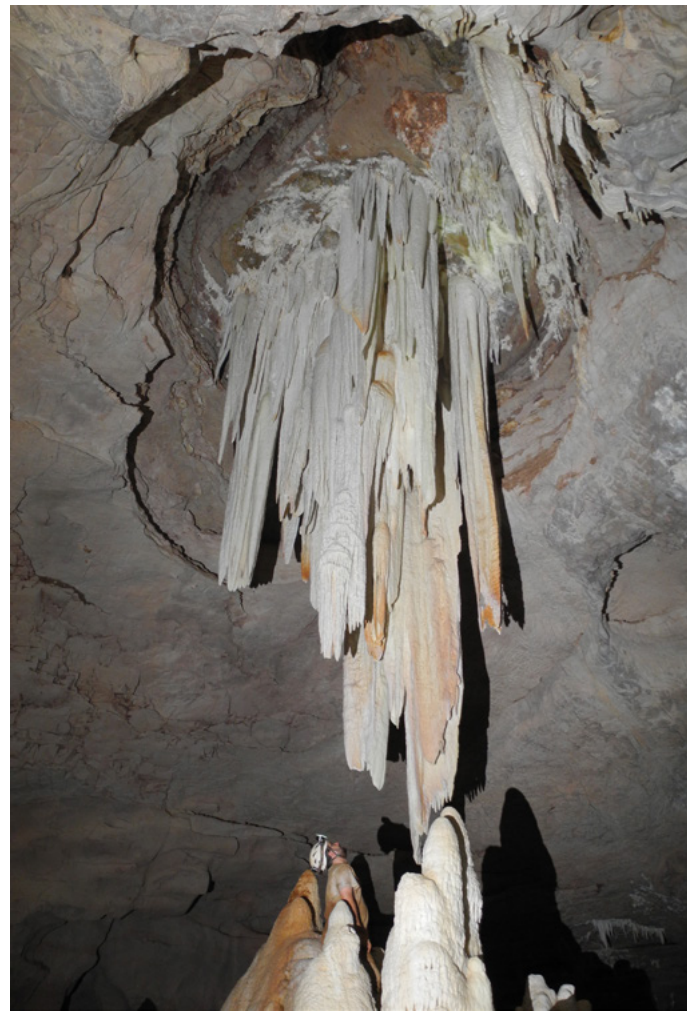


Figura 17 – Cúpula hipogênica na Toca da Barriguda (BA), apresentando belo conjunto de espeleotemas
Foto: Augusto Auler

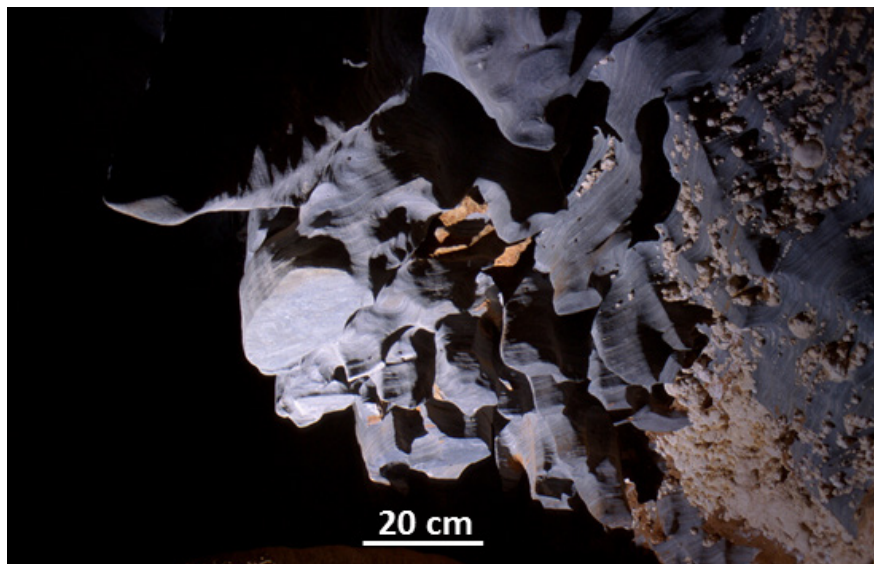


Figura 18 – Pendentes na Gruta dos Túneis (MG), Lagoa Santa
Foto: Augusto Auler

A fase final de evolução de uma caverna envolve a progressiva aproximação da superfície, quando do soerguimento do pacote rochoso. Em uma fase terminal, essa evolução leva à interceptação da caverna pela superfície e eventual eliminação da mesma (FIGURA 19).

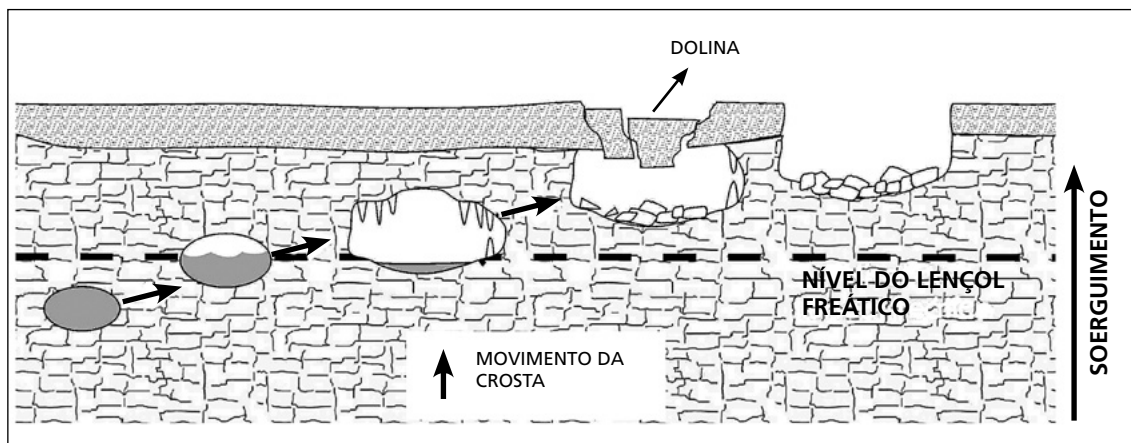


Figura 19 – Ao final da evolução de uma caverna ela tende a se tornar seca e ser eventualmente eliminada, devido ao soerguimento e à erosão superficial **Fonte:** Auler e Zogbi (2005)

O processo de formação e evolução de uma caverna é lento e pode levar milhões de anos. Durante seu desenvolvimento existem muitos fatores que conferem às cavernas enorme variedade quanto a formas e preenchimento.

Cavernas hipogênicas

Em uma caverna hipogênica, o agente da dissolução tem sua origem em profundidade, sendo normalmente ácido carbônico ou ácido sulfúrico. A água ascendente é normalmente aquecida devido à profundidade, gerando cavernas denominadas “hidrotermais”. Ácido sulfúrico é agente importante na gênese de muitas cavernas hipogênicas. Pode ser produzido a partir do gás H_2S que ascende pela rocha e se mistura com a água subterrânea produzindo o ácido sulfúrico (H_2SO_4), que dissolve a caverna. A origem do H_2S pode estar ligada a bacias de hidrocarbonetos (petróleo), como no caso das enormes cavernas de Lechuguilla e Carlsbad, nos Estados Unidos. A oxidação de lentes de pirita, um mineral do grupo dos sulfetos de ocorrência frequente em carbonatos, pode também vir a gerar ácido sulfúrico em quantidades suficientes para formar cavernas.

Cavernas hipogênicas diferem em alguns aspectos importantes de suas correspondentes epigênicas. Como foram criadas a partir do interior da rocha, não possuem qualquer relação com o terreno superficial. Suas entradas são normalmente abatimentos fortuitos devido à interceptação de condutos preexistentes quando do rebaixamento natural da superfície. Sedimentos fluviais são em geral ausentes. A mineralogia dos espeleotemas é distinta, destacando-se, no caso de cavernas formadas por ácido sulfúrico, espeleotemas de gesso e minerais característicos, como a alunita. Pendentes, cúpulas e forte intemperismo na rocha são outras feições típicas. Cavernas hipogênicas não possuem necessariamente entradas e, portanto, podem permanecer à margem das descobertas espeleológicas,

dando a falsa impressão de que representam uma tipologia rara no contexto espeleológico. O Brasil possui algumas importantes cavernas hipogênicas, como a Toca da Boa Vista e a Toca da Barriguda, em Campo Formoso (BA) (AULER; SMART, 2003; KLIMCHOUK *et al.*, 2016; AULER *et al.*, 2017).

3.2 Gênese de cavernas em rochas não carbonáticas

Dentre as rochas não carbonáticas em que ocorrem processos químicos e a consequente geração de um número expressivo de cavernas, citam-se gesso, sal, quartzito, arenito e formações ferríferas. Cavernas em gesso e sal ainda não foram descritas no Brasil, ao passo que cavidades nas demais litologias mencionadas são bastante frequentes, inserindo-se as ocorrências brasileiras entre as mais representativas do mundo. Nesta seção, ênfase será dada a cavernas em arenito/quartzito e em rochas ferríferas.

Quartzitos e arenitos são rochas assemelhadas, compostas principalmente por sílica, sendo que os quartzitos são basicamente arenitos que sofreram metamorfismo, ou seja, foram submetidos a alta temperatura e pressão. Os processos espeleogenéticos que atuam em arenitos e quartzitos são similares. A sílica e o quartzo são pouco solúveis, mas, em climas quentes, podem sofrer lento ataque químico. Essa dissolução inicial irá permitir que a água inicie sua circulação entre os grãos de quartzo, corroendo suas arestas e fazendo com que fiquem soltos. Dessa forma, a rocha pode facilmente se desintegrar, em um processo conhecido como “arenização”. A erosão se encarrega de carrear esses grãos soltos, gerando as cavernas. Assim sendo, a dissolução cumprirá um papel inicial importante, mas quantitativamente inferior quando comparado com a evolução por erosão, que será responsável pela efetiva expansão dos condutos. Cavernas em rochas siliciclásticas podem apresentar padrão dendrítico e reticulado, ao passo que os demais padrões reconhecidos para cavernas carbonáticas tendem a ser raros.

Em rochas ferríferas pouco ainda se conhece sobre a gênese das cavernas. Simmons (1963), trabalhando em áreas com presença de rochas ferruginosas dolomíticas no Quadrilátero Ferrífero, foi pioneiro em atribuir a gênese de cavernas rochas ferríferas (incluindo sua cobertura superficial, conhecida como canga) a processos de dissolução. Segundo ele, a dissolução do dolomito, mas também de quartzo e hematita, leva à formação de uma zona de minério de ferro alterado de alta porosidade que chega a atingir 50% do volume da rocha. Em regiões de formações ferríferas silicosas, a dissolução da sílica também exerce um papel importante. Processos microbiológicos foram recentemente aventados como importantes para a remoção do ferro, através da ação de bactérias redutoras que fazem com que o ferro se solubilize (PARKER *et al.*, 2015, 2018).

Cavernas em rochas ferríferas são de pequenas dimensões e sua morfologia difere bastante de suas congêneres em calcário e rochas siliciclásticas. Muitas dessas cavidades apresentam câmaras de formato arredondado conectadas por galerias menores, levando a supor que algumas das cavernas tivessem, originalmente, se desenvolvido no interior do maciço, sem abertura para o exterior (caverna oclusa). Essas galerias maiores conectadas por condutos menores podem ter evoluído independentemente em profundidade e, posteriormente, ter se conectado em ambiente de vertente (AULER *et al.*, 2014).

3.3 Atributos relacionados à gênese

Gênese única ou rara

O conceito de raridade depende, é claro, do que se considera comum. Para ser utilizado de forma coerente é necessário haver uma amostragem significativa do atributo em questão na escala de análise. Por exemplo, se conhecemos apenas poucas cavernas em determinada região e somente uma delas apresenta gênese ligada a fatores hipogênicos, ela poderia ser considerada como rara. Mas isso pode ser um mero artifício de uma amostra reduzida. Com estudos mais aprofundados, pode-se comprovar que a hipogenia é frequente naquela área e, com isto, sua gênese perderia a “raridade”. O conceito de “único” também pressupõe raridade. Não se recomenda a interpretação literal desse termo, ou seja, de modo que denote uma caverna que represente a “única” expressão de determinado processo, o que muitas vezes representaria uma impossibilidade, já que quase sempre há manifestação mais ampla de determinado mecanismo espeleogenético. “Raro” e “único” devem denotar um tipo de gênese pouco frequente na amostragem considerada.

Como regra geral, cavernas geradas por processos hipogênicos tendem a ser mais raras do que cavernas epigênicas. Outro tipo raro de gênese de cavernas é quando há contribuição, na escavação de algumas galerias, de animais extintos da chamada megafauna, como tatus gigantes. Poucas cavernas apresentam esse tipo de gênese. Cavernas geradas por processos hidrotermais também são pouco comuns no Brasil. Cavernas em que há contribuição significativa de corrosão por águas e vapores de condensação também devem ser consideradas como raras.

Cavernas em rochas pouco propícias ao cavernamento, como granitos, gnaisses, siltitos, solos, etc., são normalmente feições menos comuns, podendo ser raras dependendo das circunstâncias. No Brasil, cavernas geradas por alguns processos exógenos, como devido ao vento, não foram até o momento identificadas. Cavernas primárias, formadas devido a eventos tectônicos podem ser consideradas raras ou únicas em nosso país, assim como cavidades do tipo “tubo de lava”.

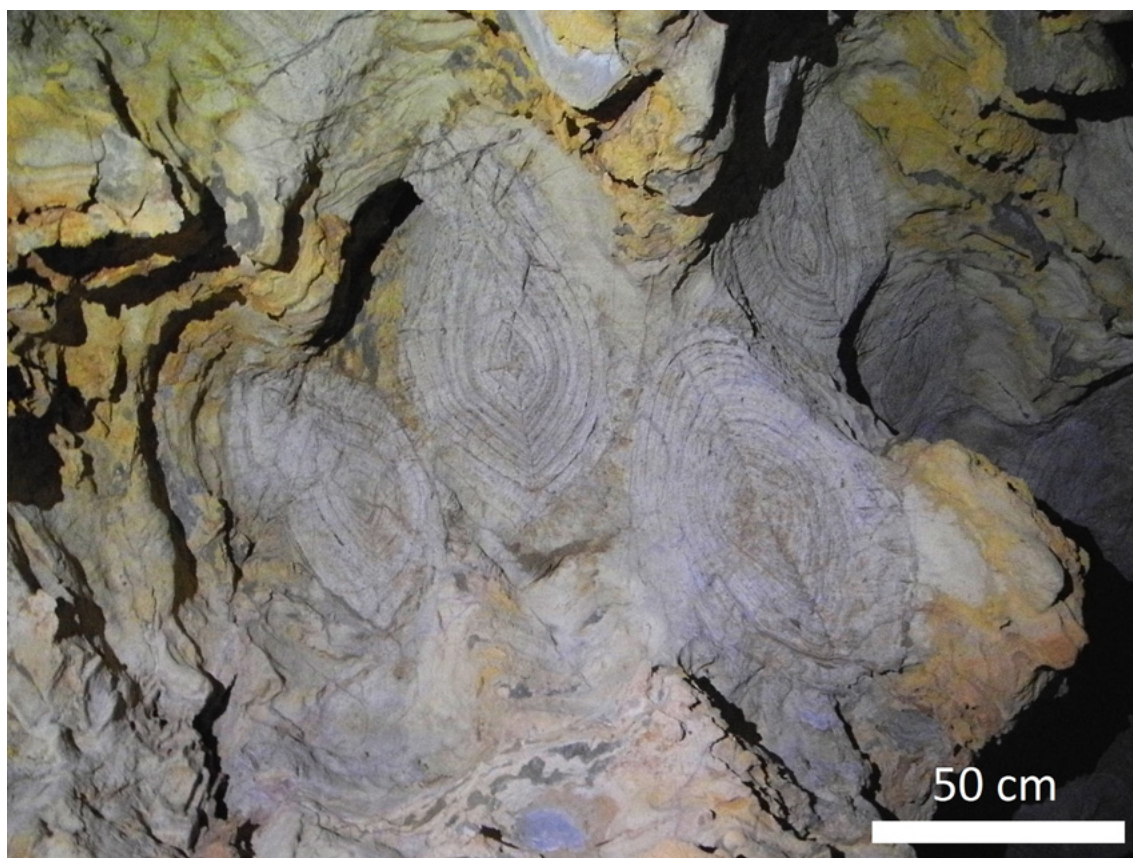
Morfologia única

O termo morfologia pode abranger tanto o padrão das galerias da caverna quanto as chamadas “mesoformas” (ou espeleogens) que são feições de corrosão na rocha relacionadas à gênese e à evolução da caverna. De modo a se aferir se determinada morfologia é única, deve-se fazer uma comparação com a morfologia das cavernas conhecidas, tanto no enfoque local quanto no regional. Para tal comparação é necessário observar o mapa da caverna, buscando-se determinar seu padrão planimétrico em relação aos padrões morfológicos conhecidos (dendrítico, ramiforme, espongiiforme, anastomosado e reticulado, no caso de cavernas carbonáticas). Caso determinada morfologia seja muito pouco frequente, poderá ser considerada como rara.

A morfologia pode também referir-se a feições como cúpulas, *scallops*, pendentes, etc. A legislação brasileira refere-se a essas microformas como “estruturas espeleogenéticas”. A descrição geológica das cavernas deverá conter registro da ocorrência, dimensão e demais características dos espeleogens. Uma análise comparativa com as demais cavernas no enfoque regional e local poderá definir se determinada morfologia é ou não frequente.

Os padrões do tipo ramiforme e espongiiforme tendem a ser quantitativamente mais raros. Espeleogênes tendem a ser comuns em cavernas carbonáticas, mas raros ou inexistentes em grutas em rochas siliciclásticas ou em formações ferríferas. Algumas feições, como cúpulas, são mais raras do que *scallops*. Existem numerosas feições que são pouco comuns e até mesmo desconhecidas no Brasil. Recentemente Auler e Souza (2017) reportaram cúpulas hipogênicas desenvolvidas segundo o eixo de estruturas estromatolíticas em algumas cavernas na região de Vazante (MG) (FIGURA 20), uma feição não descrita, até o momento, em outras cavernas do mundo. Outro exemplo seriam as “trilhas de bolhas” (caneluras ascendentes de dissolução geradas por vapores ricos em H_2S ou H_2CO_3), observadas em algumas poucas cavernas no Brasil. A observação atenta poderá revelar microformas pouco conhecidas e estudadas.

Figura 20 – Cúpulas ao teto desenvolvidas segundo o eixo de estruturas estromatolíticas em caverna nos arredores de Vazante (MG) Foto: Augusto Auler



Estruturas geológicas de interesse científico

Compreendem feições geológicas inerentes à rocha, como contatos entre litologias distintas, estruturas na rocha como dobramentos, falhas, feições deposicionais, mineralógicas, etc. As cavernas, por propiciarem uma visão interna do afloramento rochoso, apresentam potencial para esclarecer questões fundamentais relativas à história geológica de determinada área, principalmente se houver ausência de afloramentos na superfície. Esse é o caso, muitas vezes em regiões ferríferas, em que a superfície

de canga tende a mascarar a formação ferrífera e o relevo tabular limita a ocorrência de afloramentos. No interior das cavernas os agentes intempéricos são menos atuantes, resultando em exposições mais claras, muitas vezes não encontradas na superfície.

Além das estruturas na rocha encaixante, a análise deve incluir também as formas herdadas do processo de formação da caverna como *scallops*, *bell holes*, meandros, cúpulas, caneluras, pendentes, dentre outros. Também o padrão da caverna e a forma da galeria (seção ou corte) devem ser levados em consideração.

Um relatório geoespeleológico bem estruturado deverá conter descrição dessas feições, permitindo uma análise comparativa em relação a outras cavernas em escala regional e local. É muito importante a ilustração com fotografias, pois as mesmas auxiliam no momento de análise do relatório geoespeleológico.

A definição do eventual interesse científico por essas estruturas não constitui tarefa simples, pois pressupõe que o geoespeleólogo esteja ciente do estágio atual de pesquisas geológicas na região, de modo a aferir se determinada estrutura pode contribuir para o melhor conhecimento científico da geologia da área.

Isolamento geográfico

As cavernas, em geral, não constituem feições geomorfológicas isoladas, já que fazem parte de um contexto natural que inclui outras feições similares. Mas é possível que, devido a processos naturais (como erosão, processos fluviais, etc.) ou processos antropogênicos, como degradação devido à mineração, inundações devido a barramentos para geração de energia elétrica, haja cavernas em áreas isoladas na paisagem. Algumas cavernas em rochas pouco propícias à espeleogênese, como rochas ígneas, encontram-se em relativo isolamento. Um exemplo seria a Furna do Morcego, em Paulo Afonso (BA), uma caverna bem conhecida que se localiza em região onde não se tem conhecimento de outras feições espeleológicas. Consulta a cadastros espeleológicos e prospecção em detalhe são necessárias para determinar se a caverna ocorre em isolamento geográfico.

4 Hidrologia

A água é essencial para a formação da maior parte das cavernas. Mesmo após a espeleogênese, quando a caverna não mais está na zona freática, a água ainda assim é o principal agente a carrear sedimentos clásticos para o interior das cavernas, depositar sedimentos químicos e aportar material orgânico essencial para o ecossistema subterrâneo. Em regiões áridas ou semiáridas, como no Nordeste brasileiro, as cavernas, na ausência de poços ou cisternas, podem representar o único local onde se pode acessar água (FIGURA 21). Conforme já mencionado, a paisagem cárstica caracteriza-se por fluxo de água subterrâneo, com reduzida expressão fluvial em superfície.

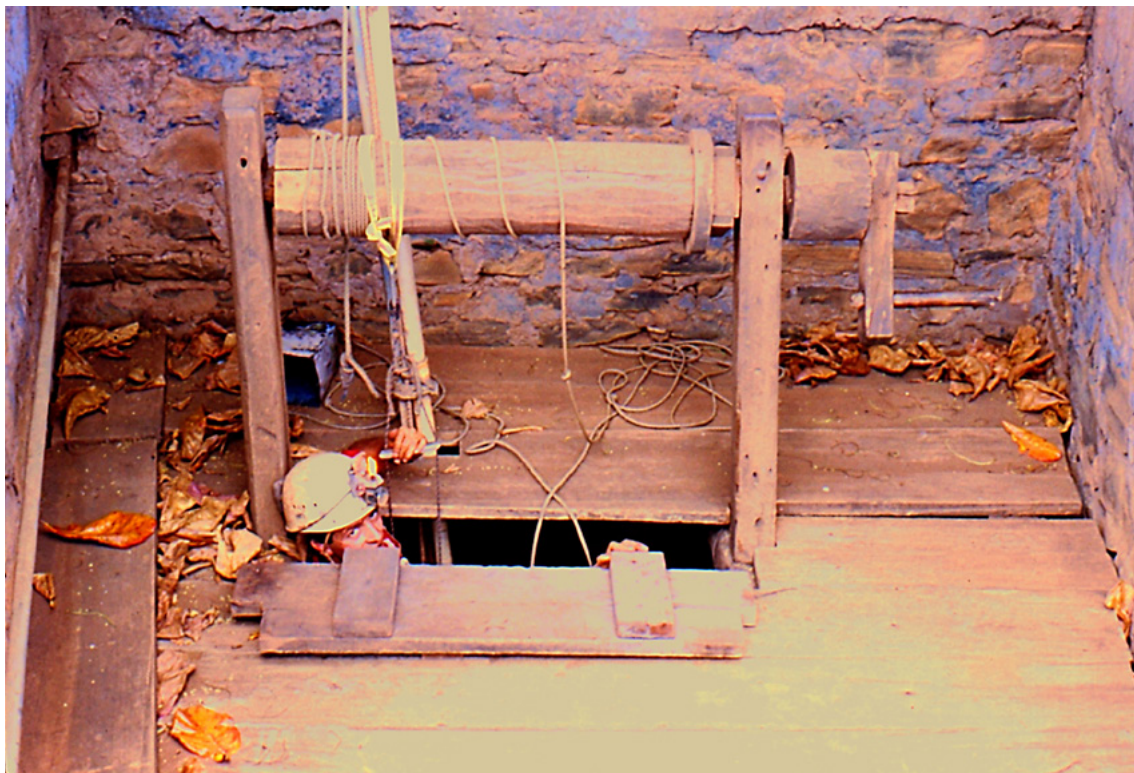
Figura 21 – Entrada de caverna associada a poço – Serra do Ramalho (BA)

Foto: Augusto Auler

O comportamento da água subterrânea no carste pode ser dividido em três componentes principais, de acordo com o tipo de porosidade e fluxo. A maior parte das regiões cársticas caracteriza-se por apresentar “tripla porosidade”, representada pela matriz rochosa, por fraturas e condutos.

A porosidade na matriz rochosa é, em geral, baixa, em se tratando de rochas maciças, antigas e bem cristalizadas como os carbonatos brasileiros. No entanto, fácies algais, e outras variações litológicas, podem criar zonas com maior porosidade. Estimativas realizadas em aquíferos cársticos do mundo mostram que a porosidade na matriz atinge valores entre 2 a 15% do pacote rochoso. A condutividade hidráulica na matriz será necessariamente baixa, entre 10^{-5} a 10^{-11} m/s. O fluxo na matriz se dará de forma laminar, obedecendo à tradicional Lei de Darcy.

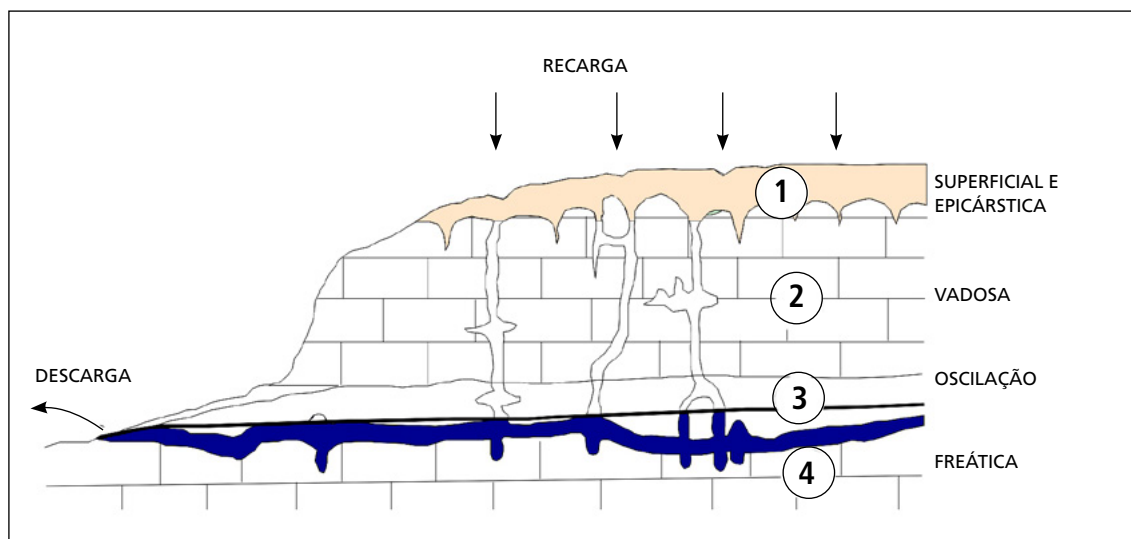
Conforme mencionado, fraturas são frequentes em meios cársticos assim como planos de acamamento. No entanto, em relação ao volume total de rocha, a porosidade das fraturas é baixa, respondendo, em média, por valores entre 0,1 a 0,01%. Apesar disso, devido à continuidade lateral das fraturas, à sua interconexão e à sua relação com os planos de acamamento, gerando zonas de maior permeabilidade, a condutividade hidráulica das fraturas se situará entre 10^{-3} a 10^{-6} m/s. O fluxo em fraturas pode ser laminar em alguns casos, mas não sendo o meio granular, este não obedecerá à Lei de Darcy.

No entanto, o fluxo em fraturas muitas vezes se dará de forma turbulenta. Fraturas (ou planos de acamamento) quando alargadas passam a receber o nome de condutos. A porosidade total

representada pelos condutos em regiões cársticas é necessariamente variável. Porém é claro que esses perfazem um volume nitidamente inferior ao das fraturas, visto que nem todas as fraturas são dissolvidas de forma a se transformarem em condutos. Estimativas realizadas em diversos aquíferos do mundo mostraram valores de porosidade entre 0,5 a 0,001% do volume total da rocha. No entanto, por constituírem espaços vazios muitas vezes de grandes dimensões, os condutos possuem altíssima condutividade hidráulica, situada entre 10^{-1} a 10^{-5} m/s.

Assim sendo, a tripla porosidade típica de regiões cársticas carbonáticas engloba modos de fluxo descritos por distintas leis da hidráulica, de modo que se torna bastante difícil qualquer caracterização de um aquífero cárstico. Muito embora a matriz rochosa seja responsável pela maior parte do volume de espaços vazios (mais de 90%), a maior parte do volume de água (mais de 90%) escoará através de condutos. A importância de cada um desses distintos tipos de porosidade será variável dependendo do aquífero. É também possível que condutos na zona freática passem a ser localizados na zona vadosa (ou vice-versa) devido ao rebaixamento induzido (ou natural) do aquífero. Desse modo, a dinâmica hidráulica nesse conduto se alterará significativamente, dependendo da época do ano e das condições de recarga ou bombeamento. Da mesma forma, um aumento repentino do gradiente hidráulico pode causar a transição entre um regime de fluxo laminar para turbulento, alternando o comportamento de fluxo. Essas considerações preliminares servem para ilustrar a notável complexidade relacionada a fluxo hídrico em aquíferos cársticos, justificando a individualização da hidrogeologia cárstica como uma disciplina “à parte”, não sujeita às leis normalmente aplicadas à hidrogeologia em meios porosos, ou em meios fraturados não solúveis. As principais zonas hidrológicas estão ilustradas na Figura 22.

Figura 22 – Zonas hidrológicas no carste:



Legenda:

1 – zona superficial e epicárstica, onde a água escoia superficialmente ou percola pelo solo, alterita ou fissuras alargadas no calcário; 2 – zona vadosa, onde a água circula livremente pelos condutos, sob a ação da gravidade; 3 – zona de oscilação do nível freático, onde os condutos apresentam-se alternadamente secos e inundados; 4 – zona freática, onde os condutos estão totalmente ocupados por água. **Fonte:** adaptada de Kohler (1994)

Em regiões de arenitos ou quartzitos predomina a porosidade de matriz, devido ao tipo de rocha constituir-se predominantemente por grãos de quartzo. Já em formações ferríferas predomina o fluxo em fraturas, devido à baixa porosidade primária deste tipo de rocha.

A água pode ocorrer de diversas formas no interior das cavernas, como rios subterrâneos, lagos, empoçamentos, infiltração, gotejamento, etc. O próprio ar da caverna possui elevada umidade relativa, permitindo condensação e formação de gotículas na rocha.

4.1 Atributos relacionados à hidrologia

Lago ou drenagem subterrânea

Refere-se a corpo ou curso d'água, perene ou intermitente, presente na cavidade. Por constituírem o agente formador da grande maioria das cavernas, as feições hidrológicas possuem grande importância na dinâmica espeleológica. O registro da existência de um corpo hídrico na caverna é relativamente simples, visto ser de fácil observação. No entanto, devido ao clima sazonal em boa parte das cavernas brasileiras, aliado à tendência natural de se realizarem os estudos em estação logicamente mais apropriada (estação seca), pode ser que corpos hídricos não estejam ativos quando da visita, devendo-se, portanto, ter cautela ao analisar o atributo. O reconhecimento de feições que caracterizem a existência de corpo hídrico ou drenagem na estação chuvosa é essencial. Dentre os indicativos, têm-se ravinamentos ao piso, marcas de nível d'água nas paredes, umidade no piso e nos sedimentos, presença de folhas presas ao teto e paredes, indicando inundação, dentre outros.

Água de percolação ou condensação

Refere-se à infiltração de água através de poros, diaclases, falhas, ou umidade existente na atmosfera da caverna sob a forma de vapor. A observação desse atributo também pode depender da estação climática e do tipo de caverna e sua rocha encaixante. Muitas das cavernas carbonáticas são relativamente profundas e possuem uma zona vadosa de algumas dezenas de metros. Por sobre a rocha em geral ocorre solo. A água que infiltra tem tempo suficiente para ficar armazenada nesses horizontes superiores, o que retarda sua chegada até a caverna. Dessa forma, a infiltração, sob a forma, em geral, de gotejamentos e escorrimientos, não reflete de forma imediata o regime de chuvas, mas se apresenta de forma atenuada, podendo ocorrer durante todo o ano. O mesmo não tende a ocorrer em cavernas em rochas siliciclásticas e principalmente ferríferas, que são mais rasas. A infiltração, quando originada de eventos pluviais, é quase imediata. Assim sendo, principalmente em cavidades em ferro e rochas siliciclásticas, é possível que os fenômenos ligados à infiltração não estejam presentes durante visitas em épocas secas, o que, obviamente, não significa que sejam ausentes.

A alta umidade relativa é uma característica de cavernas profundas, estando normalmente próxima à saturação (100%). Cavernas pouco profundas, com presença de claraboias, ou com mais de uma entrada em que haja fluxo de ar, tendem a ser menos úmidas, o que desfavorece a presença de condensação. A condensação pode ser importante para a formação de alguns tipos de espeleotemas, como coraloides, e também de pequenos espeleogens, sob a forma de orifícios, quando gotículas aderem às paredes ou ao teto.

5 Sedimentação em cavernas

A sedimentação em cavernas se dá de diversas formas, compreendendo desde aporte de material rochoso de granulometria diversa (sedimentação clástica), deposição por processos químicos de material dissolvido na água (sedimentação química) e aporte de material de constituição orgânica. Esses depósitos irão preencher as galerias da caverna em momentos diversos durante sua evolução e podem ser extremamente importantes para se compreender a evolução tanto da caverna quanto de seu entorno.

5.1 Sedimentação clástica

A maior parte das grutas apresenta algum tipo de sedimentação. Em geral são argilas ou areias trazidas por rios ou enxurradas a cobrir o piso da caverna ou material desprendido do teto e das paredes. Os sedimentos clásticos compreendem desde material com tamanho de blocos (matacões) até minúsculos componentes de dimensão argila. A maior parte tem sua origem fora da caverna (sedimentos alóctones), embora algumas rochas, como calcários impuros, quartzitos ou arenitos, forneçam com frequência sedimentos providos do interior da própria caverna (sedimentos autóctones).

A composição da sedimentação alóctone depende da área fonte. No caso de depósitos aluviais (trazidos por rios) pode representar material oriundo de áreas distantes, inseridas na bacia de captação da drenagem. Esse material tenderá a possuir graus variados de arredondamento, fruto da distância e da forma do transporte. Por vezes, é possível distinguir gradações na granulometria ou mineralogia (FIGURA 23), importantes para se determinar o ambiente deposicional. Por exemplo, sedimentos

Figura 23 – Depósito arenoso na Gruta Monte Cristo (MG), Diamantina, uma cavidade em quartzitos. Nota-se a estratigrafia preservada e alternância de níveis claros/escuros



Foto: Augusto Auler

de granulação muito fina, como argila, normalmente indicam sedimentação em situações de água estagnada ou de fluxo muito lento (LAUREANO; KARMANN, 2013). Já sedimentos de granulometria mais grosseira necessitam de considerável caudal e normalmente são oriundos de fluxo com maior velocidade.

Entre os sedimentos autóctones, blocos caídos do teto perfazem a maior parte dos depósitos. Os abatimentos são processos naturais, inerentes ao ciclo evolutivo das cavernas. O vazio representado pela caverna suporta milhares de toneladas de rocha, portanto há uma considerável tensão no maciço rochoso. Os abatimentos representam alívios de tensão, a partir dos quais a caverna busca atingir uma forma mais estável que melhor se ajuste à pressão rochosa. Os abatimentos ocorrem de forma espaçada no tempo, não constituindo perigo que deva preocupar os espeleólogos. Blocos abatidos podem abarcar dimensões diversas, desde blocos com mais de 50m de altura, como na Gruta dos Brejões (BA), até pequenas lascas. Outra forma de sedimentação autóctone compreende material insolúvel (impurezas) comumente encontrado em meio à rocha-matriz, sob a forma de bolsões de argila ou camadas arenosas.

Praticamente todas as cavernas apresentam tanto sedimentação alóctone quanto autóctone, embora sedimentação alóctone seja mais comum em cavernas carbonáticas. Grutas hipogênicas tendem a apresentar reduzida sedimentação alóctone, como é o caso da Toca da Barriguda e da Toca da Boa Vista, em Campo Formoso (BA). Grutas em formação ferrífera e em rochas siliciclásticas apresentam predominantemente sedimentação autóctone. Temos, por fim, o exemplo de grutas em tálus, que são constituídas por espaços vazios em meio a blocos abatidos.

Os depósitos clásticos podem ser de notável importância para compreender e balizar temporalmente a história evolutiva de uma caverna e da região em que se insere (LAUREANO *et al.*, 2016). São suscetíveis à datação por diversas técnicas, como por meio de paleomagnetismo e isótopos cosmogênicos, podendo também conter material fóssil.

5.2 Sedimentação química

Os depósitos cristalinos formados no interior da caverna recebem o nome genérico de espeleotemas (do grego, “depósitos de cavernas”). Os espeleotemas conferem beleza às cavernas, compreendendo centenas de formas, desde as mais conhecidas, como estalactites e estalagmites, até formas muito raras encontradas em poucas cavernas. Em cavernas carbonáticas, apesar de mais de uma centena de minerais terem sido identificados como formadores de espeleotemas, a maior parte é constituída por apenas três minerais: calcita (CaCO_3), o mais frequente mineral de cavernas; aragonita (também CaCO_3 , porém com uma estrutura cristalina diferente) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Como a cor desses três minerais é branca, esta é a coloração dominante nas ornamentações de cavernas carbonáticas. No caso da calcita e da aragonita, o processo mais comum de deposição envolve o processo inverso à reação química de dissolução mencionada anteriormente. A água saturada em carbonato de cálcio (sob a forma de bicarbonato de cálcio, que é solúvel em água) libera dióxido de carbono (CO_2) ao entrar em contato com a atmosfera da caverna. O bicarbonato irá transformar-se em carbonato de cálcio, que é insolúvel e provoca a deposição do mineral sob a forma de calcita ou aragonita. A deposição da gipsita se dá de forma distinta, precipitando-se muitas vezes devido à evaporação da água.

Portanto, os espeleotemas são sempre formados por meio da precipitação de minerais a partir de soluções aquosas que atingem o ambiente das cavernas. Os diferentes tipos de circulação de água dão origem a formas distintas de espeleotemas. Águas gotejantes podem formar estalactites no teto. As estalactites apresentam muitas vezes formato de um fino tubo apresentando um duto central por onde circula a água. Esse tipo de estalactite recebe o nome popular de “canudo de fresco”. Esse duto central pode vir a ser entupido (às vezes pelo próprio crescimento de cristais). Não podendo circular pelo interior da estalactite, a água passa a escorrer pelas bordas, dando origem a estalactites de formato cônico. Quando a frequência do gotejamento é alta, não há tempo para depositar na estalactite toda a carga mineral contida na gota. A gota atinge o solo e dá origem a estalagmites. A eventual junção de estalagmites e estalactites cria o espeleotema denominado “coluna”. Muitas vezes o teto não é plano e a gota escorre depositando uma delgada camada de calcita, que pode crescer e formar uma lâmina tortuosa conhecida como “cortina”. Outra variedade de espeleotema originada a partir de gotejamentos é o escurrimto de calcita. Conforme o nome indica, consiste em depósitos formados a partir do escurrimto de água em paredes da caverna.

Muitas cavernas apresentam circulação de água no piso, sob a forma de pequenos rios ou lagos. É possível que essa água também esteja carregada em minerais, podendo depositar espeleotemas. Um dos espeleotemas mais típicos gerados por águas circulantes são as represas de travertinos, barragens em geral de calcita que represam água. Formam-se em sequência, podendo atingir vários metros de altura e dezenas de metros de extensão em casos excepcionais. No interior das represas de travertinos, ou mesmo em lagos, podem-se formar espeleotemas relacionados a águas estagnadas. Jangadas constituem finas camadas de calcita que flutuam na superfície da água. São formadas devido à liberação de CO_2 a partir da superfície da água, ficando “suspensas” pela tensão hidrostática, afundando ao menor toque. Outro espeleotema peculiar é a pérola de caverna, semelhante às pérolas tradicionais, porém formada a partir da acumulação de camadas concêntricas de calcita ao redor de um núcleo representado, muitas vezes, por pequenos fragmentos. No interior dos lagos, cristais denominados “dente de cão” podem também ser formados.

Em outra maneira de se formarem espeleotemas, a água pode circular através dos poros da rocha ou através de estreitas fissuras, sem chegar a formar gotas. Esse tipo de dinâmica é conhecido como exsudação. É como se a rocha “suasse”. Os espeleotemas formados por águas de exsudação são em geral mais raros e mais frágeis. As helictites, por exemplo, são formações que desafiam a lei da gravidade, formando feições cristalinas que crescem para frente ou para cima, ou mesmo apresentam aspecto retorcido. É necessário ambiente confinado para sua formação. Os espeleotemas denominados ‘flores’ também são pouco comuns e possuem grande beleza. Algumas flores consistem em emaranhados de helictites, remetendo-nos a um “espaguete” cristalino, outras irradiam finos cristais a partir de um ponto único. As flores formadas pelo mineral gipsita apresentam, em geral, aspecto retorcido.

Espeleotemas podem também ser formados a partir de águas de condensação, ou seja, do vapor contido na atmosfera. O ambiente no interior das cavernas é normalmente saturado, com a atmosfera se aproximando de 100% em relação à umidade relativa do ar. Esse vapor pode aderir às paredes

e formar pequenos espeleotemas, conhecidos pelo nome genérico de “coraloides”. A Figura 24 ilustra, de forma esquemática, o mecanismo de formação de alguns tipos de espeleotemas (FIGURA 25).

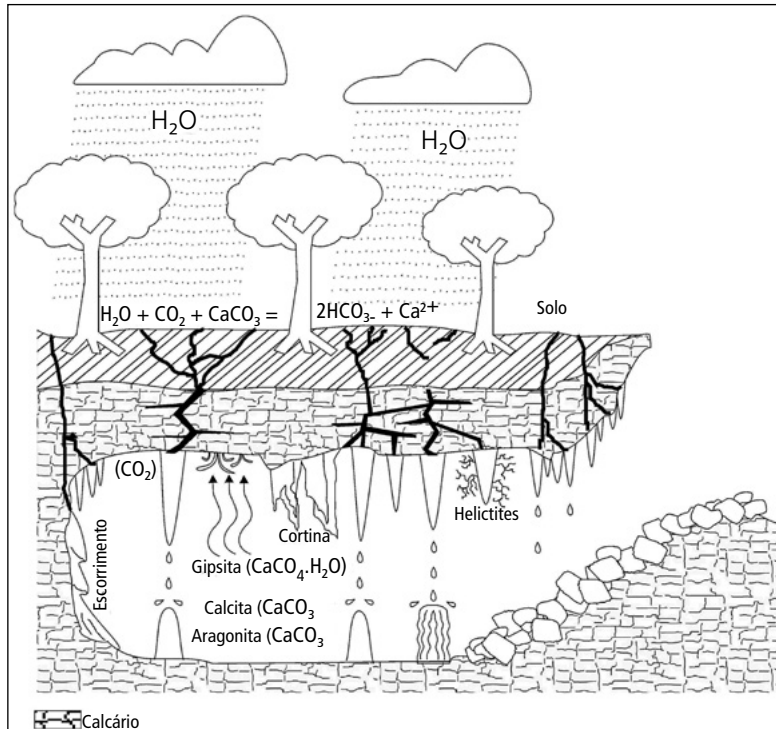


Figura 24 – Ilustração esquemática dos principais tipos de espeleotemas em cavernas carbonáticas

Fonte: Auler; Zogbi (2005)

Figura 25 – Exemplos de espeleotemas

Legenda:

A – Galeria na Gruta do Morro Agudo (MG), Paracatu, apresentando conjunto de espeleotemas, com destaque para estalactites e estalagmites;

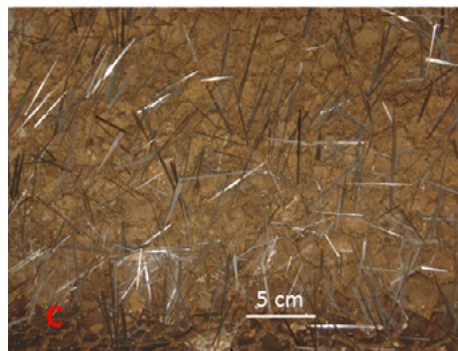
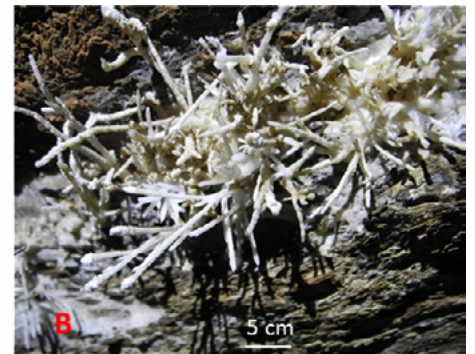
B – Helictites provavelmente de aragonita na Lapa da Delza (MG), Vazante;

C – Agulhas provavelmente de gipsita na Gruta da Torrinha (BA), Iraquara;

D – Coraloides de sílica na gruta quartzítica do Lapão (BA), Lençóis.

As ocorrências B, C e D podem, em geral, ser consideradas como raras

Fotos: Foto A – Marcelo André
Demais fotos – Augusto Auler



Além do valor estético, os espeleotemas registram variações climáticas e ambientais do passado. É possível obter a idade precisa de espeleotemas de calcita e aragonita pelo método que mede o decaimento radioativo do urânio para o tório. Esses estudos fornecem importantes informações sobre a idade das cavernas e da paisagem ao redor. As estalagmites, em particular, além das já mencionadas datações pelo método U/Th, são apropriadas para medir a razão de isótopos de oxigênio e carbono, permitindo inferir as mudanças climáticas que ocorreram no passado na região da caverna (FIGURA 26).

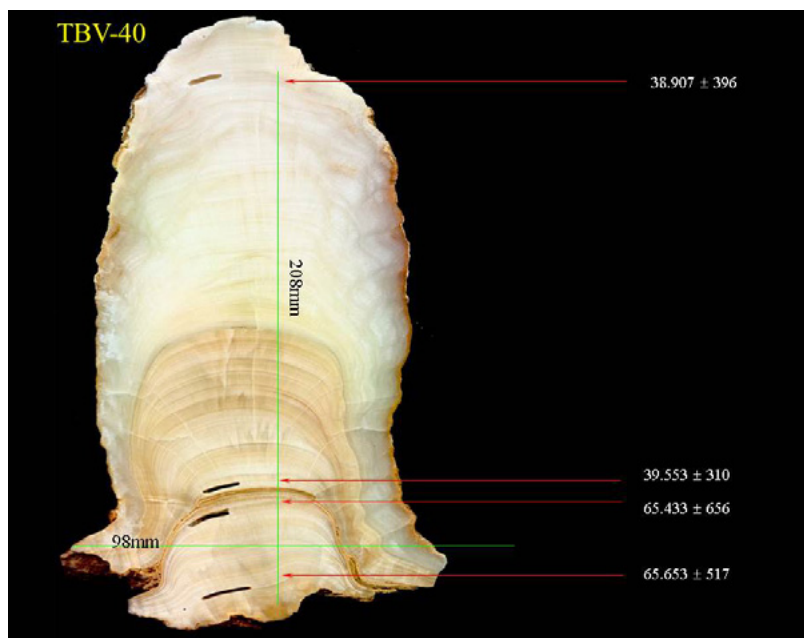


Figura 26 – Estalagmite da Toca da Boa Vista (MG), Campo Formoso, cortada ao meio, mostrando os pontos de amostragem e idades (em anos) obtidas pelo método U/Th

Foto e datação: Xianfeng Wang

Em cavernas em rochas siliciclásticas a variedade de espeleotemas é bem menor, predominando pequenas ocorrências de coraloides, muitas vezes formados por sílica em sua variedade amorfa, a opala (ver FIGURA 24). Cavernas ferríferas também tendem a apresentar espeleotemas esteticamente menos relevantes, muito embora haja importante variedade mineralógica, compreendendo desde óxidos e hidróxidos de ferro, passando por sulfatos e fosfatos.

5.3 Atributos relacionados à sedimentação

Espeleotemas únicos

Diz respeito a espeleotemas pouco comuns ou excepcionais em tamanho, mineralogia, tipologia, beleza ou profusão. Esse atributo, devido à grande variedade de espeleotemas e à dimensão muitas vezes reduzida, prescinde de observação cuidadosa. Ainda que seja inviável medir os espeleotemas e analisar sua mineralogia (seria necessária uma análise destrutiva), e sendo a beleza um atributo muito subjetivo, é necessário utilizar um cuidadoso equilíbrio entre registro em detalhe e um bom conhecimento sobre espeleotemas nas cavernas do entorno. A raridade de espeleotemas – assim como a morfologia e a gênese – é função do grau de conhecimento espeleológico na região e pode variar com o avanço das pesquisas. Recomenda-se adentrar a caverna com uma lista de espeleotemas mais

frequentes, buscando-se estimar sua dimensão e sua profusão, atentando aos espeleotemas que constem na lista. O registro fotográfico (com escala) é essencial.

Sedimentação clástica ou química

Busca avaliar a importância científica e didática dos sedimentos. Sedimentos clásticos e químicos possuem notável potencial para estudos diversos, além de servirem de substrato à fauna e influenciarem a dinâmica e a evolução da caverna. O ambiente da caverna favorece a preservação, devido à menor atuação de fatores destrutivos como intemperismo (vento, calor) e agentes biológicos. Boa parte desses sedimentos pode ser datada por métodos diversos, como radiocarbono (para material orgânico), paleomagnetismo (material clástico de granulometria fina e espeleotemas de calcita), urânio/tório (espeleotemas de calcita e aragonita) e isótopos cosmogênicos de berílio e alumínio (depósitos quartzosos de granulometria seixo a areia). De posse da idade, torna-se possível fazer diversas interpretações paleoambientais.

Depósitos de sedimentos clásticos devem ser íntegros e não terem sido afetados por perturbações diversas, inclusive de origem antrópica. A coerência estratigráfica deve estar preservada. Presença de camadas datáveis, como material orgânico no caso do radiocarbono, e associação com vestígios arqueológicos e paleontológicos devem ser observadas.

Depósitos químicos promissores do ponto de vista científico devem ser preferencialmente puros, com ausência de material terrígeno (argila, silte) e ausência de indicativos de erosão ou alteração pós-deposicional, como recristalização ou corrosão. As estalagmites constituem o depósito mais utilizado para estudos paleoambientais, por meio do uso de isótopos de oxigênio e carbono. Devido ao fato de possuírem valor estético, eventuais coletas devem ser planejadas com cuidado e, no caso de cavernas com poucos espeleotemas, devem ser minimizadas ou mesmo evitadas.

Além do valor paleoambiental, a mineralogia de depósitos químicos pode ser de grande interesse ao fornecer indicativos sobre o tipo de gênese, como no caso de minerais derivados de ácido sulfúrico, ou mesmo revelar minerais desconhecidos para a ciência. Análises de depósitos químicos são normalmente destrutivas, reforçando a necessidade de uma abordagem conservacionista na coleta dos mesmos.

Diversidade de depósitos químicos

Esse atributo lida com tipos de espeleotemas e processos relativos à sua formação. A diversidade de espeleotemas pode ser interpretada sob o ponto de vista mineralógico. Muito embora a maior parte dos espeleotemas seja composta por apenas três minerais - calcita, aragonita e gipsita -, existem centenas de outros que ocorrem de forma menos frequente ou são extremamente raros. Vários minerais foram identificados pela primeira vez em cavernas e possuem ocorrência muito restrita. A identificação de minerais exige técnicas analíticas destrutivas e, portanto, a coleta dos mesmos deve ser efetuada com parcimônia.

A diversidade de espeleotemas deve também ser analisada em relação à sua gênese. Conforme frisado, espeleotemas podem ser gerados por águas de gotejamento, infiltração, circulantes ou de

exsudação. Observar a diversidade em relação a esses processos é importante, já que em algumas cavernas todos estes mecanismos ocorrem simultaneamente, conferindo importância às mesmas. Por fim, a forma e o tipo de espeleotemas devem ser analisados. A classificação de espeleotemas adota critérios genéticos, mas também morfológicos. Registrar a morfologia dos espeleotemas, mesmo que gerados por processos similares, é importante para servir de suporte à descrição dos mesmos em determinada caverna. Por exemplo, uma helictite ou um pingente de grandes dimensões e morfologia atípica tendem a ser considerados mais importantes do que caso os mesmos espeleotemas tenham dimensões restritas ou morfologias triviais.

Configuração dos espeleotemas

Esse atributo diz respeito a aspecto, maturidade e abundância. O aspecto dos espeleotemas guarda relação com sua forma e seu aspecto estético. Formas pouco comuns, que chamem a atenção, inclusive de pessoas leigas no tema, devem ser destacadas, ainda que não sejam resultantes de processos atípicos. Maturidade é um parâmetro de difícil determinação e de conotação dúbia, já que espeleotemas “imaturos”, ou seja, ainda não consolidados, como no caso de espeleotemas coloidais em cavernas ferríferas, não são necessariamente menos importantes do que espeleotemas já consolidados. Abundância é um atributo merecedor de atenção, visto que cavernas com grande quantidade de espeleotemas tendem a ser esteticamente (ou cientificamente) mais importantes. O objetivo não é quantificar de forma exata quantos espeleotemas ocorrem na cavidade, mas apenas inferir se sua abundância é significativa quando comparada com outras cavernas na escala de análise considerada.

6 Paleontologia

As cavernas têm, há muito tempo, se destacado como excelentes locais para a existência e a preservação de material paleontológico. Esse material pode adentrar as cavernas de diversos modos. O naturalista dinamarquês Peter Lund, “pai” da paleontologia brasileira, foi o primeiro a elaborar sobre os processos que podem trazer vestígios fósseis para o interior das cavernas (LUND, 1845): (1) queda de animais em abismos; (2) carreamento por enxurradas; (3) animais que adentram as cavernas em busca de água, sal ou abrigo e não conseguem sair; (4) animais que normalmente habitam as cavernas, como morcegos, e nelas perecem e (5) animais levados às cavernas por predadores. Esses processos ocorrem em diversos graus de frequência e podem mesmo ocorrer ao mesmo tempo em algumas cavernas.

Muito do que se conhece sobre a paleontologia de mamíferos do período Pleistoceno (o período geológico que vai de aproximadamente 1,6 milhão de anos até 10 mil anos atrás) provém de estudos em cavernas. A fauna extinta encontrada em depósitos de cavernas é variada, abrangendo muitas espécies de grande porte, a chamada “megafauna”. O homem conviveu com alguns desses animais durante um período relativamente curto (NEVES; PILÓ, 2003). Por volta de 10 mil anos atrás iniciou-se a extinção dessa fauna tão particular.

Os vestígios fósseis ocorrem sob diversas formas e estados de conservação (FIGURA 27). Podem estar expostos à superfície ou sob o sedimento, sendo necessária a escavação. Alguns sedimentos

antigos aderidos às paredes e ao teto apresentam vestígios fósseis, tendo sido extensivamente escavados por Peter Lund nas cavernas da região cárstica de Lagoa Santa (MG). Os diversos processos de fossilização variam dependendo do ambiente e do local da caverna. Alguns fósseis foram recobertos por calcita, ou mesmo substituídos por minerais carbonáticos, encontrando-se muitas vezes bem preservados. Fósseis expostos podem, no entanto, se encontrar em estado friável, dificultando estudo e coleta. Para melhor compreensão dos processos envolvidos na entrada do vestígio na caverna e sua fossilização é necessário um estudo no local, em que a detalhada descrição da posição do fóssil e seu contexto são essenciais. Essa área de estudo, denominada “tafonomia”, deve preceder uma eventual coleta.

Figura 27 – Ocorrência de ossos em meio a sedimento em caverna verticalizada no Vale do Ribeira (SP)



Foto: Augusto Auler

6.1 Atributos relacionados à paleontologia

Registros paleontológicos

A identificação de fósseis de animais ou vegetais nem sempre é atividade simples. Muitas vezes esses vestígios encontram-se fragmentados ou são de pequena dimensão, escapando à atenção de olhos não treinados. Podem também se encontrar sob a superfície. Como a escavação de qualquer caverna é atividade impactante, sendo necessária licença, não é incluída na rotina de estudos geoespeleológicos.

A própria definição de fóssil pressupõe antiguidade (superior a 10 mil anos), o que prescindiria de coleta e datação, a não ser no caso de vestígios que possam ser reconhecidos como pertencentes a espécies extintas. A aplicação desse atributo diz respeito à presença ou à ausência da ocorrência. Recomenda-se uma abordagem conservadora, na qual, no caso de existência de vestígios animais e vegetais com indícios de fossilização (constituição e textura pétrea, peso acentuado, recobrimento por minerais, etc.), os mesmos sejam considerados como fósseis. Da mesma forma, depósitos sedimentares que apresentem potencial para conter vestígios fósseis devem ser registrados como tal.

7 Outros atributos

Inter-relação da cavidade com alguma cavidade de relevância máxima

Esse atributo possui relação com a área de influência da cavidade de máxima relevância. Caso a determinação dessa área inclua outras cavernas, pode-se supor que haja inter-relação entre ambas. Um exemplo bastante frequente se dá no caso de sistemas hidrológicos, em que diversas cavernas contribuem na drenagem para a mesma rede hidrológica subterrânea.

8 Considerações finais

Estudos de geoespeleologia pressupõem a identificação e a descrição de diversos parâmetros e, portanto, requerem uma abordagem integrada. A qualidade do registro guarda clara relação com a experiência do geoespeleólogo e com o nível de detalhamento do estudo. Cuidado e exatidão no registro são essenciais, pois muitas das análises comparativas com as cavernas que compõem a amostra local e regional serão realizadas em gabinete e a correta interpretação das mesmas em fichas ou equivalentes torna-se indispensável.

Uma sugestão de abordagem de campo envolveria a análise do mapa da caverna antes de adentrar a mesma. Posteriormente, procede-se a detalhada observação de paredes, teto e piso, registrando detalhes sobre tipo de rocha, estruturas presentes, tipos e abundância de depósitos clásticos e químicos, presença ou evidência de elementos hidrológicos e paleontológicos. Sugere-se que o geoespeleólogo utilize uma ficha, em que todos os vários itens a ser analisados estejam presentes, de forma a não haver ausências de registros. Atributos que demandem quantificação, como a diversidade de depósitos químicos, devem ser submetidos à avaliação que habilite a posterior tabulação das ocorrências. A documentação fotográfica é essencial, pois permite um registro pictórico do objeto-alvo, permitindo a melhor caracterização do mesmo.

O estudo deve ser robusto e completo, pois dele dependerá, muitas vezes, o futuro da caverna. Um geoespeleólogo observador (seja ele geólogo ou geógrafo) funcionará como elo entre o estudo de campo e a análise por parte do órgão licenciador, já que muitas vezes é inviável a inspeção presencial de todas as cavernas durante vistorias de campo. Além de conhecimento e experiência, é importante que o geoespeleólogo tenha uma postura conservadora tanto na interpretação dos dados quanto em eventual interferência no ambiente da caverna, pois não se justificam impactos ao ambiente cavernícola em busca de mais detalhamento nas descrições.

Referências

- AULER, A. S. Lakes as a speleogenetic agent in the karst of Lagoa Santa, Brazil. *Cave and Karst Science*, 21: 105-110, 1995.
- AULER, A. S. *et al.* Origin and evolution of Toca da Boa Vista and Toca da Barriguda Cave System in North-eastern Brazil. In: *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. KLIMCHOUK, A. *et al.* (Ed.). Cham (Suíça): Springer, 2017, p. 827-840.
- AULER, A. S. *et al.* Hypogene cave patterns in iron ore caves: convergence of forms or processes. In: KLIMCHOUK, A. *et al.* (Ed.). *Hypogene Cave Morphologies*. Karst Water Institute, 18: 15-19, 2014. (Special Publication)
- AULER, A. S.; SMART, P. L. The influence of bedrock-derived acidity in the development of surface and underground karst: evidence from the Precambrian carbonates of semi-arid northeastern Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28: 157-168, 2003.
- AULER, A. S.; SOUZA, T. A. R. Hypogene speleogenesis in the Vazante Group, Minas Gerais, Brazil. In: *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. KLIMCHOUK, A. *et al.* (Ed.). Cham (Suíça): Springer, 2017, p. 841-852.
- AULER, A. S.; ZOGBI, L. A. *Espeleologia. Noções Básicas*. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005. 104 p.
- FORD, D. C.; EWERS, R. O. The development of cave systems in the dimensions of length and depth. *Canadian Journal of Earth Sciences*, n.15: 1783-1798, 1978.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Hoboken (USA): Wiley, 2007. 576 p.
- KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L. E. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. *EspeleoTema*, n.13: 105-167, 1980.
- KLIMCHOUK, A. *et al.* Hypogenic origin geologic controls and functional organization of a giant cave system. In: Precambrian carbonates Brazil. *Geomorphology* 253: 385-405, 2016.
- KOHLER, H. C. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, J. T.; CUNHA, S. B. (Ed.) *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994, p. 309-334.
- LAUREANO, F. V.; KARMANN, I. Sedimentos clásticos em sistemas de cavernas e suas contribuições em estudos geomorfológicos: uma revisão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, n.14: 23-33, 2013.
- LAUREANO, F. V. *et al.* Two million years of river and cave aggradation. In: NE Brazil: Implications for speleogenesis and landscape evolution. *Geomorphology*, 273: 63-77, 2016.
- LOWE, D. J. *The origin of limestone caverns: An inception horizon hypothesis*. Tese (Ph.D) Manchester Metropolitan University, Manchester, Inglaterra, 1992.
- LUND, P. W. Notice sur des ossements humains fossiles, trouvés dans une caverne du Brésil. *Mémoires de la Société Royale des Antiquaires du Nord*, 49-77, 1845.
- NEVES, W. A.; PILÓ, L. B. Solving Lund's dilemma: New AMS dates confirm that humans and megafauna coexisted at Lagoa Santa. *Current Research in the Pleistocene*, 20: 57-60, 2003.
- PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. *Geological Society of America Bulletin*, 103: 1-21, 1991.

PARKER, C. W. *et al.* Fe(III) reducing microorganisms from iron ore caves demonstrate fermentative Fe(III) reduction and promote cave formation. *Geomicrobiology Journal*, 35: 311-322, 2018.

PARKER, C. W. *et al.* Microbial reducibility of Fe(III) phases associated with the genesis of iron ore caves in the Iron Quadrangle, Minas Gerais, Brazil. *Minerals* 3: 395-411. 2013.

PASINI, G. Nota preliminare sul ruolo speleogenetico dell'erosione "antigravitativa". *Le Grotte d'Italia*, 4 (1): 75-88, 1967.

SIMMONS, G. C. Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *National Speleological Society Bulletin*, 25: 66-72, 1963.

WAICHEL, B. L. *et al.* Lava tubes from the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province: Morphology and importance to emplacement models. *Journal of South American Earth Sciences*, 48: 255-261, 2013.

WORTHINGTON, S. R. H. *Karst hydrogeology of the Canadian Rocky Mountains*. Tese (Ph.D) McMaster University, Ontario, Canadá, 1991.

WORTHINGTON, S. R. H.; FORD, D. C. High sulfate concentration in limestone springs: An important factor in conduit initiation? *Environmental Geology*, 25: 9-15, 1995.



3

Prospecção espeleológica

Vitor Moura





1 Introdução

Partindo de um objetivo inicial simples, que é essencialmente encontrar cavernas, a atividade técnica de prospecção espeleológica ganhou, dentro dos processos de licenciamento ambiental, crescente complexidade e importância. Hoje, o conjunto de atividades da prospecção envolve um rol de tarefas técnicas, desenvolvidas em campo e gabinete, que levam ao reconhecimento e à caracterização básica do conjunto de ocorrências espeleológicas de determinada área. Esse resultado será atingido de acordo com um roteiro metodológico que envolve diferentes etapas preparatórias, executivas e de tratamento de dados. No rigor, na organização e na objetividade metodológica está a base da qualidade da prospecção espeleológica. O sucesso dessa atividade exploratória, que consome muitos recursos financeiros, muito tempo e coloca equipes expostas a riscos inerentes às atividades em contato com ambientes naturais, depende de um planejamento estratégico adequado.

A prospecção espeleológica, no Brasil, tem suas origens nas décadas de atuação dos grupos espeleológicos, em que a atividade sempre foi parte das expedições ou mesmo de saídas de final de semana. Porém a rotina dos licenciamentos ambientais criou uma demanda profissional mais adaptada às exigências da avaliação ambiental. As diferenças básicas entre as atividades de prospecção realizadas por grupos espeleológicos, de caráter informal e voluntário, e as atividades de prospecção profissional, que são parte dos processos de licenciamento ambiental, são inerentes aos objetivos de cada atividade (FIGURA 1). É importante citar que, com a



Figura 1 – Esquema mostrando as diferenças básicas entre a prospecção espeleológica executada pelos grupos espeleológicos e aquela realizada nos processos de licenciamento ambiental **Fonte:** Figura elaborada pelo autor.

profissionalização da espeleologia, ocorrida principalmente após o ano 2000, alguns grupos espeleológicos vêm realizando trabalhos profissionais de prospecção. Também é importante citar que a base técnica adquirida pelos integrantes de grupos espeleológicos tem sido fundamental para o treinamento de equipes profissionais de espeleologia.

Dentro dos processos de licenciamento, a prospecção assume a primeira etapa dos trabalhos espeleológicos, tendo ali um papel decisivo. As ocorrências que **não** forem identificadas durante a prospecção **não** irão fazer parte dos estudos subsequentes, como o mapeamento espeleológico em detalhe, os estudos geoespeleológicos, bioespeleológicos, paleontológicos, dentre outros. Essa falta inicial irá se transformar em sérias lacunas, fatais para uma correta avaliação ambiental de determinada área. Uma prospecção deficiente compromete todas as etapas seguintes do licenciamento, levando a um conhecimento incompleto e impreciso a respeito de um conjunto de cavernas. Erros de planejamento ou de metodologia nessas atividades geram também desperdício de recursos financeiros e necessidade de revisões nos estudos ambientais. Pior ainda, esses erros podem passar despercebidos e levar a danos e perdas irreversíveis no patrimônio espeleológico, arqueológico e paleontológico.

Por outro lado, uma prospecção eficiente possibilita o desenvolvimento adequado de todas as etapas subsequentes envolvidas no licenciamento ambiental de áreas com ocorrência de cavernas. Com uma boa prospecção é possível um bom planejamento dos empreendimentos e uma adequada avaliação de eventuais impactos sobre o patrimônio espeleológico.

Considerando empreendimentos já em operação, a prospecção espeleológica pode ser exigida e constitui um instrumento importante, possibilitando uma análise ambiental específica e direcionada a uma área com maior alteração ambiental. Nesse caso, os dados obtidos na prospecção podem subsidiar decisões sobre uma eventual expansão do empreendimento, ou mesmo resolver conflitos

existentes. Um exemplo hipotético desse tipo de conflito seria um empreendimento minerário, em operação, avançando sobre os perímetros legais de proteção de um conjunto de cavernas não previamente cadastradas e estudadas. Nesse caso, a prospecção daria suporte a uma ação corretiva, buscando minimizar os impactos sobre as cavernas, ou mesmo poderia dar suporte a uma ação de compensação ambiental.

2 Metodologia da prospecção espeleológica

Considerando os recursos tecnológicos de que dispomos atualmente, as atividades de prospecção não podem ser realizadas remotamente, por uma equipe em gabinete operando satélites ou veículos aéreos não tripulados, os populares *drones*, ou outros recursos avançados. Talvez, num futuro distante, sejam desenvolvidos métodos de sensoriamento remoto que permitam esse tipo de análise a distância, mas hoje este modelo de atividade ainda figura no campo da ficção científica. Tampouco uma prospecção espeleológica pode ser feita somente com atividades em campo, sem um planejamento e uma preparação executados em gabinete.

A seguir, serão descritas as linhas gerais das etapas metodológicas da atividade de prospecção. É importante ressaltar que essas diretrizes podem variar em cada trabalho, de acordo com os objetivos específicos, as informações disponíveis, as limitações técnicas e outros fatores.

Etapa pré-campo

Levantamento de informações existentes

Como primeiro passo para o trabalho de prospecção é fundamental saber o que já se conhece sobre o patrimônio espeleológico de uma área de estudo. A preocupação em estabelecer um cadastro de cavernas no Brasil remonta ao início do século XIX e foi, na verdade, iniciado com os trabalhos do naturalista e pioneiro da espeleologia, Peter W. Lund, em Lagoa Santa e outras regiões do centro de Minas Gerais. Posteriormente, já na virada para o século XX, outro pioneiro, E. Richard Krone, realizou também o cadastramento de diversas cavidades na área do Vale do Ribeira, em São Paulo. Já no final do século XX iniciou-se uma nova fase na qual o processamento e a disponibilização de dados estão sendo constantemente revisados (MARTINELLI; GERIBELLO, 2015).

Atualmente, a fonte cadastral referencial a ser consultada é o repositório oficial, o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, instituído pela Resolução CONAMA nº347/2000 e elaborado e mantido pelo CECav-ICMBio desde 2007. A Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE mantém outro cadastro ativo, porém seu acesso é restrito a sócios e seu conteúdo é menor do que o cadastro oficial. Porém esse cadastro oficial ainda se encontra em construção e será obviamente uma base de dados dinâmica:

Esses arquivos não representam todo o universo de cavernas existentes no território brasileiro. Eles reúnem unicamente a pequena porção de cavidades que já foram prospectadas, por pessoas físicas, grupos ou instituições, cujos dados foram publicados, em diversos meios de divulgação, e que foram cadastradas no CANIE.¹

¹ Disponível em: www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html. Acesso em: dez. 2016

A base de dados tem sido constantemente validada e disponibilizada pelo CECAV, na forma de arquivos *shape* (.shp), para uso em *softwares* de geoprocessamento, e em formato .kmz, para uso no popular *software* livre Google Earth®. Essa disponibilização tem facilitado sobremaneira o início dos trabalhos de levantamento espeleológico em uma área de estudo. No entanto, o potencial espeleológico brasileiro, estimado em mais de 100.000 ocorrências (AULER; RUBBIOLI; BRANDI, 2001), é muito mais extenso do que o representado na base cadastral, que atualmente conta com mais de 18.000 cavernas (de acordo com consulta feita em julho de 2018). Como o aporte de dados do CANIE vem de fontes diversas, o trabalho de validação é intenso e difícil, pois exige validação em campo e um contingente maior de técnicos. Uma importante fonte de aporte de informações para o CANIE tem sido as próprias atividades de prospecção nos licenciamentos ambientais, mas nem todos os trabalhos têm sua base de dados alimentando o sistema cadastral oficial, ainda que a legislação demande esta ação. É de suma importância o entendimento de que essa base de dados é um esforço conjunto e um patrimônio da nação. Sua eficiência depende do aporte de dados precisos e objetivos, advindos tanto de grupos de espeleologia quanto de órgãos ambientais diversos, de pessoas físicas ou de empreendedores. O cadastramento de cavernas é decisivo para sua proteção, dado que a simples inclusão no cadastro oficial já incorpora a ocorrência espeleológica ao conjunto conhecido, garantido pela proteção legal.

O levantamento de uma boa base cartográfica é fundamental para o desenvolvimento do trabalho de prospecção. Até a década de 1990, a base de dados cartográfica referencial, utilizada nas prospecções dos grupos espeleológicos, eram as cartas topográficas do IBGE e os produtos de aerofotogrametria, como as ortofotos. Atualmente, a cartografia utilizada em processos de licenciamento ambiental tem sido elaborada a partir de imagens de satélite, sendo que esta mudança traz vantagens e desvantagens. As principais vantagens das imagens de satélite são a sua capacidade de atualização constante, sua alta resolução, a representação fidedigna das feições superficiais e a possibilidade de gerar diferentes produtos temáticos como mapas de uso do solo, hipsométricos, geomorfológicos, dentre outros. Já as cartas do IBGE encontram-se desatualizadas e, em muitas áreas do Brasil, foram elaboradas em escalas reduzidas, que não permitem a visualização de feições geomorfológicas em detalhe, geralmente na ordem de 1:25.000, 1:50.000 ou até 1:100.000. As imagens de alta resolução, chegando a dezenas de centímetros por *pixel*, permitem identificar feições cársticas, vegetação e redes de drenagem em detalhes, facilitando o planejamento e a estratégia das atividades de prospecção. A utilização dessas imagens causou uma revolução na preparação e no desenvolvimento das atividades em campo.

Mas antigos recursos, como mapas topográficos sombreados, também podem representar de forma eficiente as feições cársticas, como mostrado no exemplo da Figura 2. No mapa topográfico, as dolinas e os vales, feições essenciais para as atividades de prospecção, são mais visíveis do que na imagem de satélite. Já na imagem, são mais visíveis as diferenças de vegetação, as áreas de solo exposto e os aspectos de detalhe como áreas urbanizadas, estradas e áreas de cultivo. Torna-se importante, portanto, que a base cartográfica inclua mapas que permitam visualizar a topografia do terreno, como mapas hipsométricos, mapas com representação de curvas de nível e mesmo recursos

mais avançados como modelos digitais de elevação (MDE). Esses produtos podem ser produzidos a partir de imagens de satélite específicas, por exemplo, com a utilização de imagens *SRTM* (*Shuttle Radar Topographic Mission*) e *Aster* (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) (PARMA, 2007; BARROS et al., 2005). É importante que todo o conjunto de bases cartográficas tenha escala compatível com o empreendimento em questão e seu plano diretor, permitindo a visualização adequada das estruturas previstas e de suas áreas de influência.

Além dessa base cartográfica, é de suma importância o levantamento de mapas temáticos existentes na área em questão, como: mapas geológicos, geomorfológicos, de vegetação, arqueológicos, de ocorrência de fauna, de áreas prioritárias para conservação, de uso do solo, dentre outros. Em geral, essas informações temáticas estão associadas a processos de licenciamento existentes e a trabalhos científicos contidos em diversos meios de publicação. As análises ambientais contidas nesses trabalhos, trazendo informações textuais, gráficos e documentação fotográfica, são de suma importância como base para as atividades de prospecção.

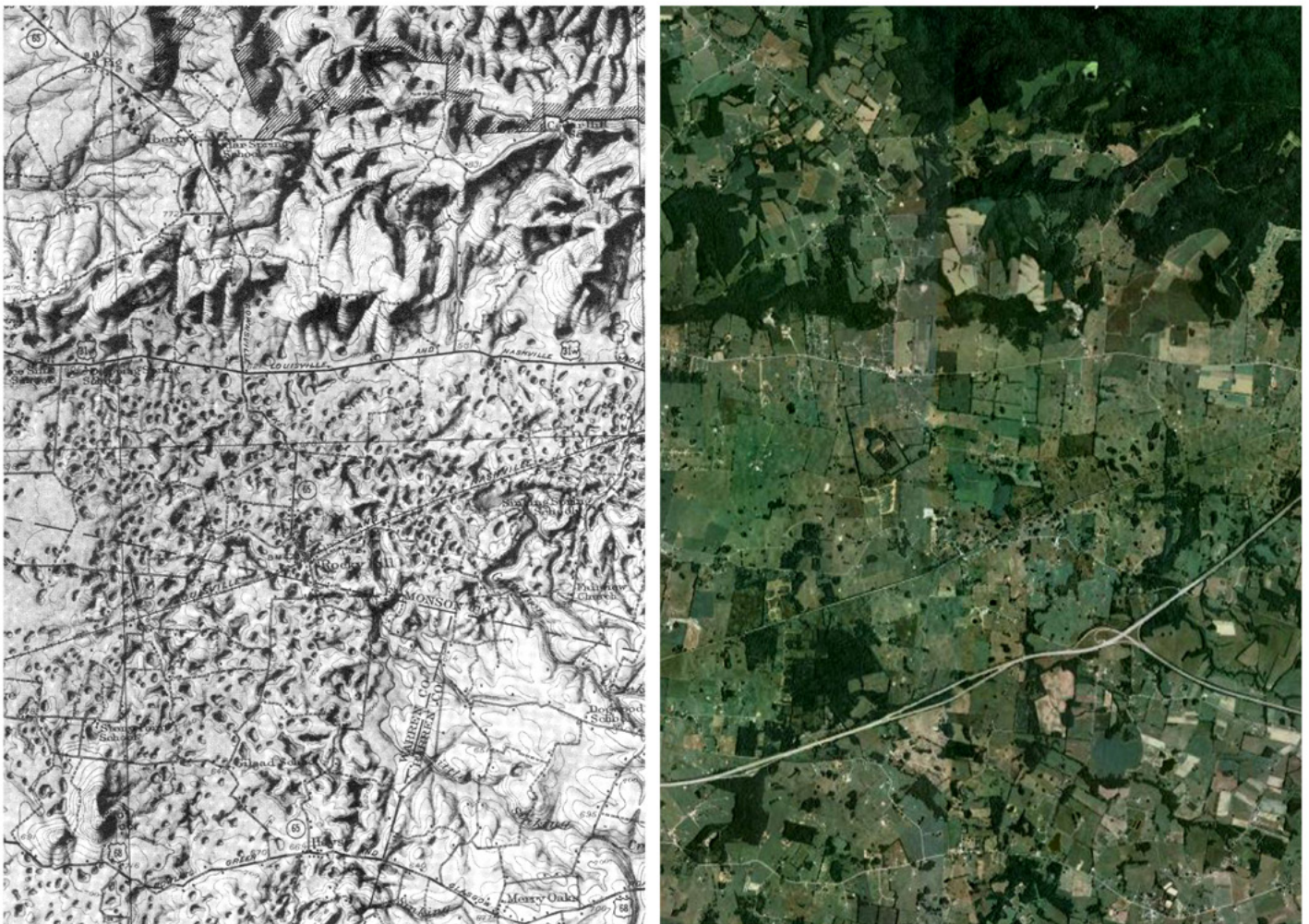
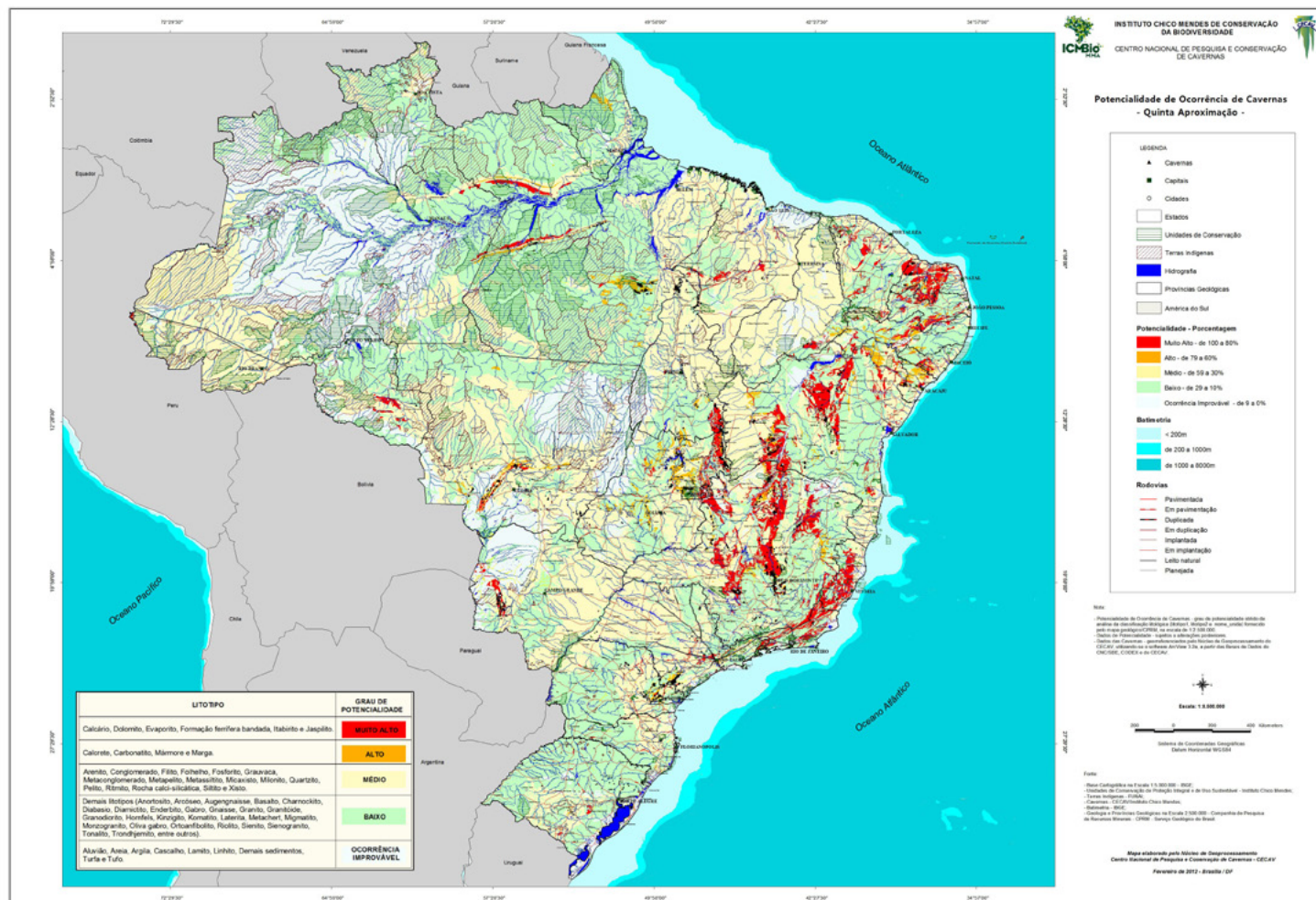


Figura 2 – Comparação entre mapa topográfico sombreado, à esquerda, e imagem de satélite, à direita. As imagens abrangem a mesma área ao sul do Mammoth Cave National Park, Kentucky (USA) **Fonte:** Mapa topográfico (CVANCARA, 1995) e imagem de satélite (Google Earth®, 2010)

Avaliação do potencial espeleológico

Dentro do planejamento das atividades de prospecção, uma das primeiras perguntas que surgem é: qual é o potencial espeleológico de determinada área? Uma das iniciativas recentes em responder a essa demanda foi a elaboração, em 2011, da versão atualizada do Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas no Brasil – Quarta aproximação, abrangendo escala nacional, na proporção de 1:2.500.000 (CECAV, 2016). Esse mapa temático foi produzido com ênfase no parâmetro Litologia como fator indicativo de potencial espeleológico, sendo produzido com base no mapa geológico nacional da CPRM de mesma escala. Esse produto serve como referência preliminar para os órgãos licenciadores e mesmo estimula o aprofundamento desse tipo de mapeamento temático.

Figura 3 – Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas no Brasil – Quinta aproximação, elaborado em fevereiro de 2012
Fonte: CECav, 2016



Mas as atividades de prospecção espeleológica dentro do rito do licenciamento ambiental demandam a determinação de potencial espeleológico em detalhe e considerando uma gama multidisciplinar de análises ambientais. Tendo como referência a base cartográfica, o conjunto de informações temáticas e as análises ambientais anteriores de determinada área, o passo seguinte para a preparação da prospecção será a elaboração de uma avaliação do potencial espeleológico local. Para tal determinação, um escopo ideal de informações deve conter os seguintes temas:

- **Litologia** – talvez seja o mais óbvio e clássico entre os temas a serem abordados na base da análise de potencial espeleológico. É fundamental a classificação dos litotipos encontrados na área de estudo, e da sua propensão ao desenvolvimento de cavidades naturais e outras feições de interesse espeleológico. Um ponto importante a ser considerado é o potencial de ocorrência de cavernas fora das rochas carbonáticas e rochas ferríferas, considerando também litotipos como quartzitos e arenitos, ainda que em graus variáveis de potencial de ocorrência de cavernas.
- **Ocorrências espeleológicas já registradas** – como já citado, é importante o levantamento de cavernas já cadastradas na área. Utilizando a base cartográfica em escala compatível, deve ser realizada uma representação cartográfica dessas ocorrências validadas, indicando sua distribuição na área de estudo. Esse “retrato” pode indicar, por correlação geológica e geomorfológica, o potencial de outras áreas não exploradas.
- **Geomorfologia** – dentro da análise de potencial espeleológico é fundamental o mapeamento de feições geomorfológicas superficiais relacionadas à ocorrência de cavernas, como maciços e paredões rochosos, escarpas, bordas de crostas lateríticas, dolinas, vales cegos, dentre outros. Um mapa geomorfológico possui uma linguagem de símbolos específica que permite reconhecer essas feições, o que não seria possível analisando uma imagem de satélite ou mesmo um mapa topográfico comum.
- **Hipsometria** – sendo mais facilmente gerado do que um mapa geomorfológico, uma classificação e um mapeamento hipsométrico são importantes como indicativos de áreas com maior propensão à ocorrência de cavernas, como morros residuais em meio a planícies uniformes. Esse tipo de mapeamento temático também é de grande valia na etapa posterior de planejamento das atividades de campo, pois permite uma visualização em relevo da área de estudo.
- **Hidrologia** – em diferentes litologias a ocorrência de cavernas comumente está relacionada à rede de drenagem superficial. Além dos clássicos sumidouros e ressurgências, o mapeamento amplo da rede de drenagem de uma área certamente deve ser uma das bases a serem consideradas na avaliação de potencial espeleológico. Em muitos casos essa rede de drenagem está relacionada com cavernas hidrologicamente ativas ou com a exposição de cavernas desconectadas do sistema hídrico atual. De qualquer forma, a drenagem superficial é um fator referencial para indicar áreas de alto potencial espeleológico.
- **Cobertura vegetal** – em muitos casos, as características da vegetação de uma área indicam a ocorrência de cavernas. Geralmente as entradas de cavernas estão associadas a áreas relativamente

mais úmidas e de maior acúmulo de solo, como dolinas, bordas de vales, de maciços ou rupturas em crostas rochosas lateríticas. Essa característica morfológica dá origem a densidades diferenciadas de vegetação, que se tornam, assim, um fator indicativo de potencial espeleológico.

Esses temas descritos devem ser sobrepostos e inter-relacionados com o objetivo de determinação de classes de potencial espeleológico de determinada área. Uma área que tenha, por exemplo, uma litologia altamente propensa ao desenvolvimento de cavernas, como calcários, associada à ocorrência de feições geomorfológicas como dolinas, vales cegos e vegetação florestal densa constitui alto potencial espeleológico. Os temas citados, e outros que porventura sejam analisados, devem ser sobrepostos e analisados em conjunto, visando à determinação dos graus de potencial espeleológico e à representação cartográfica desta classificação (FIGURA 4). A área de estudo em questão pode ser dividida em setores, seguindo diferentes figuras geométricas como quadrados, retângulos, hexágonos ou mesmo polígonos regulares, que são classificados de acordo com o potencial espeleológico.

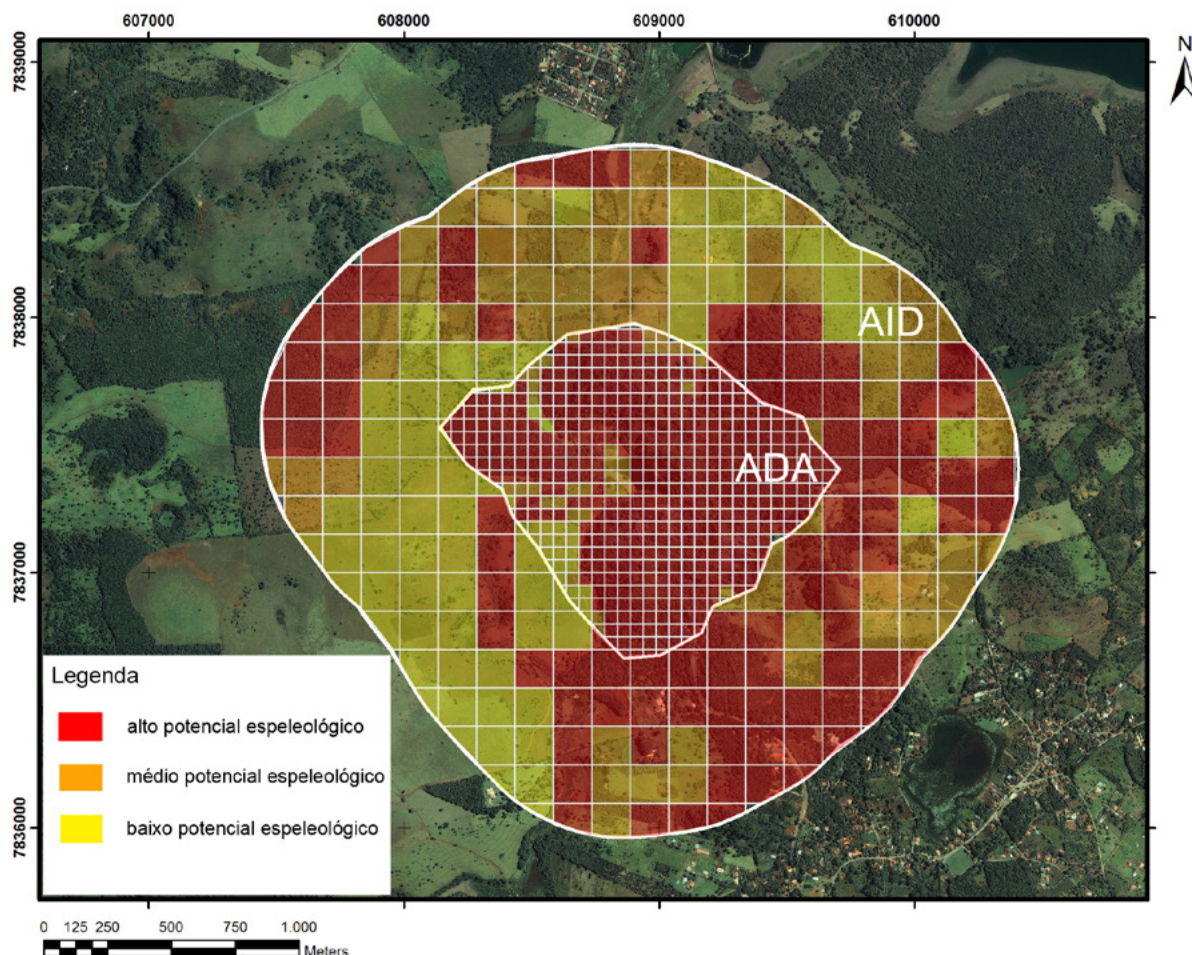


Figura 4 – Exemplo fictício de mapa de potencial espeleológico, tendo como base a imagem de uma área no Carste de Lagoa Santa (MG). A ADA e AID são também uma delimitação meramente ilustrativa, observa-se que na ADA os quadrantes são menores do que na AID, dando maior resolução ao mapa de potencial espeleológico **Fonte:** Figura elaborada por Luciana Alt

Etapa em campo

Estratégia de prospecção

Uma vez definido o arcabouço de bases cartográficas referenciais, pesquisados os trabalhos antecedentes e realizada a avaliação do potencial espeleológico de uma área, a próxima etapa a ser realizada é o trabalho em campo. Para a definição da estratégia de prospecção, no contexto de um licenciamento ambiental, o primeiro aspecto a ser levado em conta é que, considerando as áreas de influência de um empreendimento, a malha de prospecção tende a ser mais densa na área mais crítica, ou seja, na Área Diretamente Afetada - ADA. A lógica é, portanto, concentrar maior densidade dos esforços de prospecção nessa área, buscando identificar o maior número possível de ocorrências, em caráter de levantamento exaustivo. Portanto, o objetivo de suficiência amostral, considerando-se a ADA, é identificar 100% das ocorrências espeleológicas, ainda que, lidando com um ambiente natural, seja impossível garantir esta meta amostral. Idealmente, uma faixa de 250m, além da ADA delimitada de um empreendimento, deve ser incluída nesse esforço mais intenso de prospecção. Essa inclusão corresponde a um princípio da prevenção, considerando que as áreas legais preliminares de proteção de cavidades, situadas, por exemplo, no limite da ADA, devem ser incluídas no processo de prospecção com o mesmo esforço amostral aplicado na ADA. Alguns órgãos licenciadores já têm adotado esse procedimento preventivo.

Nas outras áreas de influência de um empreendimento seria excessivamente dispendioso manter essa densidade de caminhamento, então pode ser viável a diminuição do adensamento da malha de caminhamento e do percentual amostral.



Figura 5 – Esquema relacionando as áreas de influência de um empreendimento em licenciamento com a densidade pretendida da malha de prospecção e o percentual amostral da prospecção **Fonte:** Figura elaborada pelo autor

Métodos de caminhamento

Existem dois métodos básicos de caminhamento utilizados na prospecção espeleológica: o primeiro é percorrer **setores preestabelecidos**, e o segundo, mais utilizado no licenciamento, seguir **linhas preestabelecidas**.

No método de setores, exemplificado nas Figuras 6 e 7, o objetivo é percorrer cada um dos espaços previamente delimitados em gabinete, tendo como base o mapa de potencial espeleológico, seguindo um caminhamento mais denso na ADA, e uma faixa de 250m além desta, e menos denso da Área de Influência Indireta - AID, como já foi citado. Nesse método, a adoção de polígonos irregulares é uma solução mais adaptável às formas heterogêneas do relevo e também a estruturas de formas complexas, presentes nas atividades de mineração, por exemplo. Uma das vantagens desse método é que a área em questão é definida em setores com áreas conhecidas. Dessa forma, pode ser estabelecida uma relação estatística, por exemplo, entre a distância percorrida no caminhamento diário de uma equipe de prospecção e a área de um ou mais setores.

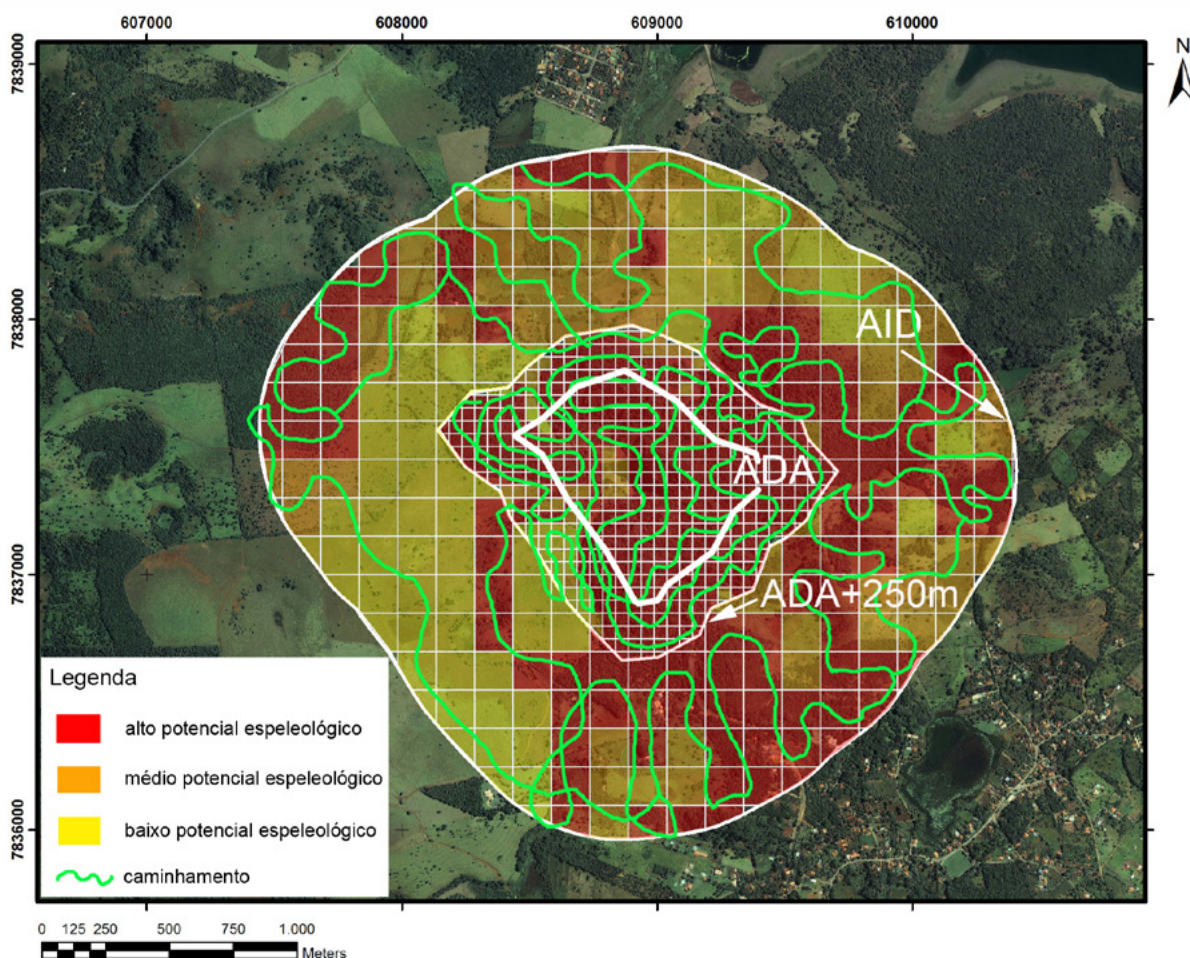


Figura 6 – Exemplo de malhas de prospecção percorrendo uma ADA e uma AID fictícias. Nota-se que na ADA o caminhamento passou pela quase totalidade dos quadrantes. No exemplo, deve-se considerar que seria necessária uma malha de prospecção mais densa no entorno de 250m além da ADA **Fonte:** Figura elaborada por Luciana Alt

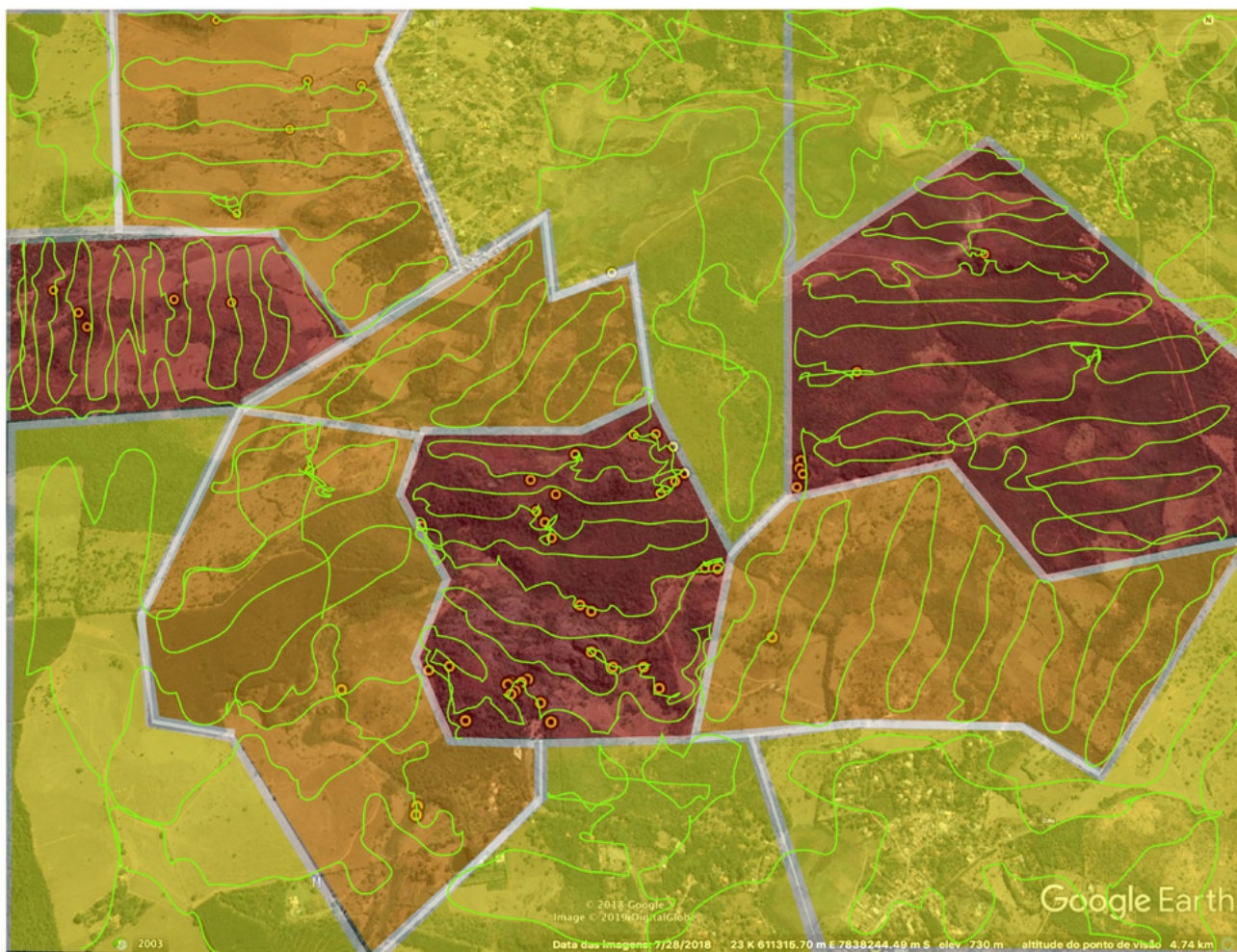


Figura 7 – Exemplo de um mapa caminhada fictício, em verde, seguindo polígonos com diferentes graus de potencial espeleológico (vermelho - alto, laranja - médio, amarelo - baixo). Nessa opção é mais fácil adaptar o desenho dos setores a elementos do empreendimento e do ambiente natural **Fonte:** Figura elaborada pelo autor

Já no método de linhas preestabelecidas, o caminhamento é planejado unicamente de acordo com trajetos ou linhas previamente carregadas em um receptor GPS, por exemplo (FIGURA 8). Nesse tipo de caminhamento é fundamental estabelecer adequadamente a distância entre as linhas, que depende de aspectos principalmente ligados à geomorfologia e à vegetação da área de estudo. Em áreas mais regulares e associadas, por exemplo, à vegetação rasteira, a distância entre as linhas tende a ser maior, da ordem de 50m ou mais, pois o alcance visual é maior. Já em áreas irregulares, e associadas, por exemplo, a vegetação densa, a distância entre linhas tende a ser menor, da ordem de 15m ou menos, pois o alcance visual é menor (FIGURA 9).

Os dois métodos de caminhamento descritos, na verdade, podem ser combinados, principalmente levando-se em conta a utilização de polígonos de maior área, como mostrado no exemplo da Figura 8. Nesse exemplo, a área do polígono (linha vermelha) é de aproximadamente 125ha e a distância entre linhas nunca menor do que 50m, indicando um caminhamento por área descampada.

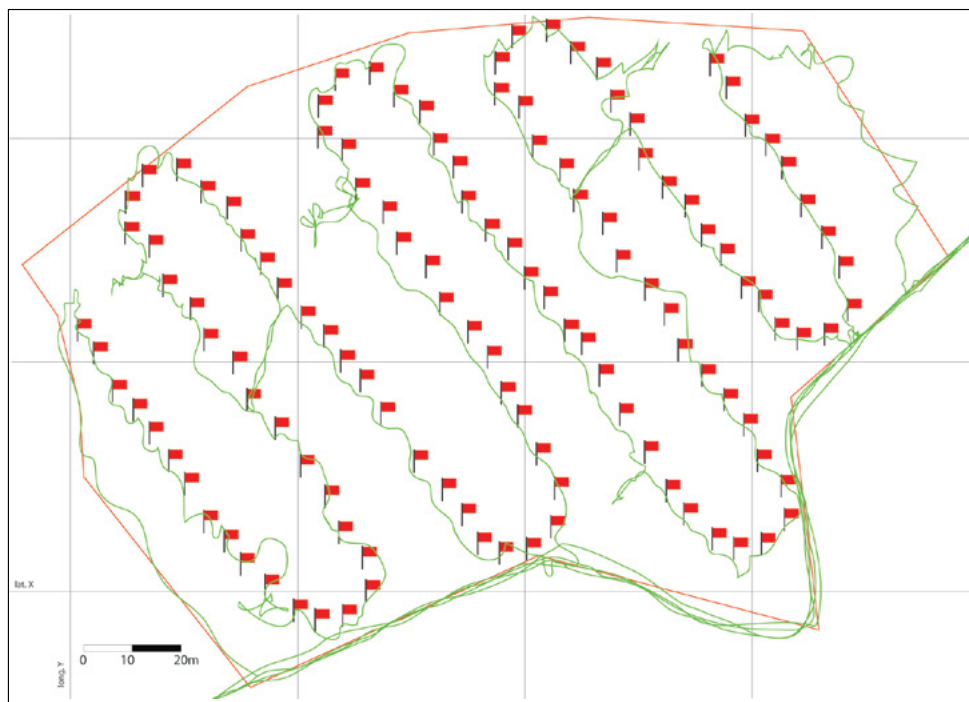


Figura 8 – Exemplo de caminhamento fictício, seguindo linhas preestabelecidas representadas pelas bandeiras vermelhas. Nota-se que o caminhamento em verde seguiu aproximadamente esse objetivo **Fonte:** Figura elaborada pelo autor

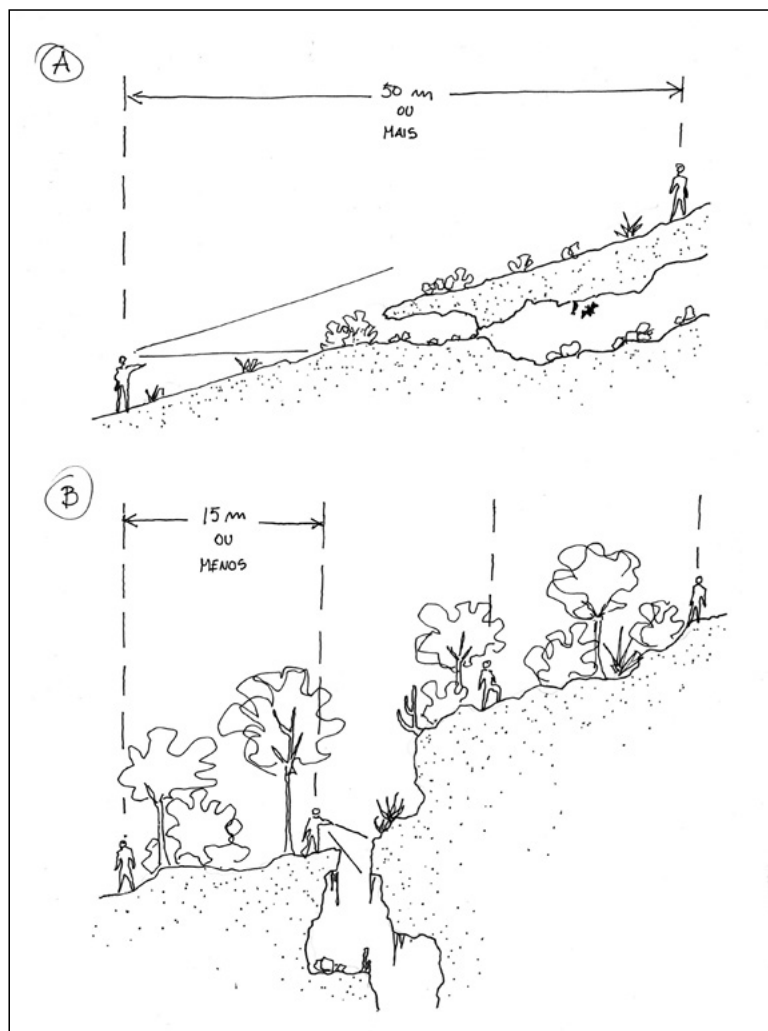


Figura 9 – (A) Exemplo de caminhamento em áreas regulares e com vegetação rasteira, onde a distância entre linhas é maior. (B) Exemplo de caminhamento em áreas irregulares e com vegetação densa, onde a distância entre linhas é menor **Fonte:** Figura elaborada pelo autor.

Ficha cadastral e trabalho da equipe de prospecção

Segundo orientação do CECrav (2016), a ficha cadastral utilizada na prospecção espeleológica deve conter as seguintes informações básicas:

- Coordenadas geográficas das cavidades existentes, obtidas com equipamento de GPS, em graus decimais, *datum* WGS 84 e a partir da captura de sinais advindos de um mínimo de quatro unidades bem distribuídas na constelação dos satélites, no ponto onde localizam-se as bases topográficas “zero” das entradas da cavidade;
- Denominação local;
- Município, nome da fazenda ou da região em que se insere;
- Dados de identificação do proprietário da área onde a caverna está inserida;
- Altitude;
- Projeção horizontal da área de influência (mínimo de 250m);
- Descrição das entradas e formas de acesso;
- Classificação da caverna quanto aos aspectos hidrológicos e morfológicos;
- Registro fotográfico.

A partir desse escopo mínimo, deve ser elaborada uma ficha padronizada, a ser utilizada em campo pelas equipes de prospecção. Especificamente, em trabalhos de prospecção em áreas remotas, algumas equipes têm optado por realizar, já na etapa de prospecção, o mapa da cavidade com maior precisão, seguindo, no mínimo, o grau 4C (BCRA), ou mesmo o grau 5D. Em outros trabalhos, as fichas de prospecção podem conter mapas simplificados, em grau 2 (BCRA), por exemplo, que auxiliam na caracterização preliminar das cavidades cadastradas, e mesmo no planejamento das etapas posteriores. Contudo, é nessas etapas subsequentes do estudo espeleológico que será realizado o mapeamento em detalhe da cavidade. Já que o investimento de recursos humanos e financeiros para a realização de mapas detalhados é alto, a demanda por mapas neste nível é mais condizente com a etapa de diagnóstico ambiental aprofundado das cavernas.

Alguns grupos de espeleologia, e principalmente empresas de consultoria, têm desenvolvido fichas próprias de prospecção, de acordo com o planejamento do trabalho, a capacitação técnica das equipes de prospecção e os objetivos específicos. Idealmente a ficha cadastral deve conter o máximo de informações que irão subsidiar os estudos posteriores. Portanto, é interessante que as fichas contenham informações sobre uso público, impactos observados, arqueologia, bioespeleologia, paleontologia, dentre outros aspectos.

Um fato paradoxal é que o trabalho de prospecção espeleológica, decisivo e estratégico para as etapas seguintes de estudo, é que utiliza, geralmente, uma equipe com menor qualificação técnica especializada. Em geral, uma equipe de prospecção possui indivíduos jovens, com alta resistência física, experientes em realizar os caminhamentos, identificar e caracterizar preliminarmente as cavernas.

Mas essa equipe, geralmente, é limitada ao analisar mais profundamente aspectos específicos dos campos científicos ligados à espeleologia. Seria inviável enviar a campo para a prospecção, por exemplo, um bioespeleólogo, um geoespeleólogo, um arqueólogo e um paleontólogo experiente. Esse paradoxo demanda um treinamento específico para a equipe de prospecção, permitindo que os técnicos sejam capacitados a identificar e caracterizar previamente aspectos inerentes às especialidades científicas citadas. Esse é um desafio estimulante, pois demanda atividades de treinamento técnico direcionadas à prospecção, e um aperfeiçoamento profissional constante para os agentes da prospecção espeleológica.

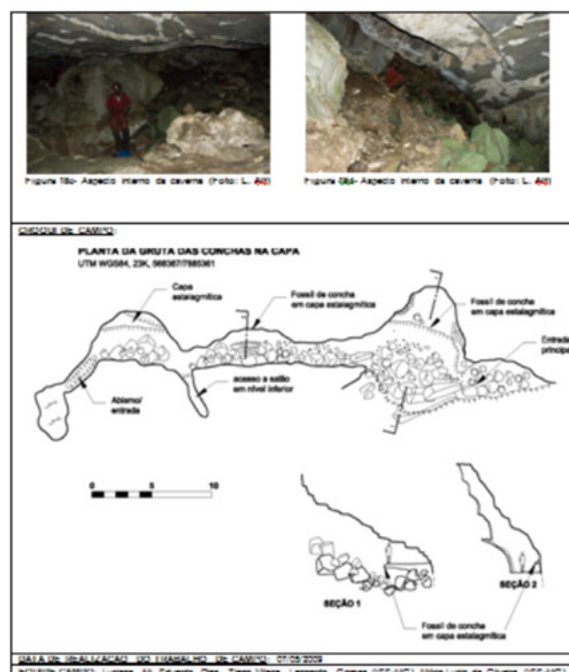
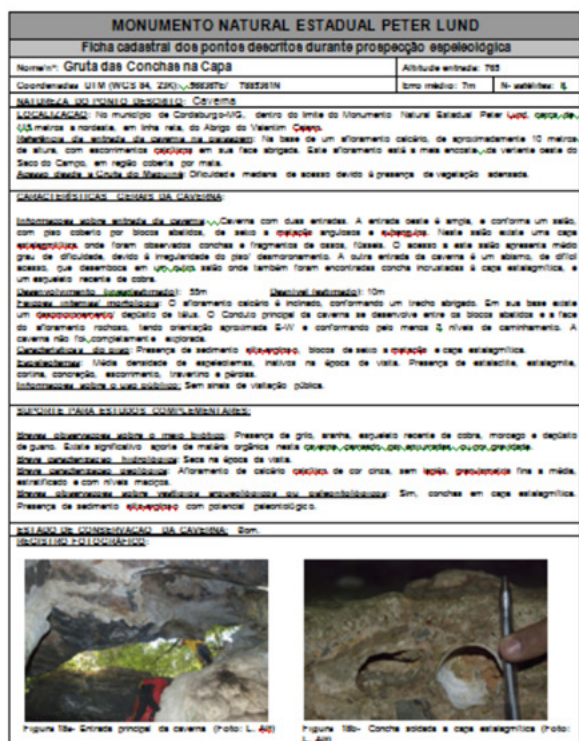


Figura 10 – Exemplo de ficha cadastral utilizada em atividade de prospecção espeleológica, contendo informações textuais, fotográficas e cartográficas acerca da caverna identificada, cadastrada e caracterizada de forma preliminar **Fonte:** Plano de Manejo do MNE Peter Lund, IEF/ Ambiente Brasil, 2009

Limite de corte dimensional das cavidades identificadas

Um ponto importante, a ser definido na etapa de preparação e realização das atividades em campo é o limite dimensional das cavernas a serem identificadas e analisadas. Seguindo o Art. 1º do Decreto nº 6.640/2008, que corresponde ao consenso internacional, uma cavidade natural é um espaço subterrâneo com dimensão mínima para permitir a entrada de um ser humano. A partir desse conceito,

um espaço subterrâneo com desenvolvimento linear de 2m, por exemplo, seria suficiente para ser classificado como caverna. É importante citar que, em campo, durante os trabalhos de prospecção, é mais utilizada a medida do desenvolvimento linear do que a projeção horizontal, que é obtida depois da elaboração do mapa da cavidade, em gabinete.

O problema prático em adotar um limite de corte dimensional de 2m, na prospecção espeleológica, é que o universo de cavernas destas dimensões em áreas de carbonato, por exemplo, seria extenso, e seu levantamento, um trabalho exaustivo. Convencionalmente, levando-se em conta a prática atual de prospecção profissional, o limite de 5m tem se mostrado mais viável, e vem sendo adotado em processos de licenciamento. Da mesma forma que é inviável garantir a identificação de 100% das ocorrências espeleológicas em determinada área, é inviável estudar a totalidade dos espaços subterrâneos de dimensões reduzidas, menores do que 5m, e a infinidade de poros centimétricos das massas rochosas. Assim, a Instrução Normativa nº 2/2017/MMA define que todas as cavidades naturais subterrâneas com menos de 5m de desenvolvimento linear serão classificadas com baixo grau de relevância, desde que demonstrada a inexistência de zona afótica, destacada relevância histórico-cultural ou religiosa, presença significativa de depósitos químicos, clásticos ou biogênicos de possível valor científico, cênico ou ecológico, ou função hidrológica expressiva para o sistema cárstico e que as mesmas não serão consideradas nos cálculos espeleométricos. Ou seja, as cavernas abaixo desse limite devem ser também identificadas e cadastradas, mas sem a necessidade de serem realizados os estudos de classificação do grau de relevância.

Pós-campo

Conteúdo do relatório de prospecção

O relatório de prospecção deve, primeiramente, deixar clara a metodologia utilizada. Somente analisando-se os critérios metodológicos é possível avaliar adequadamente a qualidade de uma prospecção espeleológica.

Os resultados devem ser apresentados de forma clara e objetiva, a cartografia deve vir em escala compatível, que permita a visualização do empreendimento, suas áreas de influência, e sua relação espacial com as cavernas. O mapa deve, por exemplo, deixar claro quais cavernas já estavam cadastradas na área e quais foram identificadas na prospecção em questão (FIGURA 11). Para a interpretação dos resultados é recomendável que todas as cavernas estejam individualmente identificadas e devem constar no mapa de resultados as áreas legais preliminares de proteção, com raio de 250m. Deve ser apresentado, separadamente, um mapa de caminhamento da prospecção. Os dados devem ser entregues também em formato digital, em arquivos geoespacializados comuns a *softwares* de geoprocessamento. Isso facilita a integração dos dados de um licenciamento com o cadastro oficial CANIE, por exemplo. O uso de recursos estatísticos simples, gráficos e esquemas contribui para a visualização apropriada dos resultados e análises do relatório de prospecção (FIGURA 12).

O conceito geral do relatório de prospecção deve ser mostrar os resultados e análises da forma mais clara e objetiva, permitindo o desenvolvimento das etapas subsequentes de licenciamento. Os resultados da prospecção devem abordar, por exemplo, uma análise estatística comparativa do universo de ocorrências cadastradas em relação ao enfoque local e regional. Isso é de extrema utilidade para o processo de análise de relevância das cavidades em questão.

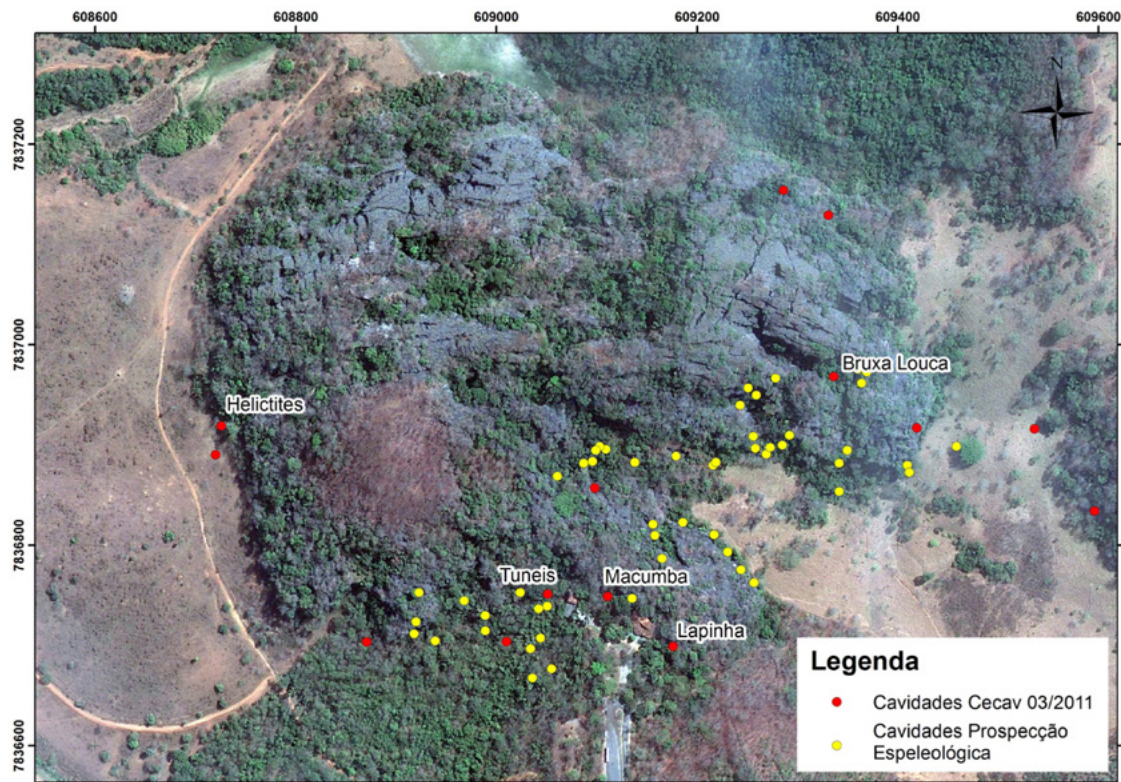


Figura 11 – Exemplo de mapa mostrando o resultado de atividade de prospecção espeleológica, realizada em 2011 na área do Parque Estadual do Sumidouro (MG) **Fonte:** Relatório de prospecção espeleológica no Parque Estadual do Sumidouro, GBPE, 2011

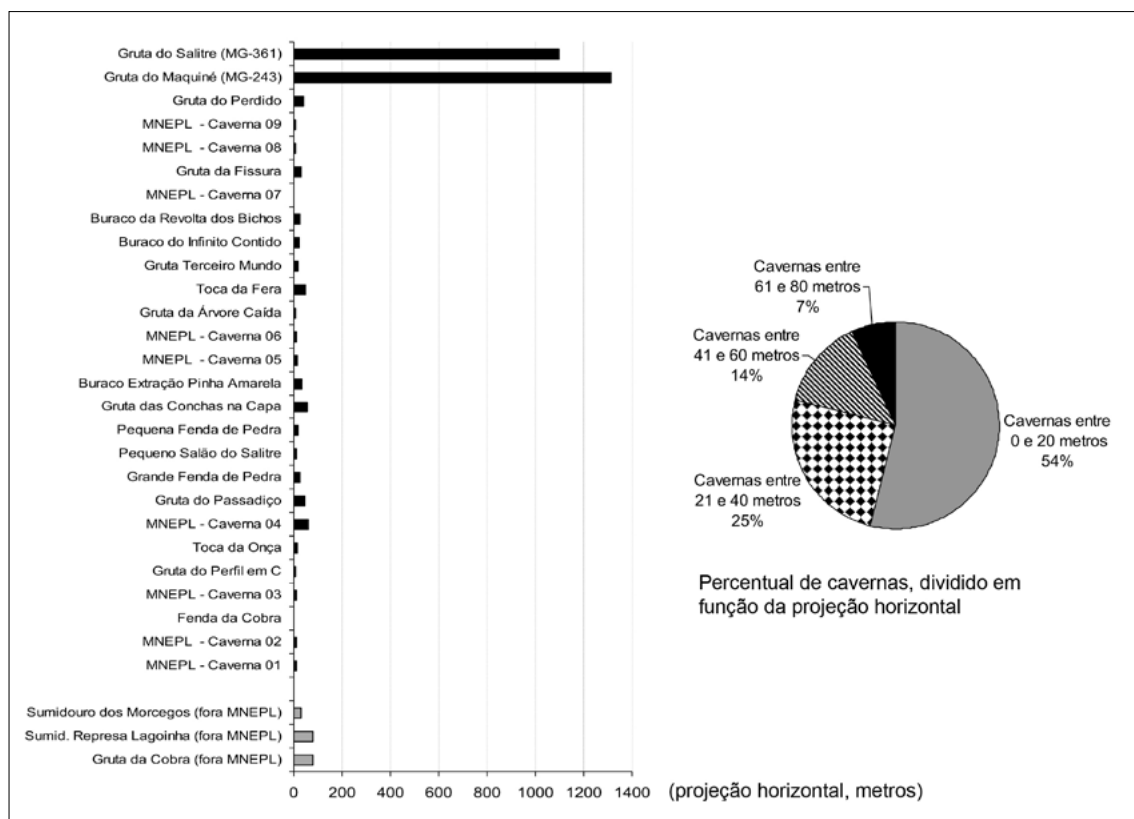


Figura 12 – Gráficos mostrando o resultado de prospecção realizada dentro dos trabalhos do Plano de Manejo do MNE Peter Lund – Cordisburgo (MG) **Fonte:** Plano de Manejo do MNE Peter Lund, IEF/ Ambiente Brasil, 2009

Como medir a suficiência amostral?

Um ponto importante a ser abordado no resultado de uma prospecção espeleológica é a medição de sua suficiência amostral, ou seja, se o trabalho realizado atingiu os objetivos mínimos de reconhecimento e análise da área, inerentes ao licenciamento ambiental em questão. Em Sanchez e Lobo (2016), é proposta uma forma de medir a eficiência da prospecção por meio do *Coeficiente de Recobrimento* (Cr), originado da razão entre a área coberta ou visualizada na prospecção (Av) e a área de superfície da área de estudo (As). Para o cálculo de Av é considerado o alcance visual da equipe de prospecção, a partir do eixo de caminhamento. Estimar e registrar esse parâmetro em campo pode ser extremamente impreciso, dado que o alcance varia com as características do ambiente, como já foi citado. Também é subjetivo afirmar que toda a área dentro desse campo de visão foi prospectada com eficiência. Porém o propósito do método é válido, e seu uso na prática pode dar origem a ajustes na forma de medição, nas estimativas de rendimento e na eficiência da atividade de prospecção espeleológica.

3 Conclusões e recomendações

O trabalho profissional de prospecção espeleológica – assim como os processos de licenciamento ambiental – é recente no Brasil. Temos pouco mais de uma década de experiência nesse campo, desde que ocorreram mudanças expressivas na legislação de proteção do patrimônio espeleológico e surgiram trabalhos de licenciamento ambiental incluindo a prospecção espeleológica sistemática. Mas, por outro lado, nesses anos foi atingido um avanço nunca visto no campo do cadastramento de cavernas no Brasil. Como já foi citado, cadastrar é proteger, e a consolidação, o aporte e a validação constante de dados no cadastro espeleológico oficial serão decisivos para a evolução dos estudos espeleológicos.

O conceito básico da prospecção já está delineado, mas os métodos podem evoluir expressivamente nos próximos anos, com o surgimento de novos equipamentos e técnicas. Mas uma coisa é certa: continuará sendo fundamental ir a campo para identificar, cadastrar e analisar as cavernas. Da mesma forma, é fundamental para o técnico que avalia o trabalho de prospecção ir a campo checar os resultados e avaliar a eficiência da prospecção. Além dessa forma de avaliação amostral *in loco*, analisar a metodologia adotada, em todos os seus aspectos e detalhes, é a forma mais adequada de averiguar a qualidade de um trabalho de prospecção espeleológica. Diferentes órgãos ambientais podem solicitar diferentes demandas metodológicas, em função de características e demandas locais. Mas a linha geral do trabalho de prospecção é comum: identificar, da melhor forma possível, o patrimônio espeleológico de determinada área.

Sendo um assunto recente, altamente especializado e em franco desenvolvimento, a análise de uma prospecção espeleológica pode gerar muitas dúvidas nos técnicos de órgãos ambientais. Da mesma forma que o cadastro espeleológico nacional deve ser constituído conjuntamente, com base na cooperação, o analista não deve hesitar em buscar auxílio ou espaço de debate com outros órgãos públicos, universidades e grupos de espeleologia. Afinal, o interesse na proteção e no entendimento progressivo acerca do patrimônio espeleológico brasileiro é comum.

Referências

AULER, A.; RUBBIOLI, E.; BRANDI, R. *As grandes cavernas do Brasil*. Belo Horizonte: Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, 2001. 228p.

BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; REIS, R. B.; COSTA JÚNIOR, N. A. Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XII., 2005, Florianópolis. *Anais [...]* São Paulo: INPE, 2005. p.3997-4004.

CECAV. *Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas no Brasil – Quinta aproximação*. Brasília: CECav/ Núcleo de Geoprocessamento, 2012. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav>>. Acesso em: dez. 2016.

_____. *Orientações básicas a realização de estudos espeleológicos*. Brasília: CECav/ICMBio, 2016. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav>>. Acesso em: dez. 2016.

CVANCARA, A. M. *A field manual for the amateur geologist: tools and activities for exploring our planet*. 2.ed. San Francisco: Jossey-bass, 1995. 335p.

MARTINELLI, R. S.; GERIBELLO, F. K. Histórico dos cadastros de cavernas no Brasil e a situação no estado de São Paulo. In: RASTEIRO, M. A.; SALLUN FILHO, W. (Org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33., 2015. Eldorado. *Anais [...]* Campinas: SBE, 2015. p.355-382.

PARMA, G. C. Processamento de imagem ASTER para obtenção do MDE e da imagem ortorretificada do Município de Palhoça, SC, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIII., 2007, Florianópolis. *Anais [...]* São Paulo: INPE, 2007, p.6019-6026.

SANCHEZ, L. E; LOBO, H. A. S (Org.). *Guia de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas* (livro eletrônico). Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016. 267p.

SLAVEC, P.; LINO, C. F. Cadastro geral das cavernas no Brasil. In: *Espeleo-Tema*, n. 13, ano IX, p.75-104, 1979.



4

Topografia e espeleometria de cavidades naturais

Ezio Luiz Rubbioli





A topografia de cavernas tem passado por profundas mudanças que elevaram significativamente sua precisão e seu nível de detalhamento. Boa parte disso surgiu a partir dos crescentes avanços tecnológicos que encontraram aplicativos diretos na espeleologia, desde a popularização dos computadores pessoais na década de 1980 e o surgimento dos primeiros *softwares* específicos para o tratamento de dados de topografias de cavernas até os recentes avanços na área de equipamentos como os *scanners* 3D, o Disto X, etc.

No caso do Brasil, essa oferta de tecnologia foi rapidamente absorvida e podemos afirmar com absoluta segurança que o mapeamento feito em nosso território pode ser considerado como um dos melhores do mundo, tanto em nível de qualidade como em quantidade. Boa parte desse avanço é fruto de uma crescente demanda no setor privado apoiada pelas ações na área do licenciamento ambiental e pesquisa. Os mapas passaram de uma forma caseira de documentar a exploração de uma caverna para uma ferramenta fundamental na avaliação de sua relevância e preservação. As dimensões lineares e volumétricas de uma cavidade passaram a ter peso na análise de impactos de grandes empreendimentos, e alguns metros a mais (ou a menos), que nunca haviam sido objeto de medições mais cuidadosas, tornaram-se números importantes na classificação do grau de relevância de uma cavidade natural subterrânea.

Com isso, é de suma importância que todos os envolvidos na topografia de cavernas estejam sintonizados com os conceitos, critérios e particularidades desta área. Aqueles que “esticam a trena” no campo têm que se adaptar às novas tecnologias; temos que entender que os mapas vão muito além

dos desenhos coloridos que ilustram os relatórios, e os analistas ambientais têm que saber como solicitar e analisar os trabalhos de mapeamento espeleológico.

1 Introdução

Poucos símbolos no mundo conseguem ter uma linguagem tão universal quanto um mapa topográfico. Desde um guia rodoviário de uma cidade até o atlas geográfico de um país, há muito a representação da superfície terrestre faz parte do dia a dia de qualquer pessoa, superando muitas vezes barreiras que nem a língua consegue romper. E em uma caverna não é diferente. O mapa espeleológico é fundamental para o entendimento das formas, das proporções, das direções de galerias, dos obstáculos, da relação com a superfície, da localização das entradas, etc., sendo a prova concreta de uma exploração, indicando os locais atingidos, as possibilidades de continuações e os dados espeleométricos (medidas da extensão e desnível). Serve também como base para qualquer estudo científico (nas áreas de biologia, geologia, etc.).

No campo do licenciamento ambiental, o mapeamento sistemático é uma ferramenta fundamental para avaliação do potencial espeleológico de uma área, documentação da cavidade, para fornecer parâmetros comparativos com outras cavidades e servir de base para vários outros estudos e avaliação dos possíveis impactos ambientais sobre ela.

Por outro lado, o ambiente cavernícola possui aspectos particulares que interferem diretamente no resultado da topografia. Devido à sua natureza, as cavernas são ambientes confinados, sem luz e com elevada umidade. Poeira, barro e água podem ser encontrados em abundância. Isso tudo, associado às dificuldades de acesso e à disponibilidade de tempo das equipes, cria limitações que devem ser bem entendidas, definidas e resolvidas antes de iniciar os trabalhos de mapeamento.

Mas o que poderia ser considerado um bom mapa espeleológico? Em linhas gerais poderíamos defini-lo como sendo o trabalho que consegue representar uma cavidade da forma mais real possível, fazendo uso somente de símbolos e traços. É aquele que sintetiza as características de uma caverna, servindo como base para qualquer levantamento específico.

2 Conceitos

Não seria exagero afirmar que a espeleotopografia encontra adeptos em todas as regiões do mundo onde se exploram cavernas, sendo a principal ferramenta para se documentar uma cavidade e essencial para qualquer tipo de pesquisa. Embora a variedade morfológica do mundo subterrâneo, aliada a fatores externos (disponibilidade de tempo, recursos humanos e objetivos diversos), tenha levado à criação de metodologias diferentes até mesmo dentro de um mesmo país, a essência do mapeamento espeleológico permanece inalterada. Em linhas gerais, os levantamentos consistem em estabelecer uma série de pontos dentro da caverna (**bases ou estações**), interligados por **visadas**, de forma que seja possível saber a posição relativa de cada um em relação a um referencial predeterminado (uma entrada, por exemplo) e em relação aos limites da cavidade (paredes, piso e teto). Esses pontos são o que chamamos de bases topográficas.

2.1 Bases ou estações

São os pontos que escolhemos como referência para os levantamentos topográficos. Eles podem ser fixos, estando situados em elementos da própria caverna, como paredes, teto e espeleotemas, ou serem “flutuantes”, ou seja, não coincidem fisicamente com nenhuma feição do espaço interno da caverna. A base fixa deve receber uma marcação que pode variar desde a indicação com o dedo no ponto e durar somente alguns instantes enquanto são feitas as visadas ou até uma identificação mais perene que pode ser feita com tinta, fitas ou placas. Deve-se sempre avaliar o impacto que a marcação de bases fixas, que não deixa de ser um tipo de depredação, irá causar sobre as cavernas. Contudo, em algumas situações particulares, como lagos, rios extensos ou grutas grandes e muito visitadas, as marcações permanentes com tinta ou outros métodos tornam-se imprescindíveis. Sempre devem ser tomados cuidados para que essas marcações sejam discretas e feitas de forma ponderada. No caso de cavernas maiores ou que estão com levantamentos em andamento é recomendável que pelo menos parte das bases receba uma marcação. No licenciamento ambiental, a permanência de bases no local, aliada com o acesso aos dados brutos do trabalho de campo, facilita a verificação e a avaliação da topografia.

2.2 Visada

É o segmento de reta que une duas bases. Normalmente uma visada é definida pelas medidas de distância, em metros, de **azimute e de inclinação**, em graus (ou grados). A sequência das visadas que ligam as diversas bases de uma topografia é conhecida como **Linha de trena**. Funciona como o esqueleto da topografia.

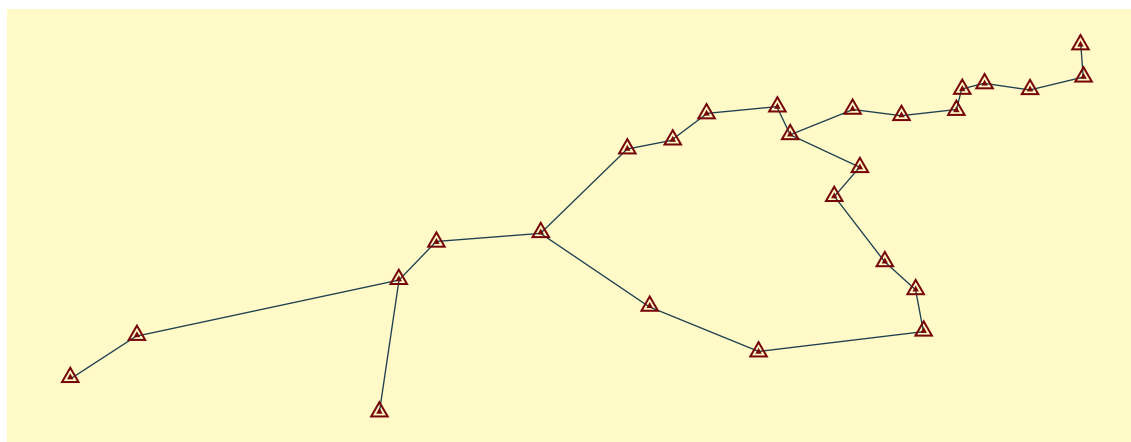


Figura 1 – Linha de trena da topografia com indicação das visadas e bases **Fonte:** Figura elaborada pelo autor

2.3 Azimute

É o ângulo projetado no plano horizontal, da visada em relação ao norte magnético. O instrumento utilizado para efetuar essas leituras é a bússola e seus valores podem ser estabelecidos em graus (de 0°

a 359°) ou grados (de 0 a 399). As que utilizam graus correspondem à imensa maioria dos equipamentos disponíveis. Uma leitura de 0° indica que a orientação da visada corresponde à do norte magnético.

2.4 Inclinação

É o ângulo projetado no plano vertical, da visada em relação a um plano horizontal. Seus valores são medidos em graus por um instrumento chamado clinômetro, e podem variar entre -90° a $+90^\circ$, sendo que a leitura 0° significa que a visada é horizontal. Os valores positivos indicam visadas em auge, e os negativos, em declive. No clinômetro geralmente existem duas escalas, uma em graus e a outra em percentual, que correspondem à tangente do ângulo.

3 Instrumentos

Devido às suas características únicas, o ambiente cavernícola exige equipamentos e técnicas específicas para o seu mapeamento. Embora possam ser utilizados instrumentos convencionais (como teodolito e estação total), em uma caverna características como leveza, robustez, estanqueidade e custo são essenciais. Além disso, o interior de uma gruta possui uma variedade e uma complexidade de formas dificilmente comparáveis com a paisagem externa, sendo praticamente impossível representar todas as feições em um levantamento convencional.

Atualmente a topografia convencional de uma caverna usa a bússola, o clinômetro e uma trena como instrumentos-padrão.

3.1 Bússola

Fornece o azimute. Normalmente graduada em graus (0° a 359°), o visor permite leituras de até $0,5^\circ$. Consiste em uma caixa de alumínio (ou plástico) envolvendo um recipiente plástico no qual o disco imantado gira livremente. Esse “recipiente” é totalmente hermético e cheio de um líquido viscoso que impõe movimentos mais lentos do disco (ao contrário das bússolas “secas”, em que a agulha oscila livremente e demora a se estabilizar).

Como as bússolas sofrem interferência dos campos magnéticos, deve-se atentar para o fato de que alguma parte da vestimenta e do equipamento possa causar desvios no aparelho. Pilhas e partes metálicas ou até mesmo rochas que contenham minerais magnéticos (como, por exemplo, a magnetita) costumam causar erros significativos nas leituras.

Também deve-se observar que a bússola esteja calibrada para o Brasil (zona 3 - *Southern Equatorial Zone*). Embora a maioria das bússolas mais utilizadas seja de fabricação europeia, podem ser adquiridos equipamentos específicos para o uso no Hemisfério Sul.

3.2 Clinômetro

Fornece a inclinação, em graus positivos ou negativos ($+90^\circ$ até -90° , com divisões de $0,5^\circ$) ou em percentual ($+150\%$ a -150%). Os valores considerados na topografia de grutas sempre são em graus.

Os fabricantes, detalhes construtivos, cuidados e utilização são similares aos das bússolas. A diferença principal é que esse instrumento deve ser lido na posição vertical; além disso, ele não sofre interferência dos campos magnéticos.



Figura 2 – Bússola (à esquerda) e clinômetro (à direita) utilizados no mapeamento espeleológico
Fonte: Foto do autor

3.3 Trena

Com a trena determina-se a distância entre as bases topográficas. Normalmente são utilizadas trenas de poliéster, reforçadas com fibra de vidro, com comprimentos variando de 20 a 50 metros, ou as trenas a laser (taqueometria). Atualmente essas últimas são bastante acessíveis em termos de preço e resistentes às condições severas de umidade e impacto, tornando-se o padrão da maior parte dos levantamentos. Contudo, devem ser tomados cuidados adicionais na sua utilização, uma vez que os erros de leitura são difíceis de serem percebidos em campo. É também fundamental que o instrumento utilizado possua uma mira a laser que identifique o local exato onde está sendo feita a leitura.

3.4 Disto X

Ainda pouco difundido na comunidade brasileira, consegue reunir em um só aparelho todas as funções da bússola, do clinômetro e da trena. É um dispositivo fabricado na Suíça que permite, com um único comando, fazer uma leitura de base a base dos três valores que compõem uma visada: o azimute, a inclinação e a distância. Os dados podem ser transmitidos via *Bluetooth* para um *tablet*. Além da evidente eficiência inserida no sistema, esse equipamento possui uma série de características altamente vantajosas se comparado com os métodos tradicionais: (1) **maior precisão**, uma vez que permite fazer a leitura diretamente no ponto da base topográfica (a bússola e o clinômetro normalmente devem ser afastados para permitir a visão do mostrador); (2) leituras realizadas com uma casa decimal para azimute e inclinação e duas casas decimais para as distâncias; e (3) transmissão

dos dados via *Bluetooth* (**evitando erros de anotação e diminuindo o tempo no tratamento dos dados no trabalho** pós-campo).

O sistema permite ainda que o desenho possa ser feito na própria caverna com auxílio de um *tablet* e um *software* específico. À medida que a topografia progride e as leituras são realizadas, a posição das bases aparece na tela do *tablet*, **facilitando e melhorando a qualidade do croqui**. Os pontos negativos ficam por conta da dificuldade de aquisição e montagem do instrumento, que não é produzido em grande escala, de sua calibragem e da elevada sensibilidade a interferências magnéticas, sejam elas provenientes da rocha ou de equipamentos metálicos usados pelo espeleólogo. Os atuais modelos que avaliam a “qualidade” dos mapeamentos já preveem um grau mais específico (e mais elevado) do que os levantamentos realizados com bússola e clinômetro (veja sistemas de classificação BCRA e UIS, a seguir).



Figura 3 – Disto X. Equipamento montado na treina Leica Disto X310, que mede distâncias, azimute e inclinação

Fonte: Foto do autor

3.5 O scanner 3D

Atualmente, existem equipamentos capazes de produzir imagens tridimensionais das cavernas com uma precisão e uma qualidade gráfica incomparáveis com outras tecnologias. O mapeamento produz uma maquete digital de alta precisão a partir de uma série de pontos distribuídos de forma tridimensional, comumente chamado de ‘nuvem 3D’. A precisão é da ordem de milímetros e o detalhamento é capaz de representar até mesmo as texturas da rocha, pichações e feições morfológicas e estratigráficas. Além disso, o produto final é apresentado em um modelo tridimensional, permitindo uma visualização virtual da distribuição e do formato das galerias. Infelizmente esses equipamentos ainda são muito caros, frágeis e pesados e não podem ser aplicados de forma indiscriminada em qualquer cavidade. Mas, no caso de cavidades onde se deseja obter um registro definitivo, essa tecnologia é o que existe de mais moderno.

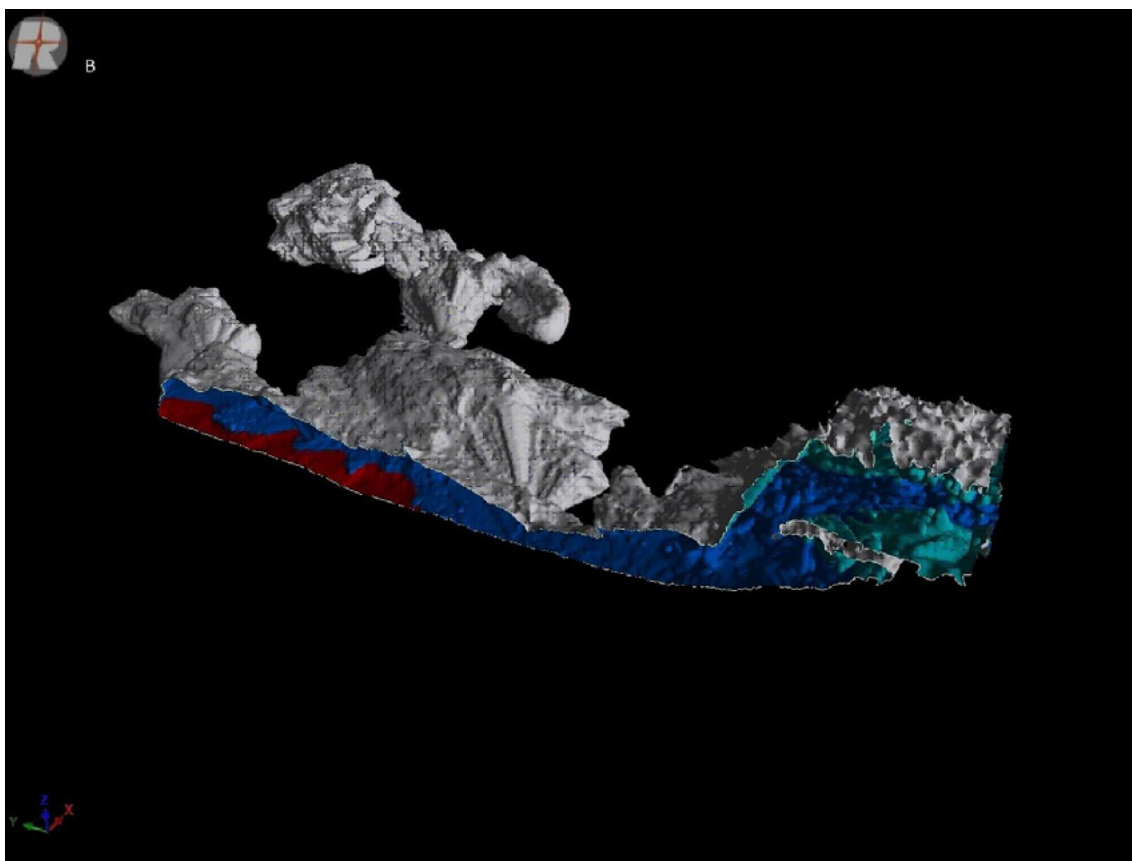


Figura 4 – O sólido formado a partir da nuvem de pontos do scanner. No primeiro plano, a definição do plano de corte longitudinal **Fonte:** Figura elaborada pelo autor

Além dos equipamentos diretamente envolvidos na topografia, são necessários outros acessórios complementares e auxiliares no trabalho de campo.

3.6 Receptor GPS (*Global Positioning System*)

Cada vez mais utilizado para navegação e mapeamento, o GPS permite situar geograficamente a entrada (ou entradas) de uma gruta na paisagem e, conseqüentemente, amarrar o mapeamento em um ponto fixo. Contudo, para obter uma boa coordenada, compatível com a precisão do levantamento topográfico, alguns cuidados devem ser observados. Em primeiro lugar, deve-se procurar um local com uma boa “visão” do horizonte. Quanto mais desimpedida, as chances de captar o sinal de um maior número de satélites aumentam e, com isto, a precisão da leitura melhora. Regiões situadas dentro de vales, de cânions, no interior de dolinas ou próximas a paredões, apesar de serem típicos de muitas entradas, devem ser evitadas. Caso a leitura do GPS seja feita em um local distante da entrada, ou seja, o ponto-âncora, será necessário topografar esse trecho, ligando-o à base inicial do mapeamento da caverna.

Não se pode considerar o valor do desvio indicado na tela do GPS como sendo uma verdade absoluta. Apesar de o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE exigir que as coordenadas

sejam acompanhadas de informações como a quantidade de satélites conectados e o erro apresentado na hora da captura, o posicionamento dos satélites é mais importante na questão de precisão do dado. Um valor mais exato pode ser obtido utilizando-se o recurso “Ponto de Passagem Médio”. Presente na maioria dos equipamentos, esse recurso é capaz de calcular uma coordenada baseada na média das leituras realizadas em um tempo predeterminado.

As cavernas inseridas em processos de licenciamento ambiental têm a obrigatoriedade do seu cadastramento no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, gerido pelo CECAV/ICMBIO. O sistema exige as coordenadas em graus decimais, *datum* WGS 84 e a partir da captura de sinais advindos de um mínimo de quatro unidades bem distribuídas na constelação dos satélites, com erro ideal de 3m e preferencial de até 10m, na entrada principal, no ponto onde se localiza a base topográfica zero.

Antes de usar o GPS, deve-se certificar que o instrumento esteja configurado corretamente. Junto com os valores da coordenada, é fundamental especificar o *datum* utilizado.

3.7 Caderno de croqui e planilha de anotação

É nesse caderno que é feito o croqui e são anotados os dados da topografia. Em algumas situações são utilizados cadernos à prova d’água, feitos de poliéster.

3.8 Cartas topográficas, imagens de satélite e ortofotocartas

São recursos importantes na exploração e no estudo detalhado de áreas com potencial espeleológico, possibilitando identificação geográfica da gruta e o entendimento espacial do sistema.

4 A equipe

Normalmente uma equipe de topografia é formada por três a cinco espeleólogos, que desempenham funções preestabelecidas como instrumentista, ponta de trena, anotador e croquista. O instrumentista é responsável pela leitura dos equipamentos (bússola, clinômetro, trena a laser ou Disto X) a partir de uma base conhecida (ou inicial) até outra escolhida e marcada pelo ponta de trena. Os resultados dessas leituras são repassados ao anotador. O croquista se ocupa de registrar os detalhes da morfologia da caverna, a posição das bases, os depósitos e tudo mais que for relevante para compor o mapa final da cavidade. Dependendo da técnica adotada, dos equipamentos e da disponibilidade de pessoas, essas funções podem ser exercidas de forma isolada ou acumulada. De qualquer maneira, o bom entrosamento, o conhecimento dos equipamentos e das técnicas, além da experiência da equipe, serão fatores primordiais para garantir a qualidade do trabalho.

5 Metodologias

Veja comparativo no quadro do Anexo 1, no final deste capítulo.

Como já foi dito anteriormente, a espeleotopografia consiste basicamente na determinação de uma sequência de pontos (chamados de bases topográficas – ou simplesmente bases) unidos por meio de vetores (chamados de visadas e determinados pela leitura da distância, do azimute e da inclinação) que irão percorrer todas as galerias da caverna. A partir desses pontos, são feitas medidas de largura e altura, além de anotados todos os detalhes básicos (com o auxílio dos croquis) para a confecção do mapa.

Dentre as várias técnicas, o posicionamento das bases é o aspecto que mais encontra variações. Duas linhas de atuação podem ser adotadas: o modelo das bases fixas ou o das bases flutuantes. No primeiro caso, as bases são necessariamente posicionadas sobre um elemento fixo da cavidade. Uma saliência na parede, um bloco ou até mesmo um espeleotema podem servir de ponto, garantindo uma posição confiável e permanente. Os instrumentos são posicionados o mais próximo possível desse ponto e as leituras são direcionadas a outro elemento da caverna visível de forma direta.

As principais vantagens do **sistema das bases fixas** são a rapidez e a sua praticidade, uma vez que pode ser utilizado em qualquer tipo de caverna (com exceção de condutos submersos). Além disso, é um modelo que permite retornar facilmente a pontos específicos da topografia para refazer algum trecho para conferência ou mesmo continuar o mapeamento de condutos laterais, já que todas as bases são marcadas. Em contrapartida, o instrumentista pode ter que se sujeitar a posições, às vezes, não muito confortáveis para efetuar a leitura dos instrumentos, o que a torna bastante suscetível a erros e perda de precisão. Além disso, existe um desgaste físico maior, dependendo do tipo de cavidade (muitas vezes as leituras são feitas com o instrumentista deitado e se contorcendo para chegar próximo à base marcada).

A utilização do Disto X elimina qualquer desvantagem que o modelo das bases fixas possa ter. O instrumento pode ser posicionado facilmente na base, desde que esta esteja ao alcance da mão do instrumentista.

Nas **bases flutuantes**, o ponto de topografia está localizado no vazio, sendo definida a sua posição em relação a elementos fixos da caverna (normalmente o piso) por meio de um tripé, prumo ou estimativas de distância. A posição da base pode ser, então, “transferida” e marcada no piso, possibilitando a identificação e o retorno a pontos que, a rigor, estão situados em algum local acima.

Essa técnica permite maior facilidade na leitura dos instrumentos, uma vez que o espeleólogo tem uma visão mais direta do equipamento, em especial da bússola e do clinômetro. Contudo, cria um adicional (a distância da base ao piso) que deve ser controlado para que não existam perdas na precisão do mapeamento. Além disso, em locais com rios, lagos ou mesmo abismos é extremamente complicado (e às vezes inviável) conseguir garantir o posicionamento da base.



Figura 5 – Equipe de topografia com sistema de bases fixas Foto: Daniel Menin

5.1 Graus de precisão

Veja o detalhamento completo no Anexo 2, no final deste capítulo.

A determinação da precisão do levantamento topográfico é importante, pois torna possível que se determine a fidedignidade do mapa em relação à cavidade trabalhada, estabelecendo parâmetros para comparar a precisão e o detalhamento de um mapa espeleológico. Existem dois sistemas de classificação, o da *British Cave Research Association* – BCRA e o da *Union Internationale de Spéléologie* – UIS. O sistema BCRA, mais antigo, obteve larga aceitação no meio espeleológico internacional e é o mais utilizado no Brasil. O método UIS, até então pouco difundido, recentemente foi objeto de novas discussões e de uma reformulação completa, objetivando sua adequação às novas tecnologias e aos métodos topográficos. Provavelmente, em um futuro próximo, a classificação da UIS será o novo padrão mundial para definição da precisão espeleotopográfica. Em linhas gerais, os dois modelos atribuem parâmetros que qualificam o mapeamento quanto a: (1) precisão dos seus instrumentos e medidas e (2) nível de detalhamento.

O **BCRA** atribui valores de 1 a 6 (mais grau X) e de A a D para avaliar a precisão da linha de trena e o registro de detalhes das galerias, respectivamente, sendo que os graus X e D significam os valores mais altos. Um mapeamento definido como sendo **3C**, segundo os critérios do BCRA, por exemplo, significaria um “*levantamento magnético de baixa precisão, sendo os ângulos horizontais e verticais medidos com precisão $\pm 2,5^\circ$ e distâncias medidas com precisão $\pm 50\text{cm}$; erro de posição da base*

menor que 50cm" (atributo 3) e "medidas de detalhe realizadas apenas nas bases topográficas" (atributo C). Por outro lado, o grau **5D** definiria um "levantamento magnético com ângulos horizontais e verticais medidos com precisão $\pm 1^\circ$, distâncias medidas com precisão de 1cm e erro de posição da base menor que 10cm" enquanto as "medidas de detalhe seriam realizadas nas bases topográficas e entre elas, de modo a representar mudanças morfológicas na galeria"¹.

A maioria dos levantamentos situa a precisão da sua linha de trena entre 3 a 5 e o nível de detalhamento entre C e D. Contudo consideramos o nível 4C como sendo o mínimo a ser atingido em um levantamento de qualidade.

A nova nomenclatura **padrão UIS** amplia esse conceito, definindo graus de -1 a 6 (mais o X) para os parâmetros relativos à precisão e de 0 a 4 para as questões de detalhamento. Além disso, cria sufixos de qualificação de A a F para definir questões adicionais, tais como "fechamento de poligonais" (B), "topografia verificada e corrigida por meios eletromagnéticos" (D) e "dados da topografia não foram transcritos manualmente, mas transferidos por meios eletrônicos" (E). Um mapeamento classificado segundo os critérios da UIS poderia ser determinado com "UIS 4-2-BC", por exemplo, o que significa uma topografia de grau 4, detalhes do mapa 2, e qualificações adicionais B e C.

Com relação à precisão, esse modelo determina para cada um dos níveis de -1 a 6 valores da precisão dos instrumentos (bússola, clinômetro e distância) e a acurácia esperada. Outro aspecto importante são as notas adicionais que esclarecem aspectos particulares da topografia como o grau 5 (atributo de precisão) destinado somente a mapeamentos nos quais foi utilizado o Disto X ou similares. Outro ponto cita que anomalias magnéticas nas bússolas impedem que um levantamento chegue ao grau 5, ou seja, cavidades localizadas em minério de ferro, onde estas interferências são relativamente comuns, o máximo que se pode considerar para a precisão seria o nível 4. Comparando com o BCRA, poderia ser considerado um levantamento de qualidade aquele em que foi atingido, no mínimo, o grau UIS 4-3. O que significa uma "topografia com bússola e trena, usando estações fixas escolhidas deliberadamente e desníveis medidos por clinômetro ou pelos componentes horizontal e vertical"². Valores de 0,1m, 2° e 2° para a precisão da distância, azimuth e inclinação, respectivamente, e uma acurácia esperada de 5%. Sobre os detalhes de desenhos feitos na caverna: "o desenho não tem que estar em escala, dimensões das passagens podem ser estimadas. Detalhes significativos devem ser desenhados com acurácia suficiente"³.

A precisão de uma topografia depende dos equipamentos adotados. Contudo a forma como esses são utilizados (ou seja, a metodologia) pode interferir nos possíveis erros cometidos. Com isso, os mapeamentos que utilizam os mesmos equipamentos podem ser mais ou menos susceptíveis a erros, dependendo de como os instrumentos são empregados. O rigor na aplicação das técnicas é fundamental para a qualidade do levantamento topográfico.

Uma avaliação criteriosa da precisão do mapeamento necessita de poligonais fechadas para quantificar o erro no posicionamento das bases. E isso nem sempre acontece, seja pelo tamanho da cavidade ou por sua morfologia. Em outros casos – cavidades maiores e/ou mais complexas – a topografia

¹ Disponível em: Day A (2002). Cave surveying. British Cave Research Association, Buxton, 40 p.

² Disponível em: <http://www.uisic.uis-speleo.org/UISmappingGrades.pdf>

³ Disponível em: <http://www.uisic.uis-speleo.org/UISmappingGrades.pdf>

pode realizar diversas poligonais (*loopings*) que nem sempre atingem o mesmo grau de precisão. Com isso, o grau de um levantamento topográfico é estipulado pelos autores da topografia com base mais na experiência em outros levantamentos, no equipamento utilizado e no tipo de cavidade do que na topografia em questão. Muitas vezes a linha de trena da topografia sequer possui uma poligonal na qual possa ser verificado o erro no fechamento das visadas. Também seria impossível garantir que todo o mapeamento fosse feito com a mesma precisão e qualidade. Erros isolados podem ocorrer ou, no caso de grutas maiores, equipes diferentes podem atuar na mesma topografia.

De qualquer forma, para avaliar se os critérios especificados (BCRA ou UIS) são coerentes com os atributos estipulados, é importante que se tenha acesso à tabela de dados dos levantamentos de campo. Com esse material é possível verificar se poligonais foram fechadas, se o posicionamento das bases acompanha as variações morfológicas das galerias e se os croquis são coerentes em proporção e direções com o mapeamento corrigido. Aliado a isso, o posicionamento físico das bases *in loco* permite a verificação dos dados das visadas. Somente de posse dessas informações é possível realizar uma vistoria de campo, visto que, no âmbito do licenciamento ambiental, a simples informação do grau de precisão não garante a qualidade da topografia.

6 O trabalho pós-campo e a confecção de mapas

Após o levantamento de campo, os dados referentes às visadas são inseridos em *softwares* específicos para tratamento dos dados e produção dos mapas finais. Existem atualmente diversos *softwares* que podem ser utilizados nos dois casos, mas não entraremos nas particularidades destes sistemas que conseguem produzir resultados bastante similares. O objetivo dessa fase é gerar um arquivo vetorial com a exata representação tridimensional das visadas e bases da topografia, a chamada linha de trena da caverna. Para tanto, esses programas verificam e distribuem os erros de fechamento de poligonais gerando um gráfico vetorial tridimensional com locação de cada base e visada, normalmente em formatos .plt ou .dxf. Além disso, a análise desses dados permite verificar se ocorreram erros grosseiros e calcular o real grau atingido pela topografia. São exemplos de programas específicos para topografia de cavernas: *Survex*, *Compass*, *Smaps*, *OnStation*, *Terion*, *cSurvey*, entre outros. Com exceção dos dois últimos, todos os outros programas necessitam do apoio de outras ferramentas de desenho para finalização dos mapas (*Illustrator*, *Corel Draw*, *MicroStation*, *AutoCAD*, etc.).

Apesar de o mapa espeleológico contar com uma boa dose do estilo e método de cada topógrafo, no âmbito do licenciamento ambiental alguns aspectos devem ser respeitados:

1. A marcação clara da entrada (Ponto Zero), das paredes e dos locais com continuações. A espessura do traço que representa as paredes deve ser diferente das outras utilizadas nas representações de elementos internos.
2. A marcação clara das bases topográficas, diferenciando as bases fixas e o Ponto Zero.
3. A indicação do ponto onde foram obtidas as coordenadas geográficas com o GPS (Ponto Âncora) e o Ponto Zero da topografia.

4. A indicação de claraboias e entradas superiores.
5. Os atributos ou feições da cavidade, em especial aqueles tratados no Decreto 99.556/2008 e na Instrução Normativa nº 2/2009/MMA.
6. Os cortes verticais: quanto mais numerosos, maior é a preocupação com o nível do detalhamento. Além disso, são fundamentais para o cálculo do volume que tem a sua precisão afetada diretamente pela densidade desses cortes.
7. O perfil longitudinal: pode ajudar bastante no entendimento do mapa, sobretudo em cavidades verticalizadas onde podem ser mais representativos da morfologia da cavidade do que a própria planta baixa.
8. A escala gráfica e a indicação do norte (geográfico e magnético, com data e declinação magnética).
9. As convenções utilizadas em uma legenda.

As informações mínimas que devem ser colocadas na legenda do mapa espeleotopográfico são:

1. Nome da caverna;
2. Município e sigla do estado;
3. Localidade;
4. Coordenadas geográficas (latitude, longitude, altitude) ou UTM (incluindo o *datum*);
5. Erro GPS e quantidade de satélites
6. Grau de precisão topográfica (UIS ou BCRA);
7. Extensão (desenvolvimento linear e projeção horizontal) indicando se foi usado o método da continuidade ou da descontinuidade;
8. Desnível, área e volume da cavidade;
9. Autores da topografia;
10. Data da topografia;
11. Quadro de convenções ou indicação da simbologia utilizada no mapa.

Na legenda podem ainda ser acrescentadas informações adicionais, tais como:

1. Número do cadastro, se houver;
2. Referência do mapa utilizado como base para as coordenadas, indicando a escala e o ano deste mapa;
3. Equipamentos utilizados na topografia e lista de material necessário à progressão (principalmente em abismos).

Observações:

- (1) Em cavidades mais complexas (principalmente com vários níveis) ou com muitas bases, o ideal é que a indicação das bases seja apresentada em um mapa separado.
- (2) Mesmo sendo notória, na cartografia, a apresentação da escala numérica, recomenda-se a utilização somente da escala gráfica. É relativamente comum encontrar erros nas medições espeleométricas causados pela interpretação errada da escala, sobretudo devido à facilidade de ampliar e reduzir mapas digitais.
- (3) As indicações apontadas no GPS relativas a “erro e quantidade de satélites” não são atributos definitivos para se mensurar a qualidade de uma coordenada. Contudo, são exigências existentes no CANIE e devem ser indicadas.
- (4) No licenciamento deve ser adotado somente o critério da descontinuidade para medição da projeção horizontal.

7 Analisando o mapa

Além das premissas básicas listadas anteriormente, um mapa espeleológico pode conter várias informações, muitas vezes sutis, sobre a qualidade e os cuidados observados nos levantamentos, sobretudo nos trabalhos de campo. Alguns aspectos a serem observados ajudam na identificação de um bom mapeamento subterrâneo:

1. A apresentação do mapa deve ser limpa, sem poluição e em escala compatível. Os detalhes devem ser preservados sem excessos que comprometam o entendimento.
2. Estar acompanhado da tabela de dados da topografia (planilha com leituras das bases topográficas, azimuth, distância e inclinação). Os dados originais do trabalho de campo, sobretudo os croquis, devem ser preservados para futuras correções e avaliações.
3. A quantidade e o posicionamento das bases dizem muito a respeito do entendimento de uma cavidade e dos critérios de representação. Normalmente, quanto maior o número de bases estabelecidas, melhor o detalhamento. Na mesma proporção, as poligonais fechadas acrescentam confiabilidade e precisão ao mapeamento, uma vez que o grau de precisão indicado na legenda só pode ser confirmado a partir do erro no fechamento destas poligonais. Deve-se observar, também, se foram estabelecidas bases nos locais onde ocorrem mudanças na morfologia da cavidade, como curvas e variações da largura das galerias. Em locais mais amplos, como salões e galerias amplas, bases posicionadas ao longo do perímetro das paredes indicam um cuidado adicional no detalhamento.

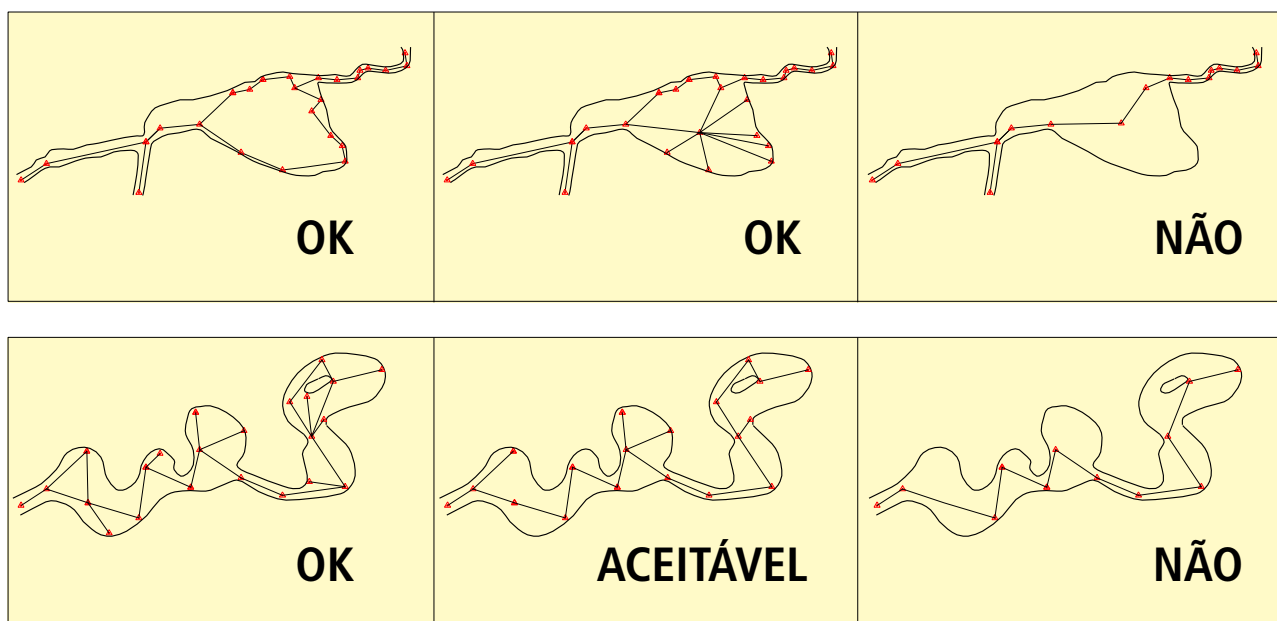


Figura 6 – Influência do posicionamento das bases na qualidade do mapa **Fonte:** Figura elaborada pelo autor

Espeleometria: medição de cavernas

Como medir uma caverna? O que pode ou não ser considerado como parte de uma gruta? Quando duas cavidades passam a fazer parte do mesmo sistema? Essas definições e esses conceitos são formas de padronizar e, conseqüentemente, de comparar duas ou mais cavidades quanto às suas grandezas espaciais, ou seja, extensão, área e volume. E no caso do licenciamento ambiental, a questão espeleométrica é mais do que um recurso comparativo, uma vez que a Instrução Normativa (IN2) é baseada em parâmetros definidos por essas medidas.

O grande problema da espeleometria é que as feições complexas do mundo subterrâneo nem sempre se enquadram em definições rígidas dos modelos matemáticos que regem os sistemas de medição. Exceções são frequentes e, por mais que se tente encontrar um modelo ideal, este nunca conseguirá ser aplicado em todas as cavidades.

1 Medidas lineares: projeção horizontal, desenvolvimento linear e desnível

Parece consenso que a maneira mais correta de comparar o tamanho de cavidades seja através do volume interno das galerias. Mas, como veremos adiante, essa grandeza na maioria das vezes é carregada de uma grande dose de incertezas e imprecisões. Com isso, é necessário recorrer ao **comprimento da caverna**, dado pela soma das galerias, e ao **desnível** como sendo as principais grandezas espeleométricas de uma cavidade. O cálculo do desnível é simples, sendo fornecido pela diferença de nível entre o piso mais alto da caverna e o piso mais baixo. No caso de grutas verticais, onde não é possível estabelecer um piso mais alto, a base zero (como será demonstrado mais adiante) passa ser a referência para essa medida. Obedecendo-se aos critérios espeleométricos que serão expostos a seguir, esse parâmetro não oferece problemas, sendo utilizado de maneira uniforme na espeleologia.

Por outro lado, o cálculo da extensão tem merecido abordagens diversas por parte da comunidade espeológica, podendo ser mensurado de duas formas. A primeira, denominada **projeção horizontal**, consiste em medir o comprimento das galerias projetadas em um plano horizontal. Já o **desenvolvimento linear** mede as galerias segundo o seu eixo de desenvolvimento, seja ele plano, inclinado ou vertical.

Uma caverna que compreenda um conduto vertical com, por exemplo, 10m de profundidade, o qual dê acesso a uma galeria perfeitamente horizontal com 10m de extensão, teria, pelo método da projeção horizontal, apenas 10m de desenvolvimento (pois os 10m verticais seriam iguais a zero em planta). Pelo método do desenvolvimento linear, essa mesma caverna teria o dobro da metragem, ou seja, 20m. A extensão de uma caverna, quando medida pelo método do desenvolvimento linear, será sempre superior ou igual ao valor da sua projeção horizontal. No caso de cavernas verticalizadas, essa diferença pode ser significativa. Na questão do licenciamento e para parâmetros comparativos, tem-se adotado a medida segundo o método da projeção horizontal.

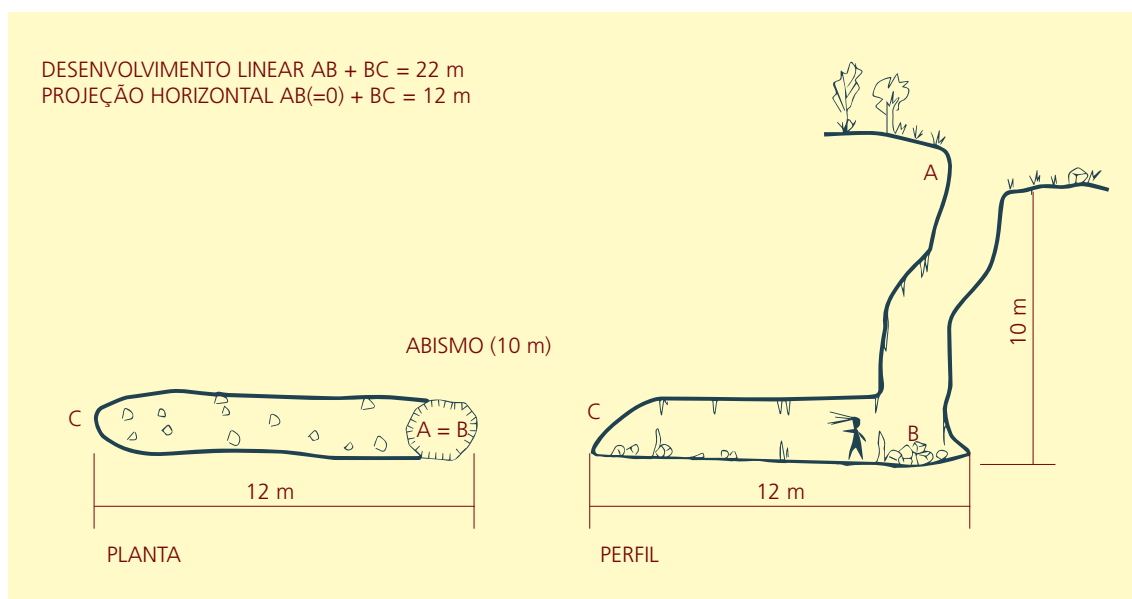


Figura 7 – Projeção horizontal e desenvolvimento linear **Fonte:** Figura elaborada pelo autor

2 Medições de área e volume

Conforme foi dito anteriormente, grandezas como área e volume são bem mais representativas do real tamanho de uma cavidade quando comparadas com as medidas lineares de projeção horizontal e desenvolvimento linear. Por outro lado, o cálculo desses valores muitas vezes é complexo e sujeito às limitações da maioria dos modelos de topografia. Mesmo assim, são parâmetros importantes a serem definidos, principalmente no âmbito do licenciamento ambiental.

A área de uma cavidade é calculada a partir da sua representação em planta e pode ser mensurada diretamente por diversos programas de cartografia como *AutoCAD*, *MicroStation*, etc. Deve-se atentar ao fato de que locais não penetráveis e pilares devem ser descontados nas medidas.

O próximo passo é o cálculo da altura média da cavidade. A precisão e a qualidade desse valor são diretamente proporcionais ao nível de detalhamento da topografia, em especial a quantidade e a distância entre as seções verticais (cortes). Inicialmente, a altura de cada seção deve ser definida, podendo ser adotada como a média de várias alturas equidistantes ou a área de seção dividida pela sua largura. Qualquer que seja o método para obtenção da altura média das seções, o segundo passo seria o cálculo da média de todos esses valores. O volume final é atribuído pelo valor: área X altura média.

Contudo as distorções dessas medidas ficam evidentes quando comparamos grutas planas com inclinadas. Como as áreas sempre são calculadas a partir da planta de uma cavidade (projeção no plano horizontal), os valores ficam depreciados ao compararmos com grutas que se desenvolvem segundo um plano inclinado. Por consequência, a mesma distorção é transferida para a medida do volume. Sendo assim, a precisão no cálculo do volume é influenciada, além da quantidade de cortes, pelo grau de inclinação das galerias. Nesses casos, o único modelo capaz de corrigir essas discrepâncias é com a utilização do *scanner* 3D. As imagens tridimensionais das cavernas produzidas por esse equipamento, aliado aos programas específicos para tratamento dos dados coletados em campo, permitem cálculos precisos das áreas e dos volumes.

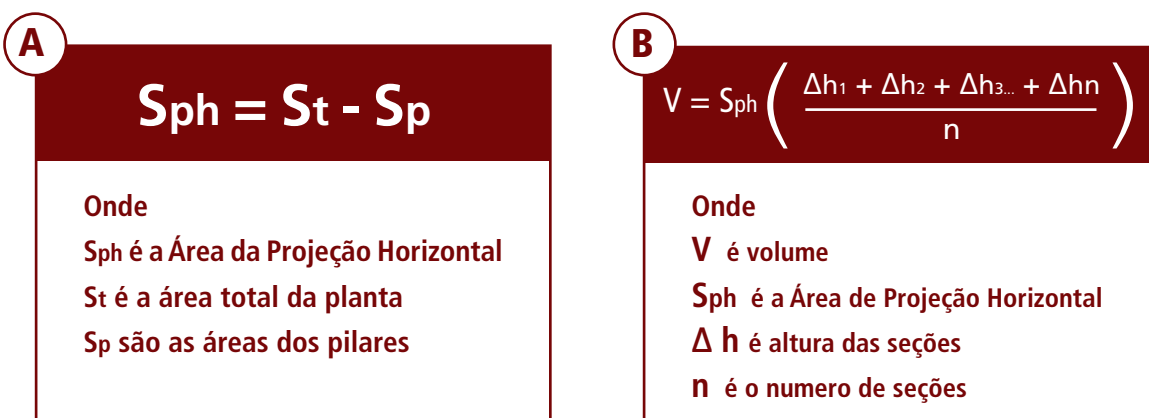


Figura 8 – Área da projeção horizontal (A), Volume (B) Fonte: Figura elaborada pelo autor

3 Métodos da continuidade e descontinuidade

As medidas lineares (projeção horizontal ou desenvolvimento linear) podem ser obtidas segundo dois critérios: contínuo ou descontínuo. No primeiro caso, a extensão de uma cavidade é calculada a partir da soma de segmentos interligados sobrepostos aos eixos das galerias e, muitas vezes, coincidem com a própria linha de trena. Por esse motivo, sendo quase uma leitura direta dos dados da topografia, acaba sendo usada por muitos espeleólogos. No segundo caso (descontínuo), as medidas são tomadas somente nos eixos das galerias, sendo desconsideradas as ligações entre os vários segmentos.

No exemplo da Figura 9, a seguir, a medida do segmento A-B seria computada no cálculo da extensão total pelo **método contínuo**, incluindo assim parte da largura do conduto maior, pois a galeria lateral se inicia apenas no ponto C. O **princípio da descontinuidade** reza que essa distância (A-C)

deve ser descontada, pois, de forma contrária, estaríamos sistematicamente incluindo larguras de condutos em todas as ramificações.

A diferença entre desenvolvimentos medidos pelos princípios da descontinuidade e da continuidade pode ser grande, principalmente em cavernas com condutos amplos, em que o componente largura é maior, ou em cavernas com muitas galerias laterais, que é o caso das várias cavernas labirínticas brasileiras. No caso do licenciamento, tem-se adotado sistematicamente as medidas feitas a partir do princípio da descontinuidade.

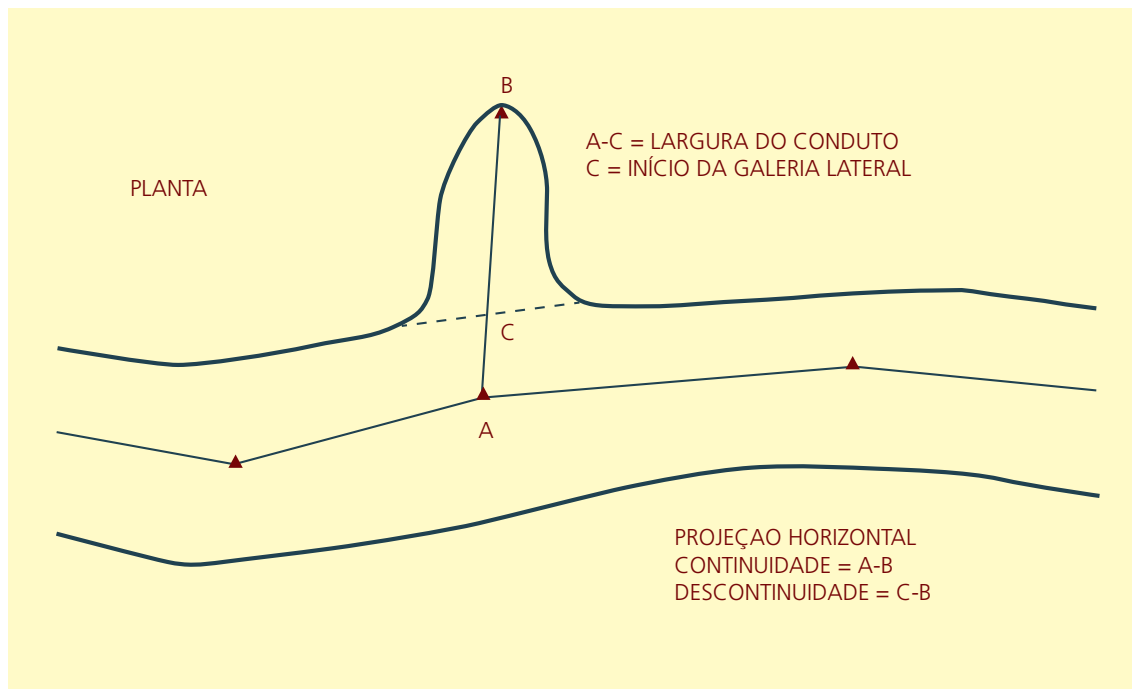


Figura 9 – Continuidade e descontinuidade Fonte: Figura elaborada pelo autor

4 Base Zero

Essa definição, particularmente importante, afeta os valores de todas as outras grandezas espeleométricas e deve ser estabelecida de forma criteriosa, principalmente nas entradas com morfologia complexa. **Corresponde ao local onde começam as medidas de uma cavidade, tanto no plano horizontal (para as medidas de extensão, área e volume) como no plano vertical (desnível).**

No primeiro caso, o plano horizontal, faz-se necessário distinguir o ponto zero do que chamamos linha d'água. Como o próprio nome diz, a linha d'água é o local onde termina a projeção do paredão que abriga a cavidade e ocorre o gotejamento da água de chuva. Já a base zero é representada pelo local onde é possível inserir um plano vertical que tenha todo o seu perímetro limitado pelo teto, parede e piso da cavidade. A base zero pode ser coincidente ou mais interna do que a linha d'água, mas nunca externa. Em entradas clássicas com aberturas bem definidas é muito fácil determinar o ponto zero, mas, quando nos deparamos com várias entradas ou condutos inclinados, esta determinação

pode não ser tão evidente. Contudo esse ponto deve ser indicado no mapa, definido no trabalho de campo e representado na planta e no(s) corte(s).

No caso de grutas com entradas verticais, seguimos o mesmo critério, contudo o plano que define o início da cavidade é horizontal. A maioria dos abismos possui bordas de diferentes alturas e, seguindo este critério, o ponto zero seria a borda mais baixa. A partir desse ponto é que deve ser medido o desnível de uma cavidade.

Sendo assim, para o cálculo das grandezas espeleométricas de uma cavidade (projeção horizontal, área, volume e desnível), a base zero marca o plano a partir do qual se devem “iniciar” as medidas.

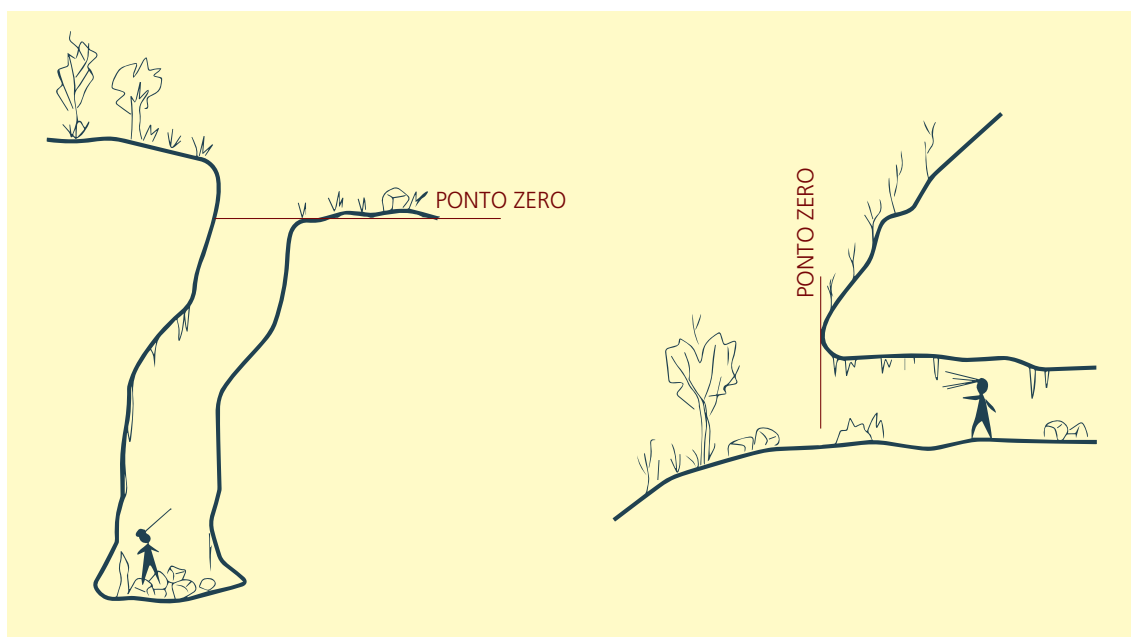


Figura 10 – A base zero Fonte: Figura elaborada pelo autor

5 Dolinas, claraboias e abrigos

Ainda na questão vertical, feições como dolinas e claraboias, comuns no carste brasileiro, devem ser analisadas morfológicamente. O critério adotado estabelece que, quando a abertura for mais profunda do que extensa, não se segmenta a cavidade em duas cavernas distintas. Ao contrário, caso possua o comprimento maior do que a profundidade, causará a divisão da cavidade em duas grutas distintas. Consideramos que essas medidas devem ser tomadas no eixo de desenvolvimento da cavidade que, em alguns casos, pode não coincidir com as dimensões máximas da dolina.

Da mesma forma que uma dolina pode dividir um sistema subterrâneo (nos critérios espeleométricos), a morfologia da entrada pode definir se uma cavidade é uma caverna ou abrigo. Uma vez definida a base zero, caso a cavidade seja menos extensa que a altura ou a largura da entrada, por definição se está diante de um abrigo. Somente a partir do ponto em que a extensão iguala ou supera o valor da altura ou largura pode-se considerar que a feição é uma caverna. Vale a pena ressaltar

que essa é uma definição puramente numérica, não sendo raros os casos em que abrigos podem alcançar dezenas de metros de extensão, possuindo espeleotemas, fauna e importância equivalente a qualquer cavidade. Consideramos que essa diferenciação (abrigo X gruta) é somente uma questão de nomenclatura, sendo que os dois casos devem ser submetidos aos mesmos critérios espeleométricos.

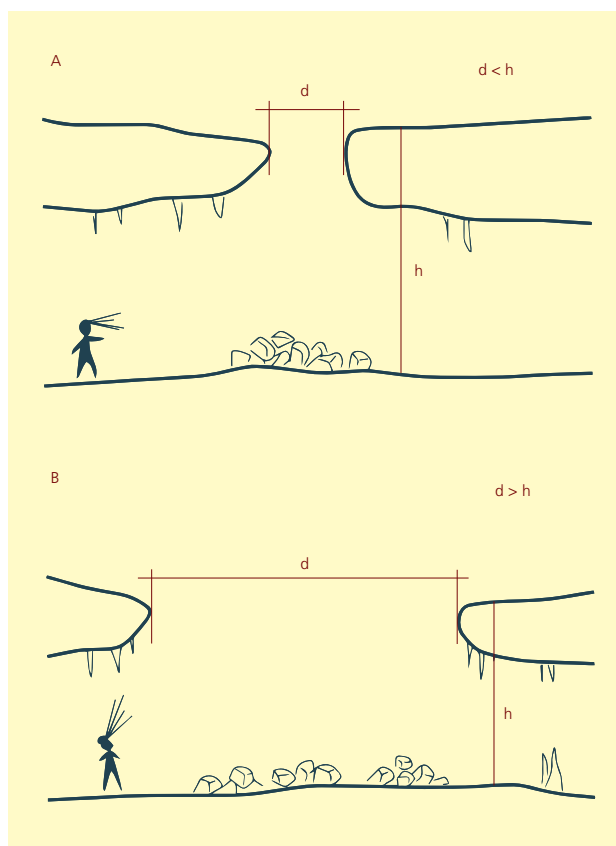


Figura 11 – Dolinas e claraboias.
(A) Caverna única (B) Duas cavernas
Fonte: Figura elaborada pelo autor

6 Limites espeleométricos

No âmbito do licenciamento ambiental, a questão espeleométrica deve estar em sintonia com a premissa básica sobre a definição de cavernas contida no Decreto 99.556/90: “cavidade natural subterrânea de qualquer dimensão acessível pelo ser humano”. Sendo assim, as medidas devem se limitar aos locais acessíveis a uma pessoa. Mesmo que existam “vazios” grandes o suficiente para serem mensurados e indicados na topografia, estes não podem ser considerados na hora de serem aplicadas as regras espeleométricas, caso não sejam acessíveis ao homem (por exemplo: sífoes não mergulhados).

Pelo mesmo critério, duas cavidades não podem ser consideradas unidas caso existam passagens impenetráveis ou ainda não exploradas. Sífoes, desmoronamentos ou entupimento com sedimento são obstáculos até mais frequentes que galerias estreitas, quando são analisados sistemas divididos em várias cavidades. Também vale ressaltar que a conexão entre cavernas só pode ser considerada a partir do momento em que uma pessoa passa pelo obstáculo. Confirmações da ligação através do som, da luz ou de traçadores não são aceitas no âmbito da espeleometria.

Esses critérios de conexão e continuidade de cavernas são de extrema importância a serem observados no rito do licenciamento ambiental, uma vez que podem alterar significativamente as amostras estudadas – tanto aumentando ou diminuindo a quantidade de cavernas quanto nas suas dimensões, que podem resultar em distorções na classificação do grau de relevância.

7 Análise das grandezas espeleométricas sob a ótica do licenciamento

Atualmente a análise espeleométrica de uma cavidade ganhou importância e pode ser decisiva na hora de definir o grau de relevância de uma cavidade. No licenciamento ambiental já não basta conhecer a projeção horizontal e o desnível de uma caverna. Os atributos devem ser submetidos a análises comparativas e definidos por critérios mais rígidos e uniformes. Tanto no Decreto 99.556/1990 quanto na Instrução Normativa nº 2/2017/MMA, as grandezas espeleométricas projeção horizontal, desnível, área e volume são consideradas para **classificação do grau de relevância de uma cavidade em alto, médio ou baixo**. Essa avaliação se baseia nos percentis, ou seja, a posição relativa em que uma gruta se situa em relação à amostra total.

Baixa: <P20, Média: entre o P20 e o P50, Alta: > P50, sendo P a posição relativa na amostra.

Por exemplo, uma cavidade que ocupa a posição relativa a 20% entre as menores projeções horizontais de uma amostra será considerada de baixa projeção horizontal. Já aquelas cavernas que tiveram esse valor entre o percentil 20 e o 50 serão de média projeção horizontal. E todas as que tiverem a projeção maior que a do percentil 50 serão de alta projeção horizontal, excetuando-se as de dimensões notáveis. Da mesma forma, isso ocorre para os cálculos de desnível, área e volume.

Já o atributo **dimensões notáveis** em extensão, área e/ou volume, o qual confere a uma cavidade o grau máximo de relevância, tem seu conceito no Quadro 1 do Anexo 1 da Instrução Normativa do Ministério do Meio Ambiente como sendo toda “cavidade que apresente extensão (horizontal ou vertical), área ou volume superiores a 8 vezes a mediana relativa ao enfoque local ou regional”. Nesse caso, o atributo a ser considerado para efeito de cálculo é a projeção horizontal e o desnível.

No Anexo 3 (a seguir) estão listadas as maiores e mais profundas cavernas do Brasil.

ANEXO 1

Quadro 1 - Comparação entre os métodos topográficos e suas aplicações

Método	Precisão	Erros	Eficiência	Restrições	Indicações
Bases flutuantes	Baixa	Grandes	Alta	Nenhuma	Grutas pequenas, que podem ser mapeadas em uma única jornada, ou quando o tempo é escasso.
Bases fixas	Média	Médios	Alta	Nenhuma	Aplicável em qualquer tipo de caverna, principalmente nas mais complexas e nas que exijam um trabalho prolongado.
Bases flutuantes com prumo	Média	Pequenos	Média	Algumas	Grutas sem rios caudalosos, lagos profundos ou abismos.
Bases flutuantes com tripé	Alta	Pequenos	Baixa	Muitas	Grutas sem rios caudalosos, lagos profundos ou abismos. Indicado para trabalhos que exijam maior precisão.

Fonte: Mapeamento de Cavernas – Guia Prático. 2005

Observação sobre o quadro acima:

A precisão de uma topografia depende dos equipamentos adotados. Contudo a forma como esses são utilizados (ou seja, a metodologia) pode interferir nos possíveis erros cometidos. Com isso, os mapeamentos que utilizam os mesmos equipamentos podem ser mais ou menos susceptíveis a erros, dependendo de como os instrumentos são empregados.

ANEXO 2

Graus de precisão e detalhamento

A. Graduação de mapeamento modelo BCRA

Quadro 1. Graus para precisão para linha de trena

Grau 1 – Esboço de baixa precisão, sem medições tomadas em campo.

Grau 2 – A ser usado, somente se necessário (ver nota 7, abaixo), para descrever um esboço com precisão intermediária entre os Graus 1 e 3.

Grau 3 – Levantamento magnético de baixa precisão. Ângulos horizontal e vertical medidos com precisão $\pm 2,5^\circ$ e distâncias medidas com precisão $\pm 50\text{cm}$; erro de posição da base menor que 50cm.

Grau 4 – A ser usado, somente se necessário (ver nota 7, abaixo), para descrever um levantamento que, apesar de mais preciso que o Grau 3, não tenha alcançado os requisitos do Grau 5.

Grau 5 – Levantamento magnético. Ângulos horizontal e vertical medidos com precisão $\pm 1^\circ$, distâncias medidas com precisão de 1cm e erro de posição da base menor que 10cm.

Grau 6 – Levantamento magnético com precisão maior que a de Grau 5 (ver nota 5, abaixo).

Grau X – Levantamento topográfico utilizando-se teodolito ou Estação Total em vez de bússola (ver notas 6 e 10, abaixo).

Notas sobre a quadro 1:

1. O quadro acima é um sumário e deve ser utilizado apenas para facilitar a memorização; as definições dos graus de topografia mencionados acima devem ser usadas apenas em conjunto com estas notas.
2. Em todas as situações é necessário que se use o “espírito” dessas definições, sem que as siga ao “pé da letra”.
3. Na obtenção do Grau 3 é necessário o uso do clinômetro.
4. Na obtenção do Grau 5 é essencial que os instrumentos estejam calibrados. Todas as medidas devem ser tomadas de um ponto inserido em uma esfera com diâmetro de 10cm e centrada na base topográfica.
5. Uma topografia de Grau 6 exige que a bússola e o clinômetro sejam lidos no limite possível de sua precisão, $\pm 0,5^\circ$. Erros de posição da base topográfica devem ser menores que $\pm 2,5\text{cm}$, o que torna necessário o uso de tripés ou outra forma de se fixar o ponto, em todas as bases topográficas.
6. Uma topografia de Grau X deve incluir no desenho notas descritivas dos instrumentos e das técnicas utilizadas, além de uma estimativa da provável precisão da topografia quando comparada com as topografias de Grau 3, 5 ou 6.

7. Os graus 2 e 4 são usados somente quando, durante o processo da topografia, as condições geofísicas tenham prejudicado a obtenção dos requisitos para o grau superior mais próximo e a retopografia seja inviável.
8. Organizações espeleológicas estão autorizadas a reproduzir os Quadros 1 (acima) e 2 (a seguir) em suas publicações, não sendo necessária permissão da BCRA para isto. Entretanto, os quadros não podem ser reproduzidos sem estas notas.
9. O Grau X é apenas potencialmente mais preciso que o Grau 6. Não se deve esquecer que o teodolito/Estação Total é um instrumento de precisão complexo, cujo manejo requer treinamento específico e prática regular, a fim de que não sejam inferidos sérios erros durante a sua utilização.
10. Para obtenção do Grau 5, na plotagem do desenho as coordenadas da topografia devem ser calculadas e não desenhadas à mão com régua, escalímetro e transferidor.

Quadro 2: Graus para registro de detalhes de conduto

Classe	
A	Detalhes das galerias baseados na memória.
B	Detalhes das galerias estimados e anotados na caverna.
C	Medidas de detalhe realizadas apenas nas bases topográficas.
D	Medidas de detalhe realizadas nas bases topográficas e entre elas, de modo a representar mudanças morfológicas na galeria.

Notas sobre o Quadro 2:

1. A precisão dos detalhes dos condutos deve ser similar à precisão da linha de trena.
2. Normalmente, apenas uma das seguintes combinações deve ser usada na graduação da topografia: 1A; 3B ou 3C; 5C ou 5D; 6D; XA, XB, XC ou XD.

B. Graduação de mapeamento modelo UIS

Grau	Descrição	Precisão			Acurácia Esperada
		Distância	Bússola	Clinômetro	
-1	Nenhum mapa disponível	–	–	–	–
0	Não graduado	–	–	–	–
1	Esboço de memória, sem escala	–	–	–	–
2	Mapa compilado de anotações, esboços e estimativas feitas na caverna. Nenhum instrumento utilizado.	–	–	–	–
3	Direções medidas com bússola, distâncias medidas por corda, passos ou dimensões corporais. Desníveis significativos estimados.	0,5m	5°	–	10%
4	Topografia com bússola e trena, usando estações fixas escolhidas deliberadamente. Desníveis medidos por clinômetro ou pelos componentes horizontal e vertical.	0,1m	2°	2°	5%
5	Topografia feita com bússola e trena. Direções e inclinações por instrumentos calibrados, distâncias por trena de fibra ou metálica, ou por taqueometria.	0,05m	1°	1°	2%
6	Topografia ou triangulação usando instrumentos calibrados, montados em tripés, para direção e inclinação. Distância por trena calibrada, taquiometria precisa ou Disto X.	0,02cm	0,25°	0,25°	1%
X	Topografia feita com teodolito ou meios comparáveis.	variável			variável

Fonte: <http://www.uisic.uis-speleo.org/UISmappingGrades.pdf>)

Graduação dos detalhes do mapa

0 - Não graduado

1 - Esboço de memória. Sem escala, mas com indicação aproximada das proporções.

2 - Detalhes de anotações, esboço e estimativa de dimensões feitas na caverna.

3 - Detalhes de desenhos feitos na caverna. O desenho não tem que estar em escala, dimensões das passagens podem ser estimadas. Detalhes significativos devem ser desenhados com acurácia suficiente.

4 - Detalhes dos desenhos feitos na caverna em escala, baseados nas medidas de detalhes significativos com respeito aos pontos de topografia, normalmente no mínimo de Grau 4. Todos os detalhes de interesse espeleológico devem ser mostrados com acurácia suficiente de forma a não ser apreciado o erro em função da escala do mapa. Dimensões das passagens medidas.

Sufixos de qualificação

A - Nada foi feito para obter uma segurança adicional de acurácia.

B - Fechamento de poligonais (*loops*) ajustados.

C - Topografia baseada em instrumentos e pessoal checados e corrigidos os efeitos de possíveis anomalias.

D - Topografia verificada e corrigida por meios eletromagnéticos.

E - Dados da topografia não foram transcritos manualmente, mas transferidos por meios eletrônicos.

F - Entradas foram medidas precisamente.

Notas adicionais

Grau -1: Apenas para propósitos de cadastro: significa que o mapa da caverna ainda não foi desenhado.

Grau 0: Apenas para propósito de cadastro. Se uma topografia não é graduada, a qualidade não pode ser assegurada. Isto é frequentemente válido para mapas históricos ou antigos.

Grau 3: Um clinômetro Silva ou comparável, meios relativamente simples sem leituras precisas qualificam para o Grau 3. Mapeamento com medições cabeça a cabeça dos topógrafos são qualificadas como Grau 3. Medidas com topofio qualificam para graus 3 ou 4.

Grau 4: Medidas com topofio podem qualificar para o Grau 4 se as visadas da topografia não forem muito longas e cuidados forem tomados para ler corretamente os dados. Trenas a laser podem ser utilizadas para graus 4 e 5. Para atingir o Grau 4, estações fixas e reencontráveis devem ser feitas. Não precisam ser necessariamente nas paredes; pontos feitos com aparelhos montados em tripés com uma distância definida acima do piso são também aceitos.

Grau 5: Disto X, DUSI ou instrumentos similares devidamente calibrados atingem o Grau 5. Se a medida de distância for calibrada, o conjunto atinge Grau 6. Se não estiverem calibrados, devem ser graduados como Grau 1! Topofio utilizado para poços verticais podem atingir o Grau 5. De forma a alcançar o Grau 5, as coordenadas da topografia devem ser calculadas (coordenadas xyz – não podem ser coordenadas polares desenhadas com escala e transferidor).

Grau X: Os modelos de teodolito e outros equipamentos similares podem variar, assim como as técnicas de medição. No entanto, todas as topografias de Grau X devem incluir, na descrição escrita da caverna, a descrição das técnicas e dos instrumentos utilizados, bem como uma estimativa da provável acurácia da topografia.

Detalhamento do mapa de Grau 4: A principal diferença entre o Grau 3 e o Grau 4 é que, para obter o Grau 4, o desenho deve ser feito em escala dentro da caverna, seja por cálculo/reportagem das distâncias no papel ou por desenhos em saídas de computadores de topografias prévias.

Sufixo C: O sufixo C designa bússola, clinômetro e pessoal checado para evitar anomalias. Anomalias magnéticas nas bússolas, anomalias de inclinação no clinômetro e anomalias de visão entre pessoas são relativamente comuns. Para alcançar o Grau 5, todos os instrumentos devem ter sido calibrados. Grau 5 e sufixo C são, portanto, redundantes.

Sufixo D: Usado para informar que posições-chave de passagens foram localizadas por rádio ou outros métodos de forma a definir a posição absoluta da topografia com respeito à superfície.

Sufixo E: Designa dados transferidos eletronicamente dos instrumentos (Disto X, etc.), eliminando possíveis erros de transcrição.

Sufixo F: Será usado tanto em mapas que representam cavernas diferentes (para indicar que as entradas foram medidas precisamente) ou em mapas de cavernas que contenham dados XYZ absolutos de uma grade. Sem qualquer informação adicional na parte escrita, é assumido que a técnica de medição utilizada para localizar as entradas foi feita no mínimo de acordo com a graduação que foi utilizada na caverna. Determinação da entrada da caverna a partir de mapas qualifica para graus 1 a 3 (para mapas de alta qualidade); topografia de superfície para graus 3 a 6, e leituras de GPS de grau 3 a X, dependendo do instrumento e dos métodos utilizados, disponibilidade de satélites, etc. De forma a alcançar o sufixo F, a posição da entrada da caverna deve ser determinada por uma topografia de superfície de, pelo menos, Grau 4, ou por uma boa leitura de GPS, ou meios comparáveis.

ANEXO 3

Maiores e mais profundas cavernas do Brasil

As maiores (em metros)

1 Toca da Boa Vista	Campo Formoso (BA)	114.000
2 Toca da Barriguda	Campo Formoso (BA)	35.000
3 Lapa São Mateus	São Domingos (GO)	22.690
4 Lapa Doce II	Iraquara (BA)	16.500
5 Gruta do Padre	Santana/Santa Maria da Vitória (BA)	16.400
6 Lapa São Vicente I	São Domingos (GO)	16.390
7 Boqueirão	Carinhanha (BA)	15.240
8 Toca dos Ossos	Ourolândia (BA)	14.200
9 Lapa do Angélica	São Domingos (GO)	14.100
10 Gruna da Água Clara	Carinhanha (BA)	13.880
11 Gruta da Torrinha	Iraquara (BA)	13.070
12 Lapa Sem Fim	Luislândia (MG)	11.890
13 Gruna da Tarimba	Mambaí (GO)	10.551
14 Lapa dos Peixes	Carinhanha (BA)	9.320
15 Lapa Doce I	Iraquara (BA)	9.300
16 Lapa do Convento	Campo Formoso (BA)	9.200
17 Gruta Olhos D'Água	Itacarambi (MG)	8.890
18 Gruta dos Brejões I	São Gabriel/Morro do Chapéu (BA)	8.416
19 Gruna do Enfurnado	Carinhanha (BA)	8.400
20 Caverna Santana	Iporanga (SP)	8.373
21 Lapa do Bezerra	São Domingos (GO)	8.250
22 Sistema Terra Ronca II – Malhada	São Domingos (GO)	7.500
23 Gruta Areia	Unaí (MG)	6.960
24 Sistema Pratinha – Gruta Azul	Iraquara (BA)	6.830
25 Gruna da Bananeira	Santa Maria da Vitória (BA)	6.550
26 Gruta da Tapagem (Caverna do Diabo)	Eldorado (SP)	6.237
27 Gruna das Três Cobras	Carinhanha (BA)	5.620
28 Lapa São Bernardo – Palmeiras	São Domingos (GO)	5.610
29 Sistema Cão –Talhão	Seabra (BA)	5.610
30 Gruta das Areias de Cima	Iporanga (SP)	5.565

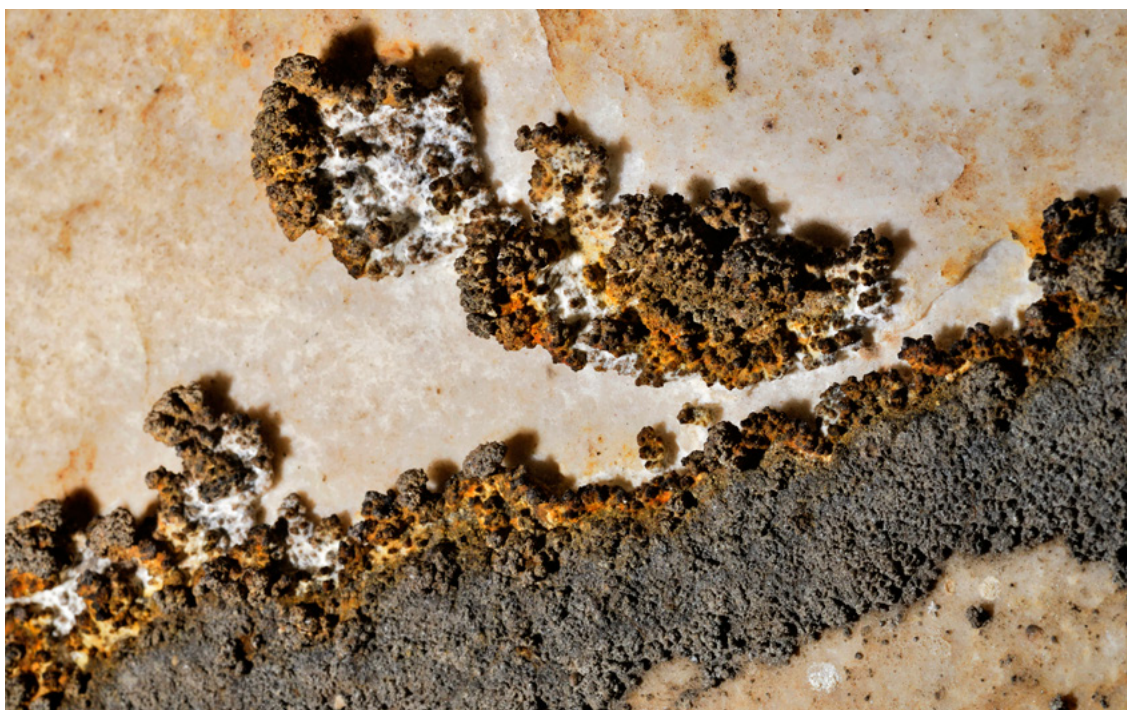
As Mais Profundas (em metros)

1	Gruta do Centenário	Mariana (MG)	484
2	Gruta da Bocaina	Mariana/Catas Altas (MG)	404
3	Gruta Alaouf	Mariana (MG)	294
4	Gruta Casa de Pedra	Iporanga (SP)	292
5	Lago Azul	Niquelândia (GO)	274
6	Abismo do Juvenal	Iporanga (SP)	241
7	Caverna do Ouro Grosso	Iporanga (SP)	228
8	Gruta de Torras	Andaraí (BA)	213
9	Lagoa Misteriosa	Jardim (MS)	211
10	Gruta da Água Suja	Iporanga (SP)	202
11	Abismo Los Três Amigos	Guapiara (SP)	200
12	Gruta da Montanha	Ipupiara(BA)	197

Referências

RUBBIOLI, E. et al. *Cavernas: Atlas do Brasil Subterrâneo*. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019. 344p.

RUBBIOLI, E.; MOURA, V. *Mapeamento de Cavernas – Guia Prático*. Belo Horizonte: Redespeleo Brasil, 2005. 93p.



**Biologia subterrânea:
conceitos gerais e
aplicação na interpretação
e análise de estudos de
impacto ambiental**

Rodrigo Lopes Ferreira





Os ambientes subterrâneos

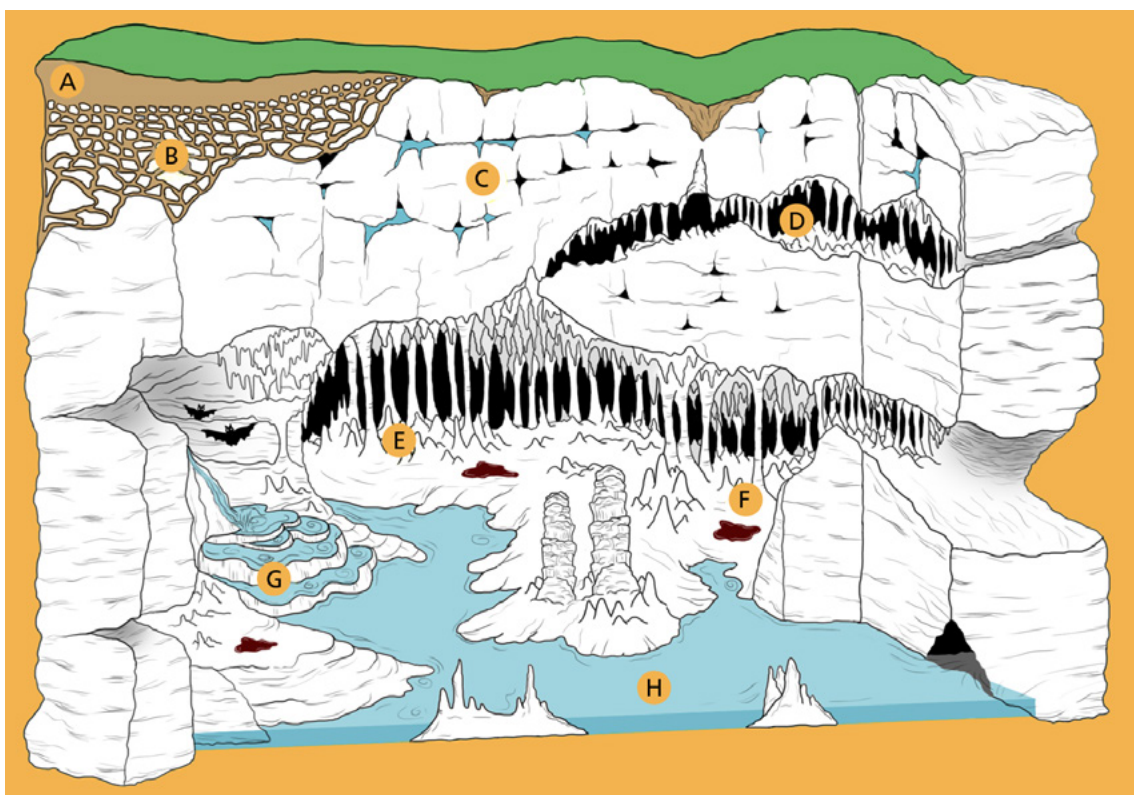
Os ambientes subterrâneos compreendem extensas redes de espaços de diferentes dimensões e graus distintos de conectividade (FIGURA 1). As cavernas (macrocavernas), nessa perspectiva, compreendem somente os espaços de maiores dimensões capazes de serem acessados pelo ser humano. Pesquisadores europeus, especialmente Racovitã (1907), já supunham que fendas nas rochas e nas cavernas (inacessíveis aos seres humanos) deveriam abrigar a maior parte dos organismos que habitam em cavernas. Assim, inúmeros organismos (especialmente invertebrados) são capazes de circular e mesmo estabelecer populações viáveis em espaços menores, como interstícios e fendas na rocha ou em seu contato com o solo. Dessa forma, existe, desde a superfície até o interior de uma caverna, uma sucessão de habitats subterrâneos que se apresentam em diferentes configurações.

O primeiro tipo de “compartimento” de habitat compõe os chamados espaços intersticiais do solo, composto por pequenas fissuras e rachaduras associadas ao manto de intemperismo. Tal conjunto de habitats pode ser denominado compartimento endógeno, sendo acessado principalmente por organismos edafobiontes (que vivem no solo), que podem tanto acessar estes habitats por meio de suas minúsculas discontinuidades ou mesmo ativamente, por meio da escavação direta do solo (no caso de organismos fossoriais). O solo, ao aproximar-se do substrato rochoso, pode mesclar-se a um conjunto de fendas de maior calibre conformadas por discontinuidades na rocha ou mesmo por espaços existentes entre blocos oriundos da própria fragmentação da porção mais superficial da rocha. Tal região, onde existe esse contato do solo com rochas fragmentadas, recebe o nome

de meio subterrâneo superficial (MSS), que compõe uma variedade importante de habitats para inúmeras espécies. Juberthie *et al.* (1980) foram os primeiros a definir e caracterizar o MSS (segundo os autores, "Milieu Souterrain Superficiel").

Culver e Pipan (2014) introduziram formalmente o conceito de "habitats subterrâneos rasos" ("Shallow Subterranean Habitats" - SSHs), listando características destes habitats (incluindo as compartilhadas). Os SSHs são mais estreitamente ligados à superfície do que às cavernas, sendo também mais variáveis em termos ambientais e possuindo maiores níveis de nutrientes e de matéria orgânica. SSHs incluem habitats hipotelminorréicos, epicarste, MSS, aquíferos calcários, habitats intersticiais ao longo dos rios e córregos, dentre outros. Com relação às condições ambientais, compartilham com as cavernas somente a ausência permanente de luz.

Figura 1 – Bloco-diagrama representando uma caverna e outros habitats subterrâneos, bem como suas interconexões



Legenda: A) Solo; B) Meio Subterrâneo Superficial (MSS); C) Epicarste; D) Galerias fósseis; E) Espeleotemas em galeria hidrologicamente ativa; F) Guano; G) Poças d'água em represas de travertinos (águas de percolação); H) Nível de base

Fonte: Ilustrado por Ana Clara Moreira Viana

A rocha encaixante pode possuir espaços gerados por discontinuidades da própria rocha que foram sendo progressivamente expandidos pela lenta ação da água. Muitos desses espaços (em geral de volumes reduzidos) são capazes de estocar a água das chuvas, que lentamente vão escoando para porções mais profundas, e muitas vezes mantêm-se encharcados ou bastante úmidos por todo o ano, possibilitando o estabelecimento de diferentes populações (principalmente de invertebrados). Tal conjunto de habitats constitui o chamado epicarste. Alguns estudos realizados nos últimos anos têm revelado comunidades ricas, muitas vezes formadas por populações de espécies altamente especializadas a esse modo de vida. Finalmente, os grandes espaços subterrâneos localizados sob essa

região epicárstica compreendem as chamadas macrocavernas, podendo este ser considerado o hábitat mais tipicamente hipógeo.

Cada um desses compartimentos possui características distintas, que, por sua vez, geram pressões seletivas diferenciadas que continuamente atuam sobre as populações das espécies residentes. Dessa forma, ao longo do tempo, a evolução vem produzindo morfologias que foram diferencialmente selecionadas em cada um desses compartimentos de habitats. A morfologia corpórea predominantemente encontrada em espécies de superfície, denominada **epigeomórfica** (FIGURA 2), compreende basicamente a elevada pigmentação tegumentar (primariamente como forma de proteção contra a radiação solar, e secundariamente como estratégias de atração sexual, aposematismo, camuflagem, dentre outras) e a manutenção de estruturas oculares bem desenvolvidas (já que a luz é uma importante pressão seletiva presente). Nos compartimentos endógenos e epicársticos predomina uma morfologia denominada **endogeomórfica** (FIGURA 2), que se caracteriza pela redução das estruturas oculares e da pigmentação tegumentar (já que nestes compartimentos afóticos a pressão da luz deixa de atuar na “manutenção” destas características). Tais organismos, entretanto, apresentam apêndices locomotores e sensoriais frequentemente não alongados, em função dos espaços de reduzido tamanho que configuram esses habitats. Finalmente, a morfologia que frequentemente evolui em espaços subterrâneos de maior volume (macrocavernas – ou sistemas hipógeos) é chamada de **hipogeomórfica**, sendo caracterizada, além da tendência à redução da pigmentação tegumentar e dos olhos, pelo alongamento de apêndices (locomotores e sensoriais) (FIGURA 2). Tal alongamento, selecionado em “macroespaços”, aparentemente está ligado à compensação sensorial desses organismos, tendo em vista a inexistência de luz nesses habitats e também à maior facilidade de deslocamento pelos substratos das cavernas, muitas vezes encharcados. A cada uma dessas morfologias, associam-se diferentes categorias de espécies que podem ser encontradas em cavernas, como será discutido à frente. Finalmente, existem organismos que apresentam morfologia **ambimórfica**, isto é, com características “mescladas” de outras morfologias.

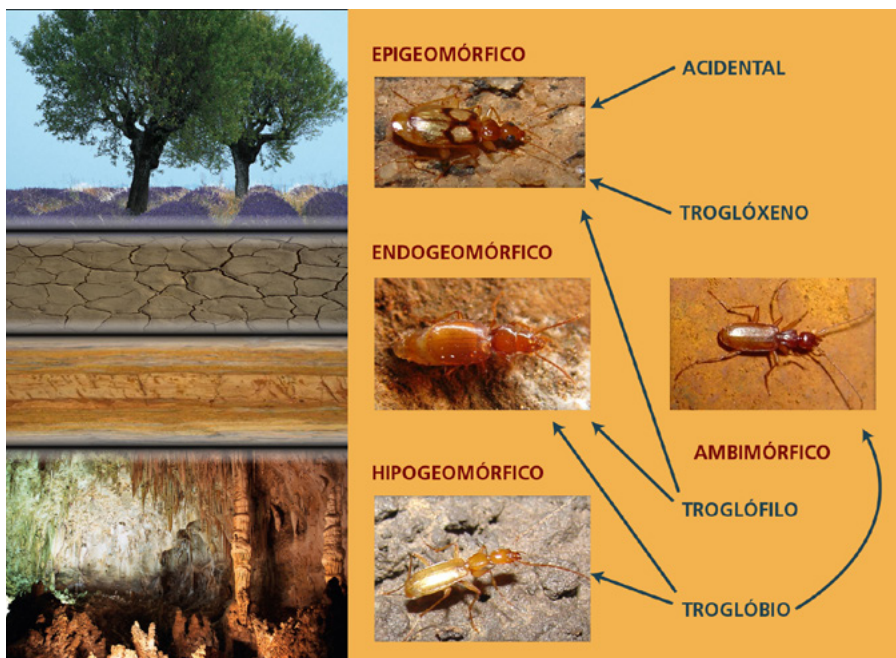


Figura 2 – “Compartimentos” de habitats desde o ambiente epígeo até uma macrocaverna

Legenda: Em vermelho, as categorias de morfologia diferenciada mais frequentemente associadas a cada compartimento (coleópteros Carabidae foram utilizados para demonstrar cada morfologia) e, em verde, as categorias ecológico-evolutivas associadas às suas morfologias preferenciais (ou mais frequentemente encontradas)
Fonte: Ilustrado por Rodrigo Lopes Ferreira.

Os ambientes externos, ou sistemas epígeos, são utilizados como base para a comparação das condições ecológicas prevalentes nos ambientes subterrâneos, chamados de sistemas hipógeos. Dessa forma, o meio cavernícola é caracterizado, principalmente, pela ausência permanente de luz, fazendo com que muitas das características bióticas e abióticas desses ambientes sejam influenciadas pela constância desta pressão ambiental. Geralmente, o ambiente físico subterrâneo varia menos que o ambiente epígeo circundante e os parâmetros ambientais caracterizam-se por permanecerem praticamente estáveis na maioria das cavernas (POULSON; WHITE, 1969; CULVER, 1982).

Em cavernas mais extensas, a temperatura é caracterizada por apresentar pouca oscilação nos locais mais distantes da entrada. Os valores de temperatura, geralmente, aproximam-se da média anual do ambiente epígeo (BARR, 1967(a); BARR; KUEHNE, 1971). Já em cavernas menores, as variações são mais evidentes, devido à maior influência do meio externo. Além disso, o ambiente subterrâneo é caracterizado pela elevada umidade que, muitas vezes, tende à saturação (POULSON; WHITE, 1969; HOWARTH, 1983). Dessa forma, o meio cavernícola pode ser caracterizado como um ambiente de elevada estabilidade ambiental, devido à ausência permanente de luz, e temperatura e umidade constantes (POULSON; WHITE, 1969; CULVER, 1982). Porém tais condições não são estáticas e podem sofrer alterações ao longo do tempo, dependendo de fatores como dimensão da caverna, localização, morfologia e orientação das entradas, dentre outros.

Tradicionalmente, podem ser distinguidas três zonas ambientais caracterizadas pelas diferenças entre luminosidade, temperatura e distribuição de organismos (CAMACHO, 1992). São elas: *i*) **zona de entrada** (ou eufótica): é aquela onde a luz incide diretamente e tanto a temperatura quanto a umidade relativa do ar acompanham as variações externas. É a região mais influenciada pelo meio epígeo; *ii*) **zona de penumbra** (ou disfótica): há incidência indireta de luz e flutuações de temperatura menores quando comparadas às da zona de entrada. Sua extensão pode variar de acordo com a época do ano e a posição da entrada em relação ao sol (dentre outros fatores); *iii*) **zona afótica**: região onde há absoluta ausência de luz e habitual tendência à estabilidade ambiental.

Como as zonas de entrada de cavernas são regiões onde as variações ambientais são fortemente influenciadas pelo ambiente externo, fatores como luminosidade, temperatura e umidade também apresentam variações diárias e sazonais (CULVER, 1982). Segundo Prous *et al.* (2004), regiões próximas às entradas demonstram gradientes de modificações estruturais, biológicas e físicas, criando uma zona de transição entre os sistemas epígeos e hipógeos. Dessa forma, a entrada de uma caverna pode ser considerada um ecótono (PROUS *et al.*, 2015). Essa região localiza-se em uma zona diferenciada pelo equilíbrio entre a disponibilidade de recursos (característica epígea) e pela estabilidade ambiental (característica hipógea). Tal fato indica que a zona de entrada pode funcionar como um filtro entre dois ambientes adjacentes, permitindo que somente organismos pré-adaptados possam atravessar e colonizar as cavernas.

O aporte de alimento e a dinâmica trófica em sistemas subterrâneos

A ausência permanente de luz solar exclui a possibilidade da ocorrência de produtores fotossintetizantes em locais profundos das cavernas. Dessa forma, a base da produção primária em algumas

cavernas é realizada por meio de organismos quimioautotróficos, principalmente bactérias que utilizam ferro ou enxofre (SARBU *et al.*, 1996; CULVER, 1982). Porém a maior parte da produção nos ecossistemas cavernícolas é de origem secundária e o alimento aportado à caverna é de origem alóctone. Esse fato faz com que a teia alimentar hipógea seja fundamentada em detritos, havendo o predomínio de organismos decompositores nos sistemas hipógeos (SIMON, 2000; SOUZA-SILVA, 2003).

Fezes ou cadáveres de animais que transitam nas cavernas com certa regularidade ou dos que entram ali casualmente, assim como a presença de raízes vegetais, podem ser também importantes fontes de recursos alimentares, tanto para as comunidades terrestres quanto para as aquáticas. O tipo e a qualidade de recurso e a forma de disseminação no sistema são determinantes da composição e da abundância da fauna (FERREIRA, 2004). Além disso, os recursos alimentares alóctones mantêm populações de organismos de todos os níveis tróficos presentes nas cavernas (FERREIRA; MARTINS, 1998, 1999).

Assim, a matéria orgânica é importada para as cavidades por agentes biológicos ou por agentes físicos, de modo contínuo ou intermitente. O alimento também pode penetrar nas cavernas através da água de percolação, das aberturas verticais nos tetos e das paredes ou em “pulsos”, carreado por rios ou riachos (GILBERT *et al.*, 1994). Essa movimentação de nutrientes e detritos do meio epígeo para o meio hipógeo é frequente; em alguns casos, 100% da matéria orgânica é importada (CULVER, 1982; HOWARTH, 1983).

No meio externo, detritos podem ser usados como alimento por inúmeros invertebrados aquáticos (MINSHALL, 1967; ALLAN, 1995; GALAS *et al.*, 1996). O aporte desses para rios e pequenos riachos é feito, principalmente, pela vegetação das margens, de acordo com sua estrutura e seu estado de conservação (ALLAN, 1995). Após cair nos rios, a água transporta esses detritos (troncos, galhos, folhas, bactérias e animais epígeos) em direção às cavernas. No meio hipógeo, fragmentos vegetais são depositados ao longo dos cursos d’água, constituindo depósitos de matéria orgânica (BARR, 1967a; SIMON, 2000; FERREIRA; HORTA, 2001). Esses depósitos são lentamente decompostos por bactérias, fungos e demais invertebrados detritívoros (GALAS *et al.*, 1996; SIMON, 2000).

No entanto, estudos relacionados à caracterização dos processos biológicos de produção, transferência e processamento de nutrientes em sistemas cavernícolas são pouco frequentes. Esses estudos são fundamentais para a compreensão da dinâmica trófica desses ambientes que, por sua vez, determina diretamente a estruturação das comunidades subterrâneas, fornecendo ainda importantes subsídios para a conservação da fauna cavernícola.

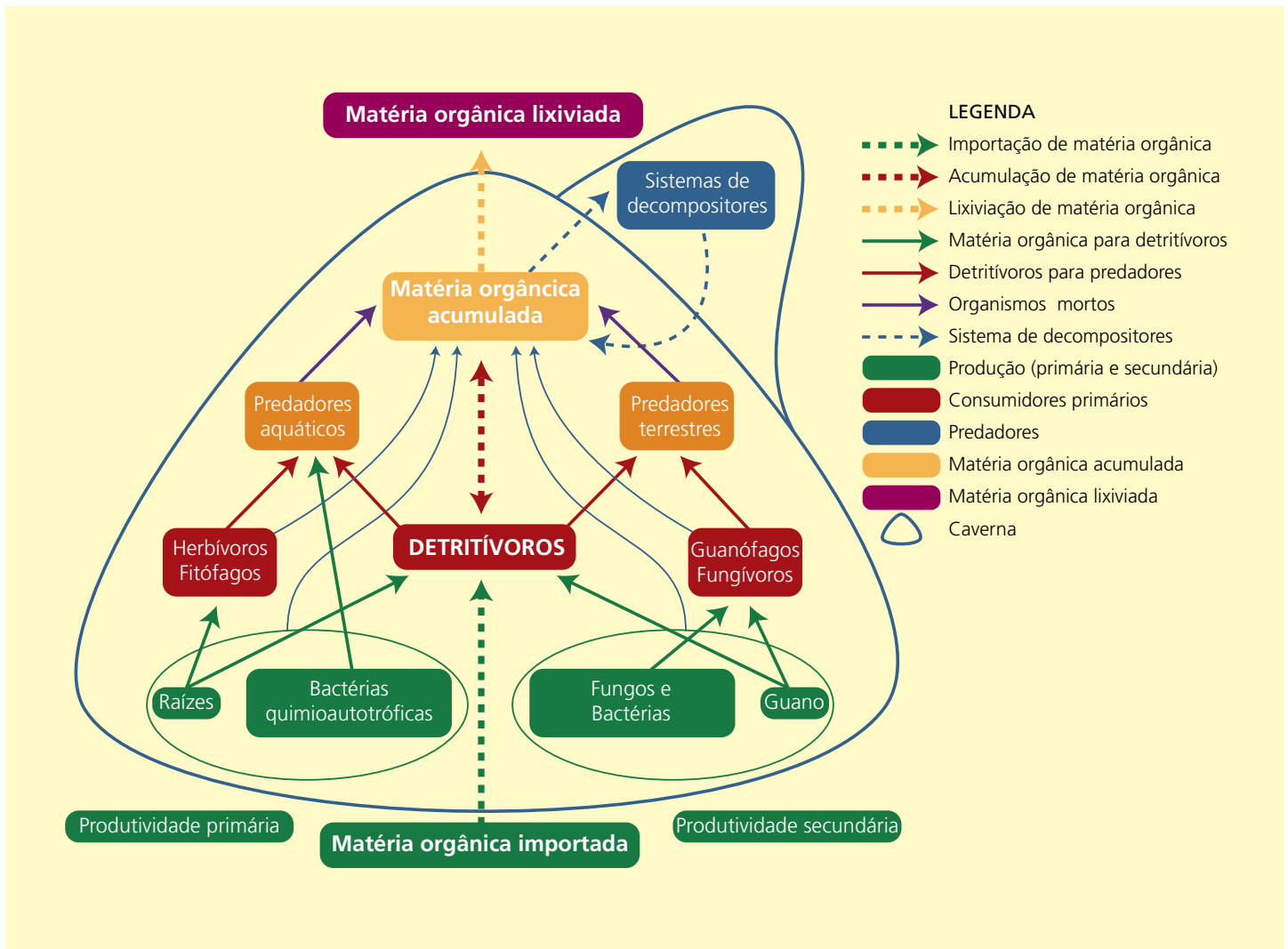
Simon (2000) analisou a dinâmica da matéria orgânica e a estrutura trófica em águas de ecossistemas subterrâneos cársticos em Dorvan-Cleyzieu, na França. O estudo demonstrou a influência de padrões temporais de fluxos de inundação no aporte e na distribuição espacial da matéria orgânica e também na distribuição do biofilme em um aquífero. Nesse mesmo estudo, Simon (2000) investigou os processos de decomposição de folhas e de gravetos e o papel de várias fontes de matéria orgânica na dinâmica trófica no riacho que percorre a Organ Cave, nos EUA. A matéria orgânica grossa (CPOM) se torna uma fonte alternativa de energia, além da dissolvida (DOM) em cavernas com

grandes entradas. A caverna é eficiente em reter CPOM e a perda de massa de folhas é mais rápida que a de gravetos, que representam, então, uma fonte mais estável de carbono. Assim, a matéria orgânica fina (FPOM) e a dissolvida (DOM) tornam-se importantes fontes de alimento em locais mais distantes das entradas, onde o transporte de CPOM é pouco provável. Consequentemente, a cadeia trófica cavernícola pode ser estruturada pela presença de raspadores de biofilme, coletores, fragmentadores e predadores (SIMON, 2000).

Graening (2000) conduziu um estudo de dinâmica trófica em uma caverna calcária denominada Springs Cave, nos EUA. Essa caverna destaca-se por ter suas características pristinas alteradas pela poluição por nutrientes, metais pesados e coliformes. Mesmo assim, a quantificação do aporte de energia no riacho subterrâneo caracterizou-o como um sistema oligotrófico, no qual a matéria orgânica dissolvida (DOM) é fonte de recurso dominante. Acredita-se que a drástica redução da população de morcegos ao longo dos anos tenha diminuído o aporte de guano, reduzindo a sua contribuição potencial para a dinâmica trófica do ambiente. A retenção de nutrientes em Springs Cave é baixa, indicando que muito da matéria orgânica aportada à cavidade é exportada sem ser utilizada. A densidade microbiana é significativamente mais alta durante fluxos de inundação e seu crescimento não é vinculado ao tipo de recurso, mas, sim, à quantidade que é importada para a caverna. Além disso, a comunidade microbiana é limitada à presença de recurso, indicando que a adição de nutrientes dentro do ecossistema cavernícola poderia provocar aumento na atividade microbiana e de biomassa (GRAENING, 2000).

No Brasil, o primeiro trabalho enfocando a disponibilidade e o processamento de recursos alimentares em um ambiente subterrâneo foi realizado por Souza-Silva (2003). A dinâmica trófica cavernícola foi avaliada nos meios aquáticos e terrestres da Lapa do Córrego dos Porcos, em Damianópolis, Goiás. Foram quantificados a disponibilidade e o consumo de recursos alimentares e foi analisada a estrutura da mesofauna, além da caracterização dos agentes e das vias de produção de matéria orgânica. No ambiente terrestre, a principal influência na composição, na distribuição e na abundância de invertebrados é determinada pelo guano de morcegos. Esse produto secundário é um recurso alimentar efêmero, dependente de uma constante produção para a manutenção das comunidades terrestres. No ambiente aquático, verificou-se que os detritos penetram em maior quantidade na estação chuvosa do ano. Entretanto, esse maior aporte é acompanhado também por um processo de lixiviação mais intenso. Os fluxos de inundação dificultam a retenção e o processamento de recursos alimentares no riacho. Portanto, os detritos vegetais acumulam-se no sedimento e são colonizados pela fauna, principalmente nas estações secas. Como fonte energética adicional, a presença de raízes submersas proporciona uma fonte diversa de recursos e micro-habitats, suprimindo a depleção causada pela ação lixiviadora dos fluxos de inundação (SOUZA-SILVA, 2003).

A partir das informações básicas a respeito da dinâmica trófica cavernícola, o fluxo energético desses ecossistemas pode ser generalizado em determinadas estruturas e processos relativamente simplificados, principalmente quando comparados a sistemas epígeos (FIGURA 3).

Figura 3 – Diagrama representando as principais inter-relações tróficas em uma caverna

Fonte: Ferreira (2004)

A fauna encontrada em cavernas e outros habitats e subterrâneos

Múltiplos critérios têm sido utilizados para a classificação dos organismos cavernícolas em função de suas características peculiares. Desde a primeira classificação, atribuída a Dane Schiödte, em 1849, inúmeras propostas e redefinições de termos e conceitos foram feitas na tentativa de enquadrar a fauna cavernícola em categorias corretas (CAMACHO, 1992). Uma das classificações mais utilizadas no Brasil é a do sistema Schinner-Racovitza (modificado em HOLSINGER; CULVER, 1988), no qual as espécies cavernícolas podem ser enquadradas em três grupos:

1. os **trogló xenos** são os regularmente encontrados no ambiente subterrâneo, mas que, obrigatoriamente, devem sair das cavernas para completar seu ciclo de vida. Ocorrem, em geral, nas porções mais próximas às entradas, mas suas populações podem, eventualmente, também ocorrer em porções mais interiores. Muitos desses organismos são responsáveis pela importação de recursos alimentares provenientes do meio epígeo em cavernas, especialmente nas que são permanentemente secas. Tais espécies frequentemente possuem morfologia epigeomórfica (FIGURA 4);

Figura 4 – Algumas espécies trogló xenas encontradas em cavernas do Brasil



Legenda: A) Colônia mista de morcegos em uma caverna arenítica, Araripe (CE). É possível observar na imagem pelo menos três espécies: *Natalus macrourus* (alaranjados), *Pteronotus gymnonotus* (costas sem pelos) e *Carollia perspicillata* (centro da foto); B) *Platyrrhinus* sp.; C) *Desmodus rotundus*; D) *Chrotopterus auritus*; E) *Goniosoma capixaba*; F) *Goniosoma vatrax*
Fonte: Fotografias de Rodrigo Lopes Ferreira, excetuando-se a letra "D", que é de autoria de Robson Zampaulo

2. os **troglófilos** são os organismos capazes de completar todo o seu ciclo de vida no meio hipógeo e/ou epígeo. No meio epígeo, tanto os troglóxenos quanto os troglófilos, geralmente, ocorrem em ambientes úmidos e sombreados. Certas espécies podem, ainda, ser troglófilas sob certas circunstâncias e troglóxenas em outras (por exemplo, em cavernas que apresentam baixa disponibilidade de alimento). Tais espécies podem exibir diferentes morfologias (FIGURA 5);

Figura 5 – Algumas espécies troglóxenas encontradas no Brasil



Legenda:

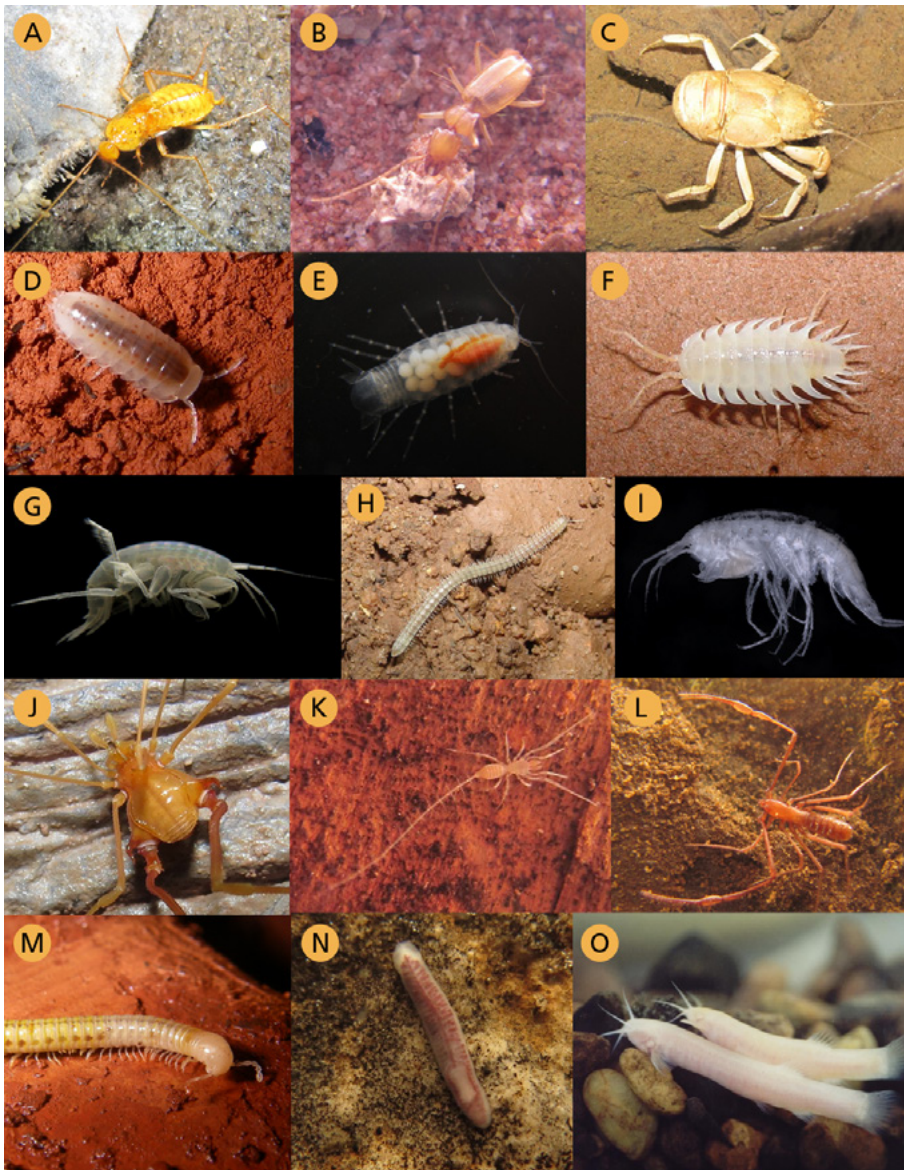
A) *Endecous bahiensis* (Ensifera: Phalangopsidae), Ourulândia (BA);
 B) *Lutzomyia* sp. (Diptera: Psychodidae), Mateus Leme (MG);
 C) *Zelurus zikani* (Hemiptera: Reduviidae), Santa Luzia (BA);
 D) *Psyllipsocus* sp. (Psocoptera: Psyllipsocidae), Pains (MG);
 E) *Zophobas* sp. (Coleoptera: Tenebrionidae), Cabeceira Grande (MG);
 F) *Blaberus* sp. (Blattodea: Blaberidae), Palmas (TO);

G) *Venezillo* sp. (Isopoda: Armadillidae), Pau Brasil (BA);
 H) *Neocarus* sp. (Opilioacarida: Opilioacaridae), Coronel José Dias (PI);
 I) *Eusarcus aduncus* (Opiliones: Gonyleptidae), Pau Brasil (BA);
 J) *Heterophrynus vesanicus* (Amblypygi: Phrynidae), Luislândia (MG);
 K) *Loxosceles* sp. (Araneae: Sicariidae), Altinópolis (SP);
 L) *Enoploctenus* sp. (Araneae: Ctenidae), Pains (MG)

Fonte: Fotografias de Rodrigo Lopes Ferreira

3. os troglóbios restringem-se ao ambiente cavernícola e podem apresentar diversos tipos de especializações morfológicas, fisiológicas e no comportamento que, provavelmente, evoluíram em resposta às pressões seletivas presentes em cavernas e/ou à ausência de pressões seletivas típicas do meio epígeo. Frequentemente, nesses organismos, observa-se uma tendência à redução das estruturas oculares, da pigmentação e ao alongamento de apêndices, especialmente aqueles de função sensorial. Além dessas características morfológicas, tais espécies também podem exibir especializações fisiológicas, como a tendência à redução da taxa metabólica basal, dentre outras. Tais espécies frequentemente possuem morfologias variáveis, ocorrendo desde organismos endo-geomórficos até hipogeomórficos (FIGURA 6).

Figura 6 – Algumas espécies troglóbias encontradas no Brasil



Legenda:

- A) *Litoblatta camargoi* (Blattodea: Blattellidae), Iraquara (BA);
 B) *Coarazuphium caatinga* (Coleoptera: Carabidae), Campo Formoso (BA);
 C) *Aegla cavernicola* (Decapoda: Aeglidae), Iporanga (SP);
 D) *Circoniscus carajasensis* (Isopoda: Scleropactidae), Canaã dos Carajás, (PA);
 E) *Typhlocirolana* sp.n (Isopoda: Cirolanidae), Governador Dix-Sept Rosado (RN);
 F) *Iuiuniscus iuiuiensis* (Isopoda: Styloniscidae), Iuiu (BA);
 G) *Spelaeogammarus titan* (Amphipoda: Artesiidae), Santa Maria da Vitória (BA);
 H) *Dobrodesmus mirabilis* (Polydesmida: Dobrodesmidae), Ituaçu (BA);
 I) *Seborgia* sp.n (Amphipoda: Seborgiidae), Felipe Guerra (RN);
 J) *Iandumoema uai* (Opiliones: Gonyleptidae), Itacarambi (MG);
 K) *Eukoenenia maquinensis* (Palpigradi: Eukoeneniidae), Cordisburgo (MG);
 L) *Spelaeobochica muchmorei* (Pseudoscorpiones: Bochiidae), Iporanga (SP);
 M) *Pseudonannolene spelaea* (Diplopoda: Pseudonannolenidae), Parauapebas (PA);
 N) *Hausera hauseri* (Tricladida: Dimarcusidae), Felipe Guerra (RN);
 O) *Trichomycterus itacarambiensis* (Siluriformes: Trichomycteridae), Itacarambi (MG)

Fonte: Fotografias de Rodrigo Lopes Ferreira, excetuando-se a letras "D" e "M", que são de autoria de Robson Zampaulo.

Outra classificação de fauna cavernícola, menos utilizada no Brasil, embora bastante utilizada em países da Europa e da América do Norte, agrupa os organismos aquáticos em também três categorias baseadas no sistema Schinner-Racovitza (GILBERT *et al.*, 1994):

1. os **estigó xenos** são organismos aquáticos cavernícolas que não têm afinidade alguma com o ambiente subterrâneo, mas que ocorrem acidentalmente em sedimentos aluviais nas cavernas. Esses influenciam os processos de aporte e consumo de matéria em águas subterrâneas como presas e/ou predadores;
2. os **estigó filis** em comparação com os anteriores apresentam maior afinidade com o ambiente cavernícola, principalmente porque exploram ativamente os recursos alimentares e buscam proteção contra condições adversas resultantes de fatores estocásticos externos;
3. os **estigó biontes** são especializados e restritos ao interior dos ambientes subterrâneos. Nesses organismos, as estruturas oculares e a pigmentação são reduzidas ou ausentes e as estruturas sensoriais são mais desenvolvidas do que em afins epígeos.

É imprescindível que a inclusão de uma espécie em quaisquer categorias necessite de uma avaliação aprofundada da história natural do organismo estudado. No entanto, a classificação mais complexa e a que mais sofreu modificações é a que tenta separar os animais que entram casualmente nas cavernas dos que entram voluntariamente nesse ambiente (comumente chamados de “verdadeiros cavernícolas”). Aqui, de forma a facilitar a compreensão dos termos, foi acrescida uma categoria que, na maioria das vezes, é excluída dos estudos de fauna cavernícola: os organismos **acidentais**.

As espécies “acidentais”, diferentemente dos trogló xenos, compreendem indivíduos epígeos que penetram (acidentalmente ou não) no ambiente cavernícola, mas não apresentam nenhuma pré-adaptação que proporcione a sua sobrevivência dentro das cavernas. Essas espécies, embora não sejam “verdadeiros cavernícolas”, são importantes em muitos sistemas hipógeos, principalmente naqueles em que a entrada de alimento é restrita, já que as fezes e, principalmente, os cadáveres desses animais são importantes fontes de recursos alimentares, tanto para as comunidades aquáticas quanto para as terrestres.

A Figura 7 ilustra as principais modificações encontradas em espécies troglóbias (neste caso, de morfologia hipogeomórfica). As espécies da figura correspondem a hemípteros das famílias Kinnaridae (FIGURA 7A,B) e Cixiidae (FIGURA 7C,D) encontrados em cavernas carbonáticas (Serra de Iuiu, Bahia) e ferruginosa (Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais). “Cigarrinhas” troglóbias são encontradas em diversas partes do mundo, e o Brasil vem se destacando nos últimos anos pela descoberta de novas espécies. Até o momento, conhecem-se três espécies troglóbias para o Brasil, uma da família Cixiidae (*Ferricixius davidi*, de caverna ferruginosa - FIGURA 7D) e duas da família Kinnaridae (*Kinnapotiguara troglobia*, de cavernas do Rio Grande do Norte, e *Iuiuia caeca*, de cavernas de Iuiu, Bahia – FIGURA 7B). As modificações morfológicas observadas nessas espécies incluem a ausência de estruturas oculares, a total despigmentação do tegumento e a redução das asas (FIGURA 7B,D). Cigarrinhas epígeas possuem olhos e asas bem desenvolvidas, além de forte pigmentação (FIGURA 7A,C).

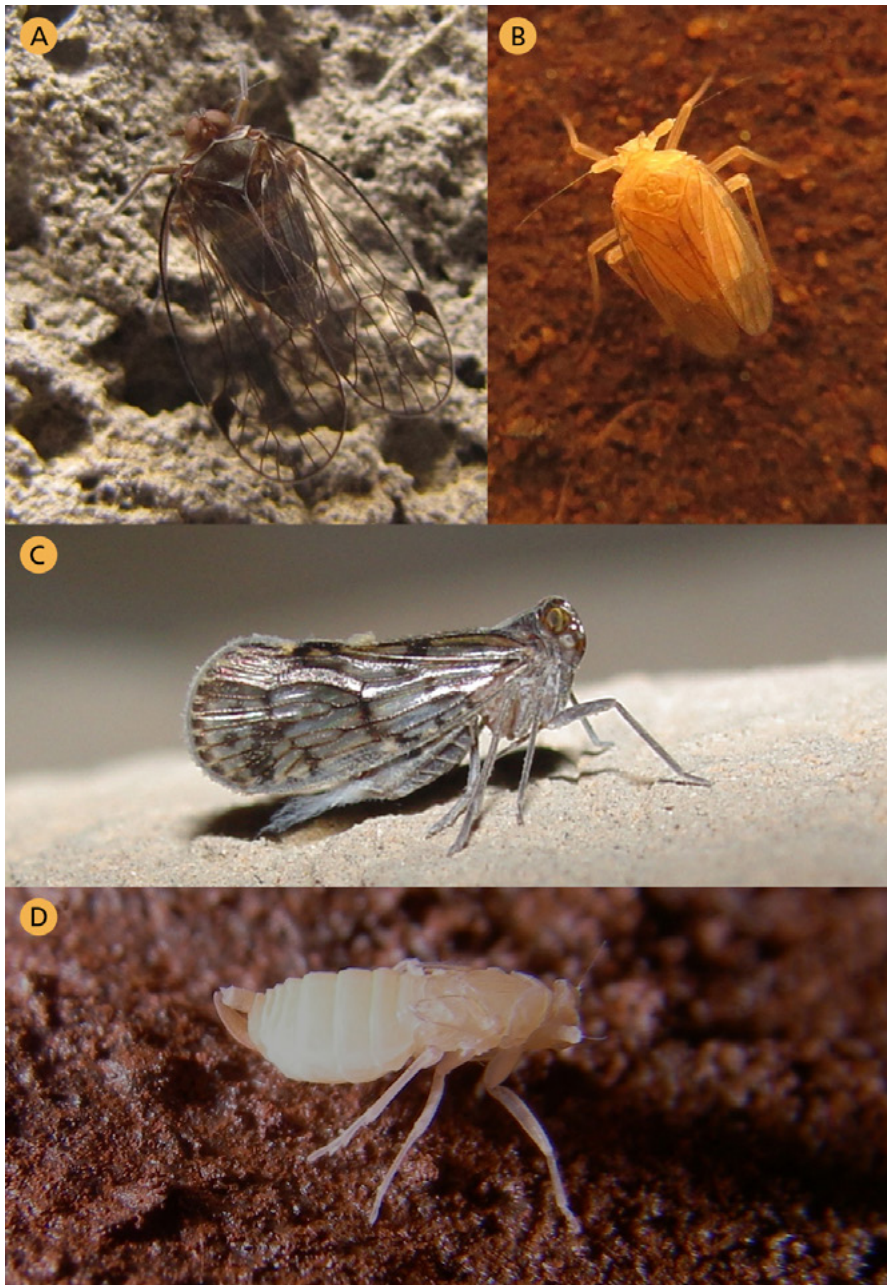


Figura 7 – Hemípteros troglóbios e troglófilos das famílias Kinnaridae (A, B) e Cixiidae (C, D) encontrados no Brasil

Legenda:

A) Kinnaridae não troglomórfico, Pains (MG);
 B) *luiuia caeca* (troglomórfico), luiu (BA);
 C) *Pintalia* sp. (Cixiidae não troglomórfico), Pains (MG);
 D) *Ferricixius davidi* (Troglomórfico), Itabirito (MG)
 No caso das espécies troglomórficas (B, D), notar a completa despigmentação do corpo, anoftalmia e redução das asas (extremamente reduzidas em *Ferricixius davidi* – D).

Fonte: Fotografias de Rodrigo Lopes Ferreira (excetuando-se a letra "D", de autoria de Marcus Paulo de Oliveira)

O conceito de espécie troglóbia diz respeito à sua restrição nos habitats subterrâneos. No entanto, para saber precisamente se uma espécie é restrita aos ambientes hipógeos, é necessário conhecer muito bem a fauna externa. Para as regiões tropicais (em especial, a região neotropical), a megadiversidade externa associada a um enorme grau de desconhecimento da fauna torna praticamente impossível determinar se uma espécie é ou não troglóbia de acordo com sua distribuição. Dessa forma, na tentativa de se aproximar de um diagnóstico mais confiável a respeito do real "status" de determinada espécie, foi criado o termo troglomorismo.

Troglomorfismos

Christiansen (1962) propôs o termo "troglomorfismo" para caracteres morfológicos que convergiram como resultado de pressões seletivas convergentes nos ambientes cavernícolas. Tal conceito refere-se a características morfológicas que podem ser utilizadas na determinação de espécies potencialmente troglóbias, já que resultam de processos evolutivos ocorrentes após o isolamento de populações em cavernas. Embora existam troglomorfismos mais "genéricos" (como redução de olhos e pigmentos), muitos são específicos a cada grupo, não representando sempre as mesmas características. Sendo assim, para certos grupos, ausência de olhos e de pigmentos, por exemplo, podem ser consideradas troglomorfismos, enquanto, para outros, não.

Atualmente várias características morfológicas podem ser listadas como troglomorfismos para diferentes grupos de organismos: especialização de órgãos sensoriais; alongamento dos apêndices; pseudofisiogastria (Coleoptera); redução de olhos, pigmentos e asas; forma corporal comprimida ou deprimida (Hexapoda); aumento do volume dos ovos; tamanho aumentado (Collembola, Arachnida); alongamento de unguis (Collembola); modificação das patas (Collembola, Auchenorrhyncha); redução ou perda de escamas (peixes teleósteos); perda de células pigmentadas; cutícula fina; forma alongada do corpo (peixes teleósteos, Arachnida); cabeças deprimidas, em forma de "pá" (peixes teleósteos, salamandras); redução ou perda da bexiga natatória (peixes teleósteos), dentre outros (CHRISTIANSEN, 2012 – FIGURA 8).

Figura 8 – Principais caracteres troglomórficos observados em organismos troglóbios, segundo Christiansen (1962)



Fonte: Fotografias de Rodrigo Lopes Ferreira

Segundo Culver e Pipan (2015), troglomorfismos correspondem a uma hipótese sobre a morfologia de organismos restritos a habitats subterrâneos, em vez de apenas uma definição morfológica. Tais autores definiram o chamado “paradigma do troglomorfismo”. Tal paradigma possui três componentes básicos: i) organismos cavernícolas são altamente convergentes em função de um ambiente seletivo convergente; ii) a convergência morfológica inclui tanto caracteres regressivos quanto construtivos e iii) o ambiente seletivo “convergente” inclui baixa disponibilidade alimentar, baixa variação ambiental e ausência de luz. No entanto, habitats subterrâneos rasos também apresentam fauna troglomórfica, com espécies sem pigmentos e olhos, e, dependendo das dimensões do habitat (tamanho de poro), apêndices alongados. No entanto os habitats subterrâneos rasos compartilham com cavernas, em termos de características gerais, somente a ausência permanente de luz, já que são habitats mais variáveis e com maior disponibilidade de recursos alimentares. Assim, cada vez mais, entende-se que características troglomórficas podem estar mais ligadas à ausência de luz do que a outras características prevalentes em cavernas (como oligotrofia – ver tópico “Evolução em ambientes subterrâneos”).

Para a maioria dos grupos, a redução da pigmentação melânica, das estruturas oculares e o alongamento de apêndices podem ser considerados características troglomórficas. Entretanto, as características a serem utilizadas para esses diagnósticos diferem dependendo do táxon analisado. Certos grupos, por exemplo, possuem espécies sempre despigmentadas e anoftálmicas, mesmo no ambiente epígeo (p.ex., Palpigradi). Nesses casos, os troglomorfismos são mais específicos (como alongamento dos flagelômeros, aumento no número de órgãos laterais, dentre outros, para Palpigradi – FIGURA 9). Dessa forma, é necessário conhecer a biologia de cada grupo no intuito de diagnosticar efetivamente a existência ou não desses caracteres.

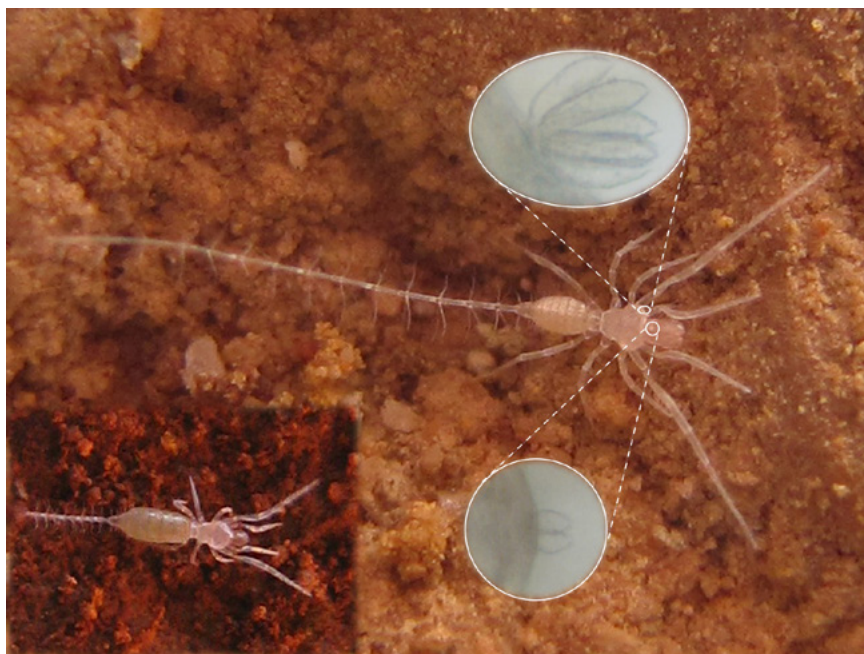


Figura 9 – Troglomorfismos observados em Palpigradi: *Eukoenenia maquinensis* (espécime maior da figura - troglóbio), em que são destacados os órgãos frontais e laterais (maior número de lâminas – 5 visíveis). Além disso, percebe-se o alongamento dos apêndices, com destaque para o primeiro par de pernas e o flagelo. No canto inferior esquerdo, observa-se *Eukoenenia florenciae* (habitante de solo). Notar os apêndices não alongados. Nessa espécie, os órgãos laterais (não ilustrados) apresentam três lâminas, enquanto em *E. maquinensis*, existem seis lâminas)

Fonte: Fotografias de Rodrigo Lopes Ferreira

Além disso, é sempre fundamental associar as características morfológicas encontradas em cada espécie com o ambiente externo à caverna à qual a referida espécie se associa. Em muitos casos, a análise da morfologia, por si, pode não ser suficiente para determinar se a espécie é (ou não) troglóbica.

Um exemplo: as traças pertencentes à família Nicoletiidae são sempre brancas e anoftálmicas. Se estivermos coletando em uma caverna localizada no sul de São Paulo, em meio a uma Mata Atlântica bem preservada e encontrarmos uma população cavernícola de uma traça dessa família, não podemos excluir a possibilidade de que existam indivíduos da mesma espécie fora da caverna, já que na floresta existem inúmeros habitats capazes de manter tais indivíduos (como o folhiço sombreado e úmido da floresta, espaços sob troncos e rochas, dentre outros). Por outro lado, se estivermos coletando em uma caverna situada no interior da Paraíba, em meio à Caatinga, e encontrarmos outra população de traças da mesma família, podemos considerar que existem enormes possibilidades de se tratar de uma espécie troglóbia, já que as condições externas à caverna (de extrema insolação, elevadas temperaturas, solo ressequido, dentre outras) dificilmente permitiriam o estabelecimento de populações epígeas daquela espécie (de tegumento fino, frágil, que permitiria uma rápida perda de água, levando à morte do indivíduo por dessecação). Sendo assim, muitas vezes nem mesmo um taxonomista especialista em determinado grupo é capaz de precisar se dada espécie é ou não troglóbia, sendo sempre necessário contextualizar suas características morfológicas em relação aos ambientes externos às cavernas às quais se associam.

Por fim, é essencial discutir a “delimitação” dos troglomorfismos. Como tais características morfológicas tendem a evoluir em resposta a diferentes pressões seletivas, das quais se destaca a ausência de luz, caracteres troglomórficos podem ocorrer em espécies não necessariamente associadas a habitats subterrâneos. Dentre os inúmeros exemplos de espécies troglomórficas não troglóbias, utilizaremos como exemplo o peixe *Orthosternarchus tamandua* Boulenger, 1898 (FIGURA 10A). *Orthosternarchus tamandua* é uma espécie de peixe pertencente à família Apterontidae (Gymnotiformes), relativamente rara e encontrada na bacia do Rio Amazonas. Tal espécie habita preferencialmente os rios Negro e Purus, ocorrendo geralmente em profundidades de 6 a 10 metros. Essa espécie possui morfologia tipicamente troglomórfica, sendo bastante semelhante a peixes troglóbios. Dentre essas características, destacam-se o alongamento e a compressão lateral do corpo, despigmentação e a extrema redução dos olhos. No entanto, essa espécie não possui quaisquer relações com habitats subterrâneos. Tais características podem ter se fixado em função da ausência de luz nos habitats dessa espécie, que vive em águas escuras ou turvas.

Da mesma forma que existem espécies não troglóbias que são troglomórficas, também existem espécies troglóbias não troglomórficas. A aquisição de características que levam ao troglomorfismo leva tempo, de forma que uma espécie, já isolada em um ambiente subterrâneo (e, conseqüentemente, troglóbia – lembrando que troglóbios são organismos restritos aos habitats subterrâneos) pode ainda possuir morfologia não troglomórfica. Um exemplo disso no Brasil é a espécie *Pimelodella spelaea*, espécie troglóbia que possui morfologia bastante similar às espécies encontradas em superfície (FIGURA 10C). A comparação entre *Pimelodella spelaea* e *Pimelodella kronei* permite notar que os caracteres troglomórficos são, de fato, bastante acentuados nesta última em comparação à primeira (FIGURA 10B). Além disso, é importante notar que nem sempre uma espécie troglóbia irá convergir para uma morfologia totalmente troglomórfica. Um exemplo disso é o opilião *Hendea myersi cavernicola* Forster, 1954 (Triaenonychidae), encontrado em cavernas de Waitomo, Nova Zelândia. Essa espécie, embora troglóbia, possui olhos funcionais (FIGURA 11A), já que preda as larvas bioluminescentes dos dípteros *Arachnocampa luminosa* (FIGURA 11B), utilizando a visão para encontrar suas presas.



Figura 10 – Exemplos de espécies troglomórficas e não troglomórficas encontradas em diferentes habitats no Brasil

Legenda:

A) *Orthosternarchus tamandua* © 2016 Danté Fenolio / anotheca.com (com permissão de uso). Esta espécie, embora altamente troglomórfica, é encontrada em rios da bacia amazônica, não apresentando quaisquer vínculos com habitats subterrâneos;

B) *Pimelodella kronei*, bagre troglóbico altamente troglomórfico, Sistema Areias (SP), Iporanga;

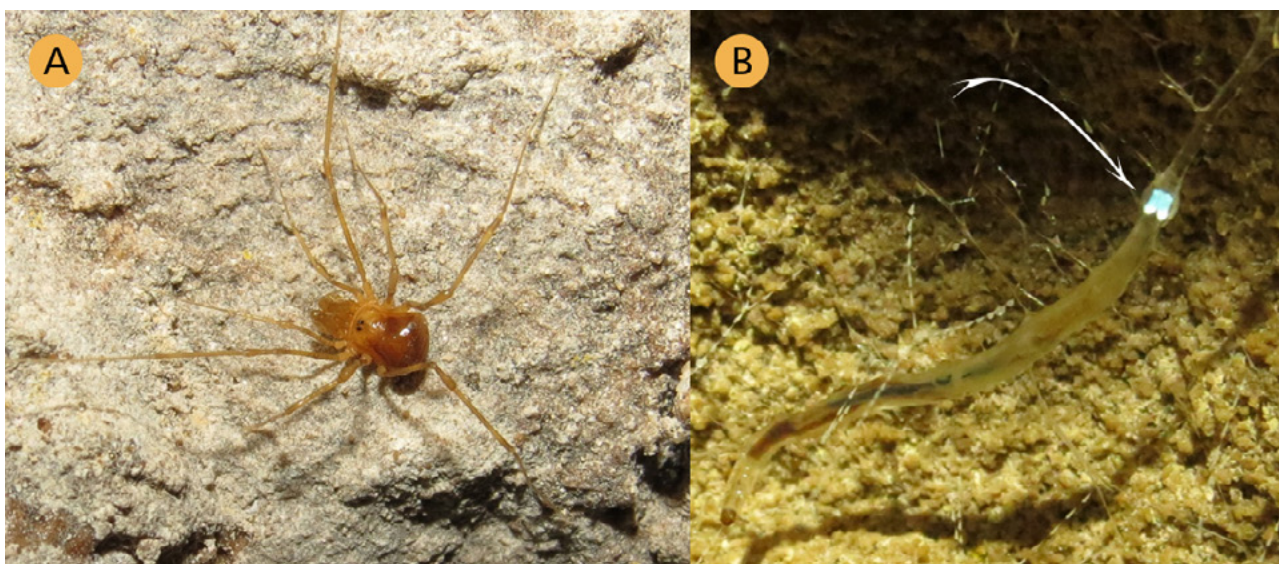
C) *Pimelodella spelaea*, bagre troglóbico pouco troglomórfico, Gruta São Bernardo (GO) São Domingos;

D) *Ancistrus cryptophthalmus*, forma não troglomórfica encontrada em ambientes epígeos no Rio Angélica (GO), São Domingos;

E) *Ancistrus cryptophthalmus*, forma troglomórfica encontrada em ambientes hipógeos, Gruta Angélica (GO), São Domingos

Fonte: Fotografias de Rodrigo Lopes Ferreira, excetuando-se a letra "A", que é de autoria de Danté Fenolio

Figura 11 – Exemplos de espécies troglóbicas nas quais os olhos foram mantidos, sendo funcionais



Legenda: A) opilião *Hendea myersi cavernicola*, caverna Hollow Hill (NZ), Waitomo. Esta espécie, embora troglóbica, possui olhos funcionais;

B) larva do díptero bioluminescente *Arachnocampa luminosa* (a seta indica a vesícula luminosa presente no final do corpo do organismo)

Fonte: Fotografias de Rodrigo Lopes Ferreira

Por fim, é importante ressaltar que existem populações troglomórficas em cavernas pertencentes a espécies que não são troglóbias. No Brasil, o exemplo mais conhecido é o do “cascudo” *Ancistrus cryptophthalmus* Reis, 1987 (Siluriformes: Loricariidae). Embora essa espécie tenha sido originalmente descrita como troglóbia (em função dos óbvios troglomorismos observados nas populações cavernícolas, como despigmentação e redução de estruturas oculares), um estudo posterior, comparando exemplares de populações epígeas (não troglomórficas - FIGURA 10D) e hipógeas (troglomórficas - FIGURA 10E), demonstrou, por meio de técnicas moleculares, que se tratava da mesma espécie (BASTOS *et al.*, 2013). Como existem populações epígeas, essa espécie não pode ser considerada troglóbia. Assim, o que existe na região, são algumas populações troglomórficas de *Ancistrus cryptophthalmus*, além das populações epígeas. Dessa forma, essa espécie corresponde, na verdade, a uma espécie troglófila.

Evolução em ambientes subterrâneos

Saber como certas características dos troglóbios evoluíram torna o estudo da vida em cavernas mais interessante (FERREIRA; MARTINS, 1999). Em geral, esses animais apresentam várias especializações relacionadas ao ambiente cavernícola, resultantes de um conjunto de processos biológicos lentos e contínuos conhecidos como “evolução regressiva”. Tais processos, ainda não totalmente esclarecidos, podem ser interpretados com a ajuda de inúmeras hipóteses, das quais duas são amplamente aceitas na atualidade, por seu bom embasamento teórico e experimental: a hipótese do acúmulo de mutações neutras e a da seleção por pleiotropia.

Para descrever a primeira hipótese é fundamental esclarecer antes o que significa o termo “mutação neutra”. Mutações são mudanças no código genético de um indivíduo, que podem levar a variações de forma, metabolismo ou comportamento transmissíveis a seus descendentes. As mutações são espontâneas ou induzidas (por radiações e por diversas substâncias químicas). Uma “mutação neutra” é aquela que não influencia nenhum aspecto importante da sobrevivência e/ou da reprodução de um organismo. A “neutralidade”, porém, depende do ambiente em que esse organismo vive. Essa hipótese assume que a regressão de certas estruturas, observada em alguns organismos que vivem em cavernas, é resultado do acúmulo de mutações neutras (que aparecem casualmente em indivíduos de uma população) durante várias gerações. Sem função nesses ambientes, tais estruturas (olhos, por exemplo) seriam gradativamente reduzidas com o passar das gerações, pois mutações casuais nesse sentido não afetariam a sobrevivência ou reprodução do indivíduo. Uma mutação que, por exemplo, reduzisse o tamanho do olho de um peixe seria muito prejudicial se ele vivesse em um rio de superfície, mas neutra em uma caverna totalmente escura. Nesse ambiente, os olhos não têm função. O acúmulo de mutações neutras desenvolveria e fixaria um determinado caráter regressivo, desde que a população cavernícola continuasse isolada de populações externas. A hipótese de acúmulo de mutações neutras, portanto, propõe que a regressão de estruturas em muitos troglóbios pode ter ocorrido por causa da ausência de pressões seletivas (como a luz) que eliminariam indivíduos mutantes no meio externo: nesse meio, um peixe com visão reduzida teria sua vida dificultada e, portanto, menos chance de transmitir a mutação a seus descendentes.

A segunda hipótese baseia-se na pleiotropia, fenômeno no qual um só gene determina a modificação de vários caracteres (no fenômeno oposto, herança poligênica, um só caráter é determinado por vários genes). Assim, um único gene controla a expressão de diversos genes que estão envolvidos na formação de estruturas aparentemente não relacionadas. Como exemplo, Yamamoto *et al.* (2009) estudaram o papel do gene Sonic Hedgehog (Shh) no aumento de traços construtivos oral-faringianos (mandíbulas e papilas gustativas) às custas da regressão ocular no peixe troglóbio *Astyanax mexicanus*. Nos embriões, os primórdios oculares degeneravam sob a influência da sinalização hiperativa do gene Shh e, em contrapartida, o tamanho das mandíbulas e o número de papilas gustativas aumentavam, o que levava a mudanças no comportamento alimentar. Para determinar se os efeitos pleiotrópicos da sinalização hiperativa do gene Shh estava conectada a esses traços regressivos e construtivos, os autores compararam a expressão do gene Shh durante o desenvolvimento tardio das formas epígeas e cavernícolas (troglóbias) de *Astyanax*. Os resultados de inibição e sobre-expressão do gene Shh indicaram que a sinalização deste gene tem um papel importante no desenvolvimento oral e do paladar. A sobre-expressão de um transgene Shh injetado em momentos específicos de desenvolvimento dos embriões mostrou que a amplificação das papilas gustativas e a degeneração dos olhos são sensíveis à sobre-expressão de Shh durante o mesmo período de desenvolvimento inicial, embora as papilas gustativas não sejam formadas até muito mais tarde. Os cruzamentos genéticos entre os peixes troglóbios e de superfície revelaram uma relação inversa entre o tamanho dos olhos e o tamanho das mandíbulas e número de papilas gustativas, apoiando uma ligação entre as características construtivas oral-faríngeas e a degeneração ocular. Dessa forma, esses autores demonstraram que a seleção de traços orais-faríngeos construtivos pode ser responsável pela degeneração ocular durante a evolução dos peixes na caverna através do efeito pleiotrópico na via de sinalização do gene Shh.

Entretanto, se essa escassez alimentar fosse a principal pressão seletiva que determinasse o processo evolutivo em cavernas, os depósitos de guano não poderiam ser considerados locais apropriados para a ocorrência da evolução regressiva (e consequentemente de espécies troglóbias). Em geral, tais depósitos oferecem recursos abundantes para as comunidades a eles associadas, o que, segundo alguns cientistas, poderia “desacelerar” esse tipo de evolução nos organismos. Os troglóbios eventualmente encontrados em depósitos de guano, para esses cientistas, já estariam presentes nas cavernas (e já teriam evoluído até essa condição), e se associaram ao guano tardiamente. Em depósitos de guano de cavernas da Bahia e de Minas Gerais, principalmente nos últimos anos, têm sido descobertos numerosos organismos troglóbios e troglomórficos. Populações relativamente densas de ácaros, colêmbolos e traças são encontradas com certa frequência nesses depósitos. Tais descobertas permitem questionar a hipótese de que a escassez de alimentos seria a principal determinante da evolução de características troglomórficas em organismos que vivem em cavernas, principalmente naqueles associados a depósitos de guano. A comparação da idade dos depósitos de guano com o tempo de desenvolvimento de um organismo troglóbio também auxilia esse questionamento. Um exemplo ocorre na toca da Boa Vista, caverna situada no norte da Bahia. Em muitas de suas galerias há registros de guano fóssil pulverizado, e nessa caverna existem populações numerosas (dezenas de indivíduos) de

uma traça troglóbia, da ordem Zygentoma. Amostras desse guano foram datadas em cerca de 16 mil anos¹. Tal período está incluído no tempo necessário para a evolução de características troglomórficas em espécies cavernícolas terrestres, estimado entre 10 mil e 100 mil anos por estudos empíricos. As traças, portanto, provavelmente desenvolveram essas características em um ambiente com bastante matéria orgânica, contrariando a ideia de que essa evolução estaria ligada à escassez de nutrientes (FERREIRA; MARTINS, 1999).

Outro aspecto que merece menção é a grande quantidade de espécies troglomórficas que têm sido encontradas em habitats subterrâneos rasos (SSHs). Inúmeras espécies com típicos caracteres troglomórficos (ausência de olhos e de pigmentação, dentre outros) têm sido descritas de diferentes tipos de habitats subterrâneos superficiais, mesmo no Brasil, como o caso da espécie *Hyaella imbya*, considerada hipotelminorreica (RODRIGUES *et al.*, 2012). Como discutido anteriormente, a única característica compartilhada entre cavernas e outros habitats subterrâneos rasos é a ausência de luz. Assim, a escassez alimentar tem cada vez mais perdido “força” como argumento para a evolução regressiva. Nessa perspectiva, segundo Culver e Pipan (2015), para cavernas e habitats subterrâneos em geral, há três fatores que aparentemente podem afetar a morfologia dos organismos:

- **A ausência de luz** que compreende um agente seletivo convergente que provavelmente atua na redução de olhos e pigmentos em organismos subterrâneos, embora não tenha sido demonstrado conclusivamente seu papel na evolução de estruturas sensoriais extraópticas, incluindo o alongamento dos apêndices;
- **O tamanho do habitat** (poro) que atua como uma força seletiva divergente na evolução do tamanho corporal, e que é especialmente importante entre diferentes habitats subterrâneos, mas que também ocorre dentro dos mesmos habitats;
- **A competição interespecífica**, que compreende uma força seletiva divergente, sendo importante para “moldar” a morfologia, quando espécies competidoras estão presentes.

Tais fatores têm sido considerados mais importantes, de modo que a incorporação dos mesmos em ferramentas de valoração de cavernas pode aumentar a probabilidade de que cavernas mais propensas à evolução de espécies troglóbias possam ser preservadas.

Raros, endêmicos e relictos: como estes conceitos podem ser aplicados às espécies troglóbias?

Existem diversos conceitos essenciais no âmbito da biologia subterrânea. No entanto, alguns deles tornaram-se ainda mais importantes, tendo em vista que sua compreensão se faz necessária à aplicação e à interpretação de atributos que definem o nível de relevância das cavernas brasileiras. De acordo com o Decreto nº 6640/2008, uma caverna será considerada como de máxima relevância se, dentre seus atributos biológicos, ocorrerem: *i)* abrigo essencial para a preservação de populações geneticamente viáveis de espécies animais em risco de extinção, constantes de listas oficiais; *ii)* habitat essencial para preservação de populações geneticamente viáveis de espécies de troglóbios **endêmicos**

¹ Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/sisbio>

ou **relictos**; *iii*) hábitat de troglóbio **raro** e *iiii*) interações ecológicas únicas. Tais atributos, embora certamente importantes, trazem conceitos (marcados em negrito) que merecem maior detalhamento e discussão.

Raridade: indiscutivelmente um conceito que merece aprofundamento. Na maior parte das comunidades biológicas ao redor do mundo (talvez na quase totalidade delas), a maioria das espécies é representada por poucos indivíduos, enquanto a maior parte dos indivíduos pertence a apenas poucas espécies mais comuns. Ser raro, dessa forma, tende a ser mais a regra do que a exceção, para a maior parte dos ecossistemas conhecidos. Mas como podemos definir raridade? A raridade é mais frequentemente definida por dois atributos: a distribuição e a abundância de dada espécie. As espécies são consideradas raras se a sua área de ocupação for restrita ou se o número de indivíduos for pequeno quando comparada a outras espécies filogeneticamente ou ecologicamente próximas. No entanto, outros atributos podem também ser empregados na definição ou determinação da raridade de dada espécie.

Um dos mais clássicos trabalhos referentes à conceituação de raridade foi publicado por Deborah Rabinowitz em 1981. Essa autora propôs uma tipologia de raridade baseada em três aspectos referentes à distribuição das espécies, em três escalas de análises: *i*) área de distribuição geográfica (ampla *versus* restrita), *ii*) especificidade de hábitat (especialista *versus* generalista) e *iii*) densidade local ou tamanho populacional (grande *versus* pequeno). Ranqueando as espécies em cada uma dessas escalas, oito combinações foram produzidas, sete das quais Rabinowitz considerou como tipos de “raridades” (FIGURA 12).

Figura 12 – Classes de raridade propostas por Rabinowitz (1981) com respectivos tipos de raridade. A categoria “H” representa espécies “raras” para os três parâmetros, sendo que o número “1” indica o mais elevado grau de raridade

		DISTRIBUIÇÃO			
		AMPLA		RESTRITA	
DENSIDADE POPULACIONAL		Grande	Pequena	Grande	Pequena
HÁBITAT	Generalista	A (4)	C (3)	E (3)	G (2)
	Especialista	B (3)	D (2)	F (2)	H (1)

Fonte: Zampaulo (2010)

Percebe-se, dessa forma, que existem diferentes tipos de raridades, e que espécies raras não podem ser todas enquadradas em uma mesma categoria. Zampaulo (2010) foi o primeiro a aplicar um modelo semelhante ao proposto por Rabinowitz para fauna cavernícola (considerando todos os organismos presentes, não somente troglóbios, para cavernas da região cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, em Minas Gerais). No entanto, segundo o autor, em função do grande desconhecimento sobre aspectos da biologia e da história de vida da maioria das espécies cavernícolas brasileiras, o

parâmetro “especificidade de hábitat” não foi considerado em seu modelo. Assim, considerando dados de distribuição e abundância, Zampaulo (2010) propôs quatro tipos de raridade: **Raridade Tipo 1:** Espécies com abundância superior a 10 indivíduos e que apresentaram uma distribuição superior a duas cavidades (trata-se da forma mais branda de raridade dentre as propostas); **Raridade Tipo 2:** Espécies que apresentaram abundância entre 2 e 10 indivíduos e que estavam presentes em mais de duas cavidades (esta forma de raridade é composta principalmente por espécies pouco abundantes). **Raridade Tipo 3:** Espécies com abundância superior a 10 indivíduos e que foram restritas a apenas uma ou duas cavernas (esta forma de raridade é composta principalmente por espécies com distribuição mais restrita); **Raridade Tipo 4:** Espécies com abundância entre 2 e 10 indivíduos e que apresentaram distribuição restrita a uma ou duas cavidades (esta corresponde à raridade mais extrema). Por fim, as espécies que apresentaram ampla distribuição (acima de 50 cavernas) e populações extremamente abundantes (acima de 500 indivíduos), foram classificadas como espécies comuns na região.

Foi amostrado, durante o trabalho de Zampaulo (2010), um total de 296 cavernas na região de Arcos-Pains-Doresópolis. Das 1.033 espécies consideradas “não acidentais”, apenas 15 (1,45%) foram consideradas comuns. O restante (correspondente a 1.018 espécies) enquadrou-se em algum tipo de raridade: 358 espécies (34,6%) foram classificadas como raras do tipo 1; 186 espécies (18%), como raras do tipo 2; 84 espécies (8,13%), como raras do tipo 3; e 390 espécies (37,75%), como raras do tipo 4. Percebe-se, a partir dos dados obtidos por Zampaulo (2010), que a “regra” de forma geral para organismos cavernícolas (independentemente da categoria ecológico-evolutiva à qual pertençam) é a raridade nestes sistemas. É importante salientar, no entanto, que no caso de espécies troglófilas e troglóxenas, elas podem ser “raras” em cavernas, mas não fora delas, já que podem habitar outros habitats.

Mas como aplicar esses modelos às espécies troglóbias? A maior parte das espécies troglóbias conhecidas tende a apresentar distribuição restrita (às cavernas, muitas vezes a uma única caverna), densidades populacionais pequenas e elevada especificidade de hábitat. Assim, *a priori*, a maior parte das espécies troglóbias se encaixaria no nível mais extremo de raridade proposto por Rabinowitz (categoria “H” da FIGURA 12). Dessa forma, em uma primeira análise, é possível aceitar que a maior parte das espécies troglóbias poderia ser considerada como rara (em um nível elevado de raridade).

Mas não existem espécies troglóbias não raras, isto é, com amplas distribuições e elevada abundância? Em raros casos, exemplos como esse podem acontecer. As aranhas troglóbias *Porrhoma cavernicola* e *Phaneta subterranea* (ambas pertencentes à família Linyphiidae), por exemplo, possuem distribuições que excedem 1.000km (MILLER, 2005). No entanto, apesar da ampla distribuição dessas duas espécies, elas ocorrem em uma única formação complexa de calcário (WHITE, 2009). No Brasil, a aranha *Brasilomma enigmatica* (Prodidomidae) possui distribuição que excede 180km lineares, tendo sido encontrada em cavernas de três litologias distintas (calcárias, ferruginosas e quartzíticas). Uma vez que espécies troglóbias não podem sobreviver por longos períodos de tempo sob condições superficiais, a dispersão entre cavernas via ambientes epígeos é considerada rara (BARR, 1967b; BARR; HOLSINGER, 1985; HOLSINGER; CULVER, 1988). Assim, espécies troglóbias amplamente disseminadas podem representar: i) uma única espécie representada por populações com mecanismos que permitem

o fluxo gênico entre cavernas (MILLER, 2005); *ii*) populações geneticamente isoladas que não divergiram devido a tempo insuficiente ou baixas taxas de mudança, ou *iii*) várias espécies crípticas distintas, erroneamente agrupadas em uma única espécie. Espécies crípticas são aquelas que, embora distintas, são morfologicamente idênticas, o que dificulta sua separação ou seu reconhecimento.

Esse último caso tem se mostrado mais comum do que se imaginava (NIEMILLER *et al.*, 2012, 2013; CHAKRABARTY *et al.*, 2014). Como exemplo pode-se citar o peixe *Amblyopsis hoosieri* (Amblyopsidae), recentemente descrito e que foi considerado, por décadas, como pertencente à espécie *Amblyopsis spelaea* até que o emprego de técnicas moleculares finalmente demonstrou se tratar de uma espécie distinta (CHAKRABARTY *et al.*, 2014). Outro exemplo ocorre com a espécie *Typhlichthys eigenmanni* (Amblyopsidae), para a qual um estudo molecular revelou que o que era considerado uma única espécie amplamente distribuída compreende, além da espécie original, oito linhagens distintas, cada qual potencialmente representando uma nova espécie (NIEMILLER *et al.*, 2013).

Como espécies troglóbias muitas vezes evoluem a partir de uma mesma espécie ancestral que colonizou diversas cavernas no passado, mantendo populações troglófilas, por exemplo, a especiação pode gerar espécies que, embora distintas (e isoladas em cavernas diferentes), são morfologicamente semelhantes (espécies crípticas) por efeito de convergência e paralelismo. Dessa forma, mesmo para aquelas espécies troglóbias amplamente distribuídas, deve-se ter cautela antes de considerá-las não raras. Uma vez que espécies crípticas têm se revelado cada vez mais comuns em cavernas, é essencial que estudos mais aprofundados (especialmente considerando o emprego de técnicas moleculares) possam definir com mais precisão os “limites” de cada espécie.

Mas por que nos importamos tanto com espécies raras? Esta resposta é simples: entre dado conjunto de espécies, as raras terão maior risco de extinção do que as comuns (JOHNSON, 1998; MATTHIES *et al.*, 2004). Populações pequenas são mais propensas a ser afetadas por eventos estocásticos (demográficos e ambientais), como doenças, inundações, a dificuldade (ou impossibilidade) em encontrar parceiro, dentre outras causas. Além disso, populações pequenas podem aumentar seu coeficiente de endogamia, potencializando as possibilidades de genes deletérios se manifestarem, e também reduzindo a habilidade da espécie em se adaptar às eventuais mudanças nas condições ambientais (ELLSTRAND; ELAM, 1993; LANDE, 1995).

Atualmente é consenso entre pesquisadores a noção de que a biodiversidade deve ser conservada para manter o funcionamento dos ecossistemas. No entanto, Schwartz *et al.* (2000) contestaram essa conclusão generalizada em uma revisão de estudos empíricos, demonstrando que, na maioria dos casos, a relação entre diversidade e processos ecossistêmicos não era linear, e, sim, assintótica. A relação assintótica sugere que o funcionamento do ecossistema pode ser mantido pela conservação de relativamente poucas espécies, geralmente dominantes, e não necessariamente por toda a comunidade. Nessa perspectiva, teoricamente, espécies raras teriam pouca ou nenhuma contribuição para a manutenção de processos ecossistêmicos.

No entanto, espécies raras podem desempenhar funções-chave em diferentes ecossistemas. Um exemplo disso foi demonstrado por Marsh *et al.* (2000). Tais autores verificaram que “cavalinhas” (Pteridófitas do gênero *Equisetum*), na vegetação do Alasca, embora representassem menos de 5% da

biomassa vegetal, desempenhavam importantes serviços ecossistêmicos, que iam desde o “bombeamento” de nutrientes limitantes (como fósforo) de camadas profundas do solo e sua disponibilização em camadas mais superficiais até o enriquecimento de minerais no solo (MARSH *et al.*, 2000). Quando cada espécie rara é considerada individualmente, seus efeitos sobre o funcionamento de ecossistemas podem ser inócuos. No entanto, considerando diversas espécies raras, seus efeitos agregados podem atuar no funcionamento de ecossistemas (SCHWARTZ, 2000). Estudos demonstraram, por exemplo, que a remoção de diversas espécies raras de um plote experimental aumentava a suscetibilidade da área a invasões biológicas. Outro estudo mostrou que espécies raras de abelhas possuíam efeitos agregados na polinização de plantas (KREMEN *et al.*, 2002), de modo que a perda destas espécies poderia implicar perdas em polinização.

Assim, embora aspectos da história de vida de boa parte das espécies troglóbias brasileiras sejam ainda desconhecidos, é possível que muitas delas, mesmo sendo raras, possam ter importância crucial (seja individualmente ou de forma agregada) para o funcionamento dos ambientes subterrâneos onde habitam. Dessa forma, é essencial a criação de mecanismos (especialmente legais) que assegurem a proteção e a conservação dessas espécies. Seus efeitos na conservação e no funcionamento dos ecossistemas subterrâneos bem como sua eventual aplicação em outras áreas da ciência (como em biotecnologia) só poderão ser garantidos caso sejam estudadas e, para isto, devem estar protegidas.

Endemismo: este termo foi proposto por A. P. de Candolle (1855) para definir a distribuição de um organismo em uma área geográfica limitada. Existem diferentes formas de calcular o endemismo de dada espécie ou grupo de organismos. De acordo com a metodologia conceitual de Usher (1986), o endemismo pode ser calculado a partir da contagem do número de “*quadrats*” na qual dada espécie ocorre, sendo expresso pela seguinte fórmula:

$$\text{Endemismo} = \sum_{i=1}^S Q^{-1}$$

onde **S** é o número total de espécies no táxon considerado, e **Q** representa o número total de *quadrats* incluído dentro do ranque de distribuição das espécies. Assim, espécies com padrão de distribuição muito restrita receberão altos valores de endemismo, sendo que as espécies mais restritas (que ocorrem em um único *quadrat*) corresponderão ao valor 1.0 na escala de endemismo.

Existem diferentes tipos de endemismo. O **Paleoendemismo** significa que uma espécie apresentava uma ampla distribuição no passado, mas agora vive em uma área menor. Espécies paleoendêmicas são frequentemente táxons isolados sistematicamente, cujas áreas de distribuição representam os remanescentes de faixas de distribuição originalmente maiores que foram reduzidas devido a mudanças ambientais. O **Neoendemismo**, por sua vez, significa que uma espécie teve origem recente e está intimamente relacionada com a área de distribuição de sua espécie ancestral. Esse é um processo

especialmente comum em plantas poliploides. Essas espécies em geral resultam da adaptação divergente a diferentes condições ambientais, levando à formação de novas espécies distribuídas localmente. Além disso, existem os chamados organismos **Autoendêmicos**, que são aqueles que evoluíram ou especiarão dentro da área de sua atual distribuição. Alternativamente, existem os **Aloendêmicos**, que se originaram em um local, se dispersaram até sua localidade atual e tornaram-se extintos no local de origem. Esses últimos também são chamados de **Relictos**.

Relictos podem ser definidos como populações ou espécies que são severamente restritas em termos de distribuição geográfica. Existem dois tipos de relictos: os chamados relictos taxonômicos (ou filogenéticos) e os relictos biogeográficos. Os relictos taxonômicos compreendem os poucos (ou únicos) sobreviventes de uma assembleia anteriormente vasta de organismos. Já os relictos biogeográficos compreendem grupos que descendem de táxons ou populações amplamente distribuídos no passado, mas que atualmente possuem uma distribuição restrita (GRANDCOLAS *et al.*, 2014).

Embora a definição por ausência seja sempre um problema na ciência, há três critérios que, especialmente quando combinados, podem ser usados para caracterizar relictos (GRANDCOLAS *et al.*, 2014): *i*) se o registro fóssil documentar extinções que foram razoavelmente completas para o grupo de estudo; *ii*) se a área de distribuição do relictos é muito menor ou extremamente disjunta em relação à área de seu grupo irmão, sem evidência de origem por dispersão; e *iii*) se a árvore molecular tem uma forma possivelmente indicando extinções, apoiando a hipótese de que o táxon relictos está na ponta de um longo ramo “verdadeiro” ou bem suportado. No entanto, a documentação fóssil tende a ser deficiente para a maioria dos grupos, o que torna esse critério pouco aplicável (especialmente quando se consideram espécies troglóbias, para as quais raríssimos fósseis são conhecidos – e.g., *Marifugia cavatica* – Mihevc *et al.*, 2002). Além disso, os ramos em árvores moleculares são sensíveis ao método de reconstrução utilizado, o que pode trazer dificuldades na utilização desse critério. Assim, especialmente para espécies troglóbias, a melhor forma de detecção de um táxon relictos seria a observação de sua distribuição, na tentativa de verificar se ela é muito menor ou extremamente disjunta em relação à área de seu grupo irmão.

Os relictos podem ainda fornecer indicadores dos possíveis caracteres que permitiram que sobrevivessem a extinções regionais ou, por outro lado, se a extinção foi puramente estocástica (GRANDCOLAS *et al.*, 2014). A modelagem de nicho de espécies relictas diante de mudanças ambientais pode ajudar a elucidar por que tais espécies sobreviveram, a partir de vários cenários de mudanças. Espécies relictas seriam generalistas que se adequaram a um ambiente em contínua mudança ou especialistas que permaneceram em refúgios pequenos e estáveis? No caso de espécies troglóbias, as cavernas podem ter funcionado como refúgios, permitindo sua continuidade. Mas indubitavelmente existem tipos distintos de relictos em cavernas brasileiras, que merecem ser estudados em maior profundidade no intuito de se compreender como evoluíram.

Relictos também são extremamente importantes na perspectiva da biologia de conservação. Eles tendem a ser táxons altamente distintos na biota moderna, representantes de grupos maiores que parcialmente desapareceram. Nessa perspectiva, eles podem certamente revelar como era a diversidade do passado, tendo, assim, um elevado valor patrimonial (GRANDCOLAS *et al.*, 2014).

No Brasil, existem exemplos de troglóbios relictos, tanto geográficos como filogenéticos. Dentre os relictos geográficos, destacam-se os isópodes Cirolanidae encontrados em cavernas do Rio Grande do Norte (FERREIRA *et al.*, 2010) e Ceará (FIGURA 6E). Essas espécies advêm de grupos cuja distribuição é predominantemente marinha, tendo evoluído a partir de ancestrais marinhos "aprisionados" em espaços subterrâneos após uma transgressão e posterior regressão oceânica pretérita. Além dos cirolanídeos, as cavernas do oeste potiguar também apresentam outros relictos geográficos, como anfípodes (FISER *et al.*, 2013) (FIGURA 6I) e turbelários (LEAL-ZANCHET *et al.*, 2014) (FIGURA 6N). Dentre os relictos filogenéticos, destacam-se os isópodes Calabozoidea existentes em cavernas da Bahia (MESSANA *et al.*, 2002; PREVORCNÍK *et al.*, 2012) e crustáceos Spelaeogriphacea de cavernas do Mato Grosso do Sul (PIRES, 1987).

Atributos de interesse biológico na atual legislação espeleológica: compreendendo melhor alguns conceitos

Além dos conceitos essenciais já discutidos anteriormente, há outros, também de cunho biológico, citados na atual legislação espeleológica brasileira. Alguns desses conceitos certamente merecem uma breve explanação ou discussão.

Atributos ligados ao hábitat

No Decreto nº 6.640, quarto parágrafo, incisos VI e VII, encontram-se dois conceitos que merecem discussão. O primeiro deles refere-se a "*abrigo ou hábitat essencial*", e o segundo, às chamadas "*populações geneticamente viáveis*". Definir um abrigo ou hábitat como *essencial* para dada espécie é algo geralmente difícil, e que exige um aprofundado estudo sobre a biologia ou o ciclo de vida da espécie em questão. Um organismo pode utilizar uma caverna somente em parte de seu ciclo de vida, e mesmo assim aquele hábitat pode ser essencial à espécie. Um exemplo disso é a utilização para fins de nidificação (reprodução) ou hibernação, no caso de regiões temperadas. Dessa forma, não é a presença constante de uma espécie em um hábitat que determina sua "essencialidade", mas, sim, uma necessidade (geral ou específica) que só pode ser suprida naquele hábitat. Infelizmente, dado enorme desconhecimento sobre o ciclo de vida da quase totalidade das espécies encontradas em cavernas do Brasil, aliada à exigência legal de apenas duas coletas em uma caverna para que sua relevância seja determinada, torna-se virtualmente impossível definir, para a grande maioria das espécies, se dada caverna ou abrigo constitui um hábitat ou abrigo essencial.

Em relação às *populações geneticamente viáveis*: da mesma forma que o anteriormente exposto, a determinação da viabilidade genética de dada população exige estudos específicos e aprofundados. O primeiro passo, nesse sentido, seria a determinação do tamanho aproximado da população da espécie em questão. Salienta-se que os habitats subterrâneos são extensos e interconectados, de modo que os organismos observados em uma caverna podem corresponder somente a uma ínfima parte da população, caso a espécie utilize preferencialmente outros habitats subterrâneos, como MSS, epicarste, etc. Além disso, destaca-se que podem existir espécies com estruturas metapopulacionais, cujo funcionamento difere das "típicas" populações. No caso de metapopulações, toda a

dinâmica depende de subpopulações que mostram certo grau de interconexão, mediada pela migração de indivíduos entre subpopulações (VAN NOUHUYS, 2009). Além disso, outra característica das metapopulações é a possibilidade de certas subpopulações serem extintas, sendo que esses habitats anteriormente ocupados podem ser novamente colonizados, e uma nova subpopulação estabelecida. Dessa forma, tomemos uma situação como exemplo: caso uma caverna possua um conjunto de indivíduos de uma espécie, que sejam considerados *a priori* como uma população e estes organismos desapareçam da caverna por determinado período, aquela “população” seria considerada como geneticamente inviável naquele habitat. No entanto, caso a espécie exiba uma dinâmica metapopulacional, aquela ausência pode ser simplesmente resultado de uma extinção estocástica, sendo que a caverna pode ser novamente recolonizada e uma nova subpopulação, estabelecida. Dessa forma, sem os devidos estudos específicos voltados a cada espécie (o que não é possível a partir dos dois levantamentos exigidos para um estudo de licenciamento), é impossível estabelecer se sua população é viável (geneticamente ou não) em dada caverna.

Outro conceito importante é o de “*localidade tipo*”. Durante a descrição de uma nova espécie, é recomendável que seja designado um espécime como *holótipo*, que é aquele que representa a descrição da espécie (Código Internacional de Nomenclatura Zoológica). Espécimes adicionais também utilizados na descrição são os *parátipos*. O conjunto de organismos utilizados na descrição (holótipo + parátipos) é denominado *sintipo*. Quando o autor da descrição designa um holótipo (situação mais frequente e recomendação do código de nomenclatura zoológica), a localidade-tipo é aquela onde a população-tipo (da qual foi coletado o holótipo) existe. No caso de cavernas, uma única caverna (ou sistema de cavernas) seria a localidade-tipo, nestas situações. No entanto, caso o autor da descrição não designe um holótipo (embora esta seja uma recomendação), todas as localidades onde sintipos foram coletados são consideradas localidades-tipo (nesta situação, várias cavernas podem ser localidades-tipo de uma mesma espécie, mas isto é bastante incomum).

Atributos ligados ao uso de cavidades

Dois atributos biológicos são diretamente relacionados ao uso de cavidades: “*local de nidificação de aves silvestres*” e “*população residente de quirópteros*”. O primeiro atributo é facilmente perceptível, seja de forma direta, como a visualização de ninhos (especialmente em proximidades de entradas de cavernas), ou indireta, como a presença de bolotas de regurgito de corujas, por exemplo. O grande problema é definir se aquela caverna ou abrigo possui uso frequente ou esporádico para essa finalidade. Como a legislação considera somente a *constatação* desse tipo de uso, quaisquer registros podem ser considerados na valoração desse atributo, independentemente se esse tipo de uso é frequente ou esporádico na cavidade.

O fato de uma espécie de morcego ser encontrada na caverna não quer dizer que aquela espécie tem a cavidade como seu principal abrigo. No Brasil, até o momento, 58 espécies de morcegos já foram registradas em cavernas, embora muitas delas não sejam consideradas “cavernícolas” (GUIMARÃES; FERREIRA, 2014). Certas espécies podem utilizar uma cavidade apenas como local de descanso temporário durante o período de forrageamento, por exemplo. Espécies especializadas em abrigar-se em folhagens, como o morcego *Thyroptera tricolor*, já foram registradas em cavernas (FARIA *et al.*,

2006) demonstrando que nem sempre uma espécie encontrada em uma cavidade possui populações ali estabelecidas. No entanto, há formas de determinar se dada população reside ou somente utiliza temporariamente uma cavidade. Uma forma direta seria o acompanhamento da população na caverna, através de capturas sucessivas em intervalos regulares, para a constatação da presença contínua da espécie na cavidade. Além disso, a presença de filhotes, bem como organismos em diferentes estágios pode ser um indicativo de persistência da população na cavidade. Por fim, uma forma indireta de inferir sobre a eventual permanência de morcegos em uma cavidade seria através do guano produzido pela colônia. Colônias persistentes (ou residentes) tendem a continuamente depositar suas fezes formando depósitos de guano (FERREIRA; MARTINS, 1998, 1999). No entanto, mesmo em um ambiente que tende a ser bastante úmido (como uma caverna), o guano começa a ressecar com o tempo (FERREIRA; MARTINS, 1999). Dessa forma, a presença de guano úmido (um claro indicativo de que está sendo continuamente depositado) é uma ferramenta útil para se inferir, mesmo que indiretamente, que dada população de morcegos reside na cavidade.

Atributos ecológicos

Os dois atributos ecológicos citados na legislação (não ligados aos componentes da diversidade – vide tópico seguinte) são indubitavelmente emblemáticos. O primeiro deles, “*interações ecológicas únicas*”, é carregado de subjetividade. O termo “único” geralmente se refere a algo excepcional, exclusivo, singular. Assim, uma interação única seria aquela que se destaca por sua singularidade ou excepcionalidade. No entanto, para que seja possível determinar excepcionalidade, é fundamental que todas as possibilidades de interações sejam bem conhecidas, e aí reside o problema, em se tratando de cavernas tropicais. Novamente, enfatiza-se aqui o escasso conhecimento sobre comunidades subterrâneas em regiões neotropicais. Novos táxons são continuamente descobertos em cavernas do Brasil, de modo que nem mesmo a composição da fauna é devidamente conhecida. As interações entre espécies são ainda mais desconhecidas. Citando um exemplo prático: há alguns anos, antes de as pesquisas bioespológicas brasileiras começarem a ser realizadas nas regiões Norte e Nordeste, o relato de uma serpente adentrar uma caverna para se alimentar de morcegos seria certamente considerado uma relação ecológica única. Atualmente, sabe-se que tal interação não é tão incomum (ESBÉRARD; VRCIBRADIC, 2007). Dessa forma, na atualidade, corre-se o risco de várias interações ecológicas serem consideradas únicas, não por sua excepcionalidade, mas simplesmente pela possibilidade de aquela interação (mesmo que razoavelmente frequente) estar sendo pela primeira vez registrada.

O segundo atributo ecológico compreende as chamadas “*espécies com função ecológica importante*”. Indubitavelmente existem diversas funções ecológicas que são imprescindíveis para o funcionamento dos ecossistemas subterrâneos. Como exemplo pode-se citar a produção (especialmente secundária), na forma de guano, que tem especial importância para manutenção de comunidades associadas a cavernas secas (FERREIRA; MARTINS, 1999). Nessa conotação, quaisquer populações de morcegos que residam numa cavidade e produzam guano que seja comprovadamente o principal recurso orgânico para a fauna compreenderiam uma função ecológica importante. No entanto, novamente existe certo grau de arbitrariedade nesse atributo. Dada função ecológica pode ser essencial

para apenas poucas espécies existentes em uma cavidade e, caso isto ocorra, dificilmente tal função será detectada em estudos pontuais ou superficiais como os exigidos em processos de licenciamento. Além disso, há funções ecológicas que, embora imprescindíveis, só podem ser avaliadas em estudos específicos. Como exemplo pode-se citar a decomposição. O acúmulo de biomassa (desencadeado por um impacto incidente sobre espécies decompositoras, por exemplo) pode converter um sistema primariamente oligotrófico em eutrófico, o que pode causar severas alterações na composição e na estrutura de uma comunidade subterrânea. No entanto, o conhecimento sobre o sistema de decompositores em uma caverna (quais espécies atuam, em quais compartimentos, quais as taxas de decomposição, etc.) demanda estudos específicos que em geral envolvem experimentação em campo (SOUZA-SILVA *et al.*, 2011, 2013). Assim, mais uma vez, os breves estudos realizados durante o licenciamento não permitem a real verificação de importantes funções ecológicas, o que torna este atributo extremamente vago ou subjetivo.

Atributos ligados aos componentes da diversidade

Dois atributos da atual legislação compreendem medidas de diversidade biológica: a *riqueza* de espécies e a *diversidade*. A riqueza de espécies corresponde simplesmente ao número total de espécies que compõem dada comunidade (MAGURRAN, 2004). No caso de uma caverna, ao final de um inventário e após o processo de triagem e identificação, a riqueza será expressa pelo somatório do número de espécies encontradas. Embora a forma de expressar a riqueza seja bastante simples (um valor numérico representando este atributo), ela é extremamente influenciada pelos métodos de amostragem. Aí reside um enorme problema referente a esse atributo. A legislação vigente (especificamente a Instrução Normativa 2, de 30 de agosto de 2017) traz, em seu artigo 15, parágrafo 11, a seguinte frase: “Os procedimentos de levantamento faunístico devem seguir métodos consagrados ou de eficácia comprovada cientificamente”. Dessa forma, não há necessidade, conforme a legislação vigente, de quaisquer padronizações amostrais. Assim, diferentes estudos podem conter valores de riqueza consideravelmente distintos, não em função de reais diferenças da riqueza entre cavernas, mas simplesmente em função de métodos distintos que foram empregados em cada inventário. Um biólogo que utilize somente amostragens manuais baseadas em procura visual certamente produzirá uma listagem cuja riqueza estará bastante aquém de um inventário que considere, além da amostragem visual, outros métodos, como extratores de microinvertebrados, armadilhas de queda, redes de Suber (no caso de ambientes aquáticos), dentre outros. Oliveira (2014) demonstrou que métodos distintos de amostragem influenciam diretamente a riqueza bem como a composição das comunidades amostradas em cavernas brasileiras. Dessa forma, é sempre recomendável que a maior quantidade de métodos seja utilizada quando a intenção é a de verificar qual é a real riqueza presente em uma caverna.

Além da riqueza, outro atributo que expressa a variedade de organismos em dado sistema é a *diversidade*. A diversidade pode ser expressa de diferentes formas, embora, para fins da atual legislação, ela tenda a ser expressa ou calculada através de algum índice que relacione a riqueza de espécies com a forma como cada espécie apresenta-se, em termos de tamanhos populacionais (equitabilidade), em dada comunidade. A diversidade, assim, pode ser calculada através de diferentes índices, como, por

exemplo, o índice de Shannon-Wiener (frequentemente representado por H'), amplamente utilizado em estudos ecológicos (MAGURRAN, 2004). Tal índice pode ser calculado por meio da seguinte fórmula:

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

onde S é o número de espécies (riqueza) e p_i é a abundância relativa de cada espécie, calculada pela proporção dos indivíduos de uma espécie pelo número total dos indivíduos na comunidade, de acordo com a seguinte razão: n_i/N , onde n_i é o número dos indivíduos em cada espécie (isto é, a abundância de cada espécie) e N corresponde ao número total de todos os indivíduos (MAGURRAN, 2004). Grande parte dos trabalhos realizados em cavernas que calcularam valores de diversidade utilizaram esse índice (SOUZA-SILVA *et al.*, 2011; BERNARDI *et al.*, 2012; INIESTA *et al.*, 2012; BENTO *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2016), de modo que, para fins de análise e principalmente de comparação, seria interessante utilizar esse índice em trabalhos referentes a relatórios de licenciamento.

Atributos ligados a aspectos de singularidade e ao modo de vida das espécies

Os últimos atributos da atual legislação que merecem ser tratados são aqueles referentes à singularidade e ao modo de vida de organismos que podem ser encontrados em cavernas. Um desses atributos, "*Composição singular da fauna*", claramente carece de objetividade. A singularidade refere-se a um conjunto único ou pelo menos atípico de espécies em relação ao que é observado em dada área, mas certamente esta definição depende do contexto. No entanto, embora subjetivo, esse atributo pode ser verificado, por exemplo, por meio de alguma análise de similaridade. Como exemplo pode-se citar a gruta do Éden, localizada em Pains, Minas Gerais (ZAMPAULO, 2010). A Figura 13 mostra uma análise de n-MDS, que se baseia na similaridade faunística entre os pontos amostrais (neste caso, cada caverna). A proximidade, no gráfico, entre cada símbolo, que representa uma caverna, indica o nível de similaridade entre elas, sendo que, quanto mais próximos dois pontos, mais similares são suas comunidades. Destaca-se que a gruta do Éden se apresenta deslocada da "nuvem" formada pelas demais cavernas, o que demonstra que sua comunidade é bastante dissimilar em relação às demais cavernas da província. Assim, a gruta do Éden, nesse contexto, certamente pode ser considerada como possuindo *Composição singular da fauna*.

Outro atributo emblemático compreende as chamadas "*Populações excepcionais em tamanho*". Novamente esse é um atributo com elevada subjetividade e que somente pode ser avaliado considerando-se o contexto. Em geral, tais populações devem ser aquelas cujos tamanhos excedem enormemente os tamanhos populacionais considerados "típicos" para aquele grupo em questão. "*Troglóxenos obrigatórios*" também são citados na atual legislação. Entende-se por obrigatório aquele troglóxe-no que tiver as cavernas como seu único hábitat, isto é, aquela espécie que não é capaz de utilizar

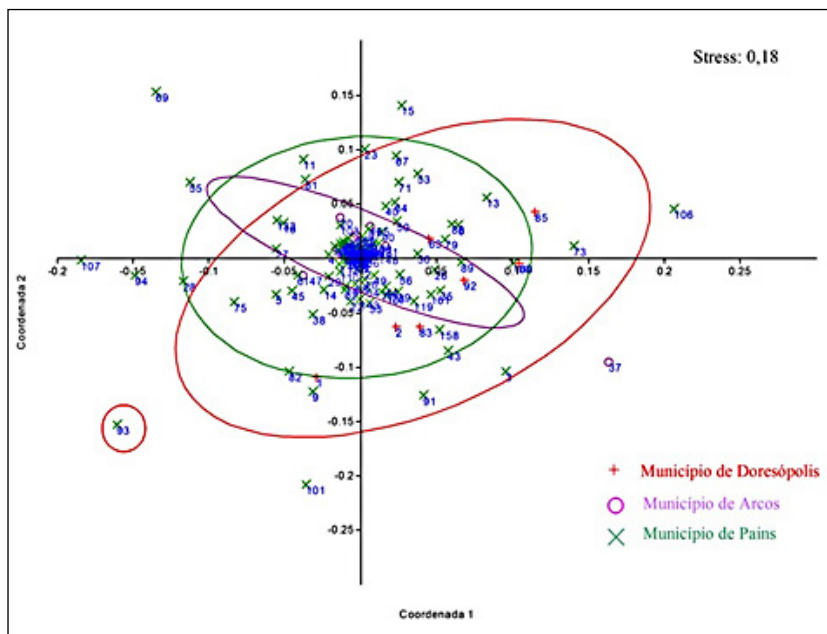


Figura 13 – Gráfico de n-MDS representando a similaridade faunística entre as cavernas da província espeleológica de Arcos-Pains-Doresópolis (MG). Cada símbolo representa uma cavidade amostrada, e a distância entre símbolos representa o grau de similaridade (cavernas mais próximas são mais similares)

Destaca-se a caverna nº 93 (gruta do Éden – pequeno círculo vermelho), cuja fauna é singular, mostrando-se bastante diferenciada da encontrada nas demais cavernas

Fonte: Zampaulo (2010)

quaisquer outros abrigos que não sejam cavidades para completar seu ciclo de vida. Novamente, a comprovação de que uma espécie compreende um troglóxico obrigatório demanda estudos específicos, que certamente transcendem as duas amostragens solicitadas pela atual legislação.

Diretrizes gerais para o inventário da fauna em cavernas

Segundo Ferreira (2004), para o levantamento de dados e a avaliação ecológica de um sistema cavernícola devem-se avaliar sucintamente fatores como composição, abundância, riqueza, diversidade (estrutura da comunidade), variação espaço/temporal da fauna, topoclima e estrutura e dinâmica trófica do sistema. Somente depois desses passos é que planos de monitoramento podem ser construídos e implantados.

Para avaliar a composição, a estrutura e a distribuição da fauna, a amostragem deve consistir em um inventário detalhado das comunidades presentes na caverna, observando-se o número de espécies, o número de indivíduos em cada espécie, a diversidade e a distribuição de cada população, no espaço e no tempo. Para tal, devem ser realizadas em cada caverna no mínimo duas coletas distribuídas entre as estações de seca e chuva, conforme previsto na própria legislação vigente. Sugere-se que os invertebrados presentes nas cavernas sejam previamente identificados visualmente no campo e alguns de seus espécimes sejam coletados como testemunhos. Os organismos observados (coletados e não coletados) podem ser plotados em croqui esquemático de cada caverna, segundo a metodologia proposta por Ferreira (2004) (FIGURA 14). É importante destacar que o principal objetivo de um inventário faunístico realizado durante processos de licenciamento é o de revelar a maior quantidade possível de espécies presentes em dada caverna. Assim, embora existam metodologias de coleta específicas para objetivos distintos, é de fundamental importância que diferentes métodos amostrais sejam utilizados durante as coletas, de forma a possibilitar o acesso à maior parte das espécies presentes em dada caverna.

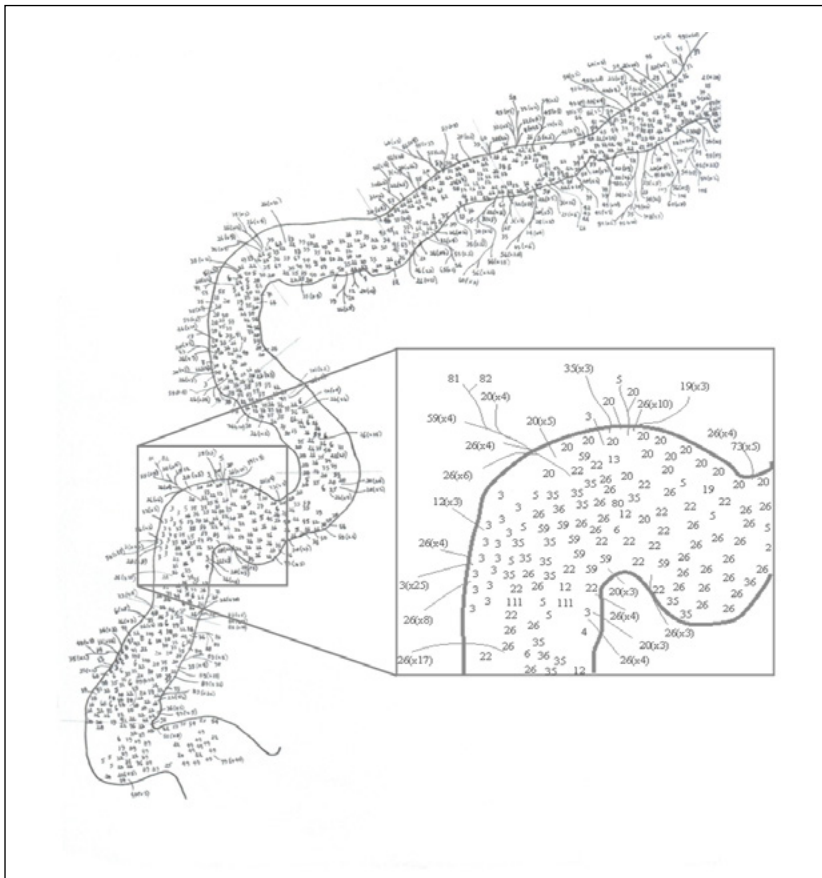


Figura 14 – Croqui esquemático de uma caverna ilustrando o método de avaliação da composição, riqueza e abundância de invertebrados. Cada número representa uma morfoespécie definida em campo. A repetição do número representa a distribuição e a abundância dos indivíduos da morfoespécie (números entre parênteses representam a quantidade de indivíduos da espécie em questão, naquele ponto)

Fonte: modificado de Ferreira (2004)

As associações dos invertebrados com os recursos alimentares presentes nas cavernas deverão ser registradas em caderno de campo e fotografadas, quando possível. Em laboratório todos os organismos coletados deverão ser devidamente acondicionados e identificados de acordo com as referências de campo. Para melhor refinamento na identificação das espécies, é altamente recomendável o envio das mesmas a especialistas, sempre que possível. Ressalta-se a importância de destinar os organismos coletados durante processos de licenciamentos para uma coleção de referência (de preferência, especializada em fauna subterrânea). Assim que depositados, tais espécimes tornam-se públicos, podendo ser acessados por quaisquer pessoas. Assim, além da contínua descrição de novas espécies, torna-se possível a realização de comparações entre espécimes coletados em diferentes empreendimentos (o que permite uma análise de relevância mais precisa), bem como pode-se evitar a coleta excessiva de certos táxons, que já se encontrem bem representados em coleções de referência.

Durante a caracterização trófica devem ser avaliados no interior das cavernas os tipos, as quantidades, a qualidade, a distribuição e as vias de acesso dos recursos alimentares ao meio subterrâneo. Os locais preferenciais de acumulação e a fauna associada aos diferentes recursos alimentares (guano, raízes, folhas, troncos, carcaças, etc.) devem ser destacados. Para tal, os recursos alimentares presentes nas cavernas deverão ser identificados visualmente plotados em croqui ou mapa e caracterizados de acordo com o tipo (raízes, folhas, troncos, fezes, etc.), locais de acumulação (perto

de entradas, condutos interiores, embaixo de claraboias, paredes, piso, etc.) e vias e modos de acesso à caverna (entradas horizontais, fraturas no teto, gotejamentos em espeleotemas, entradas verticais, rios, enxurradas, animais, etc.). Além disso, quando possível, devem ser caracterizados de acordo com a quantidade (raízes dispersas ou concentradas em rizotemas, material vegetal e guano disperso ou acumulado em depósitos, etc.), e de acordo com a condição ou o tempo de deposição (mineralizado, antigo, recente, seco, úmido, etc.). No caso do guano, deve ser destacada a dieta de origem do mesmo (frugívoro, insetívoro, hematófago, carnívoro, misto, etc.). Se ocorrer elevada riqueza e abundância no recurso alimentar, amostras devem ser coletadas para a triagem em laboratório com uso de lupa ou extratores (como, por exemplo, funis de Berlese).

Considerações finais

Embora o estudo da biologia subterrânea esteja em avançado estágio de desenvolvimento em alguns países, especialmente da Europa e da América do Norte, no Brasil esta ciência é ainda incipiente. As últimas estimativas do número de cavernas potencialmente existentes no país ultrapassam a casa de 300 mil cavernas. Dessas, algo entre mil e duas mil cavernas devem ter sido amostradas até o momento, representando uma ínfima parte do total existente. Cada expedição de coletas a regiões ainda não amostradas do país traz à luz do conhecimento dezenas de novas espécies. Infelizmente, dada a quantidade muito restrita de taxonomistas no Brasil (e mesmo no exterior, para alguns grupos), espécies têm sido descobertas em uma velocidade muito superior às suas taxas de descrição. Embora existam atualmente cerca de 130 espécies troglóbias descritas no país, o número existente em coleções (considerando espécies ainda não descritas) ultrapassa 800. E esse número representa certamente apenas uma fração do total de espécies troglóbias potencialmente existentes no Brasil.

Se nem mesmo as espécies são bem conhecidas, o que dizer do estabelecimento de padrões? É extremamente difícil estabelecer quaisquer padrões, seja de distribuição, ecologia ou evolução em larga escala em nosso país. Isso se deve às enormes lacunas de conhecimento existentes, que não somente dificultam, mas certamente impedem uma visão holística dos grandes padrões que regem o funcionamento e a estruturação das comunidades cavernícolas brasileiras. Como exemplo disso, há menos de dez anos sequer seria cogitada a possibilidade de existência de relictos oceânicos em cavernas brasileiras, tendo em vista a posição interiorana da maioria das formações carbonáticas do país. Atualmente, conhecem-se várias espécies nessa categoria, habitando cavernas do Rio Grande do Norte e do Ceará.

E é nesse cenário de obscuridade que nos encontramos, tendo que decidir sobre a destruição ou não de cavernas em meio à nossa quase total ignorância sobre boa parte dos atributos que nós mesmos arbitrariamente determinamos. Tais atributos de fato garantem a preservação daquelas cavernas mais singulares? Cavernas consideradas de menor relevância sempre o são? A forma como os estudos são conduzidos nos permite avaliar com precisão os atributos estabelecidos? Essas, como várias outras questões, têm respostas claras: provavelmente não.

Mas como mudar esta realidade? Somente através do investimento em pesquisa e educação seremos capazes de reverter este cenário. O aumento do conhecimento sobre a biologia subterrânea

brasileira, conjugado à capacitação de profissionais que atuam nesta área, é imprescindível. Além disso, a articulação entre gestores, pesquisadores, empreendedores, consultores, dentre outros, pode gerar soluções sinérgicas que contribuam significativamente para a efetiva conservação desses ambientes e de sua vida única.

Referências

- ALLAN, J. D. *Stream ecology: structure and function of running waters*. Michigan: Kluwer Academic, 1995, 388 p.
- BARR, T. C. Observations on the ecology of caves. *American Naturalist*, Chicago, n. 992, v. 101, p. 474-489, 1967a.
- BARR, T. C. A new *Pseudanophthalmus* from an epigean environment in West Virginia (Coleoptera: Carabidae). *Psyche*, 74, 166-172, 1967b.
- BARR, T. C.; Holsinger, J. R. Speciation in cave faunas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 16, 313-337, 1985.
- BASTOS, V. A. A. The cave environment influencing the lipid profile and hepatic lipogenesis of the fish *Ancistrus cryptophthalmus* Reis, 1987 (Siluriformes: Loricariidae). *International Journal of Speleology*, v. 42, p. 15-23, 2013.
- BENTO, D. M. *et al.* Seasonal variations in cave invertebrate communities in the semi-arid Caatinga, Brazil. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 78, p. 61-71, 2016.
- BERNARDI, L. F. O.; PELLEGRINI, T. G.; TAYLOR, E. L.; FERREIRA, R. L. Aspectos Ecológicos de uma Caverna Granítica no Sul de Minas Gerais. *Espeleo-Tema* (São Paulo), v. 21, p. 5-11, 2012.
- BOULENGER, G. A. On a collection of fishes from the Rio Jurua, Brazil. *Transactions of the Zoological Society of London*, 14: 421-428, 1898.
- CALLISTO, M.; ESTEVES, F. A. Distribuição da comunidade de macroinvertebrados bentônicos em um lago amazônico impactado por rejeito de bauxita, Lago Batata (Pará, Brasil). *Oecologia Brasiliensis*. In: ESTEVES, F. A. (Ed.). *Estrutura, funcionamento e manejo de ecossistemas brasileiros*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995. Instituto de Biologia. Programa de Pós-Graduação em Ecologia v. 1, p. 281-291.
- CAMACHO, A. I. (Ed.). *The natural history of biospeleology*. Madrid: SCIC, 1992. 680 p. (Monografías del Museo Nacional de Ciencias Naturales).
- CHAKRABARTY, P.; PREJEAN, J. A.; NIEMILLER, M. L. The Hoosier cavefish, a new and endangered species (Amblyopsidae, *Amblyopsis*) from the caves of southern Indiana. *ZooKeys*, 412: 41-57, 2014. doi: 10.3897/zookeys.412.7245
- CHRISTIANSEN, K. A. Proposition pour la classification des animaux cavernicoles. *Spelunca*, 2, 76-78, 1962.
- CHRISTIANSEN, K. A. Morphological adaptations. In: WHITE, W. B.; CULVER, D. C. (Ed.). *Encyclopedia of caves*. Second edition. Amsterdam: Academic/Elsevier Press, 2012, pp. 517-528.
- CÓDIGO Internacional de Nomenclatura Zoológica. Disponível em: <http://www.iczn.org/iczn/index.jsp>
- CULVER, D. C. *Cave life evolution and ecology*. Cambridge/Massachusetts/London: Harvard University, 1982, 189 p.
- CULVER, D. C.; SKET, B. Biological monitoring in caves (Biološko zasledovanje stanja [monitoring] v jamah). *Acta Carsologica*, 31:55-64, 2002.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. **Shallow subterranean habitats**. Ecology, evolution, and conservation. Oxford: Oxford University Press, 2014, pp. 258.

CULVER, D. C.; PIPAN, T. Shifting Paradigms of the Evolution of Cave Life. **Acta Carsologica**, v. 44 (3): 415-425, 2015.

CUMMINS, K. W. *et al.* Shredders and riparian vegetation. **Bioscience**. Washington, v. 39(1): 24-30, 1989.

DEVÁI, G. Ecological background and importance of the change of chironomid fauna in shallow Lake Balaton. **Hidrobiologia**, 1991:189-198, 1990.

ELLSTRAND, N. C.; ELAM, D. R. Population genetic consequences of small population size: Implications for plant conservation. **Annual Review of Ecology and Systematics** 24:217-42, 1993.

ESBÉRARD, C. E. L.; VRCIBRADIC, D. Snakes preying on bats: new records from Brazil and a review of recorded cases in the Neotropical region. **Revista Brasileira de Zoologia**, v.24, n.3, 848-853, 2007.

FARIA, D.; SOARES-SANTOS, B.; SAMPAIO, E. Bats from the Atlantic rainforest of southern Bahia, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 6, n. 2, p. 1-13, 2006.

FERNANDEZ, F. A. S. Métodos Para Estimativa de Parâmetros Populacionais Por Captura-Marcação-Recaptura. In: PERES NETO, P.; VALENTIN, J. L.; FERNANDEZ, F. A. S. (Org.). **Oecologia Brasiliensis** - tópicos em tratamentos de dados biológicos. 1.ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1995.

FERREIRA, R. L. **A medida da complexidade ecológica e suas aplicações na conservação e manejo de ecossistemas subterrâneos**. 2004. 158 p. Tese (Doutorado em Ecologia. Conservação e Manejo da Vida Silvestre) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

FERREIRA, R. L.; HORTA, L. C. S. Natural and Human Impacts on Invertebrate communities in Brazilian Caves. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, 61(1): 7-17, 2001.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Diversity and distribution of spiders associated with bat guano piles in Morrinho cave (Bahia State, Brazil). **Diversity and Distributions**, Oxford, 4: 235-241, 1998.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Trophic structure and natural history of bat guano invertebrate communities with special reference to Brazilian caves. **Tropical Zoology**, 12(2): 231-259, 1999.

FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Cavernas em risco de extinção. **Ciência Hoje**, 29(173): 20-28, 2001.

FERREIRA, R. L.; PROUS, X.; BERNARDI, L. F. O.; SILVA, M. S. Fauna subterrânea do Estado do Rio Grande do Norte: caracterização e impactos. **Revista Brasileira de Espeleologia**, 1: 25-51, 2010.

FERREIRA, R. L.; CARDOSO, R. C.; SILVA, M. S. Composição, riqueza e diversidade de invertebrados em cavernas de Dianópolis (TO). **Revista Brasileira de Espeleologia**, v. 2, p. 1-18, 2016.

FISER, C.; ZAGMAJSTER, M.; FERREIRA, R. L. Two new Amphipod families recorded in South America shed light on an old biogeographical enigma. **Systematics and Biodiversity** (Print), 11:117-139, 2013.

GALAS, J. *et al.* Litter decomposition in a mountain cave water. **Archive Hydrobiology**, 138(2): 199-211, 1996.

GILBERT, J.; DANIELPOL, D. L.; STANFORD, J. A. **Groundwater ecology**. San Diego: Academic, 1994. 571 p.

GRAENING, G. O. **Ecosystem dynamics of an Ozark cave**. 2000. 99 p. Tese (Ph.D.) University of Arkansas, Arkansas, 2000.

- GRANDCOLAS, P.; NATTIER, R.; TREWICK, S. Relict species: a relict concept? *Trends in Ecology & Evolution*, v. 29 (12): 655-663, 2014.
- GUIMARÃES, M. M.; FERREIRA, R. L. Morcegos Cavernícolas do Brasil: novos registros e desafios para conservação. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 2, p.1-33, 2015.
- HOLSINGER, J. R.; CULVER, D. C. The invertebrate cave fauna of Virginia and a part of eastern Tennessee: zoogeography and ecology. *Brimleyana*, 14:1-162, 1988.
- HOWARTH, F. G. Ecology of cave arthropods. *Annual Review of Entomology*, Palo Alto, 28: 365-389, 1983.
- INIESTA, L. F. M.; ÁZARA, L.N.; SILVA, M. S.; FERREIRA, R. L. Biodiversidade em seis cavernas no Parque Estadual do Sumidouro (Lagoa Santa, MG). *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 2, p. 18-37, 2012.
- JASINSKA, E. J.; KNOTT, B.; MCCOMB, A. J. Root mats in ground water: a fauna-rich cave habitat. *Journal of North American Benthological Society*, Glenview, 15(4): 508-519, 1996.
- JOHNSON, C. N. Species extinction and the relationship between distribution and abundance. *Nature*, 394: 272-74, 1998.
- JUBERTHIE, C.; DELAY, B.; BOUILLON, M. Sur l'existence d'un milieu souterrain superficial en zone non calcaire. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, 290: 49-52, 1980.
- KREMEN, C.; WILLIAMS, N. M.; THORP, R. W. Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Science* 99:16812-16816, 2002.
- LANDE, R. Mutation and conservation. *Conservation Biology*, 9:782-91, 1995.
- LEAL-ZANCHET, A. M.; SOUZA, S. T.; FERREIRA, R. L. A new genus and species for the first recorded cave-dwelling Cavernicola (Platyhelminthes) from South America. *ZooKeys* (Online), 442: 1-15, 2014.
- LEWINSOHN, T. M.; FREITAS, A. V. L.; PRADO, P. I. Conservação de Invertebrados terrestres e seus habitats no brasil. *Megadiversidade*, 1(1): 62-69, 2005.
- MAGURRAN, A. E. *Measuring biological diversity*. New York: Blackwell Science Ltd, 2004. 256 pp.
- MARSH, A. S.; ARNONE, J. A.; BORMAN, B. T.; GORDON, J. C. The role of *Equisetum* in nutrient cycling in an Alaskan shrub wetland. *Journal of Ecology*, 88:999-1011, 2000.
- MATTHIES, D.; BRAUER, I.; MAIBOM, W.; TSCHARNTKE, T. Population size and the risk of local extinction: Empirical evidence from rare plants. *Oikos*, 105:481-88, 2004.
- MESSANA, G.; BARATTI, M.; BENVENUTI, D. *Pongycarcinia xiphidiourus* n. gen. n. sp., a new Brazilian Calabozoidae (Crustacea Isopoda). *Tropical Zoology*, 15: 243-252, 2002.
- MILLER, J. A. A redescription of *Porrhomma cavernicola* Keyserling (Araneae, Linyphiidae) with notes on Appalachian troglobites. *Journal of Arachnology*, 33:426-438, 2005.
- MINSHALL, G. W. Role of allochthonous detritus in the trophic structure of the Woodland springbrook community. *Ecology*, Whashington, 48(1): 139-149, 1967.
- MIHEVC, A.; BOSAK, P.; PRUNER, P.; VOKAL, B. Fossil remains of the cave animal *Marifugia cavatica* in the unroofed cave in the Črnotiče quarry, W Slovenia. *Geologija*, 45(2): 471-474, 2002.

- NIEMILLER, M. L.; NEAR, T. J.; FITZPATRICK, B. M. Delimiting species using multilocus data: diagnosing cryptic diversity in the southern cavefish *Typhlichthys subterraneus* (Teleostei: Amblyopsidae). *Evolution*, 66: 846-866, 2012. doi: 10.1111/j.1558-5646.2011.01480.x
- NIEMILLER, M. L. *et al.* Doomed before they are described? The need for conservation assessments of cryptic species complexes using an amblyopsid cavefish (Amblyopsidae: *Typhlichthys*) as a case study. *Biodiversity and Conservation*, 22: 1799-1820, 2013.
- OLIVEIRA, M. P. A. Os métodos de coleta utilizados em cavernas são eficientes para a amostragem da fauna subterrânea? 2014. 85p. *Dissertação* (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2014.
- PIRES, A. M. S. *Potiicoara brasiliensis*: a new genus and species of Spelaeogriphacea (Crustacea: Peracarida) from Brazil with a phylogenetic analysis of the Peracarida. *Journal of natural history*, 21(1): 225-238, 1987.
- POULSON, T. L.; WHITE, W. B. The cave environment. *Science*, Washington, 165: 971-981, 1969.
- PREVORČNIK, S.; FERREIRA, R. L.; SKET, B. Brasileirinidae, a new isopod family (Crustacea: Isopoda) from the cave in Bahia (Brazil) with a discussion on its taxonomic position. *Zootaxa* (Auckland. Print), 3452: 47-65, 2012.
- PROUS, X.; FERREIRA, R. L.; MARTINS, R. P. Delimitation of epigean-hypogean ecotone zone in two limestone caves in southeastern Brazil. *Austral Ecology*, 29: 374-382, 2004.
- PROUS, X.; FERREIRA, R. L.; JACOBI, C. The entrance as a complex ecotone in a Neotropical cave. *International Journal of Speleology*, 44: 177-189, 2015.
- RABINOWITZ, D. Seven forms of rarity. In: SYNGE, H. (Ed.) *The biological aspects of rare plant conservation*. Chichester: John Wiley & Sons, 1981, pp. 205-217.
- RACOVITȚĂ, E. G. [1907] Essay on biospeological problems. D. C. Culver e O. T. Moldovan (Trans.) In: MOLDOVAN, O. T. (Ed.) *Emil George Racovitza*. Essay on biospeological problems - French, English, Romanian version. Cluj-Napoca, Romania: Casa Cărți de Știință, 2006, pp. 127-183.
- RODRIGUES, S. G.; BUENO, A. A. P.; FERREIRA, R. L. The first hypothelminorheic Amphipoda (Dogielinotidae: *Hyalella*) from South America. *ZooKeys* (Print), 236: 65-80, 2012.
- SARBU, S. M.; KANE, T. C.; KINKE, B. K. A chemoautotrophically based cave ecosystem. *Science*, Washington, 272: 1953-1955, 1996.
- SCHWARTZ, M. W. *et al.* Linking biodiversity to ecosystem function: Implications for conservation ecology. *Oecologia*, 122: 297-305, 2000.
- SHARRATT, N. J.; PICKER, M.; SAMWAYS, M. The invertebrate fauna of the sandstone of the caves of the Cape Peninsula (South Africa): patterns of endemism and conservation priorities. *Biodiversity and Conservation*, 9: 107-143, 2000.
- SOUZA-SILVA, M. S. *Dinâmica de disponibilidade de recursos alimentares em uma caverna calcária*. 2003. 77p. *Dissertação* (Mestrado em Ecologia. Conservação e Manejo da Vida Silvestre) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- SOUZA-SILVA, M. S.; MARTINS, R. P.; FERREIRA, R. L. Trophic Dynamics in a Neotropical Limestone Cave. *Subterranean Biology*, v.9: 127-138, 2011.
- SOUZA-SILVA, M. S.; JUNIOR, A. S.; FERREIRA, R. L. Food availability in a quartzitic cave in a Brazilian mountain Atlantic forest. *Journal of Caves and Karst Studies*, v.75: 177-188, 2013.
- SIMON, K. S. *Organic matter and trophic structure in karst groundwater*, 2000, 91p. Tese (Ph.D.) Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2000.

TRAJANO, E. Cave faunas in the Atlantic tropical rain forest: composition, ecology and conservation. *Biotropica*, 32(4): 882-893, 2000.

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. *Biologia subterrânea*: introdução. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2006, v. 1. p. 92.

USHER, M. B. *Wildlife conservation evaluation*. London: Chapman and Hall, 1986.

VAN NOUHUYS, S. Metapopulation Ecology. In: *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*. Chichester: John Wiley & Sons, 2009, 1-9.

WHITE, W. B. The evolution of Appalachian fluviokarst: competition between stream erosion, cave development, surface denudation, and tectonic uplift. *Journal of Cave and Karst Studies*, 71: 159-167, 2009.

YAMAMOTO, Y.; BYERLY, M. S.; JACKMAN, W. R.; JEFFERY, W. R. Pleiotropic functions of embryonic sonic hedgehog expression link jaw and taste bud amplification with eye loss during cavefish evolution. *Developmental Biology* 330(2009): 200-211, 2009.

ZAMPAULO, R. A. *Diversidade de invertebrados cavernícolas na província espeleológica de Arcos, Pains e Doresópolis (MG): subsídios para a definição de áreas prioritárias para a conservação*. 2010. 190 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2010.



Fragilidades e impactos ambientais no carste e nas cavernas

Cristiano Fernandes Ferreira





Introdução

As áreas de ocorrência de cavernas no Brasil historicamente vêm sofrendo com a falta de planejamento e controle das mais variadas atividades humanas. Como já mostrado em capítulos anteriores, os ambientes cársticos, principalmente carbonáticos, abrigam a maior parte dos sistemas subterrâneos conhecidos. Tais áreas ocorrem em porções significativas do país e muitas vezes em regiões de intensa produção agrícola ou industrial. Essas atividades atraem, por consequência, uma série de intervenções ligadas à infraestrutura, como abertura de estradas, expansão de cidades, projetos de geração de energia, entre outros. A questão da proteção das cavernas e seu entorno surgiu muito recentemente, quando grande parte do dano já havia se dado nas regiões mais ocupadas, como em algumas áreas metropolitanas (Curitiba e Belo Horizonte, por exemplo). Considerando que a legislação sobre o tema começa a se delinear no final da década de 1980 e que ainda na atualidade não conhecemos sequer uma ínfima parte do patrimônio espeleológico nacional (7% nos carbonatos, vide Capítulo 1), podemos concluir que, além das perdas já computadas, muito ainda resta a ser feito para garantir a conservação desses frágeis ambientes no futuro.

As cavernas talvez representem a manifestação mais expressiva na evolução natural de determinadas paisagens, como as cársticas. Talvez por esse motivo e por apelo popular tenham recebido a atenção dos legisladores com a criação de instrumentos legais tão específicos. Entretanto, apesar da inegável fragilidade e da importância científica e ambiental das cavernas, essas feições não subsistem desconectadas das áreas em que se inserem, mantendo uma relação de íntima

conexão com os ambientes superficiais e demais setores do meio subterrâneo, como o epicarste. Apesar de não existirem instrumentos legais específicos à conservação dos ambientes cársticos e suas diversas feições, pode-se considerar a legislação sobre cavernas como uma oportunidade, desafiadora, para gerenciamento indireto dessas áreas (AULER, 2016).

Grande parte do desafio reside no tamanho gigantesco do Brasil, com áreas de ocorrência de cavernas nos mais variados litotipos (carbonatos, formações ferríferas, siliciclastos), assim como condições climáticas e biogeográficas diferenciadas, ante uma recorrente falta de estudos e informações detalhadas. Por outro lado, soma-se uma demanda crescente por recursos naturais ou intervenções em tais regiões, aumentando o volume de processos de licenciamento em órgãos ambientais. Nesse contexto de pouca informação e sobrecarga de trabalho, diante de decisões que podem afetar de forma definitiva e irreversível parcela importante do patrimônio espeleológico brasileiro, observa-se também uma complexidade enorme de procedimentos institucionais. São diversas esferas de decisões, legislações nem sempre convergentes ou de fácil aplicação, que tornam o licenciamento ambiental ainda mais desafiador.

No intuito de contribuir com mais elementos para as análises nos processos de licenciamento ambiental são propostas, neste capítulo, algumas discussões a respeito da importância, da fragilidade, dos problemas recorrentes, das formas de controle e monitoramento ambiental nos terrenos cársticos e suas cavernas. Optou-se pela subdivisão do tema, iniciando a discussão sobre a importância e a fragilidade das áreas cársticas, carbonáticas sobretudo, e alguns dos seus atributos funcionais, como as cavernas e o epicarste. Na sequência serão abordados alguns dos principais problemas que afetam essas áreas, incluindo os sistemas de cavernas (carste subterrâneo). Por fim, são tratadas algumas alternativas para maior conhecimento, monitoramento e prevenção de impactos ambientais sobre as áreas de cavernas no Brasil.

A natureza diferenciada do carste

A principal diferença entre as áreas cársticas e demais ambientes naturais é a dualidade entre a superfície e todo um sistema subterrâneo tridimensional muito bem desenvolvido, tanto do ponto de vista hidrológico, geomorfológico como biológico. Conforme Ford e Williams (2007), a hidrologia distinta desses ambientes e as feições características decorrem de uma combinação da alta solubilidade da rocha (carbonática, em geral) e uma porosidade secundária bem desenvolvida, permitindo assim a captura de drenagens superficiais, o desenvolvimento de cavernas, as depressões fechadas (dolinas) e ressurgências. Isso implica que boa parte da água que entra nos sistemas cársticos escoar pouco tempo em superfície, sendo transferida rapidamente para sistemas subterrâneos (cavernas), mais superficiais ou profundos, conferindo alto dinamismo a esses ambientes. A conexão direta entre as águas superficiais e os aquíferos subjacentes no carste, devido à maior permeabilidade pela porosidade secundária da rocha (acamamento, fraturas, etc.), torna a água subterrânea extremamente vulnerável à poluição, sem tempo para reações químicas ou físicas de atenuação (GUTIERREZ, 2014). Fora das regiões cársticas, a menor permeabilidade mantém os contaminantes preferencialmente nas partes

superficiais do terreno, em bacias hidrográficas bem delimitadas, de maior facilidade de depuração natural ou induzida. Diferentemente das bacias superficiais, as bacias de drenagem subterrâneas no carste raramente possuem limites rigorosamente fixos, podendo haver conexões através de condutos que atravessam bacias adjacentes (PILÓ, 1999; WHITE, 2012).

O aquífero cárstico possui um caráter anisotrópico e heterogêneo, caracterizado não apenas pelos pontos de recarga rápida através de uma rede de condutos, como também uma infiltração lenta através de uma rede de fraturas (GENTHNER *et al.*, 2003; FERRARI; KARMANN, 2008). A porosidade por uma rede de condutos é conceitualmente típica do sistema cárstico e, conforme White (2012), se comparado com aquíferos porosos (arenitos, p. ex.), a velocidade de fluxo varia de centímetros por segundo (turbulento) para metros por ano (laminar), respectivamente. Ou seja, o fluxo em meio poroso é muito mais lento que em condutos. A água concentrada nessas “tubulações” tem pouca ou nenhuma dispersão e, portanto, os contaminantes não agem como pluma. Por isso, podem alcançar ressurgências ou poços de abastecimento sem nenhuma diluição. Outra característica desses aquíferos é que possuem a capacidade de armazenar água e possíveis contaminantes em sua estrutura (epicarste, fraturas, sifões), liberando-os somente tempos depois, após eventos de intensa pluviosidade (efeito pistão – WILLIAMS, 2008).

No Brasil, desde o final do século XVII, algumas áreas cársticas, como a de Lagoa Santa, em Minas Gerais, apresentaram vantagens competitivas que estimularam a sua ocupação por melhores condições de fertilidade estrutural dos solos, presença de ressurgências de água e salitre para produção de pólvora, encontrado nas cavernas (AULER, 2016). Ainda segundo o autor, essa região cárstica foi palco de grande crescimento populacional, a partir da década de 1950, reflexo da expansão e do dinamismo da capital, Belo Horizonte, situada a poucos quilômetros ao sul. Situação parecida é encontrada na região metropolitana de Curitiba, onde diversas cidades limítrofes ocuparam áreas cársticas. A demanda por recursos naturais tão úteis à expansão industrial e urbana de metrópoles e cidades próximas tornou essas áreas cársticas ainda mais atraentes e estratégicas, com a instalação de fazendas, mineradoras e indústrias. A maior parte do abastecimento de água da região metropolitana de Curitiba se dá através do bombeamento de água subterrânea do carste. Em 2006, em operação do CECV/IBAMA, constatou-se que a Sanepar abastecia de forma irregular a metrópole através de 32 poços perfurados, sem licenciamento. Tanto em Minas Gerais como no Paraná, contabilizam-se também inúmeras indústrias relacionadas a extração, beneficiamento e transformação de rochas como calcário e dolomito.

A aplicação mais notória dessas rochas talvez seja na composição do cimento, tão demandado na construção civil. Entretanto, conforme Sampaio e Almeida (2008), são inúmeras as aplicações dessa matéria-prima. Na indústria da construção é utilizada como blocos para calçamento, agregados (brita), cal e ornamentação (mármore, p. ex.). Derivados dos carbonatos também incluem utilização como fluxantes, fundentes, matéria-prima na indústria do vidro, refratários, escorificante, remoção de elementos químicos diversos (enxofre, fósforo, etc.); na indústria siderúrgica, para fabricação de aço, abrasivo, corretivo de solo; e na indústria química em geral. Outros usos incluem: refino de açúcar; composição de pasta de dente; em alimentos animais e humanos; no tratamento de esgoto; de

água; de ar (filtro); na fabricação de papel, plástico, tintas, cerâmicas.

Somente na referida região cárstica de Lagoa Santa e circunvizinhanças vivem aproximadamente 500 mil pessoas, existem 15 plantas industriais ligadas a cimenteiras (AULER, 2016) e ocorrem inúmeras outras frentes de lavra e ameaças ao carste e às cavernas. Ao mesmo tempo que o carste é extremamente complexo, sensível, é também atraente a diversas atividades humanas, o que reforça, portanto, a necessidade de cuidado e maior atenção nos processos que envolvem as atividades humanas nesses ambientes.

O epicarste – zona de especial interesse da conservação

Uma zona muito importante para o desenvolvimento do carste e de extrema vulnerabilidade ambiental por representar importante hábitat e manter um aquífero suspenso essencial para diversos processos é o epicarste, estudado por diversos autores (KLIMCHOUK, 2000; WILLIAMS, 2008; BAKALOWICZ, 2013). Essa zona morfogenética caracterizada por alta porosidade e permeabilidade ocorre entre a superfície e a base mais compacta de rocha calcária subjacente. Pode ocorrer em rochas expostas, sem solo, caracterizada por intenso lapiezamento, mas quando ocorre uma cobertura (solos, sedimentos ou alterita), especialmente em regiões tropicais como no Brasil, há maior disponibilidade de CO₂, importante para os processos de dissolução (formação do ácido carbônico). Esse meio mais fraturado no topo dos maciços carbonáticos propicia o armazenamento de água e a retenção dos fluxos para as zonas hidrológicas abaixo, como a vadosa e freática. Assim, o epicarste possui uma função importante ao deter a recarga e moderar eventos de inundação ou atenuar a descarga potencialmente mais vigorosa. Por representar um aquífero suspenso que retém água por longos períodos, mesmo na estiagem, é essencial para a continuidade dos processos de formação de espeleotemas, cursos de água em cavernas e hábitat para fauna aquática troglóbia (populações estigobiontes). Essa zona hidrológica é considerada por muitos autores como essencial para processos espeleogenéticos e para a formação de importantes feições de concentração de fluxos hídricos no carste, como as dolinas de dissolução. Segundo Ford e Williams (2007), até 80% da dissolução ocorrem nos primeiros 10m nos topos dos maciços calcários.

Do ponto de vista biológico, o epicarste representa um ecótono, uma zona de interface entre a superfície e as cavernas, armazenando e fornecendo matéria orgânica dissolvida e água para os ambientes subjacentes (SIMON, 2012; CULVER *et al.*, 2012). Enquanto condutos canalizam grandes quantidades de água, mas em pontos bem determinados dos maciços, o epicarste assume uma contribuição muito mais abrangente e difusa, se considerada toda a sua área de superfície na bacia. Poças e canais hídricos mantidos pelo aquífero epicárstico tendem a ser mais constantes em fluxo, temperatura e química do que canais conectados diretamente com a superfície, como através de sumidouros. Essas são características importantes que em grande parte explicam como a rica biodiversidade encontrada no meio subterrâneo se mantém ao longo do tempo.

É importante destacar que, por estar mais exposto, o epicarste é facilmente afetado por atividades que ocorrem na superfície, como desmatamento, movimentação de solo, contaminação, entre outros. Sua relação intrínseca com setores mais abaixo, inclusive com as cavernas, pode resultar na

transmissão de impactos por meio de poluentes, alterações na recarga hídrica e redução de nutrientes para populações troglomórficas. Bakalowicz (2012; 2013) relata que o epicarste é muito frágil e pode ser facilmente erodido. Além da atuação dos fatores externos, como interferências humanas ou agentes naturais de erosão superficial, existe maior gradiente altimétrico e um aparato subterrâneo que induz e propicia a perda mais acelerada de solo através de condutos verticais ou fraturas alargadas.

As cavernas – importância e fragilidades

Segundo Palmer (2007), as cavernas representam importante ferramenta para o estudo da água subterrânea, sendo impossível monitorar, prever ou remediar a contaminação dos aquíferos cársticos sem o prévio conhecimento sobre os sistemas cavernícolas. Através dessas feições é possível obter informações geológicas preciosas, como também da evolução das paisagens à sua volta. São também fontes de informação para estudos ambientais diversos e até mesmo para a engenharia estrutural e prospecção de petróleo. Para a biologia subterrânea, as cavernas representam um verdadeiro laboratório natural para observação de parte importante dos processos relacionados a esta ciência.

Conforme White e Culver (2012), as condições preservativas do ambiente subterrâneo, com níveis de umidade e temperatura mais regulares e ausência de luz, favorecem uma série de processos característicos das cavernas. Esses ambientes permitem o crescimento de minerais em formas e tamanhos não usuais. Os depósitos químicos, também denominados de espeleotemas, são fontes importantes para análises paleoambientais, visto que são nutridos pela água de infiltração, que traz consigo informações sobre as condições climáticas ou vegetacionais da superfície em épocas passadas, registradas nas suas bandas de crescimento. As cavernas ainda permitem a conservação de registros arqueológicos e paleontológicos que são depositados em suas entradas, fornecendo informações tão importantes que podem ser classificadas como um “livro de história da era do gelo”. Ao fornecer informações sobre o passado, as cavernas apontam possibilidades para análises quanto às mudanças ambientais futuras.

Ao considerar o uso de cavernas para a visitação, Palmer (2007) relata que grande parte dos processos que se desenvolvem em seu interior ocorrem de forma muito lenta e, quando perturbados, podem nunca se recuperar. Algumas formações minerais, como determinados tipos raros de espeleotemas, podem ser facilmente quebradas por um leve toque (FIGURA 1). Os habitats de vida subterrânea são facilmente alterados devido ao sensível balanço energético desses sistemas.

Nesse sentido, Elliott (2012) relata que ao menos seis espécies troglóbias norte-americanas foram extintas, sem contar as tantas outras que sequer foram estudadas antes de ter seu habitat alterado, preenchido, minerado ou poluído. Algumas espécies ou ecossistemas são endêmicos de uma única caverna ou pequeno agrupamento dessas feições, o que potencializa o risco de perdas definitivas de biodiversidade. Ao se considerar a realidade brasileira de grande diversidade de cavernas nos mais variados biomas, forte pressão de atividades antrópicas e os baixíssimos investimentos em pesquisa, há de se imaginar um número de extinções de espécies sem qualquer estudo ou conhecimento bem superior aos seis troglóbios norte-americanos. Alguns estudos têm se concentrados em compostos bioativos derivados de bactérias, fungos e demais micro-organismos em cavernas, potencialmente

importantes para a medicina (CHEEPHAM *et al.*, 2013). Perdas de biodiversidade da fauna subterrânea, sem que sequer haja tempo para o conhecimento mínimo desse patrimônio, podem, portanto, representar prejuízos não apenas ambientais.



Figura 1 – Espeleotemas frágeis, do tipo helictites e canudos, em ambiente muito estável de um conduto superior na Caverna de Santana (SP) Foto: Cristiano Fernandes Ferreira

As cavernas abrigam comunidades importantes do ponto de vista ecológico, como os morcegos, que realizam serviços ambientais essenciais como polinização, dispersão de sementes e controle de insetos. Determinadas espécies podem ter consideráveis níveis de dependência das cavernas que as abrigam, também chamados de troglótenos obrigatórios (ver interessante discussão em GUIMARÃES; FERREIRA, 2014; TRAJANO; BESSI, 2017). Algumas cavernas contêm números gigantescos de indivíduos, as chamadas “bat caves”, e, portanto, são por si só muito importantes para as regiões onde estão inseridas. É importante ressaltar também que muitas cavernas representam potenciais abrigos a espécies ameaçadas de extinção ou até mesmo hábitat de espécies só encontradas neste ambiente. Conforme a Lista Nacional Oficial de Espécies da Fauna Ameaçadas de Extinção, apresentada pelo Ministério do Meio Ambiente (Portaria MMA nº 444, de 17 de dezembro de 2014), são contadas ao menos 109 espécies que se abrigam em cavernas em categorias distintas de risco, sendo 80 delas restritas a ambientes subterrâneos (troglóbios). Das espécies troglóbias, 39 são classificadas como criticamente ameaçadas.

Problemas ambientais no carste – com exemplos no Brasil

Neste tópico serão discutidos os problemas que ocorrem nas áreas cársticas e que, por consequência, podem afetar também as cavernas. Alguns desses problemas são observados em várias partes do país.

Contaminação da água

Em regiões densamente ocupadas, o consumo de água diretamente de rios superficiais, sem tratamento prévio, obviamente não é recomendado. Como comenta White (2012), as águas de nascentes ou poços são consideradas “puras” pela população, apesar de esta máxima frequentemente não ser verdadeira, até mesmo para áreas não cársticas. A água proveniente de poços perfurados ou surgências cársticas naturais, muitas vezes confundidas como nascentes por seu aspecto de águas cristalinas, devem ser consideradas com a mesma suspeição de rios superficiais, potencialmente contaminados. Vale lembrar que a forma como se dá a recarga desses aquíferos por sumidouros ou dolinas e a alta conectividade do sistema de condutos e fraturas normalmente não envolvem processos naturais de filtração.

Já Ford e Williams (2007) destacam que, nos ambientes cársticos ocupados pelo homem, as dolinas e os sumidouros são infelizmente utilizados como lugares muito adequados ao despejo de resíduos sólidos ou líquidos de toda natureza, uma vez que eles somem da vista (e da mente). De fato, um dos grandes problemas nas áreas cársticas é que os sistemas de drenagem estão ocultos no subterrâneo, escondendo toda sorte de contaminantes, odores, carcaças de animais, lixo e o que mais for dispensável.

Segundo White (2012), diferentes categorias de contaminantes podem atingir o aquífero cárstico e se propagar de maneiras igualmente distintas. Contaminantes solúveis em água, compostos orgânicos ou sais inorgânicos (nitratos) serão transportados pelo aquífero na mesma velocidade que a água, sendo detectáveis nas ressurgências geralmente em horas ou em poucos dias. Já os líquidos leves em fase não aquosa (*Light Nonaqueous Phase Liquids* - LNAPLs), como gasolina, óleo diesel e outros hidrocarbonetos, são menos densos que a água e por isso flutuam acima dela. No seu percurso pelo aquífero cárstico, parte desses contaminantes tende a ser armazenada em bolsões no teto dos condutos (cúpulas) ou sifões. Com o aumento do nível do lençol, a água pode empurrar esses contaminantes para cima como um êmbolo, ao longo de fraturas e descontinuidades, permitindo que os gases exalados atinjam estruturas na superfície, como casas e prédios. Outra categoria de contaminantes são os líquidos pesados em fase não aquosa (*Heavy Nonaqueous Phase Liquids* - DNAPLs), representados por determinados tipos de solventes, desengraxantes e outros compostos, mais densos que a água e que tendem a ser encontrados na base dos aquíferos. Eles podem ser capturados no epicarste e, quando atingem o aquífero subjacente, se deslocam para as partes mais inferiores, muitas vezes se misturando aos sedimentos clásticos presentes no fundo dos condutos (argilas), o que atrasa a saída natural do sistema por muito tempo, sendo dificilmente detectados nas ressurgências após os derramamentos na superfície. Outro tipo de contaminante seriam os elementos metálicos, representados por substâncias diversas, como cromo, cádmio, chumbo e mercúrio (muito tóxicos), além de cobre e zinco (menos tóxicos), que podem ser transportados, precipitados, adsorvidos ou

incorporados aos sedimentos. Por fim, diversos tipos de contaminantes biológicos atingem os aquíferos (vírus, bactérias e protozoários) principalmente pela falta de filtração natural do sistema cárstico. Alguns tipos de protozoários, como a *Giardia lamblia*, podem se propagar através de cistos e sobreviver por um período suficiente para atingir longas distâncias da área-fonte, como currais, pocilgas ou fossas negras. Nos ambientes subterrâneos, a morte ou eliminação natural desses organismos é mais lenta, pela condição ambiental propícia (com umidade, sem insolação).

Ford e Williams (2007) adicionaram um sexto tipo de contaminante: os resíduos sólidos, como o lixo, e ressaltam que a contaminação atinge o aquífero cárstico por fluxos alogênicos ou autogênicos, com características diferentes em função da menor ou nenhuma filtração. White (2012) faz o mesmo alerta, e relata que o aporte de águas alogênicas nos sistemas subterrâneos, como rios superficiais, frequentemente se dá através de entradas de cavernas, ou pontos de pouca ou nenhuma filtração natural, carregando consigo contaminantes dissolvidos ou em suspensão, como garrafas, pneus, lixo diverso e carcaças de animais. Durante eventos de fortes chuvas, o fluxo excedente superficial em terrenos cársticos (autogênicos) pode não ser completa ou imediatamente absorvido pelas estruturas de captação, como dolinas, levando ao acúmulo de água e formação de poças. Essa retenção hídrica leva a maior pressão de infiltração, que pode induzir colapsos por *piping* e, por consequência, a entrada de considerável quantidade de sedimentos clásticos e toda sorte de contaminantes existentes na superfície para o subterrâneo. Dessa forma, não apenas problemas com contaminantes específicos, como agrotóxicos, dejetos humanos e animais, entre outros, alteram as condições do aquífero cárstico. A introdução de quantidades volumosas de material sólido, desde sedimentos, restos vegetais e lixo, sobretudo em regiões com excedente desses resíduos disponíveis em superfície, também resulta em alterações significativas da qualidade da água.

A dificuldade de tratamento natural dos contaminantes em áreas cársticas é ressaltada por Ford e Williams (2007), que enumeram cinco razões principais para a ineficácia dos processos. Primeiramente, a área de superfície em meio fraturado nas rochas cársticas é bem menor que em meio poroso, como em rochas clásticas, e isto implica menor adsorção, troca de íons e colonização de microrganismos naturais importantes no processo de depuração. A infiltração mais rápida reduz a possibilidade de evaporação de determinados contaminantes mais voláteis, como alguns tipos de solventes e pesticidas. Em carste de solo menos espesso, a filtração física é menos importante, o que transfere mais rapidamente os contaminantes para o aquífero. Material particulado pode ser transportado facilmente nos sistemas de condutos, auxiliados pelo fluxo turbulento livre, bastante frequente nesse tipo de aquífero. Os mecanismos de eliminação de determinados vírus e bactérias são tempo-dependentes, o que não se observa nos fluxos rápidos dos sistemas de condutos, reduzindo a efetividade nos processos de adsorção e dessorção.

No Brasil observam-se diversas fontes de contaminação para o aquífero cárstico, desde relacionados ao mau gerenciamento de dejetos animais e restos vegetais no campo, como contaminantes ligados a áreas urbanas provenientes de lixões, esgoto ou fossas mal projetadas, ou até mesmo o lançamento inadequado de resíduos industriais no solo ou nas dolinas (FIGURAS 2, 3, 4 e 5). Num país caracterizado pela força da agricultura moderna, o uso de fertilizantes, ricos em nitratos ou de agrotóxicos com



Figura 2 – Curral sem controle dos dejetos animais na borda da dolina associada à Lapa Vermelha (MG), ao fundo, decretada Monumento Natural Estadual. No fundo da dolina há um lago que se conecta com a caverna

Foto: Cristiano F. Ferreira



Figura 3 – Restos vegetais aprisionados no sumidouro da Lapa do Penhasco (GO) após fortes chuvas, oriundos do desmatamento a montante, em área de preservação permanente

Foto: Cristiano F. Ferreira

Figura 4 – Lixão de Matozinhos (MG), posicionado na parte alta de uma depressão que converge as águas para um sistema ativo de dolinas e cavernas, já contaminadas
Foto: Cristiano F. Ferreira



Figura 5 – Zona urbanizada em Matozinhos (MG) numa grande dolina, na qual se observa também a presença do gado. Efluentes domésticos, rurais, resíduos e sedimentos são constantemente carreados para o aquífero cárstico
Foto: Cristiano F. Ferreira

as mais variadas composições representa um grande risco para contaminação dos aquíferos nesses tipos de ambientes. Também há que se ressaltar que muitas cidades estão completamente inseridas no carste, incluindo aí potenciais fontes de contaminantes, desde graxas, óleos e combustíveis oriundos de vazamento em tanques, oficinas mecânicas, da lavagem do asfalto nas chuvas, entre outros.

Rios alogênicos que passam por cidades às vezes distantes, cruzando áreas agrícolas degradadas e mal gerenciadas podem ser capturados por sistemas cársticos, importando contaminantes de regiões muito distantes. Como exemplo desses sistemas flúvio-cársticos, podem ser citados os rios que nascem na Serra Geral de Goiás, na divisa com o agronegócio do oeste baiano, os quais atravessam importantes cavernas do Parque Estadual de Terra Ronca (GO), como São Mateus, Angélica, São Vicente, entre outras, possíveis candidatas à contaminação por agroquímicos ou material particulado. Da mesma forma, as cavernas do Sistema João Rodrigues, como a gigantesca Buraco do Inferno, da Lagoa do Cemitério, são drenadas por águas capturadas do Rio Tamanduá, com mais de 90km de extensão da bacia antes da captura, passando por cidades como Baianópolis e Cristópolis, na Bahia. Essas cidades no interior do Brasil frequentemente não contam com sistemas adequados de esgoto, regulação de postos de combustível, oficinas mecânicas, entre outras fontes de contaminantes. As cidades citadas, no oeste baiano, de Cristópolis e Baianópolis apresentam, respectivamente, menos de 20% e 10% de esgotamento adequado nos domicílios, segundo o *site* do IBGE¹.

Soterramento ou alteração de estruturas funcionais – epicarste e dolinas

Como já discutido, o epicarste é considerado por muitos como uma importante zona morfogênética e ecológica do carste. Bakalowicz (2013) é taxativo ao afirmar que o epicarste é a parte mais frágil do carste. Outros autores associam a formação de dolinas de dissolução à atuação do epicarste na concentração de fluxos e morfogênese, afirmando que a expressão superficial dessas depressões fechadas é na verdade fruto da dinâmica dissolutiva dessa zona subsuperficial (WILLIAMS, 1983; KLIMCHOUK, 2000). O epicarste é um dos principais habitats subterrâneos superficiais para espécies aquáticas (CULVER *et al.*, 2012).

Partes do carste onde afloram pontas de rocha, campos de lapiás ou de dolinas indicam uma proximidade e maior exposição e desenvolvimento do epicarste. Já áreas com maiores espessuras de solo ou outro material de cobertura tendem a ser menos vulneráveis, apesar de que os processos ainda operam no epicarste em maior profundidade, mesmo sem feições aparentes na superfície (HIRUMA *et al.*, 2007). Conforme Bakalowicz (2013), quanto mais o epicarste se desenvolve, menos vulnerável o aquífero cárstico se torna. Entretanto, a redução ou alterações no epicarste ou nos solos acima dele têm sérias repercussões para populações subterrâneas e sua biodiversidade, além de implicações físicas como redução desse aquífero ou processos espeleogenéticos.

As dolinas representam importantes pontos de pronta conexão com o subterrâneo, indicando que os processos morfogênéticos, também ligados ao epicarste, estão bem desenvolvidos nas áreas onde ocorrem estas feições. Essas depressões fechadas, que convergem fluxos em pontos de recarga, são consideradas feições de grande importância em análises de vulnerabilidade do aquífero cárstico (ver ZWAHLEN, 2004). As dolinas podem ser consideradas uma das formas mais distintas dos relevos

¹ Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>

cársticos, comparáveis a canais de primeira ordem (SAURO, 2012) e, na realidade, deveriam ser enquadradas legalmente como áreas de preservação permanente.

São várias as atividades antrópicas que causam a destruição ou a perturbação de feições funcionais no carste (áreas de recarga), como dolinas, campos de lapíais ou regiões de epicarste bem superficial. Atividades agrícolas talvez promovam as alterações mais amplamente disseminadas nas áreas cársticas, por revolver o solo por meio da aragem, por utilizar pesadas máquinas e regularizar as terras através do recobrimento de dolinas ou áreas lapiazadas, por remover a vegetação nativa e por frequentemente não adotar técnicas de conservação do solo, levando à erosão (FIGURA 6 e FIGURA 7). Para ter uma dimensão, mais de 50% das cavernas cadastradas no Brasil estão localizadas em terras com algum grau de alteração, especialmente ligadas ao uso do solo para atividades agrícolas ou rurais, conforme se observa na tabela a seguir (TABELA 1).

Tabela 1 – Relação da quantidade de cavernas cadastradas por áreas alteradas relacionadas ao uso do solo no Brasil

Número de cavernas	Porcentagem (total 16.646)	Tipologia cobertura vegetal
5.960	35,8%	Agricultura e pastagem permanentes
1.202	7,22%	Mosaico de agricultura, pastagem e vegetação arbórea alterada
1.735	10,4%	Mosaico de vegetação arbustiva pastejada e pequenas agriculturas

Fonte: EMBRAPA² e CANIE³.

Na Europa, diversas áreas agrícolas que tradicionalmente utilizavam-se dos fundos de dolinas e depressões foram estendidas para setores do epicarste mais superficial, com afloramentos na superfície, que anteriormente eram apenas usadas para pastagens de baixa intensidade, conforme relatam Parise e Pascali (2003). Máquinas pesadas e retroescavadeiras usadas na agricultura moderna removeram as rochas para formação de campos agricultáveis. Os blocos de rocha em geral foram jogados em cavernas ou sumidouros. Tal situação e a intensificação do uso agrícola levaram ao aumento da erosão em diversas regiões da Europa.

Por outro lado, algumas regiões cársticas vêm sendo ocupadas pelo acréscimo populacional, que empurra setores mais pobres da sociedade, com menos recursos tecnológicos e informação, para terras menos propícias e frágeis, como algumas regiões de exposição de rochas e epicarste raso. Esse fenômeno pode induzir os processos erosivos em tais áreas, tornando até mesmo inviável sua utilização para fins agrícolas. Ford e Williams (2007) citam que muitas áreas cársticas ocupadas por populações

² Shape de vegetação: EMBRAPA-CNPM no projeto "Mapa da Cobertura Vegetal Brasil", que utilizou as imagens do Satélite Landsat do período 15/09/1999 a 24/10/2001 do projeto "O Brasil Visto do Espaço". Os shapefiles da cobertura vegetal do Brasil podem ser obtidos através do link: http://www.cobveget.cnpm.embrapa.br/resulta/brasil/vgt_brasil_final_sad69latlong.zip

³ Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE, (CECAV/ICMBio). Disponível em: www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html. Acesso em: mai. 2017.



Figura 6 – Desmatamento em dolina, de epicarste raso, associada a recarga hídrica da Gruna da Tarimba (GO), uma das maiores e mais importantes cavernas do Brasil, localidade-tipo de espécie de peixe troglóbia, *Ituglanis boticário* (RIZZATO; BICHUETE, 2014) **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 7 – Preparação de terreno para plantio em depressão cárstica associada à Gruta da Lavoura (MG), no paredão ao fundo, que é assoreada nos episódios de chuvas **Foto:** Cristiano F. Ferreira

pobres da China, Europa e Malásia foram abandonadas pela inviabilidade de recuperação. Wang *et al.* (2004) descreveram um grave caso de “desertificação rochosa” que se operou no sudoeste da China, o que levou a uma situação em que mais de 20% da Província de Guizhou tenha sido afetada nesse processo. A grande densidade populacional, juntamente com o manejo inadequado do solo, a natural fragilidade e a tendência do carste local em permitir e acentuar os processos erosivos, dada a alta permeabilidade típica desse ambiente (epicarste muito desenvolvido), foram as causas apontadas do problema.

O processo de desertificação rochosa no carste é mais notório em países de clima temperado, onde a espessura dos solos geralmente é menor, ou em regiões de intensa predisposição erosiva, como em algumas regiões da China (monções, relevos declivosos). Apesar de as áreas cársticas brasileiras em geral apresentarem coberturas mais espessas, esse processo pode representar um risco localizado para determinadas regiões de maior permeabilidade no epicarste, menor espessura de solos e maior declividade. A substituição secular das áreas florestais por pastagens ou áreas de plantio com técnicas inadequadas levou à intensificação de processos de perda de solo e desertificação rochosa em áreas cársticas na Europa e China (FORD; WILLIAMS, 2007), ocupadas há muito mais tempo do que no Brasil. Essa condição propícia à desertificação rochosa, que já se observa inicialmente em alguns locais (FIGURA 8), se não for combatida e não forem adotadas práticas agrícolas conservacionistas, pode levar a uma situação irreversível no futuro.



Figura 8 – Campo de dolinas em área intensamente alterada por atividades agrícolas e criação de gado. O epicarste raso e a predisposição aos processos erosivos, com a formação de terracetes e a exposição de pontas de rocha, indicam possível evolução para desertificação rochosa **Foto:** Cristiano F. Ferreira

Outras intervenções também são bastante danosas às áreas de recarga, como a mineração que destrói parte do epicarste no topo dos maciços calcários, a expansão de áreas urbanas no carste ou os projetos lineares que, por vezes, soterram estruturas importantes como dolinas (FIGURAS 9 e 10). Na obra de pavimentação da BR-135, na região de São Desidério, oeste da Bahia, uma grande parte do projeto ocorreu justamente sobre o raso epicarste local, ligado a um dos mais importantes sistemas subterrâneos do país, associado ao Rio João Rodrigues, já citado. A obra foi embargada antes do asfaltamento, entretanto diversas intervenções de soterramento e detonação por explosivos foram realizadas para regularizar o leito da rodovia, inclusive com suspeitas de indução de colapsos na maior caverna da área (FIGURAS 11 e 12). Uma situação dessas, com dolinas e epicarste tão próximos ao leito da rodovia, representa um enorme risco, literalmente de mão dupla, em que os aquíferos epicársticos e freáticos podem ser afetados em quantidade e qualidade de água e a futura rodovia poderá ser danificada por processos de subsidência, como será tratado à frente. O derramamento de substâncias nocivas na instalação de uma rodovia asfaltada, principalmente durante a operação posterior com o trânsito de veículos pesados e carregados da mais variada sorte de produtos potencialmente perigosos, representa um enorme risco de contaminação do carste. O próprio desgaste paulatino de pneus na banda de rodagem ou o vazamento de óleo dos motores ao longo da pista já são suficientes, neste caso, para contaminar o aquífero, sem que haja processos naturais de depuração, pela escassez de solo e alta permeabilidade do carste na área.



Figura 9 – Destruição do epicarste no norte de Goiás, comum em minerações que se utilizam dos maciços calcários expostos para facilitar a extração de minério **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 10 – Área de expansão urbana em Pains (MG), no Bairro Alvorada, realizado sobre o epicarste, que foi removido ou soterrado, justamente sobre a maior caverna da região, a Gruta do Éden. Notar ao fundo parte do epicarste natural, possível frente para novas expansões **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 11 – Pavimentação para asfaltamento da BR-135, em São Desidério (BA). Dolinas e campos de lapiás foram destruídos exatamente sobre o maior sistema subterrâneo local **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 12 – Colapsos de rocha do teto na caverna Buraco do Inferno da Lagoa do Cemitério (BA), São Desidério. Este ponto coincide em superfície com as obras de pavimentação e detonação de rochas mostradas na foto anterior **Foto:** Cristiano F. Ferreira

Alteração da dinâmica hídrica

Outra repercussão das interferências antrópicas na superfície, destruindo dolinas e o epicarste, é a alteração da complexa, frágil e dinâmica hidrologia do carste, afetando as áreas de recarga, os sistemas de condução e descarga. A obstrução cada vez maior dos caminhos naturais de absorção, seja pela atividade agrícola ou por projetos de infraestrutura, como ilustrado anteriormente, colaboram para eventos mais frequentes de inundações em determinadas áreas e de escassez hídrica em outras. A impermeabilização de extensas superfícies por pavimentação ou edificações relacionadas à urbanização, ou a disposição inadequada de estêreis e resíduos da mineração também podem causar esses problemas (FIGURAS 13 e 14). Gutierrez *et al.* (2014) relatam que essas interferências causam uma mudança no comportamento do sistema diante de episódios de fortes chuvas, causando tanto alterações na resposta das dolinas ante alagamentos como mudanças nas hidrógrafas das ressurgências, resultando em inundações rápidas, mas de maiores magnitudes. Veni *et al.* (2001) relatam que, em áreas naturais, as dolinas estão aproximadamente em equilíbrio com o sistema climático de longo termo, absorvendo a água excedente da maioria das tempestades. As alterações por urbanização causam o entupimento das dolinas e as inundações passam a ser mais frequentes, ocorrendo até mesmo em chuvas moderadas.



Figura 13 – Ocupação urbana em depressão cárstica no município de Pedro Leopoldo (MG). Foto tirada em período de estiagem na região Foto: Cristiano F. Ferreira



Figura 14 – Enchente sazonal na mesma área cárstica urbanizada representada na foto anterior, na região de Pedro Leopoldo (MG). Uma mineração obstruiu parcialmente as estruturas de permeabilidade (sumidouro) com a disposição inadequada de pilha de estéril, causando alagamentos no período de chuvas Foto: Cristiano F. Ferreira

São muito comuns no Brasil regiões de carste coberto, com a presença de solo ou outros materiais de cobertura (argila e areia) potencialmente mobilizáveis em processos de erosão, estimulados pelo uso e ocupação dessas áreas. Esses materiais vão sendo transportados da superfície para o sistema subterrâneo de condutos e cavernas, sendo depositados no fundo das galerias e, às vezes, preenchendo espaços significativos, até mesmo entupindo os condutos. Apesar de esse processo ser natural no carste, ele é especialmente intensificado pela ação humana, como se observa em áreas muito alteradas, a exemplo de Mambai (GO), onde galerias superiores de cavernas importantes vêm sendo entulhadas por sedimentos (FIGURA 15). A substituição dos espaços vazios no subterrâneo por acúmulo de sedimentos faz com que, em episódios de chuvas fortes e prolongadas, o sistema não comporte fisicamente tanta água, levando a inundações que antes não ocorriam. Há então uma alteração na capacidade hidrodinâmica dos reservatórios subterrâneos. Em Pains (MG), também ocorre processo semelhante; na base dos paredões calcários formam-se inúmeras lagoas temporárias, especialmente decorrentes da menor capacidade do sistema, já bem alterado em drenar eficazmente esses aportes hídricos.



Figura 15 – O desmatamento na área da Gruta Borá (GO) levou ao assoreamento em mais de um metro da galeria superior, onde antes era possível caminhar normalmente **Foto:** Cristiano F. Ferreira

Outro exemplo similar, conforme relatam Hiruma *et al.* (2007), ocorre na cidade de Nova Campina (SP), que está implantada sobre um conjunto de depressões fechadas suaves, associadas ao carste subjacente nos arenitos da Formação Furnas. A área urbana, portanto, sofre com enchentes crônicas

durante as épocas de chuva, justificando intervenções mais incisivas como o bombeamento de água para cursos superficiais próximos e obras de aprofundamento nas dolinas para diminuir o impacto das enchentes.

As atividades de mineração, especialmente do calcário, também alteram a dinâmica hidrológica e podem causar impactos ambientais. Os principais problemas derivam do aprofundamento das lavras a céu aberto e da segmentação de condutos e sistemas fraturados que armazenam ou conduzem água. À medida que a lavra se aprofunda, passa a ser necessário o bombeamento da água que se acumula na base da área de mineração (ver FIGURA 16). A abertura causada nos pacotes rochosos pela mineração libera a água anteriormente aprisionada nestes maciços e induz um cone de rebaixamento hídrico à sua volta. Essa redução do nível do aquífero nas adjacências pode causar problemas de falta de água em surgências e poços perfurados, rebaixamento de lagos em cavernas, como na Gruta Tamboril, em Unai (MG), e até mesmo colapsos de solo na superfície.



Figura 16 – Um dos muitos empreendimentos minerários na área de Pedro Leopoldo (MG), na Região Metropolitana de Belo Horizonte. O aquífero e as muitas cavernas nessa região se encontram ameaçados **Foto:** Cristiano F. Ferreira

Alterações importantes em parte do sistema hidrológico do carste de Vazante (MG) também foram causadas pela atividade de mineração, neste caso, subterrânea (mina de zinco). O estudo de Ninyanya *et al.* (2018) teve como objetivo realizar análises (técnicas de modelagem numérica) para sanar os problemas operacionais e custos financeiros decorrentes do alagamento e contínuo bombeamento de água nas galerias subterrâneas desse empreendimento. Segundo o estudo, acredita-se que essa mina subterrânea seja a que mais bombeia água no mundo (cerca de 11.000 m³/h), criando um cone de rebaixamento de 180m que atinge, através de estruturas cársticas oclusas, o Rio Santa Catarina e suas adjacências (bacia do Rio São Francisco). É relatado que a ocorrência de colapsos superficiais nas circunvizinhanças aumenta a permeabilidade de água para a mina, ameaçando o ambiente de

mineração e a segurança, o que justificaria uma série de intervenções para cessar a conectividade hídrica com o empreendimento, como selamento de estruturas de absorção e do rio (canalização). O estudo considera que essa situação foi causada pela interceptação, pela mineração, da tripla porosidade do pacote cárstico local (da matriz, das estruturas da rocha e de condutos).

Em uma abordagem bem mais alarmista quanto à questão da mina subterrânea de zinco em Vazante (MG), Mendonça (2009) relata que a operação desse empreendimento levou ao intenso rebaixamento do aquífero, da drenagem de córregos, lagoas e açudes usados pela população (Poço Verde, Lagoa do Sucuri), à contaminação do solo e água do Rio Santa Catarina por metais pesados e à consequente mortandade de peixes. Segundo a autora, em 1999 a mineração teria atingido um importante conduto freático a 350m de profundidade, que causou a repentina inundação das galerias. A autora afirma que, num raio de 92km do empreendimento, mais de 100 produtores rurais foram afetados pela formação de dolinas e em apenas uma propriedade limítrofe à mina foram contabilizadas mais de 40 dolinas, supostamente induzidas pelo rebaixamento do aquífero. A despeito das posições conflitantes entre as abordagens pró ou contra essa mina, a situação em Vazante alerta para os riscos de alterações nos complexos sistemas hídricos do carste, podendo gerar não apenas eventuais danos ambientais significativos, como custos potencialmente impeditivos a determinados empreendimentos.

Fuga de água em reservatórios

Os aquíferos cársticos, como já mencionado, não se atêm somente às bacias hidrográficas superficiais. A estrutura tridimensional da rede de condutos que ocorre nesses sistemas implica a existência de novos e antigos caminhos para a água fluir. Conforme White (2012), novos condutos vão sendo formados em profundidade e paulatinamente priorizados no escoamento, em detrimento de condutos mais antigos, que vão sendo abandonados em níveis superiores. Entretanto, em episódios de cheias ou grandes aportes hídricos, como em tempestades, os antigos caminhos podem vir a ser reativados, levando parte do escoamento da água para outros pontos, às vezes muito distantes da área atual de descarga (ressurgência). Essa característica do aquífero cárstico denota alta complexidade para empreendimentos relacionados ao barramento de água em represas.

Além disso, a formação de grandes lagos em áreas afetadas por sistemas cársticos pode levar à reativação de estruturas presentes no subsolo. Gutierrez *et al.* (2014) relatam que dolinas são normalmente causadas pela formação de represas. A sobrecarga nas áreas de formação da coluna de água leva à compressão nos condutos e feições ocultas obstruídas por sedimentos, aumentando fluxos turbulentos capazes de remover estas barreiras, o que pode gerar colapsos. A variação dos níveis da represa em operação e do próprio sistema cárstico decorrente da sazonalidade estimula a erosão química e mecânica em subsuperfície. A existência de estruturas cársticas não detectadas na fase prévia de instalação da represa, como criptodolinas (ver SAURO, 2012), pode levar a severos danos estruturais e de estabilidade, não apenas ao empreendimento como às áreas próximas, pela interligação por condutos e fugas d'água.

Segundo Milanović (2011), a construção de represas em áreas cársticas, a despeito dos estudos prévios, é sempre cercada de incertezas. Apesar de levantamentos geofísicos, análise geomorfológica,

testes com traçadores, prospecção espeleológica e um mapeamento detalhado da geologia da região serem ferramentas úteis para adequar certas medidas preventivas, como o selamento de estruturas permeáveis, as possibilidades de fuga d'água permanecem. Em alguns casos no mundo, após a construção das barragens, medidas paliativas foram tomadas com relativo sucesso. Em outros casos, devido à enorme complexidade, não houve remediação e os prejuízos foram enormes. Isso denota que cada região cárstica é única e que as mudanças geoestrutural impostas pela coluna d'água podem repercutir de forma inesperada e rápida, mesmo décadas depois da construção da barragem, impondo enorme risco a este tipo de empreendimento. A adoção de técnicas convencionais de investigação ou preparação dos terrenos para enchimento dos reservatórios não é bem-sucedida em áreas com a porosidade típica do carste. A utilização de caldas de concreto ou bloqueios para grandes estruturas cársticas, como cavernas e condutos, definitivamente não resolve isoladamente o problema. Apesar disso, são apresentadas na publicação de Milanović (2011) algumas experiências e técnicas para evitar tais prejuízos, que podem servir de ponto de partida em eventuais projetos dessa natureza em ambientes cársticos no Brasil.

A demanda sempre crescente por energia e, ao mesmo tempo, uma predisposição natural para a criação de projetos hidrelétricos no Brasil podem levar a situações conflituosas com o carste no futuro. Um projeto recente, em que foram necessárias intervenções para evitar fugas d'água, foi o da Usina de Belo Monte, no Pará. A Caverna Kararô, nos arenitos, é um importante abrigo de morcegos em meio à floresta amazônica, já bem alterada naquela região. A caverna fica situada a menos de 250m da área diretamente afetada pelo empreendimento, em bacia adjacente. Além disso, há um curso de água perene nessa cavidade, que se encontra em nível altimétrico inferior à cota de alagamento. Essa situação levou o empreendimento a adotar medidas para prevenir impactos ao sistema espeleológico. Foram impermeabilizadas com material argiloso algumas áreas identificadas como potencial rota de fuga. Também foram determinadas pelo órgão licenciador medidas cautelares de monitoramento constante nessa caverna.

Colapsos e subsidências do terreno

Um dos mais preocupantes problemas que afetam as áreas cársticas são relacionados aos processos de subsidência e colapsos na superfície. A migração de materiais (solos, rocha alterada) para o meio subterrâneo, através de processos contínuos, lentos e às vezes pouco perceptíveis definem a subsidência, ao passo que processos mais abruptos e imprevistos definem os colapsos (geralmente de solo).. Esses fenômenos são típicos do carste, pela predominância dos processos de transporte e erosão (química e mecânica) ocorrerem preferencialmente no subsolo, às vezes a dezenas de metros abaixo da superfície. Os colapsos e subsidências, juntamente com a dissolução, são os mecanismos principais de formação de depressões no carste, como as dolinas, e, por isso, são detalhadamente tratadas do ponto de vista geomorfológico por diversos autores (SAURO, 2012; BECK, 2012; FORD; WILLIAMS, 2007). A ocorrência de colapsos e subsidências, portanto, é considerada um fator dinâmico e natural do carste. Entretanto, o aumento da população e da demanda por recursos naturais estimula a ocupação de áreas cársticas, mais vulneráveis e sujeitas a riscos para estruturas urbanas e vidas humanas. Alguns trabalhos de cunho mais aplicado estão ligados ao entendimento desses processos que

podem ser de origem natural ou induzida pelo homem (VENI *et al.*, 2001; WHALTHAM *et al.*, 2005; GUTIERREZ *et al.*, 2008, 2014; GALVÃO *et al.*, 2015).

A natureza do sistema cárstico é caracterizada pela alta permeabilidade no subsolo, especialmente promovida pelo alargamento das estruturas da rocha por dissolução, abrindo caminho para o transporte de materiais móveis que frequentemente recobrem tais áreas, como o solo. Os colapsos de rocha compacta no teto das cavernas, abaixo da superfície, ocultas ou não, dificilmente ocorrem no tempo humano e causam danos (WHITE, 1988; PALMER, 2007). O mesmo não se pode dizer da migração ascendente de tetos de cavidades presentes no solo friável, capazes de resultar em rebaixamentos mais dinâmicos de terreno. O contato de coberturas móveis com rochas bem carstificadas abaixo promove a maior perda de material, a criação de vazios, e formam um arco de ascensão do teto dessas cavidades até a superfície. A depender da coesão desse material de cobertura intemperizado ou depositado, o processo relatado acima pode ser mais abrupto (colapso) ou lento e contínuo (subsidência, sufusão). Materiais menos coesos, ricos em partículas mais arenosas, por exemplo, tendem a ser carregados pela água para fraturas ou condutos no subsolo de forma contínua, aumentando paulatinamente a depressão. Esse processo causa danos progressivos a estruturas próximas, sendo normalmente identificados pelo surgimento de rachaduras em muros, paredes ou afundamentos de pisos. Já nos materiais mais coesos, ricos em argila, por exemplo, os vazios que vão se formando no subsolo podem se sustentar por mais tempo, em finas camadas, sem que se note qualquer dano a edificações na superfície. A sobrecarga por alguma alteração nessas áreas ou eventos de forte precipitação levam ao colapso repentino, às vezes tragando tudo à sua volta (casas inteiras, ruas, etc.). Esse último tipo de ameaça é muito difícil de detectar, especialmente em áreas urbanizadas, e já causou perdas de vidas humanas em diversos lugares do mundo.

Interferências antrópicas nos sistemas aquíferos possuem forte relação na indução desses afundamentos de solo e outras coberturas no carste. A redução do nível do lençol freático, seja pelo bombeamento para projetos de irrigação, pelo abastecimento público, ou pela soma de vários usos individuais numa região, bem como o bombeamento em minerações ou minas subterrâneas para desalgar suas praças de extração, podem causar processos de colapsos ou subsidência nas adjacências. Conforme Gutierrez *et al.* (2014), no rebaixamento do lençol ocorre a perda de sustentação por flutuabilidade dos sedimentos anteriormente embebidos na água. Além disso, há um aumento da velocidade da água subterrânea com a substituição de fluxos freáticos lentos para fluxos vadosos descendentes que induzem erosão subsuperficial (*piping*) pelo novo gradiente estabelecido. Essa condição é especialmente importante quando o nível do lençol baixa além do contato entre o topo da rocha e o material de recobrimento (VENI *et al.*, 2001; WHALTHAM *et al.*, 2005).

Alguns outros mecanismos também induzem esses processos. A elevação repentina dos níveis do aquífero, injeções hídricas pontuais, ou a ocorrência de inundações também são relatadas como possíveis causas para esses distúrbios na superfície. Gutierrez *et al.* (2014) comentam que o acréscimo de água no solo pode aumentar os processos de erosão subterrânea e modificar adversamente o peso e a resistência mecânica dos sedimentos ali presentes. Pode ocorrer um processo de alteração na viscosidade dos sedimentos anteriormente secos e mais compactos. Alterações promovidas pela

ocupação humana, como a impermeabilização por estradas, edificações e calçamentos, levam à canalização sobrecarregada de água em determinados pontos no carste, que podem conter cavidades em desenvolvimento em subsuperfície. Uma vez que os pontos de absorção naturais foram suprimidos (dolinas, epicarste), os pontos remanescentes não conseguem dar vazão a grandes volumes de água em fortes precipitações. As inundações e os empoçamentos de água decorrentes disso pressionam por excesso de peso as possíveis cavidades no subsolo, que colapsam ou afundam. Veni *et al.* (2001) relatam que alterações no meio urbano induzem a maior frequência na variação do nível do aquífero, pela constante retirada ou injeção de água no subsolo, o que pode gerar maior estresse nos materiais envolvidos. Construções pesadas sobre áreas susceptíveis a dolinamentos, barramento de água (represa), vazamento em tubulações enterradas ou fossas também podem desencadear colapsos.

Casos de dolinamentos induzidos por atividades antrópicas em terrenos cársticos também são relatados no Brasil. Pereira (1998), ao estudar a região cárstica de Itaetê, na Bahia, identificou inúmeros colapsos e subsidências, recentes na época, atribuídas ao desmatamento em larga escala na região e a eventos de precipitação. Hiruma *et al.* (2007) relatam colapsos e subsidências em estradas e propriedades rurais na região de Nova Campina (SP). Galvão *et al.* (2015) contabilizaram ao menos 17 eventos desse tipo na região urbana de Sete Lagoas (MG), desde o primeiro e mais divulgado episódio ocorrido em 1998, que causou danos a edificações urbanas. O bombeamento de água subterrânea para abastecimento público da cidade, para uso industrial e drenagem de pátios de mineração por rebaixamento das cavas são indicados como causas prováveis para os afundamentos em Sete Lagoas.

Na publicação de Galvão *et al.* (2015) são citados casos similares nas regiões de Cajamar e Maringá (São Paulo), Almirante Tamandaré e Colombo (Paraná), Teresina (Piauí), Lapão (Bahia), Lagoa Santa (Minas Gerais). Em notícias veiculadas pela mídia (internet), acrescentam-se eventos em Bocaiúva do Sul (Paraná), Nobres (Mato Grosso), diversos casos em Vazante (Minas Gerais) e, recentemente, um impressionante colapso (70m de comprimento; 30m de largura e 45m de profundidade) ocorrido coincidentemente na área de uma empresa petroquímica que capta água subterrânea em Vera Cruz, Ilha de Itaparica (BA). Em visita de campo na área urbana de Matosinhos (MG) também foram observados alguns exemplares de colapsos de cobertura em região altamente antropizada, denotando a recorrência desses processos em áreas cársticas alteradas (FIGURA 17). Diversas casas na localidade apresentam rachaduras ou danos nas estruturas por conta de subsidência de solo.

Destruição de cavernas

Ao considerar os aspectos faunísticos, Elliott (2012) relata que diferentes tipos de animais são adaptados a condições naturais extremas relacionadas ao ambiente cavernícola, e até podem se ajustar a determinadas ameaças causadas pelo homem. Porém algumas das alterações mais destrutivas se relacionam a atividades de mineração e projetos de contenção hídrica, que literalmente destroem ou inundam completamente as cavernas como habitat.

As perdas de cavernas em frente de lavras pelo Brasil são incontáveis, especialmente em regiões de grande concentração de empreendimentos, com forte apelo competitivo e comercial. Conforme Auler (2016), na Região Metropolitana de Belo Horizonte (Lagoa Santa, Sete Lagoas, Matosinhos,



Figura 17 – Periferia de Matosinhos (MG), onde dois colapsos de cobertura próximos de casas denotam o risco da ocupação de áreas cársticas. Edificações na área já apresentam danos **Foto:** Cristiano F. Ferreira

Pedro Leopoldo, Prudente de Moraes - MG) são aproximadamente 15 indústrias cimenteiras e projetos para novos empreendimentos (FIGURA 16). Na região de Arcos e Pains, em Minas Gerais, além de grandes cimenteiras, competem pelo recurso mineral pequenas e médias minerações que extraem dolomito e calcário para a fabricação de cal, brita, corretivo agrícola e muitas outras aplicações, com diversos casos de supressão total ou parcial de cavernas, como na região da Gruta do Éden e Coqueiros (FIGURA 18). Próximo a Curitiba (Colombo, Bacaetava, Rio Branco do Sul, Almirante Tamandaré - PR) diversos empreendimentos de tamanho e finalidades distintas são observados, às vezes dividindo as mesmas áreas e frentes de lavra, lado a lado, há décadas. Alguns desses empreendimentos destruíram importantes sistemas hídricos de cavernas, como no caso da Gruta Escura, Bacaetava e Cinco Níveis (FIGURA 19). Nessa região, em 2006, o CECAV, através do IBAMA, em uma operação para coibir a destruição e a degradação do patrimônio espeleológico, vistoriou e aplicou sanções, entre embargos, autuações e notificações, em 12 empreendimentos de mineração distintos, em pouco mais de uma semana.

Projetos de barramento para produção de energia elétrica no Brasil também já causaram a destruição de inúmeras cavernas, que foram completamente ou parcialmente inundadas. A Usina de Serra da Mesa, nas proximidades de Minaçu (GO), no Rio Tocantins, é considerada a de maior reservatório em volume de água no país (54,4 bilhões de m³)⁴, ocupa uma área de 1.784km² e, conforme

⁴ Disponível em: http://www.furnas.com.br/hotsites/sistemafurnas/usina_hidr_serramesa.asp



Figura 18 – Gruta Coqueiros (MG), parcialmente destruída numa frente de lavra em Pains **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 19 – Gruta Cinco Níveis (PR) destruída numa frente de lavra **Foto:** Cristiano F. Ferreira

o banco de dados de cavernas do CECV (CANIE), foram alagadas 39 cavernas e ocorrem ainda outras 75 em suas proximidades, com potenciais danos parciais ou indiretos. Mais recentemente, a formação dos lagos das Usinas de Belo Monte (PA), no Rio Xingu, e em Estreito, na divisa entre MA/TO, no Rio Tocantins, também afetaram cavernas.

Degradação de cavernas

Algumas cavernas apresentam condições de alta energia, com várias entradas e claraboias, grandes colônias de morcegos, ou rios susceptíveis a eventuais e violentas inundações. Apesar de muitas delas no Brasil apresentarem essas condições, pode-se considerar que tais cavernas são exceções. Em geral, as cavernas na natureza apresentam ambientes estáveis do ponto de vista climático, hídrico e ecológico, sendo caracterizadas pela total ou parcial ausência de luz, por aportes energéticos regulares e de baixa amplitude e umidade elevada. Essas condições naturais favorecem o estabelecimento de ecossistemas complexos e frágeis, assim como o desenvolvimento de formas incríveis de espeleotemas. Essas características impõem um baixo grau de resiliência à maior parte desses ambientes subterrâneos, onde alterações mais significativas podem ter caráter irreversível.

Atividades nas vizinhanças de cavernas podem causar uma série de problemas a esses peculiares ambientes. Já foram notadas alterações significativas causadas por pó oriundo de estradas, calcinações e britagem nas áreas próximas, assim como fuligem em áreas industriais ou por queimadas junto às entradas de cavernas. O desmatamento das áreas circunvizinhas acentua esses problemas e induz também à piora das condições ambientais, hídricas e tróficas. A erosão nas áreas desmatadas junto às cavernas causa grandes aportes de sedimentos. Em várias cavernas no país já foi observado, inclusive, a presença de gado em seu interior, que busca esses locais para se abrigar do sol. Outro problema comum que degradou muitas grutas brasileiras foi a extração de salitre, escavações paleontológicas (científicas ou comerciais) e vandalismo (GOMES; PILÓ, 1992; AULER, 2016).

Baseados na investigação de 48 cavernas na região centro-norte de Minas Gerais, Rabelo *et al.* (2018) analisaram 14 tipos diferentes de possíveis impactos às áreas das cavernas. O desmatamento no entorno desses habitats foi observado em 100% dos casos, seguido pelas atividades agrícolas (80%) e pelo lixo inorgânico no interior desses ambientes (75%). Outras alterações analisadas em conjunto alcançam 86% da amostra, como queimadas, depleção de recursos tróficos, espécies exóticas e derramamento de poluentes. Corpos hídricos ocorrem em um terço da amostra e boa parte dessas cavidades apresentam alterações na dinâmica hídrica, para captação de água (barramentos). Apenas 6% da amostra total são afetados pela mineração, mas é bom considerar o potencial de danos mais efetivos desses tipos de ameaças, que ocorrem de forma mais pontual do que disseminada na paisagem. Diversos tipos de atividades potencialmente degradadores de cavernas são encontrados a menos de 1.000m dessas feições pesquisadas (86%), desde rodovias, áreas urbanas, fazendas e mineração. A realidade demonstrada nesse levantamento não difere muito da maior parte das áreas cársticas e de cavernas do restante do Brasil.

O lixo intencionalmente despejado em cavernas é um aspecto recorrente em várias partes do mundo e no Brasil também. Parise e Pascali (2003) relatam uma caverna na Itália em forma de abismo (San Leonardo), com curso ativo de água, na qual é despejado lixo, inclusive hospitalar, desde a

década de 1960, resultando numa pilha de vários metros e toneladas de resíduos. Em Botuverá (SC), o CECAV, em trabalho de levantamento espeleológico no Parque Nacional da Serra do Itajaí, identificou uma pilha menor de resíduos agrícolas, inclusive latas vazias de agrotóxicos, no Abismo da Areia Alta, uma caverna com atributos similares à italiana anteriormente descrita. Aparentemente, abismos estimulam o despejo de lixo pelas populações nas vizinhanças, mas tais feições têm relação direta com a recarga do aquífero. Casos similares são observados em diversos pontos do país, como em Paripiranga (BA), Pains e região cárstica de Lagoa Santa, em Minas Gerais, entre muitos outros lugares, seja relacionado à urbanização próxima ou a atividades agrícolas.

Degradação pela visita em cavernas

O interesse e a curiosidade que as cavernas despertam sempre atraíram turistas, pesquisadores, grupos de espeleólogos, religiosos e a população das regiões onde ocorrem (recreação). Algumas cavernas foram adaptadas para receber esses públicos, outras permanecem sem qualquer controle ou estrutura para minimizar eventuais danos. Os principais problemas associados às atividades de visita em cavernas são:

Quebra de espeleotemas (FIGURA 20); compactação do piso em sedimentos clásticos (substrato fauna); turbidez pela travessia em cursos d'água; contaminação com uso de materiais inadequados nas estruturas; lixo e *lint*; pichações; poluição luminosa (sistemas artificiais de iluminação); alterações do microclima (CO₂ inclusive); alterações no crescimento de espeleotemas (por gordura das mãos ou alteração do microclima); espeleotemas sujos (por mãos e pés); erosão nas trilhas; *lampenflora* e outros organismos exóticos (FIGURAS 21 e 22); deposição de fuligem (carbureto, fogueira, motobomba, FIGURAS 23 e 24); poeira levantada pelo caminhar; afugentamento da fauna (morcegos); detritos humanos em trilhas longas na caverna; construção de estruturas pesadas ou inadequadas (barragem, passarelas, etc.); abertura de passagens no piso (sedimentos) ou paredes (por escavação ou detonação de rochas por explosivos - FIGURA 25); barramentos para formação de espelho d'água.

Cigna (2012) traz algumas informações interessantes e atualizadas sobre o manejo de cavernas turísticas desde suas primeiras publicações. A emissão de calor corporal equivale a uma lâmpada de 150 a 200W. Portanto, considerando centenas ou milhares de visitantes por dia, a quantidade de energia liberada não deve ser negligenciada. Já o dióxido de carbono exalado na respiração, anteriormente considerado prejudicial, foi constatado que é muitas vezes inferior ao que o próprio ambiente produz naturalmente (solo, rio, etc.), não sendo mais um problema a se considerar. Por outro lado, o *lint*, caracterizado como os resíduos importados do meio externo pelo visitante, composto pela descamação da pele, cabelo, restos secos das roupas e sujeira dos sapatos, deve ser considerado como um problema para deterioração das formações (recobrimento de espeleotemas). A *lampenflora*, organismos clorofilados como algas, musgos e samambaia, comuns onde há sistemas fixos de iluminação artificial, deve ser combatida com sistemas de iluminação apropriado, com baixa emissão de ondas úteis aos organismos (espectro entre 440 e 650nm), ou o não direcionamento às formações. Também pode-se retirar a *lampenflora* lavando os espeleotemas antes de serem recobertos por calcita. O autor não sugere mais o uso de infraestruturas removíveis, por essa medida ser ineficaz, mas sugere o uso de materiais mais condizentes com o ambiente, como concreto. Madeira pode



Figura 20 – Espeleotemas raros, espirólitos, em cavernas areníticas da Chapada Diamantina (BA). Observam-se vários exemplares quebrados por vândalos, na Gruta do Lapão, com apenas um ao centro íntegro e na cor original (branco) **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 21 – Exemplo de organismos exóticos na caverna turística Rei do Mato (MG). Em ambiente afótico a instalação de luminárias induziu o crescimento de samambaia **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 22 – Exemplo de organismos exóticos na caverna turística Rei do Mato (MG). Em ambiente afótico a instalação de luminárias próximas aos espeleotemas induziu o desenvolvimento de *lampenflora* (mancha esverdeada) **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 23 – Fuligem decorrente do uso de carbureteiras, utilizadas durante décadas na Caverna de Santana (SP), uma das mais visitadas no Estado de São Paulo **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 24 – Espeleotemas raros, espirólitos, afetados por fogueiras utilizadas por caçadores na Gruta da Araponga (BA), Chapada Diamantina, responsável pelo escurecimento destas formações inicialmente brancas **Foto:** Cristiano F. Ferreira



Figura 25 – Na Caverna de Santana (SP), passagem aberta na rocha com o uso de explosivos. Estrutura inadequada e rudimentar de madeira se mostra deteriorada pela colonização de fungos **Foto:** Cristiano F. Ferreira

ser colonizada por organismos; plástico tem que ser sem contaminantes (não é o caso das madeiras plásticas no Brasil); e aço inox pode ser usado em ligas específicas, mas é caro (AISI 304, p.ex.). Toda intervenção deve ser precedida de estudos e acompanhamento de espeleólogos, com experiência na área. As estruturas devem ser consideradas viáveis do ponto de vista ambiental e estético, não conflitantes com o ambiente. O autor termina apresentando um guia para abertura de cavernas turísticas, que pode ser usado para balizar algumas regularizações em licenciamento.

No livro editado por Hildreth-Werker e Werker (2006), *Cave Conservation and Restoration*, observam-se inúmeras experiências relacionadas ao uso turístico de cavernas, com considerações a respeito das estruturas, dos materiais, do manejo e da concepção de trilhas internas, de aspectos éticos relacionados a ambientes prístinos e fauna sensível, processos de restauração de espeleotemas e ambientes degradados pela visitação, monitoramento, entre muitos outros assuntos correlatos. De forma geral pode-se avaliar essa publicação como de extrema importância para consulta em processos de licenciamento de cavernas turísticas. O livro se baseia na adoção de melhores práticas, sempre pautadas pelo bom senso, evitando soluções artificiais e realizando intervenções mínimas. Uma questão muito discutida refere-se ao uso de materiais, quando necessários, mais adequados ao frágil ambiente, considerando aspectos como a necessidade de manutenção ou possibilidade de deterioração nesses ambientes extremos. Aplicações de técnicas sugeridas nessa publicação vêm sendo realizadas em algumas cavernas turísticas no Brasil, com a realização de cursos de restauração em que os próprios participantes colaboram com a limpeza ou adequação das cavernas, a exemplo do ocorrido recentemente no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, Gruta do Janelão (ALT; MOURA, 2018).

Elliott (2012) também ressalta a questão dos materiais ou organismos exóticos. Cavernas turísticas, especialmente aquelas com sistema fixo de iluminação artificial são muito afetadas pelo crescimento de cianobactérias e plantas próximo das luzes, acúmulo de resíduos trazidos com o visitante como o *lint* e lixo, além de perturbação geral do sistema ecológico. Na contramão, a visitação em certas cavernas (nos EUA) abandonou sistemas fixos de iluminação, proporcionando experiências mais educativas aos visitantes, que passaram a portar a própria lanterna e descobrir por si mesmos a vida selvagem desses ambientes.

Essa posição, mais natural, é o que atualmente defende o CECAV. A instalação de estruturas fixas de iluminação em cavernas deve ser combatida. Cavernas com sistemas antigos (década de 1960, p.ex.) não contam sequer com projetos elétricos originais ou o mapeamento das estruturas instaladas. Existe toda uma rede elétrica enterrada nessas cavernas sem que muitas vezes se saiba onde passam as fiações e sob qual condição de segurança se encontram, impossibilitando formas apropriadas de manutenção. Projetos recentes, supostamente mais sustentáveis (LED), valorizaram o jogo de luzes e cores, esteticamente questionáveis, em detrimento dos aspectos naturais da caverna. As pesadas infraestruturas encontradas em muitas grutas turísticas devem ser repensadas em futuras implantações ou reformas no sentido da utilização de projetos mais discretos, leves, com materiais mais apropriados, frequentemente encontrados no próprio ambiente, como rocha ou solo (ver HILDRETH-WERKER; WERKER, 2006). O licenciador deve lembrar que, para as cavernas, menos é mais, não existem materiais mágicos ou projetos mirabolantes que “melhorem” o aspecto do atrativo. Quando necessário, deveriam apenas permitir o acesso com maior segurança aos visitantes e proteção às formações frágeis (FIGURAS 26, 27 e 28).



Figura 26 – Trecho turístico da Caverna do Diabo (SP), uma das cavernas mais visitadas do Brasil e adaptada ao turismo há décadas. A concepção arquitetônica da época impôs à caverna fortes e exageradas estruturas de alvenaria, corrimãos de aço galvanizado (material inadequado) e um potente sistema de iluminação (vapor metálico e de sódio). Recentemente, o sistema de iluminação foi readequado, permanecendo, entretanto, problemas recorrentes em tais projetos, como lampenflora e exigência de manutenção constante **Foto:** Cristiano F. Ferreira

Figura 27 – Trecho da Gruta do Janelão (MG), recentemente adaptado ao uso público, onde a simples demarcação da trilha já foi suficiente para evitar a dispersão de turistas com consequente compactação do piso e destruição de espeleotemas. A concepção do plano de manejo propunha o uso de materiais locais e de menor destaque paisagístico

Foto: Cristiano F. Ferreira



Figura 28 – Lapa do Rezar (MG), onde o ajuste de blocos da própria caverna quase tornou a trilha imperceptível na foto. A concepção do plano de manejo propunha o uso de materiais locais e de menor destaque paisagístico

Foto: Cristiano F. Ferreira

O plano de manejo espeleológico, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 347/2004, visa, sobretudo, a que se discutam antecipadamente o zoneamento das áreas internas das cavernas, o regramento de uso, as infraestruturas necessárias para a sua operação sustentável e o monitoramento ambiental. A maior parte das cavernas turísticas no país foi implantada sem qualquer preocupação ou discussão prévia que considerasse as fragilidades de determinados setores, formações ou da fauna. São poucas as oportunidades de planejamento prévio, como o da implantação do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, que levou décadas até sua abertura e que valorizou a exuberância natural do próprio ambiente. Apesar das alegações quanto ao burocrático sistema para licenciamento de cavernas turísticas no Brasil, há que se considerar que, uma vez implantadas, as alterações podem ser irreversíveis nesses ambientes.

Avaliação ambiental em áreas cársticas e algumas medidas preventivas

Dada toda a discussão acerca dos problemas que afetam os sistemas cársticos e as cavernas, observa-se que a gestão da água nesses ambientes complexos é fundamental. Conforme Ford e Williams (2007), para o manejo adequado do aquífero cárstico é necessário primeiro avaliar a magnitude e a qualidade deste recurso e então comparar com a demanda pelos diversos usuários de água na área sob análise. Em sua publicação e em muitas outras, inclusive no Brasil (GENTHNER *et al.*, 2003; PESSOA, 2005; FERRARI; KARMANN, 2008), observam-se técnicas para dimensionamento, delimitação aproximada, geometria e dinâmica desses complexos aquíferos. Em geral, é necessário um monitoramento de longo prazo, com a realização de um balanço hidrológico combinado com os dados de drenagem da área e das surgências principais, para alcançar uma estimativa do aquífero. White (2012) relata que uma das poucas vantagens na caracterização dos aquíferos cársticos diante de sua heterogeneidade é que a água ressurge na superfície geralmente em um único ou poucos pontos, e esta água carrega consigo informações sobre o que ocorre a montante. Assim sendo, as formas possíveis para caracterização do aquífero passam por análises baseadas no balanço hídrico da região estudada, testes com traçadores, hidrógrafas e análises químicas da água nas ressurgências, dados de poços perfurados e modelagem. Sobre o uso de traçadores em sistemas cársticos, que podem confirmar conexões, mas nem sempre o oposto (a não conexão), informações iniciais podem ser obtidas em Jones (2012).

Ao comparar o comportamento do lençol freático em tipologias de aquífero diferentes, White (2012) relembra que nos meios porosos não cársticos a água vai se infiltrando verticalmente do meio vadoso até o freático, havendo um nível de oscilação nessa interface (*water table*), mas que, em geral, o topo do aquífero acompanha grosseiramente o relevo superficial. O caminho da água até a descarga, nas partes baixas do relevo, nos rios, possui maior resistência hidráulica no meio poroso que no meio de condutos, característico do sistema cárstico. O mapeamento piezométrico no meio poroso é mais fidedigno que no meio de condutos, porque neste último as velocidades de respostas são altas, e podem haver aquíferos suspensos que não correspondam ao nível regional do lençol, sobretudo em áreas de relevo mais acentuado. Entretanto, em áreas de relevo médio a baixo, uma rede de poços bem densa é capaz de fornecer mapas do nível do aquífero de maior confiabilidade, mesmo para o carste, que podem auxiliar as análises em processos de licenciamento ambiental.

A anisotropia e a heterogeneidade dos aquíferos cársticos geram muitas dificuldades para a modelagem hidrogeológica em computadores. Ford e Williams (2007) consideram que alguns modelos, mais apropriados a análises regionais de sistemas porosos e fraturados uniformes, podem não representar adequadamente sistemas de condutos cársticos, de fluxos rápidos e distribuição desuniforme. Essas considerações são importantes num contexto de licenciamento ambiental, em que por vezes os empreendimentos podem afetar severamente o regime hidrogeológico e serem apresentados estudos demonstrando suposta segurança para suas intervenções, baseados em sistemas aquíferos não cársticos. Apesar de alguns modelos terem sido elaborados para aplicação nos sistemas cársticos, deve-se avaliar sempre o caráter diferenciado entre essas regiões, com níveis de carstificação, conectividade e associação com tipologias de aquíferos diferentes, caracterizado pela tripla porosidade: poroso, fraturado e condutos. Existe alta incerteza na generalização de modelos para o carste. O conhecimento detalhado da região onde será implantado o empreendimento, os sistemas de cavernas, a estrutura geológica e demais feições cársticas são muito importantes para uma avaliação mais certa do aquífero. Ford e Williams (2007) relembram uma tragédia ocorrida em uma pequena cidade canadense no ano 2000 (Walkerton, Ontário), em que sete pessoas morreram e 2.300 foram afetadas por contaminação da água de abastecimento público, atingida por esterco de um campo recentemente adubado. O modelo hidrogeológico utilizado mostrou uma velocidade de fluxo 80 vezes menor que o de fato ocorrido.

Uma etapa importante nos projetos que possam afetar regiões cársticas e suas cavernas é o mapeamento detalhado não apenas das estruturas previstas pelos empreendimentos, como das feições naturais típicas desses ambientes. Apesar de essa afirmação parecer óbvia, ao longo das atuações do CECAV em processos de licenciamento ambiental envolvendo cavernas, sempre foram necessárias complementações de informações básicas relacionadas aos aspectos do empreendimento *versus* feições naturais de importância funcional. Os projetos devem detalhar as áreas de interferência, estradas, *pits* de mineração e avanço de lavra, cotas de alagamento, pontos de captação de água ou alteração da drenagem, áreas desmatadas, aterradas, pontos de disposição de resíduos, entre outras informações detalhadas. Devem ser mapeadas, além das cavernas, outras feições importantes, como as drenagens superficiais, os sumidouros ativos e efêmeros, ressurgências e surgências, campos de lapíás, vales secos, e depressões cársticas. Devem ser consideradas não apenas as intervenções futuras, mas também as já ocorridas historicamente na região, como destruição/degradação de cavernas ou alterações do sistema hidrológico. Cabe também aos licenciadores a difícil tarefa de realizar avaliações mais regionais que considerem outros usos dos recursos cársticos na mesma área por demais atividades potencialmente danosas, dentro do princípio de uma análise integradora.

O mapeamento de dolinas pode representar uma ferramenta para análises regionais especialmente em virtude da relação dessas feições de concentração de fluxo e intrínseca associação com o epicarste no desenvolvimento e na evolução desses ambientes e para a conservação dos aquíferos. Segundo Angel *et al.* (2004), esses mapas podem ser usados de forma precursora a investigações mais detalhadas, com o uso de traçadores corantes, para localizar e delimitar as bacias de drenagens subterrâneas. Análises morfométricas (área, profundidade, índice de circularidade, eixo de desenvolvimento,

etc.), de densidade e distribuição de dolinas fornecem dados para interpretações na direção de fluxos, podendo gerar aproximações dos limites da bacia, bem como o grau de conectividade e evolução do sistema cárstico. Hiruma *et al.* (2007; 2014) reforçam que o mapeamento de feições cársticas, como depressões fechadas (dolinas, p.ex.), é de fundamental importância para a compreensão dos sistemas hidrológicos, fornecendo informações para subsidiar o planejamento do uso e ocupação dessas áreas, repercutindo na conservação de cavernas e recursos hídricos. O estudo de Kovačič e Ravbar (2013), realizado na importante e histórica região cárstica do Kras (Eslovênia), demonstrou que o aceleramento do uso e ocupação na área estudada causou a modificação de cerca de 60% das dolinas, desde soterramento por entulhos de construção, regularização do nível da terra para agricultura, formação de pastagens, entre outros, ameaçando o suprimento e a qualidade das águas de abastecimento bem como habitats únicos para a fauna subterrânea. O mapeamento detalhado realizado nesse estudo, identificando inclusive as feições que foram anteriormente soterradas ou parcialmente alteradas, através de análises multitemporais, pode servir de referência para projetos em regiões em que, apesar de ocultas, as estruturas de permeabilidade no carste podem permanecer operantes em subsuperfície.

Uma vez que a contaminação da água no carste é um dos principais problemas dessas áreas, diversas metodologias foram concebidas para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos (mais detalhes em ZWAHLEN, 2004; e na revisão de IVÁN; MÁDL-SZÖNYI, 2017). Em geral, essas metodologias se baseiam em análises da vulnerabilidade intrínseca do carste, ou seja, que estão ligadas às condições geológicas e hidrológicas locais, e das vulnerabilidades específicas, relacionadas às diferentes propriedades dos diversos tipos de contaminantes. São baseadas no modelo-origem (dos contaminantes), caminho (pelo solo, epicarste, dolinas, condutos) e alvo (a superfície do aquífero subterrâneo que se quer proteger). A partir de diversas bases de dados e do conhecimento detalhado das áreas cársticas é possível produzir mapas de vulnerabilidade que também podem ser úteis às análises de licenciamento ambiental. Entretanto ambas as publicações citadas reforçam que, apesar da facilidade da aplicação dos métodos via ferramentas disponíveis (SIG, geoprocessamento), é necessário conhecer bem a área sob investigação e realizar a validação através da comparação dos resultados e análises em campo. Resultados sensivelmente diferentes e até contraditórios podem ser alcançados no uso de métodos distintos.

Elliott (2012) relata que alguns estados norte-americanos publicaram manuais de melhores práticas de manejo para projetos que porventura venham a causar interferências em sistemas cársticos. O autor resume as recomendações principais desses manuais em alguns poucos pontos, lembrando, contudo, que diferentes áreas cársticas devem ter diferentes manuais de melhores práticas de manejo. A primeira recomendação é que se deve descrever detalhadamente a geologia, a hidrologia e a biologia, e ressaltar que esses ambientes são facilmente alterados por sedimentos, derramamentos, despejos e atividades de construção. A identificação de feições cársticas, como dolinas, áreas de recarga, sumidouros, cavernas e ressurgências, assim como uma pesquisa a respeito dos trabalhos já realizados sobre o assunto na área deve ser feita. Os mapas de cavernas são úteis para determinar a extensão superficial dessas feições, assim como estudos com traçadores para delinear as bacias. Os solos podem conter estruturas de permeabilidade oculta. Locais de armazenamento de óleos e combustíveis

devem ser colocados longe de estruturas cársticas e com controle de erosão e vazamentos. Águas servidas e despejo de concreto também necessitam ser mantidos fora de áreas carstificadas. Estradas de serviço temporárias não podem ser feitas com muita inclinação e devem ter contenção adequada do escoamento para evitar erosão. Precisam ser criadas zonas de proteção para ressurgências, sumidouros e cavernas com controle de erosão nas partes altas dessas zonas. Devem-se banir queimadas e uso de pesticidas nesses pontos. As áreas alteradas necessitam ser revegetadas após os projetos e o uso de espécies, nativas ou não, deve ser acompanhado ao longo dos anos. Alterações nos sistemas de drenagem têm que ser evitadas e o descarte de lixo, resíduos, estéreis e outros deve ser devidamente planejado e contido com estruturas de controle de erosão.

A publicação de Veni *et al.* (2001) também traz uma discussão mais ampla sobre melhores práticas de manejo em áreas cársticas e pode servir de base para algumas propostas no licenciamento ambiental. São apresentadas algumas alternativas para problemas comuns em áreas cársticas, como inundações em áreas urbanizadas. Os autores sugerem que nessas áreas ocupadas as dolinas sejam consideradas áreas de preservação, com a manutenção de vegetação nativa ao seu redor. Entretanto, em alguns casos onde a ocupação é consolidada, podem ser tentadas soluções para o aumento da permeabilidade nos sumidouros e dolinas, como a instalação de “poços secos”, devidamente concebidos para evitar entupimentos.

Problemas construtivos no carste e algumas alternativas são relatados por muitos trabalhos (WHITE, 1988; VENI *et al.*, 2001; FORD; WILLIAMS, 2007; ZHOU; BECK, 2013; GUTIERREZ *et al.*, 2014). Em geral, essas publicações ressaltam a dificuldade de prever as condições subsuperficiais em terrenos caracterizados por epicarste irregular, setores ocultos de perda de material (criptodolinas), pontas de rocha desniveladas recobertas por solo (pináculos), blocos soltos e vazios de difícil identificação. Essa situação dificulta a compactação ou a localização correta de bases sólidas para fundações. Também propicia subsidências e colapsos, causando prejuízos em todo tipo de obra, como rodovias, ferrovias, represas, edificações, sistemas de tubulação, pontes, entre outros. Os processos de colapso ocorrem normalmente sem indícios aparentes, mas alguns sintomas podem indicar anomalias (VENI *et al.*, 2001): fissuras lineares ou circulares no solo, asfalto e pavimentos de concreto; depressões no solo ou pavimentos resultando no acúmulo de água; queda, flexionamento ou inclinação de estruturas verticais ou horizontais tais como árvores, postes, cercas, estradas, trilhos, tubulações e placas de sinalização; rebaixamento de estruturas como postes e mastros de pequeno diâmetro; fraturas em paredes e pisos com o consequente emperramento de portas e janelas; pequenos buracos cônicos no solo que aparecem repentinamente; inesperada turbidez na água de poços que produzem água límpida; esvaziamento súbito de cursos d'água ou lagos.

Conforme Waltham e Fookes (2005), a realização de sondagens no carste para identificar vazios ocultos para projetos de engenharia pode não representar uma tarefa fácil, especialmente num carste muito maduro, como os tropicais. Seriam necessárias 2.500 sondagens em um hectare para ter 90% de certeza de encontrar uma cavidade oculta de 2,5m de diâmetro, algo inimaginável a depender da extensão da obra. Sondagens focalizadas nos pontos de apoio, como colunas em determinados projetos, podem ser mais efetivas. Muitas vezes, porém, mesmo em projetos com bastante investigação,

os vazios só são identificados na escavação das fundações, ou durante a operação. Os métodos geofísicos, apesar de avançarem muito, ainda precisam resultar em interpretações mais confiáveis. Além disso, podem não ser adequadas a grandes obras, em áreas extensas. Entretanto o avanço tecnológico nessa seara é constante, podendo tornar viável a utilização dessas metodologias em futuro próximo.

Essas questões sobre danos a estruturas causadas pela ocupação ou construção de grandes obras no carste é discutida com maior profundidade no livro publicado por Waltham *et al.* (2005), cujo principal legado é tratar os aspectos dinâmicos do carste relacionados a colapsos e subsidências numa abordagem aplicada à engenharia. Além de realizar classificações das tipologias de dolinas e do carste em função da maior ou menor dificuldade de intervenções, a publicação mostra soluções preventivas ou corretivas relacionadas a esses processos. O carste tropical é considerado como o de maior dificuldade e desafio, especialmente em situações de maior desenvolvimento e maturidade, taxado como um cenário extremo. São tratadas de forma mais detalhada as técnicas de investigação desses terrenos, além de estudos de caso, podendo ser útil em análises de grandes empreendimentos em áreas cársticas.

Quanto às ferramentas para conservação específica de cavernas, talvez o melhor mecanismo ainda seja o estabelecimento de sua efetiva área de influência, conforme estabelece a legislação atual (ver Capítulo 7 - sobre legislação). A manutenção de áreas verdes ao redor das cavernas com conectividade a demais áreas preservadas e funcionais do ponto de vista biológico e hidrológico garante boa parte de sua conservação. Isso reduz impactos decorrentes de erosão, escassez de recursos tróficos, variações climáticas, diminuição de umidade e qualidade das águas. Também pode representar uma estratégia preventiva e indireta de conservação, considerando os baixos níveis de conhecimento e do funcionamento ecossistêmico complexo relacionado à biologia subterrânea, por exemplo.

Diante da legislação atual, especialmente preocupada com a conservação das cavernas brasileiras, talvez o melhor mecanismo de proteção dessas feições e, por consequência, parte potencialmente importante dos sistemas cársticos seja a ampliação do conhecimento acerca desse patrimônio natural. Aumentar o número de cavernas computadas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas-CANIE⁵, base de dados oficial do governo, pode representar uma estratégia para evitar que cavernas e suas áreas de influência venham a ser destruídas ou danificadas por atividades e empreendimentos sem que se alegue o desconhecimento da existência dessas feições protegidas, ou que não se compensem eventuais alterações. Nos processos de licenciamento e fiscalização, o CANIE é um dos primeiros instrumentos consultados, e que, apesar de não necessariamente conter toda a possibilidade de ocorrências, é uma fonte importante para monitoramento.

Monitoramento

O monitoramento é uma ferramenta estratégica que visa a subsidiar inúmeras ações, como pesquisa, manejo de áreas ou sistemas, controle de diversos aspectos ambientais (emissões, organismos exóticos, qualidade) e, de forma mais ampla, dimensionar o avanço de atividades ou acesso aos recursos naturais. Como coloca Thurgate (2004), o monitoramento se vale do registro sistemático de

⁵ Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>

informações que reflitam aspectos ambientais e sociais, sendo uma ferramenta que pode antecipar problemas, fornecer elementos para o planejamento, estabelecer prioridades e avaliar a eficácia das ações de prevenção ou mitigação. A despeito de todo o esforço teórico e de levantamentos detalhados das áreas onde venham a ser instalados novos projetos ou operar atividades potencialmente danosas ao meio ambiente, é o monitoramento que consolida o real conhecimento sobre a região e pode detectar os complexos efeitos cíclicos e sinérgicos da natureza. O monitoramento traduz em dados quantitativos (e às vezes qualitativos) informações difusas difíceis de serem detectadas numa simples fotografia do momento, da visita a campo ou da única amostra. O maior conhecimento de determinados sistemas ou ambientes muitas vezes só ocorre em decorrência do monitoramento de décadas. E essa afirmação é ainda mais verdadeira quando o que está sob análise são sistemas subterrâneos intrincados e de evolução policíclica, cujos intervenientes nem sempre estão expostos, como nos ambientes cársticos em geral.

Bons exemplos dessa dilatação temporal podem ser observados nos trabalhos sistemáticos realizados sobre biologia subterrânea no Sistema Areias, na região do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira - PETAR (SP), onde diversos pesquisadores se debruçaram especialmente a partir da década de 1980 sobre o conhecimento desse *hotspot* de diversidade de troglóbios, com resultados surpreendentes (ver síntese em TRAJANO, 2006). Ainda na mesma região e desde meados da década de 1990 podem ser citados os inúmeros trabalhos em geoespeleologia buscando compreender a evolução dos sistemas cársticos locais, as interligações hídricas nem sempre convergentes e os complexos aspectos naturais desses ambientes (KARMANN, 1994; FERRARI *et al.*, 1998; GENTHNER *et al.*, 2003; HIRUMA *et al.*, 2007; dentre outros).

Apesar dessas experiências localizadas, são poucas as abordagens específicas sobre monitoramento de cavernas e do carste. Grande parte dos estudos nessa área se relacionam a aspectos específicos e peculiares desses ambientes, como a estabilidade climática de cavernas, a complexidade hidrogeológica, a fauna e ecossistemas diferenciados. O monitoramento microclimático de cavernas é realizado há bastante tempo (ver CIGNA, 1993; PULIDO-BOSH *et al.*, 1997), sobretudo em função da necessidade de obtenção de parâmetros que balizassem atividades turísticas de massa nesses ambientes, conservação de espeleotemas, pinturas rupestres e outros registros patrimoniais importantes, além de possibilitar eventuais análises relacionadas à fauna, potencialmente dependente de condições climáticas estáveis. Esses estudos se baseiam em dados de instrumentos cada vez mais sensíveis que fornecem informações sobre temperatura, umidade, fluxos de ar, radônio, gases perigosos (CO₂, metano, etc.), entre outros parâmetros, obtidos em diversos pontos das cavernas e nos meios externos (RUSSELL; MACLEAN, 2008; TOOMEY III, 2009; FREITAS, 2010; KILLING-HEINZE *et al.*, 2017; NOVAS *et al.*, 2017). Análises do microclima podem ser aplicadas ao entendimento de situações mais abrangentes, como, por exemplo, os efeitos de: poeiras em ambientes cavernícolas (estradas, calcinação, etc.); desmatamento de áreas de influência; alterações hidrológicas próximas (barragens, desvio de rios, etc.); o efeito da urbanização, da industrialização e de mudanças climáticas.

Toomey III (2009) destaca as muitas metodologias para alcançar dados relacionados aos “sinais vitais” para aspectos físicos relacionados a cavernas, dentre os quais se destacam o microclima, a

sedimentação aérea (poeira), impactos diretos da visitação (pichação, quebras, etc.), poças/gotejamento, microbiologia (que afete as formações), aspectos geotécnicos (segurança), crescimento mineral (espeleotemas), processos superficiais (geoprocessamento), água subterrânea (regional), e processos fluviais que afetem as cavernas. Essa publicação demonstra os métodos utilizáveis para cada parâmetro, destacando o uso de equipamentos, técnicas manuais e outras formas de aquisição dos dados mensuráveis. O autor discute as interfaces entre as atividades correlatas ao monitoramento, como os levantamentos/inventários prévios, e as atividades de pesquisa de longo termo. Os levantamentos prévios, pré-requisitos importantes para qualquer estudo posterior, normalmente se valem dos mesmos instrumentos e técnicas que podem ser utilizadas no monitoramento. O inventário estabelece muitos dos parâmetros e estratégias para o monitoramento. O que difere, principalmente, é a manutenção do esforço de coleta, a regularidade no uso dos equipamentos e mão de obra envolvida, o que torna a atividade de monitoramento um investimento caro, apesar dos potenciais resultados mais fidedignos. Essa característica do monitoramento explica em parte por que muitos projetos subvalorizam essa importante atividade, muito em decorrência dos custos, da demora nos resultados e na dificuldade de aplicação em diversos pontos simultâneos. Cabe aos licenciadores cobrar para que tais programas sejam mantidos e até ampliados, especialmente considerando a maior fragilidade e a complexidade dos ambientes cavernícolas e os riscos de impactos irreversíveis.

O monitoramento da fauna associada a cavernas e sistemas subterrâneos talvez represente o mais complexo desafio em análises ambientais, apesar de ser uma área promissora. Devido à grande complexidade, à heterogeneidade temporal e espacial e ao dinamismo dos ecossistemas subterrâneos, as cavernas talvez representem de fato o que Trajano (2013) chamou de “janelas imperfeitas” para representar as características e o funcionamento dos complexos e cíclicos ambientes hipógeos. Essas características, segundo a autora, justificam monitoramentos mais dilatados, nem sempre exequíveis no sistema de licenciamento ambiental vigente e ante as pressões dos empreendimentos. Eleger os parâmetros, espécies indicadoras, a escala de observação no tempo e espaço e eventualmente a partir disto aplicar a fatos concretos que repercutam no manejo de uma caverna ou na redelimitação de um empreendimento são aspectos complexos e incertos relacionados ao monitoramento biológico. A própria falta de pesquisas e informações mais detalhadas pode ser alegada como motivo para a subutilização ou baixa aplicabilidade de análises de monitoramento de fauna, já que não representariam de forma adequada tais ambientes. São poucos os trabalhos sistemáticos e de longo prazo relacionados à fauna cavernícola, tendo como ponto de partida o monitoramento, técnicas e métodos específicos. Boa parte desses trabalhos, quando realizados, são inerentes a processos de licenciamento e planos de manejo espeleológicos, geralmente efetuados em períodos exíguos, entre as chuvas e secas, e podem não representar a real situação biológica dos meios subterrâneos.

Mesmo na literatura internacional são poucos os registros. O trabalho de Faille *et al.* (2014) sobre a abertura de uma caverna turística nos Pirineus franceses ressalta esse déficit. Os autores utilizaram como referência um dos raros trabalhos de longo termo (CABIDOCHÉ, 1966, *apud* FAILLE *et al.*, 2014) realizado sobre uma espécie altamente adaptada (besouro do gênero *Aphaenops*), coincidentemente na mesma caverna sob análise. Mesmo após quase 50 anos, os resultados não mostraram

alterações significativas em relação a essa espécie, a despeito da implantação do turismo na caverna. Apesar do baixo impacto avaliado no estudo, é necessário refletir sobre as especificidades de cada caso, visto que a caverna utilizada (La Verna) apresenta características próprias, considerada ecologicamente robusta e resiliente, com a presença de grandes salões e galerias, bem diferente de outras condições específicas, eventualmente observadas no licenciamento ambiental.

Fora das cavernas, mas intimamente relacionados a elas, outros aspectos podem ser monitorados, como a complexa hidrologia cárstica, as condições ambientais referentes a vegetação, a erosão, colapsos, subsidências e aspectos ligados a vibrações (detonações, etc.). O monitoramento hidrológico no carste, geralmente através das ressurgências ou de poços estáticos, serve como fonte de dados para análises quantitativas, qualitativas e a realização de testes, como o de traçadores (ver GOLDSHEIDER *et al.*, 2008; rever os já citados GENTHNER *et al.*, 2003; PESSOA, 2005; FERRARI; KARMANN, 2008; JONES, 2012). As áreas de entorno de cavernas protegidas podem ser monitoradas por parâmetros indiretos, ligados, por exemplo, a vegetação, processos erosivos, etc. Além das técnicas clássicas de sensoriamento remoto que permitem a avaliação multitemporal, novas tecnologias vêm sendo adotadas visando ao adensamento e à melhor comparação entre as aquisições, merecendo destaque o uso de veículos aéreos não tripulados - VANTs (ver RAMSEY *et al.*, 2014; LEE *et al.*, 2016) e o uso de escâner a laser (LIDAR), capaz de detectar mínimas alterações, mesmo sob o dossel (WU *et al.*, 2016; SILVA *et al.*, 2016; JEANPERT *et al.*, 2016). O uso de parâmetros externos às cavernas também propicia a avaliação das áreas de influência e sua possível efetividade, especialmente se combinadas análises dos monitoramentos internos às feições (biológicos, microclimáticos).

Nos casos de empreendimentos que possam afetar, por detonações, cavernas sensíveis, o CECAV/ICMBio editou recentemente duas publicações que podem servir de referência: “Sismografia aplicada ao patrimônio espeleológico – Contribuição técnica à análise de estudos ambientais” e “Sismografia aplicada ao patrimônio espeleológico – Orientações básicas à realização de estudos ambientais” (PINHO *et al.*, 2016a e b). A questão dos possíveis impactos a frágeis sistemas de cavernas, com espeleotemas sensíveis ou eventuais distúrbios de fauna, sempre causaram muita discussão no meio acadêmico e, sobretudo, no licenciamento ambiental. Essas publicações vêm preencher uma grande lacuna, considerando a falta de parâmetros para atividades fontes de vibrações potencialmente perigosas para sistemas de cavernas. Ambos os trabalhos, de cunho bastante didático e autoexplicativos, se propõem a lançar bases para um monitoramento mais adequado e sobretudo auxiliar as análises desses estudos por parte dos licenciadores. Vale ressaltar que fontes de vibração, por serem artificiais (explosivos, por exemplo) podem ser perfeitamente manejáveis conforme as especificidades dos empreendimentos e principalmente das fragilidades das cavernas e dos sistemas cársticos.

Protocolo

Mineração: direção de avanço das lavras e a qual profundidade (*Pit* final); mapa com os pontos de absorção de água e sistemas protetivos; estradas, setor de beneficiamento, oficina e outras estruturas do empreendimento; identificação das cavernas nas áreas de influência; sistema de proteção

contra poeira; posicionamento do empreendimento em relação a recarga e descarga hídrica; áreas de armazenamento de estéreis e disposição de resíduos; adequação das técnicas de desmonte às fragilidades específicas das cavernas quanto às vibrações; planos alternativos de lavra diante de cavidades de máxima relevância.

Hidrelétrica e barragens: debate amplo sobre os riscos e incertezas de empreendimentos desse tipo, em curto e longo prazos em áreas cársticas; cota de alagamento máximo e variação sazonal com potencial interferência em cavernas; localização e dimensões do barramento; material para construção e áreas fonte (pedreiras que podem ter cavernas); identificação de sistemas ativos de cavernas a jusante e a montante; estudos geofísicos para identificação de possíveis pontos de fuga; mapeamentos geológico, geomorfológico e espeleológico de detalhe; identificação de pontos de possíveis fugas, reativamento de condutos ou áreas colapsáveis por coluna d'água; técnicas de selagem e proteção em áreas com pontos de fuga.

Urbanização e industrialização: identificação dos pontos de absorção de água e sua proteção, especialmente dolinas; afastamento das áreas de cavernas; dimensionamento dos sistemas de drenagem e sua devida compatibilização com sistemas ativos de cavernas (filtragem e retenção de enchentes); redução da impermeabilização das áreas naturais; abastecimento e captações de água compatíveis com a manutenção do nível do aquífero em condições seguras; identificação de zonas de fragilidade para colapsos e subsidências; adequada gestão de efluentes e áreas de tratamento; alternar empreendimentos para áreas não carstificadas.

Agropecuária: delimitação e cercamento conforme o caso das áreas de proteção, como os pontos de absorção e cavernas; manutenção de mata nativa nessas áreas; não destruir o epicarste raso ou soterrar dolinas para ampliar áreas agricultáveis; implantar sistemas de contenção de sedimentos ou poluentes, como curvas de nível, terraços, tanques de decantação e tratamento de água; adequação de pocilgas, currais e demais criadouros para coleta e tratamento adequado de dejetos; não barrar rios de sistemas de cavernas; avaliação da capacidade sustentável dos poços de captação de água em projetos de irrigação para evitar a superexploração do aquífero; disposição adequada de resíduos diversos, como restos vegetais (da produção ou limpeza de áreas de plantio) e recipientes de agroquímicos; adoção de práticas orgânicas, sustentáveis, sem uso do fogo e demais ações potencialmente mais danosas ao carste.

Projetos de engenharia: plotagem dos desenhos finais com a identificação das áreas de cavernas e recarga; medidas de controle de contaminantes para todas as fases, especialmente durante a construção e a operação dos projetos; caracterização das áreas fonte de materiais de construção (pedreiras); avaliação correta para uso de explosivos em ambientes com cavernas próximas; elaboração de planos de contingência para atuação em caso de derramamento de substâncias potencialmente lesivas ao meio ambiente em áreas cársticas; estudos detalhados conforme cada empreendimento, inclusive realização de sondagens, estudos geofísicos ou hidrogeológicos (traçadores, p.ex.); alternativa locacional para não implantação no carste.

Turismo: discussão prévia e planejamento (plano de manejo espeleológico); utilização de iluminação fria, preferencialmente pessoal (lanternas); nos casos em que houver iluminação fixa na caverna (não

recomendável), utilizar fontes frias (como LED) e em espectro luminoso adequado à não proliferação da *lampenflora*; adoção de infraestruturas mínimas, que não afetem ou descaracterizem a paisagem; quando necessário, deve-se utilizar o próprio material da caverna ou materiais inertes de fácil substituição e manutenção, livre de substâncias químicas ou que degradem no ambiente; adoção de grupos pequenos de turistas acompanhados de guia; análises de capacidade de carga de cada caverna; equidistância temporal entre grupos e utilização de percursos preferencialmente circulares e bem delimitados; associação da caverna turística com atrações alternativas no entorno, como trilhas ou centro de visitantes (menor pressão à caverna); receptivos, estruturas de apoio, banheiros, restaurantes e outros devem estar afastados da caverna e das dolinas; alimentação dos visitantes e lixeiras externas à caverna; treinamento contínuo de guias para condução e controle da visitação.

Referências

- ALT, L.; MOURA, V. Cave Conservation Course. In: Janelão Cave, Peruaçu Caves National Park – Brazil 2017. *NSS News*, v. 76, n. 4, p. 03-09, 2018.
- ANGEL, J. C.; NELSON, D. O.; PANNO, S. V. Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois'sinkhole plain. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 66, n. 1, p. 9-17, 2004.
- AULER, A. S. Cave protection as a karst conservation tool in the environmentally sensitive Lagoa Santa karst, Southeastern Brazil. *Acta Carsologica*, v. 45, n. 1, p. 131-145, 2016.
- BAKALOWICZ, M. Epikarst. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.), *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. pp. 284-288.
- BAKALOWICZ, M. Epikarst Processes. In: SHRODER, J. (Editor in Chief); FRUMKIN, A. (Ed.). *Treatise on Geomorphology*. San Diego, CA: Elsevier Inc, 2013, v. 6, p. 164-171.
- BECK, B. Soil piping and sinkholes failures. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.), *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. pp. 718-723.
- CHEEPHAM, N. *et al.* Cure from the cave: Volcanic cave actinomycetes and their potential in drug discovery. *International Journal of Speleology*, v. 42, n. 1, p. 35-47, 2013.
- CIGNA, A. A. Environmental management of tourist caves. *Environmental Geology*, v. 21, n. 3, p. 173-180, 1993.
- CIGNA, A. A. Show caves. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. p. 690-697
- CULVER, C. D.; BRANCELJ, A.; PIPAN, T. Epikarst communities. In: CULVER, D. C., WHITE, W. B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. p. 288-295.
- ELLIOTT, W. R. Protecting caves and cave life. In: CULVER, D. C.; WHITE, W. B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. p. 624-633
- FAILLE, A.; BOURDEAU, C.; DEHARVENG, L. Weak impact of tourism activities on biodiversity in a subterranean hotspot of endemism and its implications for the conservation of cave fauna. *Insect Conservation and Diversity*, v. 8, n. 3, p. 205-215, 2015.

- FERRARI, J. A.; HIRUMA, S. T.; KARMANN, I. Caracterização morfométrica de uma superfície cárstica do Vale do Ribeira, São Paulo (Núcleo Caboclos - PETAR). *Revista do Instituto Geológico*, v. 19, n. 1/2, p. 9-17, 1998.
- FERRARI, J. A.; KARMANN, I. Comportamento hidrodinâmico de sistemas cársticos na bacia do Rio Betari, município de Iporanga, SP. *Revista do Instituto Geológico*, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2008.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Second ed. Chichester: Wiley, 2007. 562p.
- FREITAS, C. R. The role and importance of cave microclimate in the sustainable use and management of show caves. *Acta Carsologica*, v. 39, n. 3, p. 477-489, 2010.
- GALVÃO, P.; HALIHAN, T.; HIRATA, R. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 23, p. 1499-1513, 2015.
- GENTHNER, C.; FERRARI, J. A.; KARMANN, I. Identificação das áreas de recarga de fontes cársticas com o uso do traçador Rodamina FWT (área carbonática Lajeado - Bombas, Iporanga, SP). *Revista do Instituto Geológico*, v. 24, n. 1/2, p. 11-23, 2003.
- GOLDSCHIEDER, N.; MEIMAN, J.; PRONK, M.; SMART, C. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, v. 37, n. 1, p. 27-40, 2008.
- GOMES, M. C. A.; PILÓ, L. B. As minas de salitre: a exploração econômica das cavernas em Minas Gerais nos fins do período colonial. São Paulo, SBE. *Espeleo-Tema*, 16:83-93, 1992.
- GUIMARÃES, M. M.; FERREIRA, R. L. Morcegos cavernícolas do Brasil: novos registros e desafios para conservação. *Revista Brasileira de Espeleologia*, v. 2, n. 4, p. 1-33, 2014.
- GUTIÉRREZ, F.; GUERRERO, J.; LUCHA, P. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environmental Geology*, v. 53, p. 993-1006, 2008.
- GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; DE WAELE, J.; JOURDE, H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth Science Reviews*, v. 138, p. 61-88, 2014. doi: 10.1016/j.earscirev. 2014.
- HILDRETH-WERKER, V.; WERKER, J. C. (Ed.). Cave Conservation and Restoration. First ed. Huntsville, Alabama: **National Speleological Society**, 2006. 600 p.
- HIRUMA, S. T.; FERRARI, J. A.; AMARAL, R.; HONÓRIO, R. F. Mapeamento e caracterização de feições cársticas de superfície na faixa Itaiacoca nas regiões de Nova Campina e Bom Sucesso de Itararé, SP/PR. *Revista do Instituto Geológico*, v. 27-28, n. 1/2, p. 1-12, 2007.
- HIRUMA, S. T.; FERRARI, J. A. Análise comparativa da extração automatizada de dolinas a partir de modelos digitais de terreno. *Revista do Instituto Geológico*, v. 34, n. 2, p. 1-11, 2014.
- IVÁN, V.; MÁDL-SZÖNYI, J. State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation and outlook. *Environmental Geology*, v. 76, p. 112, 2017.
- JEANPERT, J. *et al.* Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific). *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 41, p. 1854-1868, 2016.
- JONES, W. K. Water tracing in karst aquifer. In: CULVER, D.C., WHITE, W.B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012, p. 887-897

KARMANN, I. *Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo*. 1994. 274 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

KILLING-HEINZE, M.; PFLITSCH, A.; FURIAN, W.; ALLISON, S. The importance of air temperature as a key parameter to identify climatic processes inside Carlsbad Cavern, New Mexico, USA. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 79, n. 3, p. 153-167, 2017.

KLIMCHOUK, A. B. The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. In: KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.) *Speleogenesis: evolution of karst aquifers*. Huntsville, Alabama: National Speleological Society, 2000, p. 91-99

KOVAČIČ, G.; RAVBAR, N. Analysis of human induced changes in a karst landscape -the filling of dolines in the Kras plateau, Slovenia. *Science of the Total Environment journal*, v. 447, p. 143-151, 2013.

LEE, E. J.; SHIN, S. Y.; KO, B. C.; CHANG, C. Early sinkhole detection using a drone-based thermal camera and image processing. *Infrared Physics and Technology*, v. 78, p. 223-232, 2016.

MILANOVIĆ, P. Dams and reservoirs in karst. In: BEYNEN, P. E. (Ed.) *Karst Management*. Springer Netherlands, Dordrecht: p. 47-73, 2011.

MENDONÇA, M. L. O verdadeiro perfil do Grupo Votorantin. In: CAMPANHA JUSTIÇA NOS TRILHOS et al. (Org.). *Empresas transnacionais brasileiras na América Latina: um debate necessário*. São Paulo: Expressão Popular, 2009, p. 176-185.

NINANYA, H. et al. Analysis of water control in an underground mine under strong karst media influence (Vazante mine, Brazil). *Hydrogeology Journal*, s/n. June, p. 1-26, 2018.

NOVAS, N. et al. A real-time underground environment monitoring system for sustainable tourism of caves. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 2707-2721, 2017.

PALMER, A. N. *Cave Geology*. Dayton: Cave Books, 2007. 454 p.

PARISE, M.; PASCALI, V. Surface and subsurface environmental degradation in the karst of Apulia (southern Italy). *Environmental Geology*, v. 44, p. 247-256, 2003.

PEREIRA, R. G. F. A. *Caracterização geomorfológica e geoespeleológica do Carste da Bacia do Rio Una, Borda Leste da Chapada Diamantina (Município de Itaetê, Estado da Bahia)*. 1998. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

PESSOA, P. F. P. *Hidrogeologia dos aquíferos cársticos cobertos de Lagoa Santa, MG*. 2005. 475 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2005.

PILÓ, L. B. Ambientes cársticos de Minas Gerais: valor, fragilidade e impactos ambientais decorrentes da atividade humana. *O Carste*, v. 11, n. 13, p. 50-58, 1999.

PINHO, M. et al. *Sismografia aplicada à proteção do patrimônio espeleológico: contribuição técnica à análise de estudos ambientais*. Brasília: ICMBio, 2016a. 47p.

PINHO, M. et al. *Sismografia aplicada à proteção do patrimônio espeleológico: orientações básicas à realização de estudos ambientais*. Brasília: ICMBio, 2016b. 55p.

PULIDO-BOSCH, A. et al. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena, Spain). *Environmental Geology*, v. 31, n. 3-4, p. 142-149, 1997.

- RABELO, L. M.; SOUZA-SILVA, M.; FERREIRA, R. L. Priority caves for biodiversity conservation in a key karst area of Brazil: comparing the applicability of cave conservation indices. **Biodiversity and Conservation**, v. 27, n. 9, p. 2097-2129, 2018.
- RAMSEY, C. L.; GRIFFITHS, P. A.; STOKES, T. R. Multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVS) and high-resolution compact digital cameras: A promising new method for monitoring changes to surface karst resources. **Acta Carsologica**, v. 43, n. 2-3, p. 269-286, 2014.
- RIZZATO, P. P.; BICHUETTE, M. E. Ituglanis boticario, a new troglomorphic catfish (Teleostei: Siluriformes: Trichomycteridae) from Mambai karst area, central Brazil. **Zoologia**, v. 31, n. 6, p. 577-598, 2014.
- RUSSELL, M. J.; MACLEAN, V. L. Management issues in a Tasmanian tourist cave: Potential microclimatic impacts of cave modifications. **Journal of Environmental Management**, v. 87, n. 3, p. 474-483, 2008.
- SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e Dolomito. In: LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. (Ed.). **Rochas e Minerais Industriais**. CETEM/MCT, Rio de Janeiro: p. 363-391, 2008.
- SAURO, U. Closed Depressions in Karst Areas. In: CULVER, D. C., WHITE, W. B. (Ed.), **Encyclopedia of Caves**. Second Ed. New York: Elsevier, 2012, p.140-155.
- SILVA, O. L.; BEZERRA, F. H. R.; MAIA, R. P.; CAZARIN, C. L. Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. **Geomorphology**, v. 295, p. 611-630, 2017.
- SIMON, K. S. Cave ecosystems. In: CULVER, D. C., WHITE, W. B. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. Second Ed. New York: Elsevier, 2012, p. 99-102.
- THURGATE, M. Monitoring. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. New York: Fitzroy Dearborn, 2004, p. 628-642.
- TOOMEY III, R. S. Geological monitoring of caves and associated landscapes. In: YOUNG, R.; NORBY, L. **Geological monitoring**. Boulder: Geological Society of America, 2009, p. 27-46.
- TRAJANO, E. (Org.). **Sistema Areias: 100 anos de estudos**. São Paulo: Redespeleo, 2006. 122p.
- TRAJANO, E. Variações anuais e infra-anuais em ecossistemas subterrâneos: implicações para estudos ambientais e preservação de cavernas. **Revista da Biologia**, v. 10, n. 2, p. 1-7, 2013.
- TRAJANO, E.; BESSI, R. A classificação Shiner-Racovitza dos organismos subterrâneos: uma análise crítica, dificuldades para aplicação e implicações para conservação. **Espeleo-Tema**, v. 28, n. 1, p. 87-102, 2017.
- VENI, G. *et al.* Living with karst: a fragile foundation. **Environmental Awareness Series**, n. 4. American Geosciences Institute, 2001. 64p.
- WALTHAM, A. C.; BELL, F.; CULSHAW, M. **Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction**. Chichester, England: Praxis Publishing, 2005. 382 pp.
- WALTHAM, A. C.; FOOKES, P. G. Engineering classification of karst ground conditions. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 3, n. 1, p. 2, 2005.
- WANG, S.; LIU, Q.; ZHANG, D. Karst rocky desertification in southwestern china: geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. **Land degradation & Development**, v. 15, p. 115-121, 2004.

WHITE, W.B. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford: Oxford University Press, 1988. 464p.

WHITE, W. B. Hidrogeology of karst aquifers. In: CULVER, D. C., WHITE, W. B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. p. 383-391

WHITE, W. B.; CULVER, D. C. Cave, definition of. In: CULVER, D.C., WHITE, W.B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. p. 103-107

WILLIAMS, P. W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, v. 61, p. 45-67, 1983.

WILLIAMS, P. W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *International Journal of Speleology*, v. 37, n. 1, p. 1-10, 2008.

WU, Q.; DENG, C.; CHEN, Z. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. *Geomorphology*, v. 266, p. 1-10, 2016.

ZHOU, W.; BECK, B. F. Engineering issues on karst. In: BEYNEN, P. E. (Ed.) *Karst Management*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, p. 09-45.

ZWAHLEN, F. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers: final report (COST action 620)*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 297p.



7

Histórico e fundamentação legal

André Afonso Ribeiro

José Carlos Ribeiro Reino

Jocy Brandão Cruz





Histórico sobre a legislação e a conservação do patrimônio espeleológico

Como já foi abordado nos capítulos anteriores, a peculiaridade e a importância das áreas cársticas e dos ambientes cavernícolas vêm sendo reveladas por pesquisadores e espeleólogos ao longo do tempo.

Especialmente nas últimas décadas, maior compreensão dessa importância pelos vários setores das sociedades motivou muitos países, entre eles o Brasil, a incluir em sua legislação ambiental normas específicas a respeito da conservação do patrimônio espeleológico.

No Brasil, a primeira Lei Federal que abordou o tema foi a nº 3.924, de 26 de julho de 1961, sobre os monumentos arqueológicos e pré-históricos. Em seu artigo 2º, a lei dispõe que serão protegidos, pelo Poder Público, os sítios nos quais se encontram vestígios positivos de ocupação pelos paleoameríndios, tais como grutas, lapas e abrigos sob rocha.

Os primeiros instrumentos no Brasil que abordaram exclusivamente o patrimônio espeleológico foram a Resolução CONAMA nº 9, de 24 de janeiro de 1986, que criou a "Comissão Especial para Estudos do Patrimônio Espeleológico" e, no ano seguinte, a Resolução CONAMA nº 5, de 6 de agosto de 1987, que aprovou o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico.

Marco histórico legislativo, a Constituição Federal promulgada em 1988 definiu em seu artigo 20 os bens da União, incluindo em seu inciso X, juntamente com os sítios arqueológicos e pré-históricos, as cavidades naturais subterrâneas.

Em 1990 foram inseridas na legislação ambiental brasileira as primeiras regras a respeito da preservação e do uso do patrimônio espeleológico, por meio da Portaria nº 887, de 15 de junho, do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, e da publicação do Decreto nº 99.556, em 1º de outubro daquele ano.

Tendo em vista as particularidades dos ecossistemas subterrâneos, suas fragilidades, potenciais ameaças e sua necessária conservação, o mencionado decreto estabeleceu a preservação de todas as cavidades naturais subterrâneas no país, permitindo apenas usos relacionados a atividades técnico-científicas, ético-culturais, turísticas, recreativas ou educativas.

Sob esse contexto, em 5 de junho de 1997 o IBAMA cria em sua estrutura o Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas - CECAV, único ente do governo federal dedicado exclusivamente à gestão ambiental do patrimônio espeleológico nacional.

A Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC, apresenta entre seus objetivos descritos no artigo 4º a necessidade e a importância de proteção, por meio da criação e da gestão de unidades de conservação, de características relevantes de natureza espeleológica.

Contudo, as primeiras unidades de conservação criadas para proteção do patrimônio espeleológico são bem anteriores ao SNUC, a exemplo do Parque Estadual do Alto Ribeira, no Estado de São Paulo, criado por meio do Decreto nº 32.283, de 19 de maio de 1958, e, em âmbito federal, do Parque Nacional de Ubajara, pelo Decreto nº 45.954, de 30 de abril de 1959. Atualmente, dezenas de unidades de conservação federais, estaduais, municipais e particulares têm como objetivo a conservação de amostras representativas de nosso patrimônio espeleológico. Importantes cavernas também se encontram protegidas no interior de terras indígenas e territórios quilombolas.

Em setembro de 2004, o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA aprovou a Resolução nº 347, que trouxe novas regras no sentido de regulamentar o licenciamento ambiental de atividades com potencial de degradação do patrimônio espeleológico, inserindo na legislação conceitos como os de área de influência sobre o patrimônio espeleológico e de plano de manejo espeleológico. Estabeleceu também procedimentos para autorização de atividades turísticas e de pesquisas científicas no interior de cavernas, além de instituir o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE.

A citada Resolução também significou a primeira tentativa de conferir diferentes graus de relevância às cavernas, por meio do previsto em seu artigo 2º, inciso II, que instituiu o conceito de “cavidade natural subterrânea relevante para fins de anuência pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA no processo de licenciamento”, estabelecendo critérios para sua aplicação. Entretanto, em dezembro de 2010 esse conceito foi revogado, por meio do previsto no artigo 8º da Resolução CONAMA nº 428.

Por meio da Lei nº 11.516, de 28 de agosto de 2007, foi criado o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, autarquia federal vinculada ao Ministério do Meio Ambiente. O CECAV passa, então, a compor a estrutura desse novo Instituto, com alterações em parte de suas atribuições e nova denominação: Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Atualmente, a estrutura regimental do Instituto Chico Mendes é definida pelo Decreto nº 8.974, de 24 de janeiro

de 2017, que contém em seu Anexo I um conjunto de atribuições relacionadas a ações de proteção e conservação da biodiversidade, incluindo o patrimônio espeleológico nacional.

O ano de 2008 foi marcado no histórico da legislação ambiental devido à publicação do Decreto Federal nº 6.640, que alterou dispositivos do Decreto Federal nº 99.556/1990 e, entre outros pontos, introduziu no arcabouço jurídico brasileiro a possibilidade de impacto ambiental irreversível em cavernas, bem como o novo conceito de relevância de cavidades naturais subterrâneas, que passaram a ser classificadas em quatro graus de relevância: máximo, alto, médio e baixo, sendo que somente aquelas com máximo grau de relevância estão legalmente resguardadas de sofrerem impactos negativos irreversíveis. O citado decreto instituiu ainda, no rito do licenciamento ambiental, formas de compensação de danos ambientais relacionadas especificamente ao patrimônio espeleológico.

Conforme previsto na nova redação do artigo 5º do Decreto nº 99.556/1990, cabe ao Ministério do Meio Ambiente a competência para definição da metodologia para classificação do grau de relevância de cavidades naturais subterrâneas. Assim, entre janeiro e março de 2009, o Instituto Chico Mendes, por meio do CECAV, coordenou tecnicamente o processo de construção da metodologia, que envolveu a participação de dezenas de pesquisadores e de instituições concernentes ao tema.

A metodologia para definição do grau de relevância de cavernas foi estabelecida dez meses após a publicação do Decreto nº 6.640/2008, por meio da publicação da Instrução Normativa nº 2 do Ministério do Meio Ambiente, de 20 de agosto de 2009.

Logo após a IN nº 2/2009, o Ministério do Meio Ambiente também publicou a Portaria nº 358, de 30 de setembro de 2009, que instituiu o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, importante marco legal para a conservação das cavernas brasileiras. O Programa, com seus princípios e diretrizes definidos, foi estruturado em seis componentes abrangendo praticamente todas as áreas relacionadas à conservação do patrimônio espeleológico: conhecimento; conservação; utilização sustentável; monitoramento, avaliação, prevenção e mitigação de impactos; divulgação; e fortalecimento institucional.

Em 2012 um Comitê Técnico Consultivo, com representantes de todos os setores da sociedade relacionados à conservação do patrimônio espeleológico, foi criado pelo Instituto Chico Mendes, por meio da Portaria nº 32/2012, com objetivos de acompanhar e avaliar a aplicação da IN do Ministério do Meio Ambiente nº 2/2009 nos processos de licenciamento ambiental, bem como de propor ao Ministério do Meio Ambiente o aprimoramento das regras técnicas existentes. As reuniões do Comitê ocorreram entre junho de 2012 e outubro de 2016. A aplicação da metodologia prevista na referida IN passou também a ser avaliada e debatida em praticamente todos os eventos técnicos e científicos relacionados à espeleologia.

Após alguns anos de avaliação da utilização da metodologia para classificação do grau de relevância de cavernas no rito do licenciamento ambiental e com o avanço do conhecimento e descobertas científicas na área da espeleologia, o ICMBio/CECAV desenvolveu nova metodologia e a levou como proposta ao Comitê Técnico Consultivo, resultando posteriormente na publicação da Instrução Normativa nº 2, de 30 de agosto de 2017, do Ministério do Meio Ambiente.

Entre os aprimoramentos da nova IN, pode-se destacar como uma das principais alterações a avaliação de conjuntos de atributos para definição dos graus de relevância alto, médio e baixo, diferentemente do previsto na norma anterior, na qual a presença de apenas determinado atributo poderia conferir o grau alto ou médio de relevância a uma caverna, assim como nova forma de cálculo para avaliação da importância dos atributos espeleométricos.

Complementarmente, citam-se as normas do Ministério do Meio Ambiente e do Instituto Chico Mendes que tratam de questões relacionadas ao licenciamento ambiental e que possuem dispositivos específicos no tocante ao patrimônio espeleológico.

Em relação à aplicação do §3º do artigo 4º do Decreto nº 99.556/1990, que trata das outras formas de compensação sob responsabilidade do Instituto Chico Mendes, foi publicada em setembro de 2012 a Instrução Normativa nº 30, que estabeleceu procedimentos administrativos e técnicos para a execução de compensação espeleológica, no âmbito do Instituto Chico Mendes. Em 2017, a IN nº 30/2012 foi revogada e os procedimentos do Instituto foram atualizados por meio das Instruções Normativas nº 1 e nº 4, respectivamente, de 24 de janeiro e 20 de setembro de 2017.

A Portaria nº 55 do Ministério do Meio Ambiente, de 17 de fevereiro de 2014, estabeleceu os procedimentos entre o Instituto Chico Mendes e o IBAMA para os processos de licenciamento ambiental federal sujeitos à autorização ou à ciência do órgão responsável pela administração de unidades de conservação federais. O Capítulo IV da Portaria, que contempla os artigos 11 a 13, define os procedimentos específicos relativos ao licenciamento de atividades e empreendimentos que impactem cavidades naturais subterrâneas.

Relacionada ao mesmo tema, a Instrução Normativa nº 7 do Instituto Chico Mendes, de 5 de novembro de 2014, estabeleceu os procedimentos para manifestação do Instituto Chico Mendes nos processos de licenciamento ambiental nos quais há necessidade de autorização do Instituto. O Capítulo V da Instrução Normativa é dedicado especificamente aos procedimentos relativos aos processos de licenciamento que afetem cavidades naturais subterrâneas em unidades de conservação federais e suas zonas de amortecimento.

A respeito das autorizações para pesquisa científica, o Instituto Chico Mendes por meio da Instrução Normativa nº 3, de 1º de setembro de 2014, estabeleceu as normas para a utilização do Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade – SISBio, bem como regras para a autorização de atividades com finalidade científica ou didática em unidade de conservação federal ou em cavidade natural subterrânea.



Lapa dos Brejões (BA) – Foto: Allan Calux

Legislação ambiental aplicada à conservação do patrimônio espeleológico

Introdução

As áreas cársticas e as cavidades naturais subterrâneas compõem o patrimônio espeleológico nacional e abrigam atributos biológicos, ecológicos, geológicos, geomorfológicos, paleontológicos, arqueológicos, hidrológicos e cênicos, por vezes únicos ou raros, de importância científica, ambiental, histórica, cultural e socioeconômica. Não por outro motivo há uma legislação específica que trata da conservação desse patrimônio, sobretudo no que concerne ao rito e às normas do licenciamento ambiental.

Como já mencionado no histórico, a Constituição Federal de 1988 inseriu as cavidades naturais subterrâneas como bens da União, sendo sua gestão ambiental de responsabilidade dos órgãos que compõem o Sistema Nacional do Meio Ambiente - SISNAMA.

Nesse contexto e considerando-se a legislação vigente, dependerão de aprovação de estudos espeleológicos específicos e/ou da autorização ou do licenciamento dos órgãos ambientais:

- empreendimentos ou atividades considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores do patrimônio espeleológico ou de sua área de influência;
- empreendimentos ou atividades turísticas, culturais ou religiosas que utilizem o ambiente cavernícola;
- atividades com finalidade científica ou didática no âmbito do ensino superior em cavidades naturais subterrâneas;
- demais atividades no interior de cavernas, previstas em normas estaduais ou municipais ou em planos de manejo de unidades de conservação.

O objetivo deste capítulo é, portanto, apresentar e analisar as questões entendidas como as mais importantes a respeito das situações acima mencionadas, no que se refere à legislação vigente e à atuação dos órgãos ambientais.

Não há, atualmente, nenhuma norma específica que exija a autorização para as atividades de mergulho em cavernas. Entretanto, o assunto também será objeto de discussão, uma vez que ao longo de muitos anos foi tema de normas específicas que regulamentavam a atividade.

As atividades de topografia e mapeamento de cavernas, desenvolvidas principalmente pelos grupos de espeleologia, não necessitam de autorização dos órgãos ambientais. Exceção feita a cavidades naturais subterrâneas situadas no interior de unidades de conservação, para as quais poderão ser exigidas autorizações específicas, a depender do plano de manejo da unidade ou de normas e procedimentos de seus órgãos gestores.

Os principais instrumentos jurídicos vigentes atualmente que dispõem especificamente sobre a conservação do patrimônio espeleológico são: o Decreto nº 99.556/1990, com as alterações dadas pelo Decreto nº 6.640/2008, a Resolução CONAMA nº 347/2004 e a Instrução Normativa nº 2/2017 do Ministério do Meio Ambiente.

Em seu artigo 1º, o Decreto nº 99.556/1990 dispõe que:

Art. 1º As cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional deverão ser protegidas, de modo a permitir estudos e pesquisas de ordem técnico-científica, bem como atividades de cunho espeleológico, étnico-cultural, turístico, recreativo e educativo.

A redação deixa bastante claro que, primeiramente, as cavernas brasileiras devem ser protegidas, tendo como principais usos e finalidades a realização de estudos e pesquisas, bem como atividades que possibilitem diferentes experiências de visita e conhecimento destes peculiares ambientes.

Reconhecidamente, as unidades de conservação compõem uma das principais estratégias de preservação e uso sustentável de amostras representativas da bio e geodiversidade. Por conseguinte, a Lei nº 9.985/2000, que instituiu o SNUC, incluiu entre seus objetivos a necessidade de proteger características relevantes de natureza espeleológica. Em dezembro de 2018, 35% das cavernas conhecidas se encontram no interior de unidades de conservação federais, estaduais, municipais e particulares, sendo que, destas, 46% estão em unidades de proteção integral (ou 16% do total de cavernas conhecidas) e 54% estão em unidades de uso sustentável (ou 19% do total de cavernas conhecidas).

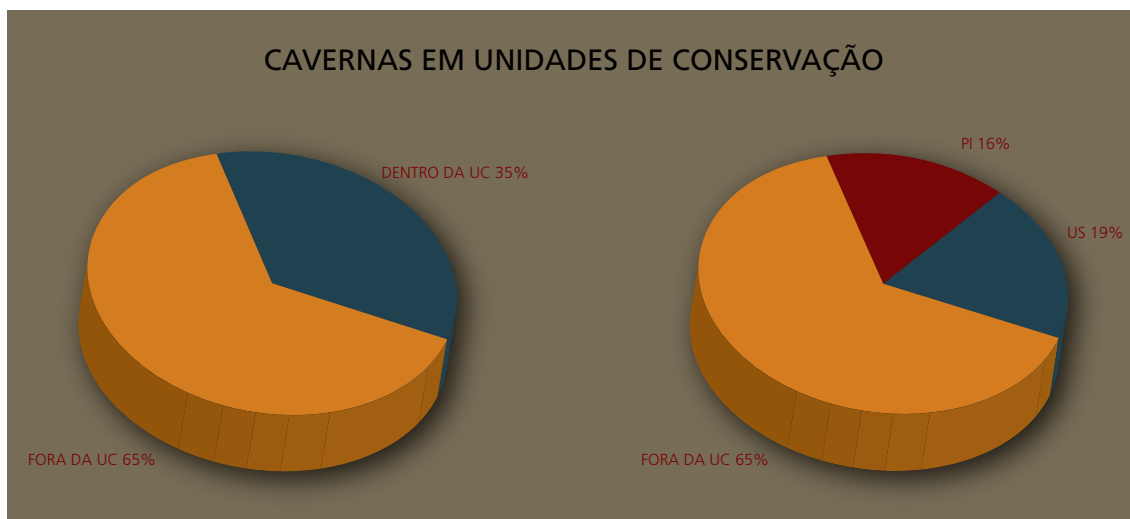


Figura 1 – Cavernas em unidades de conservação **Fonte:** CANIE Dezembro/2018

Esses dados indicam que há porção importante de cavernas com algum regime de proteção. Por outro lado, há a necessidade de prosseguir com as iniciativas de identificação e estudos de áreas prioritárias e de criação de unidades de conservação nas três esferas de governo e particulares, bem como de ampliar os esforços para a elaboração e a implantação de planos de manejo de unidades de conservação que tenham entre seus objetivos a proteção do patrimônio espeleológico.

A partir de 1990, a legislação passou a proibir qualquer impacto ambiental em cavidades naturais subterrâneas, o que contribuiu de forma importante para a preservação desse patrimônio. Entretanto, as situações de conflito entre a conservação de cavernas e o interesse na instalação e ampliação de empreendimentos, em especial das áreas de mineração, transportes e geração de energia se acentuaram, tendo em vista os seguidos anos de crescimento econômico que o país vivenciou na década de 2000.

Esse cenário levou então à publicação do Decreto nº 6.640, em 7 de novembro de 2008, que inseriu a possibilidade de impactos ambientais irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas, com exceção daquelas classificadas com grau máximo de relevância.

Destaca-se, todavia, que a única previsão legal para a ocorrência de impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas com graus de relevância alto, médio ou baixo é a sua autorização mediante licenciamento ambiental, uma vez que não existem em nossa legislação cavidades naturais subterrâneas que sejam consideradas sem relevância.

Nesse contexto, depreende-se do mesmo modo que, no território brasileiro, qualquer cavidade natural subterrânea que não foi objeto de estudos espeleológicos aprovados pelo órgão ambiental competente para a classificação do seu grau de relevância tem o mesmo nível de proteção daquelas que possuem grau máximo de relevância.

No âmbito do licenciamento ambiental, um dos principais instrumentos para gestão e monitoramento do patrimônio espeleológico é o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE, instituído em 2004 pela Resolução CONAMA nº 347 e atualmente sob gestão do Instituto Chico Mendes. Em dezembro de 2018, o Cadastro contava com o registro de 18.358 cavidades naturais subterrâneas, destacando-se que a partir de 2009, principalmente em decorrência da aplicação da nova legislação, houve significativo aumento no número de descobertas de cavernas no país e de registros no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 2.

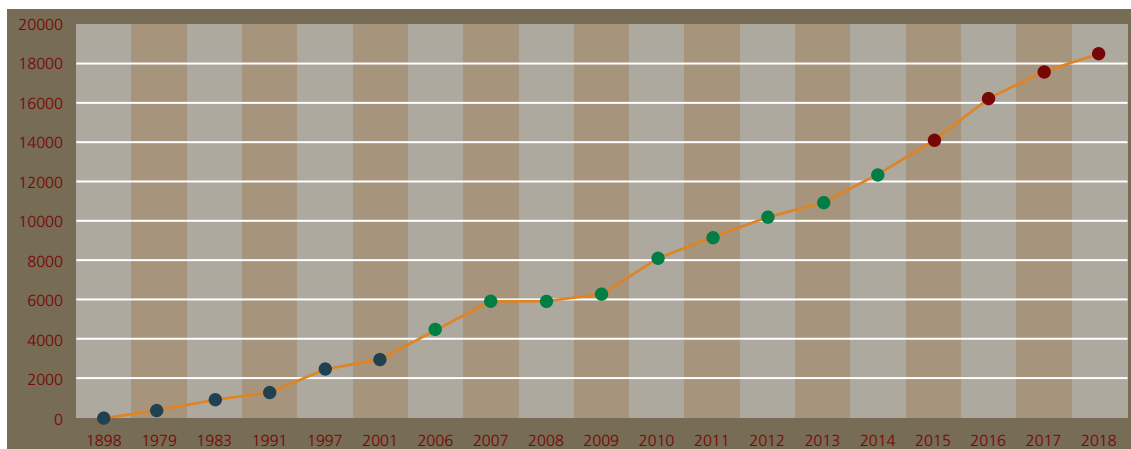


Figura 2 – Evolução histórica dos registros de cavernas no Brasil **Fonte:** CANIE Dezembro/2018 – Total: 18.358 cavidades

No que se refere às políticas públicas para conservação do patrimônio espeleológico, destaca-se o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, instituído pela Portaria nº 358/2009 do Ministério do Meio Ambiente, o qual estabelece a estratégia nacional sobre o tema, compreendendo, entre outros pontos, os princípios, diretrizes e metas para a conservação do patrimônio espeleológico brasileiro. O Instituto Chico Mendes é o responsável pela coordenação do Programa, porém

entende-se ser fundamental para sua efetiva execução que todos os órgãos do SISNAMA e demais setores da sociedade contribuam para o alcance das metas definidas nos seis Componentes que o constituem: Conhecimento do Patrimônio Espeleológico; Conservação do Patrimônio Espeleológico; Utilização Sustentável dos Componentes do Patrimônio Espeleológico; Monitoramento, Avaliação, Prevenção e Mitigação de Impactos sobre o Patrimônio Espeleológico; Divulgação sobre o Patrimônio Espeleológico; e Fortalecimento Institucional para a Gestão do Patrimônio Espeleológico.



Gruta Troncos (MG) - Foto: Jocy Cruz

A Conservação do Patrimônio Espeleológico no Rito do Licenciamento Ambiental

Como já destacado, a única possibilidade existente na legislação que permite que empreendimentos e atividades sejam autorizados a realizar impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas é por meio do licenciamento ambiental.

O licenciamento ambiental é um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente, estabelecida pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Entre as principais normas que o regulamentam estão as Resoluções do CONAMA nº 01, de 23 de janeiro de 1986, e nº 237, de 19 de dezembro de 1997, bem como a Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011.

Particularmente em relação à conservação do patrimônio espeleológico no rito do licenciamento ambiental, atualmente estão vigentes as seguintes normas: Decretos nº 99.556/90 e 6.640/2008, Resolução CONAMA nº 347/2004, Instrução Normativa nº 2/2017 do Ministério do Meio Ambiente e Instruções Normativas nº 1 e 4/2017 do Instituto Chico Mendes.

O artigo 4º da Resolução CONAMA nº 347/2004 dispõe que:

Art. 4º A localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades, considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores do patrimônio espeleológico ou de sua área de influência dependerão de prévio licenciamento pelo órgão ambiental competente, nos termos da legislação vigente.

O artigo 5º-A do Decreto nº 99.556/1990 apresenta redação semelhante:

Art. 5º-A. A localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades, considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores de cavidades naturais subterrâneas, bem como de sua área de influência, dependerão de prévio licenciamento pelo órgão ambiental competente.

Nessas situações, portanto, é necessário que os órgãos licenciadores incluam os estudos espeleológicos entre os demais estudos solicitados ao empreendedor.

Um dos pontos fundamentais para uma efetiva avaliação dos impactos ambientais é que os estudos espeleológicos sejam parte integrante do Estudo Prévio de Impacto Ambiental - EIA ou do estudo ou relatório solicitado nas demais situações não sujeitas à elaboração de EIA/RIMA. A avaliação de impactos ao patrimônio espeleológico não deve jamais ser efetuada de forma isolada e, sim, conjuntamente com os demais potenciais impactos ambientais da atividade ou do empreendimento em análise.

Para os empreendimentos novos, o processo deve ser iniciado com a elaboração do termo de referência pelo órgão ambiental licenciador.

As primeiras atividades e os estudos a ela relacionados são aqueles que buscarão identificar a ocorrência de cavidades naturais subterrâneas na Área de Influência Direta do empreendimento - AID.

As atividades de identificação de ocorrência de cavernas devem compreender, ao menos, duas etapas: avaliação do potencial espeleológico e prospecção espeleológica. O Capítulo 3 deste livro é dedicado a esse tema.

Destaca-se que as atividades de prospecção devem observar o conceito de cavidade natural subterrânea que consta no parágrafo único do artigo 1º do Decreto nº 99.556/1990, complementado pelo conceito de espaço subterrâneo que está no Anexo V da IN nº 2/2017 do MMA. Nesse sentido, o único parâmetro dimensional para enquadramento de feições naturais no conceito de cavidade natural subterrânea é o espaço subterrâneo ser acessível ao ser humano, não devendo ser adotado no rito do licenciamento ambiental nenhum outro critério dimensional para o registro de cavidade natural subterrânea.

Ao final dessa etapa, o órgão licenciador deve solicitar, no mínimo, os seguintes produtos: mapa de potencial espeleológico e sua nota explicativa; mapa de caminhamento das atividades de prospecção espeleológica; mapa com as cavidades naturais subterrâneas identificadas; mapa topográfico de cada cavidade natural subterrânea; arquivos digitais geoespacializados referentes às atividades realizadas e produtos gerados.

Nas situações em que as atividades de prospecção espeleológica identificarem a ocorrência de cavidades naturais subterrâneas na AID, deverão então ser efetuados os estudos para: avaliação dos impactos ambientais ao patrimônio espeleológico; subsidiar a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas identificadas; e definição das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico das cavidades com grau de relevância máximo e daquelas com grau de relevância alto, médio e baixo que não sofrerão impactos negativos irreversíveis diretos.

A etapa de avaliação de impactos ambientais pode ser considerada como a mais importante de todo o processo de licenciamento ambiental, inclusive naquilo que se refere à conservação do patrimônio espeleológico e ao uso sustentável de áreas cársticas.

Apesar de o Decreto nº 99.556/1990 utilizar-se do termo “impactos negativos irreversíveis” em diversos momentos, a norma não o conceitua, o que pode trazer dificuldades e diferentes interpretações. Contudo a IN nº 1/2017 do Instituto Chico Mendes apresenta esse conceito em seu artigo 2º, inciso II, e ele pode ser utilizado pelos órgãos ambientais no momento da avaliação de impactos ao patrimônio espeleológico:

Art. 2º [...]

II - impacto negativo irreversível em cavidade natural subterrânea: intervenção antrópica em cavidade natural subterrânea ou em sua área de influência, que implique na sua supressão total ou em alteração parcial não mitigável do ecossistema cavernícola, com o comprometimento da sua integridade e preservação.

É importante relembrar que os impactos ambientais ao patrimônio espeleológico são abordados no Capítulo 6 deste livro.

O artigo 5º da Resolução CONAMA nº 347/2004 apresenta alguns aspectos que devem ser considerados pelos órgãos licenciadores na avaliação de impactos ao patrimônio espeleológico, como: a intensidade, a temporalidade, a reversibilidade e a sinergia dos referidos impactos.

Juntamente à avaliação de impactos ao patrimônio espeleológico que visará a identificar cavidades naturais subterrâneas sujeitas a impactos negativos irreversíveis, devem ser realizados os estudos para a classificação do grau de relevância de cada uma das cavidades naturais subterrâneas identificadas.

É atribuição do órgão ambiental licenciador classificar o grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, com base em análise técnica dos estudos realizados pelo empreendedor, bem como vistorias em campo.

A classificação do grau de relevância de cada cavidade natural subterrânea deverá ser objeto de documento técnico formal do órgão ambiental e ser registrado no CANIE.

Após sua definição, o único órgão que poderá rever a classificação do grau de relevância de uma caverna, mediante fatos novos comprovados por estudos técnico-científicos, é o Instituto Chico Mendes, conforme previsto no §9º, artigo 2º do Decreto nº 99.556/1990.

A metodologia e os atributos que devem ser considerados para definição do grau de relevância de cavidades naturais subterrâneas são os que constam na Instrução Normativa nº 2/2017 do Ministério do Meio Ambiente.

Os capítulos 2 a 5 deste livro trazem explicações e análises técnicas e científicas a respeito de cada um dos atributos constantes da IN MMA nº 2/2017.

A respeito das cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo, e conforme disposto no artigo 3º do Decreto nº 99.556/1990, estas cavernas e suas áreas de influência não podem ser objeto de impactos negativos irreversíveis, sendo que sua utilização deve fazer-se somente dentro de condições que assegurem sua integridade física e a manutenção do seu equilíbrio ecológico.

Assim, quando houver cavernas com grau de relevância máximo na área de influência direta do empreendimento, deverão ser adotadas as medidas para que durante a instalação e a operação do empreendimento não ocorra nenhum impacto ou alteração no ambiente cavernícola, bem como deverão ser definidas as áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico. Deverá também ser estabelecido programa de monitoramento a ser implantado anteriormente à emissão da Licença de Instalação e que deverá ser executado durante toda a vigência da atividade ou do empreendimento, com foco na avaliação da integridade física e no equilíbrio ecológico dessas cavernas.

Para as cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância alto, médio ou baixo que o órgão ambiental emitir autorização para impactos negativos irreversíveis, deverão ser adotadas as medidas de compensação espeleológica e/ou ambiental. Tópico específico sobre esse tema é apresentado na sequência deste capítulo. Destaca-se neste ponto que todo o esforço deverá ser promovido para que a compensação espeleológica das cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância alto seja efetuada por meio do estabelecimento de cavidades testemunho, conforme disposto no §1º, artigo 4º do Decreto nº 99.556/1990.

A execução das outras formas de compensação, prevista no §3º do artigo acima mencionado, deve ser compreendida como uma situação excepcional no rito do licenciamento ambiental.

Nos casos em que os estudos aprovados pelo órgão licenciador concluírem que não haverá impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas, as mesmas não necessitarão de compensação, mas deverão ser incluídas em programa de monitoramento ambiental semelhante ao implantado para as cavernas com grau máximo de relevância.

Resumidamente, antes da emissão da Licença Prévia - LP deverão ser executados pelo empreendedor atividades e estudos, contemplando: prospecção espeleológica na AID com base em mapa de

potencial espeleológico; topografia das cavidades naturais subterrâneas identificadas; estudos de avaliação de impactos ambientais ao patrimônio espeleológico; estudos para definição das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico das cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo; estudos para definição das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico das cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo; e proposição das medidas de compensação para os impactos negativos irreversíveis autorizados em cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância alto e médio. Destaca-se que a análise e a aprovação pelo órgão licenciador desse conjunto de estudos são indispensáveis nessa fase do processo, pois são fundamentais para a análise da viabilidade ambiental do empreendimento.

Após a emissão da LP e anteriormente à emissão da Licença de Instalação – LI, recomenda-se que sejam realizados outros passos importantes relacionados à conservação do patrimônio espeleológico.

Durante esse período, deverá o empreendedor efetuar o registro de todas as cavidades naturais subterrâneas e estudos no CANIE. Do mesmo modo, caberá ao órgão ambiental registrar no Cadastro a classificação do grau de relevância das cavernas estudadas.

Programa de monitoramento das cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo e daquelas com grau de relevância alto, médio e baixo que não sofrerão impactos negativos irreversíveis deverá ser definido e implantado antes do início da instalação do empreendimento.

Para as cavernas com grau de relevância alto, médio e baixo que sofrerão impactos nesse momento deverão ser realizados o registro fotográfico e o resgate dos atributos espeleológicos, como disposto no artigo 18 da IN nº 2/2017 do Ministério do Meio Ambiente.

O fluxograma constante na Figura 3 apresenta de forma resumida as atribuições do órgão ambiental e do empreendedor e sua sequência no rito do licenciamento ambiental, da abertura do processo à emissão da Licença de Instalação.

É importante apresentar e analisar algumas questões a respeito das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico.

O conceito de área de influência sobre o patrimônio espeleológico foi inserido na legislação pela Resolução CONAMA nº 347/2004, em seu inciso IV do artigo 2º:

Art. 2º Para efeito desta Resolução ficam estabelecidas as seguintes definições: [...]

IV - área de influência sobre o patrimônio espeleológico: área que compreende os elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola;

A aplicação do conceito no rito do licenciamento ambiental é explicitada nos §§ 2º e 3º do artigo 4º da Resolução:

Art. 4º A localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades, considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores do patrimônio espeleológico ou de sua área de influência dependerão de prévio licenciamento pelo órgão ambiental competente, nos termos da legislação vigente. [...]

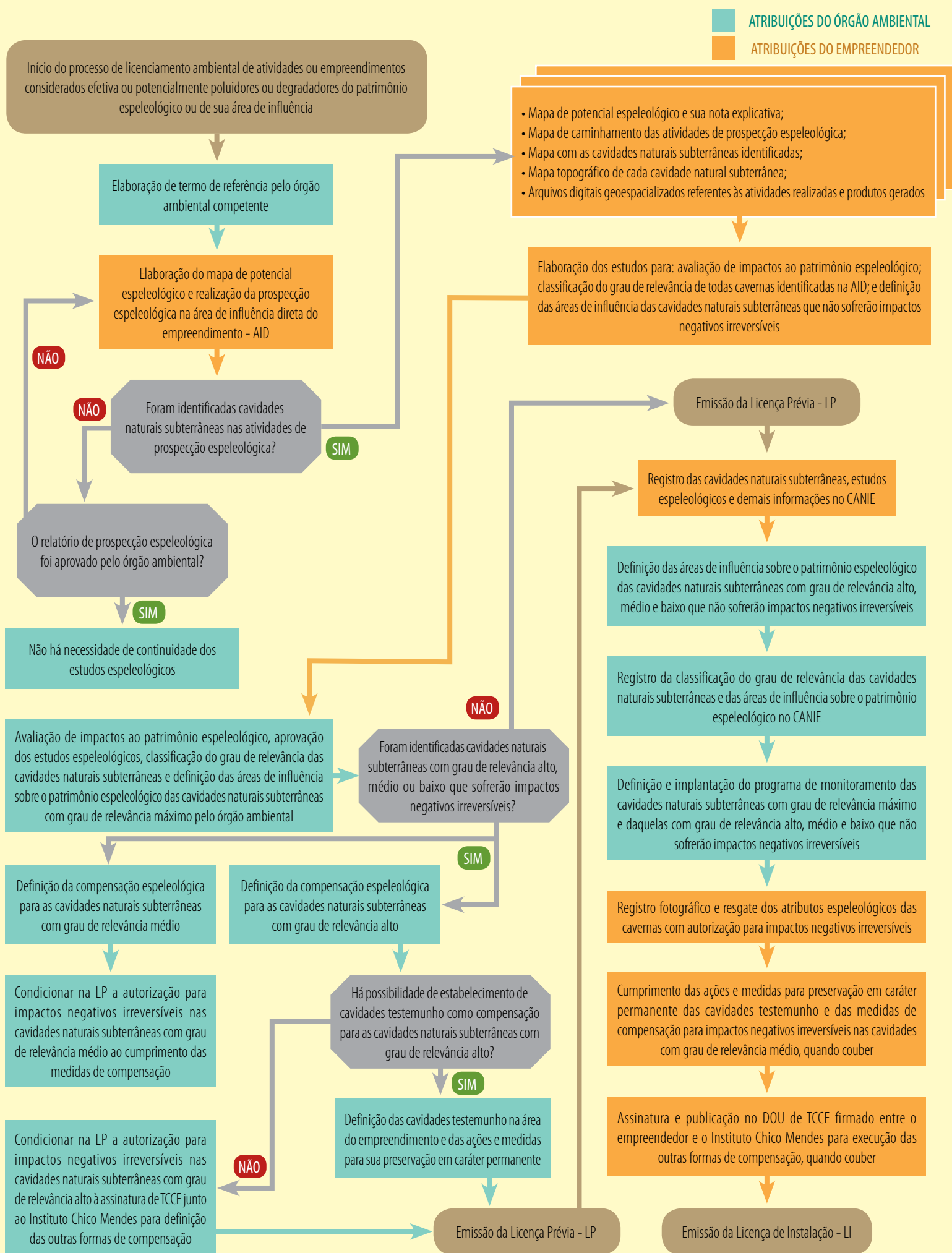


Figura 3 – Atribuições do órgão ambiental e do empreendedor e sua sequência no rito do licenciamento ambiental Fonte: Figura elaborada pelos autores

§ 2º A área de influência sobre o patrimônio espeleológico será definida pelo órgão ambiental competente que poderá, para tanto, exigir estudos específicos, às expensas do empreendedor.

§ 3º Até que se efetive o previsto no parágrafo anterior, a área de influência das cavidades naturais subterrâneas será a projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de duzentos e cinquenta metros, em forma de poligonal convexa.

Primeiramente, depreende-se que o conceito legal de área de influência é bastante claro, assim como seu objetivo. Em outras palavras, a área de influência é um espaço territorial delimitado com base apenas em aspectos naturais: bióticos e físicos, superficiais e subterrâneos, no interior do qual alterações ambientais têm potencial para gerar impactos no ambiente cavernícola. Dessa maneira, as características associadas aos empreendimentos e atividades e às alterações ambientais que os mesmos venham a causar, como, por exemplo, a emissão de vibrações, não são critérios a serem utilizados na delimitação das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico, devendo ser considerados na fase de avaliação de impactos ambientais.

Constata-se, contudo, que há situações específicas nas quais a delimitação dessas áreas pode envolver certa complexidade técnica.

Via de regra, entende-se que atividades e empreendimentos desenvolvidos fora da área de influência não causarão impactos em cavernas. No entanto, há exceções nesse raciocínio, como: empreendimentos e atividades emissoras de vibrações, rebaixamento do nível d'água de aquíferos, instalação de reservatórios de hidrelétricas, entre outros.

As áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico serão fundamentais para a avaliação de impactos ambientais no rito do licenciamento ambiental, pois indicarão se a atividade ou o empreendimento é ou não compatível com a manutenção da integridade física e do equilíbrio ecológico da caverna, tendo por objetivo impedir a ocorrência de impactos negativos irreversíveis aos ambientes cavernícolas.

A Resolução CONAMA nº 347/2004 também deixa claro em seu artigo 4º, §2º, que a definição das áreas de influência é atribuição do órgão ambiental, que poderá solicitar os estudos que se fizerem necessários ao empreendedor.

Isso posto, revela-se, portanto, essencial a definição das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico de todas as cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo na área de influência direta do empreendimento, entendendo-se imprescindível que essas áreas de influência sejam definidas anteriormente à emissão da Licença Prévia - LP. Essa recomendação embasa-se no entendimento de que a análise a respeito da viabilidade ambiental do empreendimento passa pela compreensão e pela avaliação dos potenciais impactos ambientais a cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo, suas possibilidades de mitigação e as eventuais alterações que serão necessárias nos projetos dos novos empreendimentos em decorrência disto.

Outra questão relevante é que as pesquisas mais recentes, assim como as experiências no licenciamento ambiental vêm demonstrando, de forma inequívoca, que a simples preservação do entorno

de 250 metros previsto no §3º do artigo 4º da Resolução CONAMA nº 347/2004 não significa garantia de que a caverna com grau máximo de relevância não sofrerá impactos negativos irreversíveis.

Dessa maneira reforça-se que o recomendável como boa prática no rito do licenciamento ambiental é a definição das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico das cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo antes da emissão da LP, sugerindo-se que a utilização do entorno de 250 metros ocorra apenas em situações fora do rito normal do licenciamento ambiental.

No caso das cavernas com graus de relevância alto, médio e baixo que não serão impactadas pelo empreendimento, entende-se que suas áreas de influência poderão ser definidas até o momento da emissão da Licença de Instalação - LI.

Após a definição da área de influência das cavernas com graus de relevância alto, médio e baixo que não serão diretamente impactadas pelo empreendimento e antes da emissão da Licença de Instalação, deverá ser observado se houve sobreposição (interferência) do empreendimento, ou infraestrutura associada, com os limites da área de influência então definida. Em caso afirmativo, deve ser avaliado se haverá impacto na caverna em decorrência do uso de sua área de influência. Havendo impacto negativo irreversível, essa caverna deverá ser incluída no cálculo das cavernas a serem compensadas, conforme as regras para o seu respectivo grau de relevância.

Orientações técnicas com intuito de contribuir na elaboração e na análise dos estudos para definição de áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico estão disponíveis na página do ICMBio/CECAV, no endereço: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/orientacoes-e-procedimentos/area-de-influencia.html>.

Há situações nas quais os empreendimentos ou atividades possuem potencial de impactos a unidades de conservação. Nesses casos, o licenciamento ambiental só poderá ocorrer mediante autorização do órgão gestor da unidade, conforme previsto no §3º do artigo 36 da Lei nº 9.985/2000:

Art. 36. Nos casos de licenciamento ambiental de empreendimentos de significativo impacto ambiental, assim considerado pelo órgão ambiental competente, com fundamento em estudo de impacto ambiental e respectivo relatório - EIA/RIMA, o empreendedor é obrigado a apoiar a implantação e manutenção de unidade de conservação do Grupo de Proteção Integral, de acordo com o disposto neste artigo e no regulamento desta Lei. [...]

§ 3º Quando o empreendimento afetar unidade de conservação específica ou sua zona de amortecimento, o licenciamento a que se refere o caput deste artigo só poderá ser concedido mediante autorização do órgão responsável por sua administração, e a unidade afetada, mesmo que não pertencente ao Grupo de Proteção Integral, deverá ser uma das beneficiárias da compensação definida neste artigo.

Em âmbito federal, os procedimentos entre o IBAMA e o Instituto Chico Mendes nos processos de licenciamento ambiental com potencial de impactos em unidade de conservação federal estão estabelecidos na Portaria nº 55, de 17 de fevereiro de 2014, do Ministério do Meio Ambiente. A portaria contém capítulo específico relacionado a empreendimentos que possam impactar cavidades naturais subterrâneas.

É importante destacar que nesses casos, apesar da necessária autorização do Instituto Chico Mendes e mesmo considerando que as cavidades naturais subterrâneas se localizam no interior de unidade de conservação federal, as atribuições para a classificação do grau de relevância das cavidades, assim como para a definição das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico permanecem com o IBAMA.

Nesse sentido, e estendendo o raciocínio da referida portaria para processos que envolvam órgãos ambientais estaduais ou municipais, recomenda-se que em processo de licenciamento ambiental no qual exista a necessidade de autorização de órgão gestor de unidade de conservação, a classificação do grau de relevância das cavidades e a definição das áreas de influência sobre o patrimônio espeleológico sejam efetuadas pelo órgão licenciador, ouvido o órgão gestor da unidade de conservação.

Por fim, outros órgãos públicos que não compõem a estrutura do SISNAMA também devem ser consultados em certas situações.

Como as cavidades naturais subterrâneas são bens da União, conforme previsão constitucional, anteriormente à autorização para ocorrência de impactos negativos irreversíveis e em especial nos casos de supressão total da caverna, recomenda-se realizar consulta à Secretaria de Patrimônio da União – SPU, atualmente parte da estrutura do Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão.

No que concerne à importância histórico-cultural ou religiosa de determinada caverna, há entre os atributos que conferem o grau de relevância máximo o listado no inciso XI, §4º do artigo 2º do Decreto nº 99.556/1990, que possui a seguinte redação:

Art. 2º A cavidade natural subterrânea será classificada de acordo com seu grau de relevância em máximo, alto, médio ou baixo, determinado pela análise de atributos ecológicos, biológicos, geológicos, hidrológicos, paleontológicos, cênicos, histórico-culturais e socioeconômicos, avaliados sob enfoque regional e local. [...]

§ 4º Entende-se por cavidade natural subterrânea com grau de relevância máximo aquela que possui pelo menos um dos atributos listados abaixo: [...]

XI - destacada relevância histórico-cultural ou religiosa.

O artigo 16 da IN nº 2/2017 do Ministério do Meio Ambiente, que trata do mesmo tópico, apresenta que:

Art. 16. O atributo referente à destacada relevância histórico-cultural ou religiosa de uma cavidade natural subterrânea, previsto no inciso XI do § 4º do art. 2º do Decreto nº 99.556, de 1990, será objeto de avaliação pelo órgão competente.

As atribuições dos órgãos públicos são definidas em leis, sendo que não é de competência dos órgãos ambientais a avaliação da importância de atributos histórico-culturais ou religiosos.

Nesse contexto, e salientando-se que a presença desse atributo em cavidade natural subterrânea confere o grau de relevância máximo, recomenda-se que no rito do licenciamento ambiental a avaliação deste atributo seja solicitada ao órgão competente, no caso da esfera federal, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN.



Terra Ronca II (GO) – Foto: Allan Calux

Gruta do Brega (MG) – Foto: Allan Calux



Compensação Espeleológica

Pelo termo compensação espeleológica compreende-se o previsto nos §§ 1º a 4º do artigo 4º do Decreto nº 99.556/90, com nova redação dada pelo Decreto nº 6.640/2008:

Art. 4º A cavidade natural subterrânea classificada com grau de relevância alto, médio ou baixo poderá ser objeto de impactos negativos irreversíveis, mediante licenciamento ambiental.

§ 1º No caso de empreendimento que ocasione impacto negativo irreversível em cavidade natural subterrânea com grau de relevância alto, o empreendedor deverá adotar, como condição para o licenciamento ambiental, medidas e ações para assegurar a preservação, em caráter permanente, de duas cavidades naturais subterrâneas, com o mesmo grau de relevância, de mesma litologia e com atributos similares à que sofreu o impacto, que serão consideradas cavidades testemunho.

§ 2º A preservação das cavidades naturais subterrâneas, de que trata o § 1º, deverá, sempre que possível, ser efetivada em área contínua e no mesmo grupo geológico da cavidade que sofreu o impacto.

§ 3º Não havendo, na área do empreendimento, outras cavidades representativas que possam ser preservadas sob a forma de cavidades testemunho, o Instituto Chico Mendes poderá definir, de comum acordo com o empreendedor, outras formas de compensação.

§ 4º No caso de empreendimento que ocasione impacto negativo irreversível em cavidade natural subterrânea com grau de relevância médio, o empreendedor deverá adotar medidas e financiar ações, nos termos definidos pelo órgão ambiental competente, que contribuam para a conservação e o uso adequado do patrimônio espeleológico brasileiro, especialmente das cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo e alto.

Conforme disposto no Decreto nº 99.556/90, com as alterações dadas pelo Decreto nº 6.640/2008, as cavernas existentes no país somente poderão ser objeto de impactos negativos irreversíveis mediante licenciamento ambiental e após a classificação de cada caverna em graus de relevância: máximo, alto, médio ou baixo, conforme metodologia estabelecida na Instrução Normativa nº 2/2017 do Ministério do Meio Ambiente.

As cavernas com grau máximo de relevância e suas áreas de influência não podem ser objeto de impactos negativos irreversíveis. Nesse sentido, não há dispositivo na legislação que versa sobre o patrimônio espeleológico que trate da compensação aos danos ocasionados a essas cavernas, devendo o órgão ambiental competente, nestas situações, recorrer às sanções previstas na legislação vigente, em especial as leis nº 6.938/81 e nº 9.605/98 e normas complementares.

Por outro lado, quando da autorização de impactos a cavernas com baixo grau de relevância, o empreendedor não estará obrigado a adotar medidas e ações para assegurar a preservação de outras cavidades naturais subterrâneas.

Assim, a chamada compensação espeleológica trata das ações e medidas que deverão ser adotadas pelo empreendedor nas ocasiões em que o órgão licenciador emitir autorização para impactos negativos irreversíveis em cavernas com graus de relevância alto ou médio.

Nos casos de impactos em cavidades naturais subterrâneas com alto grau de relevância, há duas situações.

A primeira, inserida no decreto como regra geral para o licenciamento ambiental, é a prevista nos §§ 1º e 2º do artigo 4º do Decreto nº 99.556/90:

§ 1º No caso de empreendimento que ocasione impacto negativo irreversível em cavidade natural subterrânea com grau de relevância alto, o empreendedor deverá adotar, como condição para o licenciamento ambiental, medidas e ações para assegurar a preservação, em caráter permanente, de duas cavidades naturais subterrâneas, com o mesmo grau de relevância, de mesma litologia e com atributos similares à que sofreu o impacto, que serão consideradas cavidades testemunho.

§ 2º A preservação das cavidades naturais subterrâneas, de que trata o § 1º, deverá, sempre que possível, ser efetivada em área contínua e no mesmo grupo geológico da cavidade que sofreu o impacto.

Essa regra geral é bastante clara, ou seja, para cada caverna com alto grau de relevância em que houve autorização de impacto, deverão ser adotadas medidas para preservação de outras duas cavernas com o mesmo grau de relevância, de mesma litologia e com atributos similares à que sofreu o impacto. Essas duas cavernas serão consideradas cavidades testemunho e passarão a possuir grau de relevância máximo, conforme inciso X, §4º do artigo 2º do Decreto nº 99.556/90.

Assim, as medidas e ações que assegurarão a preservação em caráter permanente dessas duas cavidades testemunho deverão constar entre as condicionantes das licenças ambientais como obrigação do empreendedor.

Entretanto existem situações nas quais o empreendedor, com base no previsto no §3º do artigo 4º do Decreto nº 99.556/90, apresenta ao órgão licenciador justificativa técnica a respeito da impossibilidade de cumprimento do previsto no §1º do citado artigo:

Art. 4º [...]

§ 3º Não havendo, na área do empreendimento, outras cavidades representativas que possam ser preservadas sob a forma de cavidades testemunho, o Instituto Chico Mendes poderá definir, de comum acordo com o empreendedor, outras formas de compensação.

Nesses casos, o órgão licenciador deverá emitir manifestação técnica que analise a justificativa do empreendedor e apresente o posicionamento do órgão em relação à mesma, acatando-a ou não.

O conceito de área do empreendimento para fins do estabelecimento de cavidades testemunho pode ser entendido como a área circunscrita à matrícula ou matrículas de propriedade, posse ou sujeita à posse pelo empreendedor no interior da área de influência direta do empreendimento. Contudo esse conceito não consta em nenhuma norma e cabe a cada órgão licenciador definir como o utilizará em seus processos.

Caso o entendimento do órgão seja no sentido de concordar com a impossibilidade de preservação de outras duas cavernas com alto grau de relevância para cada uma impactada na área do empreendimento, o empreendedor deverá requerer junto ao Instituto Chico Mendes a abertura de processo de compensação, conforme procedimentos previstos na Instrução Normativa nº 1/2017 do Instituto Chico Mendes.

Contudo é importante enfatizar que essa possibilidade de efetivação de outras formas de compensação deve sempre ser entendida pelo órgão licenciador como algo excepcional, uma vez que todos os esforços deverão ser promovidos para que haja a preservação de cavernas de mesma litologia e com similaridade de atributos, em área o mais próximo possível do empreendimento.

Em relação à análise de similaridade de atributos entre as cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância alto que serão impactadas e as cavidades testemunho, cita-se o §1º do artigo 20 da IN MMA nº 2/2017, que esclarece que os elementos constantes em cada grupo de atributos podem ser considerados, não sendo necessário haver a presença exatamente do mesmo atributo nas cavernas avaliadas, conforme a seguinte redação:

Art. 20. A preservação de 2 (duas) cavidades testemunho, ou outras formas de compensação previstas no § 3º, art. 4º, do Decreto nº 99.556, de 1990, definidas em procedimento de licenciamento ambiental, será condicionante para o licenciamento de empreendimentos que causem impactos a outras cavidades naturais subterrâneas de alta relevância.

§ 1º As cavidades testemunho preservadas deverão apresentar configurações similares de quaisquer elementos que compõem os grupos de atributos que determinaram a classificação de alta relevância para a cavidade alvo de impactos negativos irreversíveis. [...]

Destaca-se também que há a possibilidade de cumprimento parcial do previsto no §1º do artigo 4º do Decreto nº 99.556/90, ou seja, parte das cavernas com alto grau de relevância que sofrerão impactos pode ter sua compensação definida com a preservação de duas cavidades testemunho, enquanto que, apenas para as demais cavernas em que haja esta impossibilidade, sejam negociadas outras formas de compensação.

Como o Decreto nº 99.556/90 delegou ao Instituto Chico Mendes a responsabilidade de execução dos processos relacionados às outras formas de compensação, em setembro de 2012 foi publicada a Instrução Normativa nº 30, que posteriormente foi revogada e substituída pela Instrução Normativa nº 1, de 24 de janeiro de 2017. Em 20 de setembro de 2017 foi publicada a Instrução Normativa nº 4, complementando dispositivos da IN nº 1/2017.

A normativa vigente, entre outros pontos, estabelece os procedimentos administrativos e técnicos no âmbito do Instituto Chico Mendes para a execução das outras formas de compensação (artigo 4º, § 3º, do Decreto nº 99.556), como: as etapas para execução das outras formas de compensação, os documentos necessários para a abertura de processo, os critérios técnicos que deverão ser observados na análise das propostas e as regras para a assinatura dos Termos de Compromisso de Compensação Espeleológica - TCCE entre o Instituto Chico Mendes e o empreendedor.

Em seu artigo 3º, a norma define quais são as ações que o empreendedor poderá adotar para a compensação. Todos os processos deverão contemplar ações que incluam: i) a realização de ações que garantam a preservação de cavidades naturais subterrâneas; e ii) a implementação de ações do Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, instituído pela Portaria nº 358, de 30 de setembro de 2009, do Ministério do Meio Ambiente.

A respeito das ações que garantam a preservação de cavidades naturais subterrâneas, o artigo 4º da IN nº 1/2017 define que o cumprimento dessa medida se dará por meio da criação e da gestão de unidades de conservação da categoria Reserva Particular do Patrimônio Natural - RPPN ou da consolidação territorial de unidades de conservação administradas pelo poder público, sendo que deverão ser preservadas, para cada caverna com grau de relevância alto impactada na área do empreendimento: ou duas cavernas com grau alto ou uma com grau máximo de relevância.

Em relação aos investimentos no Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, existem duas situações:

- se os estudos para definição do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas na área do empreendimento seguirem o previsto na IN MMA nº 2/2009, a fórmula de cálculo dos recursos financeiros que serão investidos no Programa Nacional consta no artigo 5º da IN ICMBio nº 1/2017;
- caso os estudos tenham seguido a metodologia para classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas definida na IN MMA nº 2/2017, a fórmula de cálculo dos recursos financeiros que serão investidos no Programa Nacional consta no artigo 5º-A da IN ICMBio nº 1/2017, inserido pela IN ICMBio nº 4/2017.

Considerando-se importante que as cavernas que venham a ser preservadas por meio da criação de RPPN ou da consolidação territorial de unidades de conservação possuam a mesma litologia daquelas que foram impactadas na área do empreendimento, o artigo 6º da IN ICMBio nº 1/2017 estabelece redução de 50% do valor a ser investido no Programa Nacional caso esta seja a proposta do empreendedor para cumprimento do previsto no artigo 4º da IN.

Os artigos 9º e 10º trazem o detalhamento a respeito das ações necessárias para a criação de RPPN ou consolidação territorial de unidades de conservação.

Todas as ações de compensação espeleológica junto ao Instituto Chico Mendes serão objeto de Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica - TCCE, que será firmado entre os representantes legais do empreendedor e a presidência do Instituto. O artigo 12 da IN nº 1/2017 apresenta as regras e os procedimentos para assinatura do TCCE.

Importante contribuição ao entendimento sobre as outras formas de compensação foi trazida pela Procuradoria Federal Especializada junto ao Instituto Chico Mendes, por meio do Memorando nº 514/2010/AGU/PGF/PFE-ICMBIO, que esclarece:

Entendemos que esse dispositivo excepcional, que fala em “outras formas de compensação”, deve ser compreendido no contexto normativo no qual está inserido, de forma que essas outras formas de compensação não devem fugir da ideia de proteção do patrimônio espeleológico, até para afastar qualquer confusão com o instituto da compensação ambiental (art. 36, Lei do SNUC).

Por isso, é preciso interpretar as normas citadas no sentido de que, não havendo duas cavidades para serem preservadas na mesma litologia, com atributos similares, em áreas contínuas e no mesmo grupo geológico da cavidade que sofreu o impacto (até porque, quanto a estes últimos requisitos o próprio decreto fala em “sempre que possível”), deve-se partir para outra solução acordada com o empreendedor, que pode inclusive ser a preservação de duas cavidades de alta relevância, mesmo que de outra litologia, ou alguma outra medida, desde que seja exclusivamente voltada para a proteção do patrimônio espeleológico brasileiro.

Portanto, nos casos em que o órgão licenciador autorize impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância alto, a compensação deverá ser efetivada observando-se o previsto nos §§ 1º e 2º do artigo 4º do Decreto nº 99.556/90 e, apenas em casos excepcionais, o disposto no § 3º.

Quando houver entendimento técnico do órgão licenciador sobre a impossibilidade de cumprimento do previsto nos §§ 1º e 2º do artigo 4º do Decreto nº 99.556/90, este fato deverá ser comunicado formalmente ao Instituto Chico Mendes por meio de ofício, conforme previsto no inciso I, artigo 8º da IN ICMBio nº 1/2017.

Nessas situações, recomenda-se que o órgão ambiental licenciador condicione a autorização dos impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas com grau alto de relevância, a assinatura de TCCE junto ao Instituto Chico Mendes.

Nos processos de licenciamento ambiental em que houver autorização para impactos negativos irreversíveis em cavernas com médio grau de relevância, a compensação deverá então ser promovida conforme o disposto no § 4º do artigo 4º do Decreto 99.556/90:

Art. 4º [...]

§ 4º No caso de empreendimento que ocasione impacto negativo irreversível em cavidade natural subterrânea com grau de relevância médio, o empreendedor deverá adotar medidas e financiar ações, nos termos definidos pelo órgão ambiental competente, que contribuam para a conservação e o uso adequado do patrimônio espeleológico brasileiro, especialmente das cavidades naturais subterrâneas com grau de relevância máximo e alto.

A definição e o acompanhamento da execução desse tipo de compensação, relacionada às cavernas com médio grau de relevância, é de competência do próprio órgão licenciador.

Várias medidas poderão ser avaliadas para execução nessas situações, incluindo, por exemplo, aquelas já previstas no Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico, assim como ações de capacitação do quadro de servidores dos órgãos ambientais, de ampliação ou divulgação do conhecimento sobre o patrimônio espeleológico, de educação ambiental, de restauração ou recuperação de cavernas ou áreas cársticas degradadas, entre outras.

O fundamental é que as ações de compensação gerem produtos e resultados que tragam efetiva contribuição à conservação do patrimônio espeleológico e possam iniciar processos e atividades que

se consolidem e tenham condições de permanecer mesmo após o término das obrigações e da disponibilização de recursos financeiros por parte do empreendedor.

Diante das dificuldades em definir as medidas e ações de compensação em cada caso concreto, e tomando como referência o contido em pareceres da Procuradoria Federal Especializada junto ao Instituto Chico Mendes, recomenda-se que nos processos de compensação espeleológica o órgão ambiental sempre procure avaliar a proporcionalidade, a adequação e a equivalência entre os impactos às cavernas e a proposta de compensação em análise, observando os princípios da razoabilidade, da prevenção e da precaução, sem que, por outro lado, haja excessos em detrimento do empreendedor.

Nesse sentido, a compensação deve ser aquela capaz de produzir e garantir ganhos ambientais compatíveis e equivalentes com as perdas e os impactos autorizados ao patrimônio espeleológico na área do empreendimento.



Gruta Bonita (MG) – Foto: Allan Calux

Compensação Ambiental

A compensação ambiental foi instituída pela Lei nº 9.985/2000, por meio do disposto em seu artigo 36:

Art. 36. Nos casos de licenciamento ambiental de empreendimentos de significativo impacto ambiental, assim considerado pelo órgão ambiental competente, com fundamento em estudo de impacto ambiental e respectivo relatório - EIA/RIMA, o empreendedor é obrigado a apoiar a implantação e manutenção de unidade de conservação do Grupo de Proteção Integral, de acordo com o disposto neste artigo e no regulamento desta Lei.

No que se refere à conservação do patrimônio espeleológico, cabe destacar o previsto no §4º do artigo 5º-A do Decreto nº 99.556/90:

Art. 5º-A. A localização, construção, instalação, ampliação, modificação e operação de empreendimentos e atividades, considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores de cavidades naturais subterrâneas, bem como de sua área de influência, dependerão de prévio licenciamento pelo órgão ambiental competente.

[...]

§ 4º Em havendo impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas pelo empreendimento, a compensação ambiental de que trata o art. 36 da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, deverá ser prioritariamente destinada à criação e implementação de unidade de conservação em área de interesse espeleológico, sempre que possível na região do empreendimento.

O artigo 8º da Resolução CONAMA nº 347/2004 também aborda o tema, com a seguinte redação:

Art. 8º. Nos casos de licenciamento ambiental de empreendimentos e atividades considerados efetiva ou potencialmente causadores de significativa alteração e degradação do patrimônio espeleológico, para os quais se exija Estudo Prévio de Impacto Ambiental-EIA e respectivo Relatório de Impacto Ambiental ao Meio Ambiente-RIMA, o empreendedor é obrigado a apoiar a implantação e a manutenção de unidade de conservação, de acordo com o previsto no art. 36 da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000.

§1º O apoio a que se refere o caput desse artigo poderá nos termos do art. 33, do Decreto nº 4.340, de 22 de agosto de 2002, constituir-se em estudos e pesquisas desenvolvidas, preferencialmente na região do empreendimento, que permitam identificar áreas para a implantação de unidades de conservação de interesse espeleológico.

§2º O apoio que trata o caput desse artigo se aplica às hipóteses do art. 36, da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que regulamenta o art. 225, §1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências, e demais atos legais em vigência.

Nesse sentido, em processos de licenciamento de empreendimentos que sejam considerados pelo órgão ambiental competente como de significativo impacto ambiental e que causem impactos em cavernas e suas áreas de influência, a compensação ambiental deverá priorizar ações de conservação do patrimônio espeleológico.

Nessas situações, mesmo que o impacto em cavernas seja somente naquelas classificadas com grau baixo de relevância, a definição das medidas de compensação ambiental também deverá observar o previsto no §4º do artigo 5º-A do Decreto nº 99.556/90.

Destaca-se que os processos de licenciamento ambiental tratarão das duas formas de compensação concomitantemente e de forma independente: a ambiental, em empreendimentos considerados pelo órgão ambiental como de significativo impacto ambiental, e a espeleológica, quando houver autorização para impactos negativos irreversíveis em cavernas com alto ou médio grau de relevância.



Arco do André (MG) – Foto: Jocy Cruz

Pesquisa Científica em Cavidades Naturais Subterrâneas

A Resolução CONAMA nº 347/2004, em seu artigo 7º, prevê que:

Art. 7º As atividades de pesquisa técnico-científica em cavidades naturais subterrâneas que impliquem em coleta ou captura de material biológico ou mineral, ou ainda de potencial interferência no patrimônio espeleológico, dependerão de prévia autorização do IBAMA, ou de órgão do SISNAMA devidamente conveniado.

Em 2007, a atribuição para autorizar determinadas atividades de pesquisa científica, incluindo aquelas no interior de cavernas, passa a ser do Instituto Chico Mendes.

Atualmente, a norma do Instituto que regulamenta os procedimentos de autorização para essas atividades é a Instrução Normativa nº 3, de 01 de setembro de 2014.

Conforme previsto na mencionada Instrução Normativa, qualquer atividade de pesquisa a ser realizada em cavidade natural subterrânea, com finalidade científica ou didática no âmbito do ensino superior, deve ser submetida ao Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBio para a obtenção de autorização.

Entre as atividades mais comuns inseridas nos projetos de pesquisa estão: a coleta, o transporte ou a captura de material biológico, paleontológico, arqueológico, geológico, como: fósseis, artefatos, rochas, sedimentos clásticos ou químicos (espeleotemas), água, entre outros. Além dessas, também necessitam de autorização a observação e a gravação de imagem ou som em cavernas, quando realizadas no contexto de projeto de pesquisa científica.

O SISBio é um sistema de informação automatizado, interativo e simplificado de atendimento a distância, no qual as solicitações de autorização são realizadas por meio do preenchimento de formulários eletrônicos, disponíveis no endereço: www.icmbio.gov.br/sisbio.

As autorizações via SISBio somente podem ser solicitadas por pesquisadores que desenvolvam atividades de ensino ou pesquisa e que possuam vínculo vigente com instituição científica. Cabe esclarecer que organizações sem fins lucrativos e não governamentais como ONG, OSCIP e fundações podem ser enquadradas no conceito de instituição científica desde que seu estatuto preveja o desenvolvimento de atividades de pesquisa de caráter científico ou tecnológico.

As autorizações emitidas pelo SISBio não poderão ser utilizadas para fins comerciais, industriais, esportivos ou para realização de atividades inerentes ao processo de licenciamento ambiental de empreendimentos, sendo que, neste último caso, a responsabilidade pela autorização das atividades de pesquisa é do próprio órgão ambiental licenciador.

Excepcionalmente, profissionais com vínculo empregatício com empresas que atuem na área ambiental ou por ela contratados poderão solicitar autorização por meio do SISBio para atividades de pesquisa em cavidade natural subterrânea, quando visar a: definição de áreas destinadas à conservação da natureza; elaboração, implementação e revisão de zoneamento ecológico-econômico; elaboração, implementação e revisão de plano de manejo ou de proteção de unidade de conservação; geração de informações visando a subsidiar a gestão de unidades de conservação, quando no interesse de seus gestores; ou inventário florestal em unidade de conservação para subsidiar a elaboração de plano de manejo florestal sustentável.

Destaca-se ainda que uma das modalidades de autorização no SISBio é a licença permanente, com validade por período indeterminado. No entanto, esse tipo de autorização não é concedido para realização de pesquisas que envolvam cavidades naturais subterrâneas.

O transporte de qualquer material oriundo de pesquisa realizada em cavidade natural subterrânea, entre as localidades de coleta e as instituições destinatárias informadas na solicitação, deverá ser acompanhado de cópia da respectiva autorização emitida pelo SISBio, sendo que as autorizações previstas na IN nº 03/2014 não exigem o cumprimento das demais normas vigentes.

Para a execução de atividades de prospecção espeleológica, topografia e mapeamento de cavernas que não ocorram no âmbito de projeto de pesquisa vinculado à instituição científica, comumente realizadas pelos grupos de espeleologia, não é exigida a solicitação de autorização via SISBio, não eximindo os interessados nestas atividades de outras autorizações eventualmente necessárias.

Considerando-se a contribuição do SISBio ao aprimoramento de informações para subsidiar, técnica e cientificamente, a formulação de políticas públicas e o planejamento de ações que visem a promover a conservação e o uso sustentável da bio e geodiversidade, destaca-se a importância do relatório de atividades.

Para as atividades relacionadas ao patrimônio espeleológico nacional, recomenda-se que os relatórios de atividades informem as coordenadas geográficas das cavidades naturais subterrâneas onde foram realizadas as atividades, com a melhor precisão possível. No caso de finalidade científica, também devem ser apresentados os resultados preliminares da pesquisa e, sempre que disponível, informações relevantes ao manejo das cavernas e à proteção das espécies associadas ao ambiente subterrâneo.

O relatório de atividades deverá ser apresentado no prazo de até 30 dias depois de expirada a validade da autorização e sua inserção no SISBio será condição para a revalidação da autorização.

Os dados e informações dos relatórios de atividades permanecerão sob custódia do Instituto Chico Mendes, podendo o pesquisador solicitar período de carência de até cinco anos para sua publicação. Durante o período de carência informado, o Instituto Chico Mendes se responsabilizará pela não divulgação dos dados ao público em geral.



Gruta Túneis (MG) – Foto: Allan Calux

Plano de Manejo Espeleológico

Tanto no Brasil quanto em diversos países do mundo, as particularidades e os aspectos únicos dos ambientes cavernícolas, sua grande beleza cênica e por vezes seu uso histórico ou religioso despertam a curiosidade e o interesse de muitas pessoas, que se programam para visitar uma caverna.

Por um lado, é importante que cada vez mais pessoas tenham a oportunidade de vivenciar diferentes experiências em ambientes naturais, incluindo os ambientes cavernícolas, para despertar ou ampliar a compreensão da necessidade de conservação da natureza e sua diversidade. Por outro lado, atividades turísticas ou religiosas no interior de cavernas causam impactos a esses ambientes, que devem ser avaliados, monitorados e mitigados para proporcionar seu uso sustentável.

Nesse contexto, compreende-se que possibilitar e incentivar a visita em algumas cavernas do país, com a devida avaliação e o manejo de impactos, compõem estratégia que pode contribuir decisivamente para a preservação de outras cavernas, ou de forma mais ampla, do patrimônio espeleológico brasileiro, além de representar importante instrumento de educação ambiental.

Contudo sabe-se que cavernas com grandes dimensões, espeleotemas notáveis e diversidade de formas e ambientes são aquelas que mais despertam o interesse para visita, representando muitas vezes as cavernas mais importantes para conservação. Desse modo, regras, estratégias e estudos técnicos e científicos são necessários para viabilizar sua adequada utilização turística.

Em 2004, portanto, foi inserido na legislação pela Resolução CONAMA nº 347 o conceito de plano de manejo espeleológico, instrumento que tem por objetivo presidir o uso de cavidades naturais subterrâneas.

Do ponto de vista técnico, o plano de manejo espeleológico é o instrumento que assegurará o uso sustentável da caverna, seja turístico, religioso ou cultural. Sua definição na Resolução CONAMA é a seguinte:

documento técnico mediante o qual, com fundamento nos objetivos gerais da área, se estabelece o seu zoneamento e as normas que devem presidir o uso da área e o manejo dos recursos naturais, inclusive a implantação das estruturas físicas necessárias à gestão da cavidade natural subterrânea.

Basicamente, um plano de manejo espeleológico apresentará breve caracterização da caverna e sua estratégia de gestão da visita. Deve, no mínimo, conter: o zoneamento ambiental da caverna; as regras de uso para o ambiente cavernícola; a descrição das intervenções, infraestrutura e materiais utilizados, quando for o caso; programa de monitoramento; e programa de comunicação e resgate. Em determinadas situações, poderá haver a necessidade de elaboração de estudo para avaliação de risco geológico-geotécnico, com vistas à definição de setores da caverna cuja visita não será permitida.

Os estudos para a caracterização ambiental deverão levantar e analisar as informações que, de fato, são relevantes para definição do zoneamento da caverna, suas regras de uso, necessidade ou não de intervenções e infraestrutura, assim como definir uma linha de base para o programa de monitoramento. Portanto, longos textos e análises, por exemplo, sobre a geologia regional da área ou a respeito do bioma no qual a caverna está inserida, via de regra, não significam contribuição importante para o plano de manejo espeleológico.

O levantamento de informações secundárias e em campo deve ser compatível com a escala do objeto de análise, ou seja, os setores da caverna que poderão ser impactadas pela atividade turística, cultural ou religiosa. Portanto, informações sobre os meios físico e biótico e histórico-culturais da caverna e seu entorno imediato devem ser o foco dos estudos.

Cada caverna apresentará especificidades que na prática significarão diferentes necessidades de aprofundamento dos estudos ou daquilo que deve ser analisado.

De forma geral, a caracterização deve contemplar aspectos geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, microclimáticos, biológicos, ecológicos, arqueológicos e paleontológicos.

Com base na definição de critérios e parâmetros e promovendo uma análise integrada de todas as informações levantadas na etapa de caracterização, será então elaborado o zoneamento da caverna.

Basicamente, o zoneamento definirá o grau de restrição ao uso dos diferentes setores da caverna. Assim, condutos ou salões que apresentem riscos geológicos, espécies troglóbias sensíveis a pequenas alterações ambientais, espeleotemas raros em locais acessíveis, entre diversas outras eventuais situações, podem ter seu uso restringido ou até mesmo proibido.

Fator determinante para sua efetividade é o plano de manejo espeleológico ser entendido como um documento dinâmico, que poderá ser periodicamente atualizado considerando-se, sobretudo, os resultados de seu programa de monitoramento, além de novas informações levantadas, descobertas científicas, ou até mesmo variações na demanda turística.

As regras de uso incluem normas gerais, como a definição do caminhamento em cada roteiro previsto no interior da caverna, os equipamentos e tipo de vestuário obrigatórios para os condutores e visitantes, tamanho dos grupos de visitantes, número máximo de visitantes que cada guia poderá conduzir, intervalo de tempo mínimo entre os grupos, os roteiros disponíveis, etc. Regras específicas, considerando-se o zoneamento estabelecido para a caverna, também devem ser avaliadas.

Algumas cavernas necessitarão de intervenções e instalação de infraestrutura de apoio à visitação. As principais funções dessas infraestruturas ou intervenções são proporcionar uma experiência segura ao visitante, e ao mesmo tempo conferir proteção aos atributos físicos, biológicos ou histórico-culturais da caverna.

Os exemplos mais comuns seriam: pontes sobre rios ou lagos, ajuste de blocos em porções da trilha com maior declividade, trilhas suspensas em locais mais frágeis da caverna, escadas e corrimãos. Em situações específicas ou em cavernas com alta demanda turística poderá haver a instalação de equipamentos de iluminação artificial.

Deve ser realizada criteriosa avaliação da real necessidade de intervenções e instalação de infraestrutura no interior da caverna, evitando-as sempre que possível, com intuito de minimizar os impactos e proporcionar ao visitante o conhecimento do ambiente cavernícola o mais próximo possível de seu estado natural.

Quando necessárias, as intervenções devem sempre observar o zoneamento da caverna e ser executadas com a mínima alteração ambiental. É importante também que os impactos das intervenções e da instalação da infraestrutura sejam totalmente reversíveis. Recomenda-se o uso de material que já ocorra naturalmente no ambiente cavernícola ou seja o mais similar possível a este. Não havendo alternativas, é aconselhado o uso de materiais inertes.

Os potenciais impactos do uso turístico, como danos a espeleotemas, contaminação da água e sedimentos, compactação do solo, interferência na fauna subterrânea, entre outros, serão abordados com mais detalhes no Capítulo 6 deste livro.

Também é essencial avaliar a presença de organismos patógenos relacionados a doenças como histoplasmose, leishmaniose e raiva, bem como de animais venenosos ou peçonhentos como serpentes, escorpiões, aranhas-marrom, entre outros de possível ocorrência, devendo ser apresentadas no plano de manejo espeleológico as estratégias para conciliar a visitação turística com a presença dessas espécies.

A elaboração e a execução de um bom programa de monitoramento são essenciais para a sustentabilidade e a continuidade do uso turístico, cultural ou religioso da caverna – não apenas para compreender e mitigar os eventuais impactos identificados, mas também para proporcionar uma boa experiência ao visitante.

É sabido que, apesar de todo o planejamento elaborado, as atividades em ambientes naturais sempre possuem algum risco de ocorrência de acidentes. E as experiências demonstram que o socorro e o resgate de vítimas de acidentes em cavernas são geralmente bastante complexos, demandam pessoas devidamente capacitadas para tal atividade e podem acarretar impactos indesejáveis e, por vezes, irreversíveis ao ambiente cavernícola. Portanto, a identificação de riscos de acidentes relacionados à visitação na caverna também deve ser objeto de avaliação, visando a dirimir ao máximo sua possibilidade de ocorrência.

Nesse sentido, programa de comunicação e resgate deve ser item obrigatório em todo plano de manejo espeleológico que preveja detalhadamente toda a estratégia, as atividades necessárias e os recursos humanos que serão empregados em casos de acidente.

A aprovação do plano de manejo espeleológico pelo órgão ambiental competente é condição para a autorização de empreendimentos ou atividades turísticas, religiosas ou culturais que utilizem o ambiente constituído pelo patrimônio espeleológico, de acordo com o previsto no artigo 6º da citada resolução.

Assim, o proprietário da terra onde se encontra a caverna ou os interessados em viabilizar seu uso turístico, religioso ou cultural devem elaborar o plano de manejo espeleológico da caverna e submetê-lo à aprovação do órgão ambiental competente.

Sobre a competência para aprovação de planos de manejo espeleológico, esclarece-se o seguinte: a Resolução CONAMA nº 347/2004 dispõe, em seu artigo 6º, que o IBAMA é o órgão ambiental responsável pela mencionada aprovação dos planos. Entretanto, com a publicação da Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011, que regulamentou o artigo 23 da Constituição Federal, as atribuições dos órgãos ambientais foram definidas de forma mais clara.

Após a promulgação da LC nº 140/2011 e de questionamentos técnicos e jurídicos do IBAMA e do Instituto Chico Mendes, a Consultoria Jurídica do Ministério do Meio Ambiente elaborou o Parecer nº 147/2014/CGAJ/CONJUR/MMA/jpfs, homologado pela Ministra de Estado do Meio Ambiente, por meio do qual conclui, entre outros pontos, que a parte final do artigo 6º da Resolução CONAMA nº 347/2004, na qual consta “aprovado pelo IBAMA” não foi recepcionada *ipsis literis* pela LC nº 140/2011.

O parecer também elucida que, mesmo com a previsão constitucional de que as cavidades naturais subterrâneas são bens da União, sua gestão ambiental não é competência única dos entes federais de meio ambiente.

Na prática, as conclusões do citado Parecer da Conjur/MMA tornam mais claro o entendimento de que todos os órgãos que compõem o SISNAMA são responsáveis pela gestão ambiental do patrimônio espeleológico.

A definição sobre qual órgão deverá aprovar um plano de manejo espeleológico, em cada caso específico, deverá observar a legislação vigente, em especial o previsto na LC nº 140/2011, sendo que no interior de unidades de conservação, por exemplo, a atribuição para a aprovação de planos de manejo espeleológico é do órgão gestor da unidade, seja ele municipal, estadual ou federal.

Nas ocasiões em que o órgão ambiental não dispuser de quadro técnico capacitado sobre o tema, poderá ser solicitada a atuação subsidiária do Instituto Chico Mendes, nos termos do artigo 16 e do inciso III, artigo 2º da LC nº 140/2011.

Destaca-se ainda que cada órgão ambiental poderá definir o rito e os procedimentos específicos para a aprovação de planos de manejo espeleológico que estejam sob sua responsabilidade e que, a princípio, a atribuição de fiscalizar e monitorar a adequada implantação do plano de manejo espeleológico é do órgão ambiental que o aprovou.

No caso de cavernas situadas em unidades de conservação de posse e domínio públicos, é recomendável que o plano de manejo espeleológico seja parte integrante do plano de manejo da unidade de conservação.

Por fim, destaca-se entre as publicações técnicas no país sobre a gestão da visitação em ambientes naturais o *Roteiro Metodológico para Manejo de Impactos da Visitação*, publicado em 2011 pelo Instituto Chico Mendes. Possibilidades de ações de manejo, definição do número balizador da visitação e planejamento e execução do monitoramento estão entre os pontos importantes dessa publicação no âmbito do tema plano de manejo espeleológico.

E em relação propriamente à elaboração e à implantação de planos de manejo espeleológico, recomenda-se o documento *Diretrizes e Orientações Técnicas para a Elaboração de Planos de Manejo Espeleológico*¹, elaborado pelo ICMBio/CECAV e parceiros.

¹ Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/orientacoes-e-procedimentos/plano-de-manejo-espeleologico>



Lago Azul (MS) – Foto: Jocy Cruz

Mergulho em Cavernas

As atividades de mergulho em cavernas, ou espeleomergulho, foram regulamentadas pela primeira vez por meio da Portaria nº 89 do IBAMA, de 13 de agosto de 2001. Posteriormente a Instrução Normativa IBAMA nº 100, de 5 de junho de 2006, revogou a norma anterior e trouxe novos dispositivos para regulamentação da atividade. Apesar de apresentarem pontos positivos e participação ativa de representantes dos mergulhadores e demais setores envolvidos com o assunto, a aplicação das citadas normas sempre resvalou em dificuldades técnicas.

Cabe salientar que, quando realizadas dentro das boas práticas de mergulho, as atividades de espeleomergulho podem ser consideradas de baixo impacto ambiental e devem ser incentivadas, uma vez que podem contribuir para a geração de conhecimento, trazendo novas informações e dados relevantes para a ciência e para a conservação do patrimônio espeleológico, assim como têm potencial para despertar ou fortalecer em seus praticantes a compreensão da importância de conservar esses singulares ambientes.

Considerando-se esse cenário e o fato de que outras normas vigentes poderiam ser utilizadas para a autorização da atividade em determinados casos, o IBAMA publicou em 22 de janeiro de 2018 a Instrução Normativa nº 2, que revogou a IN nº 100/2006. Com essa revogação houve, portanto, importante mudança no que se refere às autorizações para a prática da atividade de mergulho em caverna.

Contudo, para algumas situações específicas, há normas vigentes que podem ser aplicadas.

Quando as atividades de mergulho em caverna possuírem finalidade turística, deve ser observado o previsto no artigo 6º da Resolução CONAMA nº 347/2004, ou seja, as mesmas deverão ocorrer em cavernas com plano de manejo espeleológico aprovado, respeitando-se o zoneamento espeleológico e demais regras e orientações contidas no plano de manejo.

Nas situações em que a atividade de mergulho em caverna possuir finalidade científica ou didática, conforme previsto na Instrução Normativa nº 3/2014 do Instituto Chico Mendes, a autorização deverá ser solicitada por meio do Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBio², no âmbito do respectivo projeto de pesquisa.

Se a atividade de mergulho em caverna estiver inserida na elaboração de estudos espeleológicos previstos no rito do licenciamento ambiental, a autorização deverá ser emitida pelo próprio órgão ambiental licenciador responsável pela aprovação dos estudos.

Para as atividades de mergulho em caverna que envolvam cursos, treinamentos, manutenção de habilidades técnicas, exploração, topografia ou mapeamento fora do contexto das situações descritas anteriormente, não há norma específica em âmbito federal. Nesse sentido e observando-se a legislação vigente, orienta-se o seguinte:

- Para a realização dessas atividades em cavernas localizadas no interior de unidade de conservação, recomenda-se solicitar autorização ao órgão gestor da unidade.
- Quando a caverna estiver localizada fora de unidade de conservação, deve ser verificado junto ao órgão ambiental competente, estadual ou municipal de acordo com a legislação vigente em cada estado ou município, a necessidade ou não de autorização específica para as atividades acima listadas envolvendo mergulho em caverna.

² Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/sisbio>

- No caso de realização de cursos, treinamentos e manutenção de habilidades técnicas em cavernas com plano de manejo espeleológico aprovado, as mesmas podem ser desenvolvidas sem autorizações específicas, desde que observem as regras estabelecidas no plano.

No âmbito do Instituto Chico Mendes, a autorização para as atividades de mergulho em cavernas situadas no interior de unidades de conservação federais ou suas zonas de amortecimento deverá seguir o previsto na Instrução Normativa nº 4, de 2 de setembro de 2009, que estabelece os procedimentos administrativos para autorização de atividades condicionadas ao controle do poder público e não sujeitas ao licenciamento ambiental previsto na Resolução CONAMA nº 237/97 e de atividades cuja autorização seja exigida por normas específicas.

Ressalta-se que as autorizações dos órgãos ambientais têm por objetivo avaliar e mitigar os eventuais impactos ambientais das atividades de mergulho em cavernas. A verificação das certificações necessárias e comprovação de habilidades técnicas para a prática segura do espeleomergulho são de responsabilidade das instituições pertinentes, assim como das empresas, dos profissionais e mergulhadores envolvidos na realização da atividade.

É importante, por fim, destacar que o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico prevê, entre as metas iniciais de seu Componente 3, a elaboração de um programa de turismo sustentável para as cavernas brasileiras, incluindo a abertura de um circuito nacional de espeleomergulho, com o objetivo de incentivar a inserção do Brasil no cenário mundial da prática da atividade.

Referências

BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do *caput* e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. *Diário Oficial da União*, Brasília, 9 de dezembro de 2011, nº 236, Seção 1, p. 1-3.

BRASIL. Lei nº 3.924, de 26 de julho de 1961. Dispõe sobre os monumentos arqueológicos e pré-históricos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L3924.htm.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9985.htm.

BRASIL. Lei nº 11.516, de 28 de agosto de 2007. Dispõe sobre a criação do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - Instituto Chico Mendes; altera as Leis nos 7.735, de 22 de fevereiro de 1989, 11.284, de 2 de março de 2006, 9.985, de 18 de julho de 2000, 10.410, de 11 de janeiro de 2002, 11.156, de 29 de julho de 2005, 11.357, de 19 de outubro de 2006, e 7.957, de 20 de dezembro de 1989; revoga dispositivos da Lei no 8.028, de 12 de abril de 1990, e da Medida Provisória

no 2.216-37, de 31 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 28 de agosto de 2007, nº 166-A, Seção 1 - Edição Extra, p. 1-2.

BRASIL. Decreto nº 45.954, de 30 de abril de 1959. Cria o Parque Nacional de Ubajara, Estado do Ceará. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1950-1969/D45954.htm.

BRASIL. Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 de outubro de 1990, Seção 1, p. 18836.

BRASIL. Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dá nova redação aos arts. 1º, 2º, 3º, 4º e 5º e acrescenta os arts. 5-A e 5-B ao Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, que dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 10 de novembro de 2008, nº 218, Seção 1, p. 8-9.

BRASIL. Decreto nº 8.974, de 24 de janeiro de 2017. Aprova a Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e das Funções de Confiança do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - Instituto Chico Mendes, remaneja cargos em comissão e função de confiança e substitui cargos em comissão do Grupo-Direção e Assessoramento Superiores - DAS por Funções Comissionadas do Poder Executivo - FCPE. **Diário Oficial da União**, Brasília, 25 de janeiro de 2017, nº 18, Seção 1, p. 4-8.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=23>.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 9, de 24 de janeiro de 1986. Dispõe sobre a criação de Comissão Especial para estudos do Patrimônio Espeleológico. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=32>.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 5, de 06 de agosto de 1987. Dispõe sobre o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=56>.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=237>.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 347, de 13 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452>.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 428, de 17 de dezembro de 2010. Dispõe, no âmbito do licenciamento ambiental sobre a autorização do órgão responsável pela administração da Unidade de Conservação (UC), de que trata o § 3º do artigo 36 da Lei nº 9.985 de 18 de julho de 2000, bem como sobre a ciência do órgão responsável pela administração da UC no caso de licenciamento ambiental de empreendimentos não sujeitos a EIA-RIMA e dá outras providências. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=641>.

IBAMA. Gabinete do Presidente. Instrução Normativa nº 2, de 22 de janeiro de 2018. Revoga a Instrução Normativa nº 100, de 5 de junho de 2006. **Diário Oficial da União**, Brasília, 24 de janeiro de 2018, nº 17, Seção 1, p. 43.

IBAMA. Gabinete do Presidente. Instrução Normativa nº 100, de 5 de junho de 2006. Regulamenta as atividades de mergulho em caverna. **Diário Oficial da União**, Brasília, 6 de junho de 2006, nº 107, Seção 1, p. 64-66.

IBAMA. Gabinete do Presidente. Portaria nº 89, de 13 de agosto de 2001. Regulamenta as atividades de mergulho em caverna. **Diário Oficial da União**, Brasília, 14 de agosto de 2001, nº 155-E, Seção 1, p. 95-96.

IBAMA. Gabinete do Presidente. Portaria nº 887, de 15 de junho de 1990. *Diário Oficial da União*, Brasília, 20 de junho de 1990, Seção 1, p. 11844.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. *Roteiro Metodológico para Manejo de Impactos da Visitação com Enfoque na Experiência do Visitante e na Proteção dos Recursos Naturais e Culturais*. Brasília: Instituto Chico Mendes, 2011. 88p.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Gabinete do Presidente. Portaria nº 32, de 2 de março de 2012. Criar o Comitê Técnico Consultivo, órgão colegiado consultivo com atribuições de acompanhar e avaliar a aplicação da Instrução Normativa MMA nº 2, de 20 de agosto de 2009, nos processos de licenciamento ambiental, bem como de propor ao Ministério do Meio Ambiente o aprimoramento das regras técnicas existentes. *Diário Oficial da União*, Brasília, 6 de março de 2012, nº 45, Seção 1, p. 207.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Gabinete do Presidente. Instrução Normativa nº 4, de 2 de setembro de 2009. Estabelece procedimentos administrativos para autorização de atividades condicionadas ao controle do poder público e não sujeitas ao licenciamento ambiental previsto na Resolução CONAMA nº 237/97 e de atividades cuja autorização seja exigida por normas específicas. *Diário Oficial da União*, Brasília, 18 de setembro de 2009, nº 179, Seção 1, p. 98-99.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Gabinete do Presidente. Instrução Normativa nº 30, de 19 de setembro de 2012. Estabelece procedimentos administrativos e técnicos para a execução de compensação espeleológica de que trata o art. 4º, § 3º, do Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, alterado pelo Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008, para empreendimentos que ocasionem impacto negativo irreversível em cavidade natural subterrânea classificada com grau de relevância alto e que não possuam na sua área, conforme análise do órgão licenciador, outras cavidades representativas que possam ser preservadas sob a forma de cavidades testemunho. *Diário Oficial da União*, Brasília, 21 de setembro de 2012, nº 184, Seção 1, p. 74.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Gabinete do Presidente. Instrução Normativa nº 7, de 5 de novembro de 2014. Fixar normas para a utilização do Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade - SISBio, na forma das diretrizes e condições previstas nesta Instrução Normativa, e regulamentar a disponibilização, o acesso e o uso de dados e informações recebidos pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade por meio do SISBio. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2 de setembro de 2014, nº 168, Seção 1, p. 60-62.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Gabinete do Presidente. Instrução Normativa nº 3, de 1º de setembro de 2014. Estabelece Procedimentos do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade nos Processos de Licenciamento Ambiental. *Diário Oficial da União*, Brasília, 10 de novembro de 2014, nº 217, Seção 1, p. 83-86.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Gabinete do Presidente. Instrução Normativa nº 1, de 24 de janeiro de 2017. Estabelece procedimentos para definição de outras formas de compensação ao impacto negativo irreversível em cavidade natural subterrânea com grau de relevância alto, conforme previsto no art. 4º, § 3º do Decreto nº 99.556, de 1º outubro de 1990. *Diário Oficial da União*, Brasília, 26 de janeiro de 2017, nº 19, Seção 1, p. 42-43.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Gabinete do Presidente. Instrução Normativa nº 4, de 20 de setembro de 2017. Acrescenta o art. 5º-A à Instrução Normativa nº 1, de 24 de janeiro de 2017. *Diário Oficial da União*, Brasília, 27 de setembro de 2017, nº 186, Seção 1, p. 81-82.

MARTINELLI, R. S.; GERIBELLO, F. K. Histórico dos cadastros de cavernas no Brasil e a situação no Estado de São Paulo. In: RASTEIRO, M. A.; SALLUN FILHO, W. (Org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. *Anais [...]* Campinas: SBE, 2015. p.355-382. Disponível em: <http://www.cavernas.org.br/anaisA33cbe/33cbe_355-382.pdf>.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Gabinete do Ministro. Instrução Normativa nº 2, de 20 de agosto de 2009. Dispõe sobre a metodologia para classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas. **Diário Oficial da União**, Brasília, 21 de agosto de 2009, nº 160, Seção 1, p. 68-71.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Gabinete do Ministro. Portaria nº 358, de 30 de setembro de 2009. Institui o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeológico. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1º de outubro de 2009, nº 188, Seção 1, p. 63-64.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Gabinete da Ministra. Portaria nº 55, de 17 de fevereiro de 2014. Estabelece procedimentos entre o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - Instituto Chico Mendes e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis-IBAMA relacionados à Resolução nº 428, de 17 de dezembro de 2010, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA e dá outras providências no âmbito do licenciamento ambiental federal. **Diário Oficial da União**, Brasília, 18 de fevereiro de 2014, nº 34, Seção 1, p. 60-61.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Gabinete do Ministro. Instrução Normativa nº 2, de 30 de agosto de 2017. Define a metodologia para a classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas, conforme previsto no art. 5º do Decreto nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. **Diário Oficial da União**, Brasília, 1º de setembro de 2017, nº 169, Seção 1, p. 161-165.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto nº 32.283, de 19 de maio de 1958**. Cria o Parque Estadual do Alto Ribeira. Disponível em: <http://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1958/decreto-32283-19.05.1958.html>.



Conclusão

Jocy Brandão Cruz

José Carlos Ribeiro Reino

André Afonso Ribeiro





A diretriz de integrar a atuação dos órgãos competentes do Sistema Nacional de Meio Ambiente - SISNAMA na execução da Política Nacional do Meio Ambiente, em conformidade com as respectivas competências, foi contemplada no Decreto nº 99.556/90 e em alterações dadas pelo Decreto nº 6.640/2008, ao estabelecer em seu Art. 5º-B que cabe à União, aos estados, ao Distrito Federal e aos municípios preservar, conservar, fiscalizar e controlar o uso do patrimônio espeleológico brasileiro, bem como fomentar levantamentos, estudos e pesquisas que possibilitem ampliar o conhecimento sobre as cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional.

Nesse sentido, impõe-se o desafio de fortalecer os órgãos ambientais e aprimorar a gestão do patrimônio espeleológico existente nos respectivos territórios, tanto em cumprimento às normas vigentes quanto na perspectiva da geração de conhecimento, por meio do adequado gerenciamento de dados e informações em escala local e regional. Como exemplo, pode-se citar a importância de cada órgão licenciador promover a classificação sistemática e organizada das unidades espeleológicas (ênfase regional) e geomorfológicas (ênfase local) apresentadas em processos de licenciamento ambiental, de modo a construir mosaicos estaduais que permitam a delimitação e a abordagem de unidades espaciais baseadas em critérios e atributos uniformes, minimizando avaliações precárias ou com elevado grau de incertezas e discrepâncias. De acordo com Zampaulo (2010), inventários com resultados de diversidade e riqueza média podem ser utilizados como um referencial importante pelos órgãos ambientais para análise de processos de licenciamento ambiental na região, permitindo

assim a compreensão de padrões de biodiversidade e o planejamento de ações de conservação. Estudos hidrogeológicos em áreas cársticas com potencial para reserva hídrica de sistema de abastecimento público de água permitem delimitar bacias cuja fragilidade natural do aquífero em absorver e conduzir contaminantes ensejam ações de preservação (FREITAS, 2009). Nesse caso, a delimitação dessas bacias como unidades espaciais de análise funcionaria como critério básico de análise no licenciamento ambiental de qualquer empreendimento ou atividade localizado sobre esses aquíferos, cujos resultados retroalimentariam o respectivo banco de dados do órgão ambiental, tornando o processo sistêmico e aprimorado a cada novo licenciamento.

O tratamento sistemático das informações oriundas dos processos de licenciamento ambiental também permite o aprimoramento do monitoramento ambiental, tornando-o ferramenta robusta e efetiva para a geração de informações relevantes. Ações nesse sentido fortalecem os órgãos ambientais, criando condições favoráveis a maior participação dos estados, do Distrito Federal e dos municípios em fóruns voltados ao aperfeiçoamento dos instrumentos relacionados à gestão ambiental e ao uso das cavidades naturais subterrâneas. Um exemplo foi o comitê técnico consultivo criado para acompanhar e avaliar a aplicação da Instrução Normativa nº 2/2009 do Ministério do Meio Ambiente nos processos de licenciamento ambiental, com a finalidade de propor a este Ministério o aprimoramento das regras técnicas previstas, que envolveu a participação de todos os setores interessados e envolvidos com a conservação do patrimônio espeleológico e com o rito do licenciamento ambiental. Assim, peculiaridades locais e regionais reforçariam a formulação e a revisão de políticas públicas voltadas à avaliação de impactos ambientais, à classificação e à reclassificação do grau de relevância de cavernas, bases do licenciamento ambiental em questão.

Contudo o aprimoramento da gestão pública nesse tema está intimamente relacionado à contratação e à permanência de número suficiente de servidores públicos nos órgãos ambientais e sua constante capacitação em espeleologia, medida que permite a efetiva incorporação do conhecimento pela instituição e o desenvolvimento da capacidade analítica nos processos de licenciamento. Considerando a característica multidisciplinar do tema, a participação de profissionais de diversas áreas do conhecimento se faz necessária, motivo pelo qual deve-se fomentar a formação de servidores sob a perspectiva de abordagens sistêmicas, inclusive como forma de não separar as análises de atributos e processos espeleológicos dos demais temas dos estudos voltados ao licenciamento ambiental. Nesse sentido, recomenda-se a construção de parcerias com especialistas, entidades e instituições direta ou indiretamente afetas à espeleologia para fins de suporte técnico e científico e de aprimoramento de habilidades das equipes técnicas dos órgãos ambientais.

A heterogeneidade também é uma característica presente nos procedimentos administrativos relacionados ao licenciamento ambiental. Apesar de procedimentos e critérios gerais estabelecidos em normas de abrangência nacional, como a Resolução CONAMA nº 237/1997, existe significativa diversidade nas formalidades inerentes. Em que pese a previsão legal de que o órgão ambiental competente definirá, se necessário, procedimentos específicos para as licenças ambientais, observadas a natureza, as características e peculiaridades da atividade ou do empreendimento, percebe-se a importância de homogeneizar procedimentos básicos, daqueles considerados efetiva ou potencialmente

poluidores ou degradadores de cavidades naturais subterrâneas, quanto aos elementos que subsidiaram a emissão de licenças, principalmente em relação aos estudos espeleológicos exigidos em uma mesma fase do licenciamento.

Como exemplo pode-se citar a exigência de que a avaliação dos impactos ao patrimônio espeleológico contemple análise de sinergia dos impactos, como previsto na Resolução CONAMA nº 347/2004. Portanto, uma vez compreendida a Licença Prévia como ato administrativo concedido na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade, atestando sua viabilidade ambiental, torna-se imprescindível que qualquer que sejam as peculiaridades da atividade ou do empreendimento, os estudos subsidiários à sua emissão devem englobar esse tipo de análise (sinérgica), não dissociando os elementos espeleológicos dos demais atributos ambientais, mas sob uma perspectiva sistêmica. Postergar essa avaliação torna o licenciamento ambiental temerário, haja vista que a descoberta tardia de impactos, ou seja, nas fases de instalação ou operação, adversos ao patrimônio espeleológico em razão da associação com impactos negativos a outros atributos pode exigir ajustes espaciais antes desconsiderados, inclusive no sentido da inviabilidade econômica do empreendimento, manifestando uma dificuldade ao processo diante da incoerente viabilidade ambiental inicialmente assumida na fase da emissão de Licença Prévia.

Referências

FREITAS, P. M. C. Estudo de intercomunicação hidráulica superficial – subterrânea no Carste da área periurbana de Pains/MG, utilizando-se traçador Rodamina WT. 2009. [manuscrito]

ZAMPAULO, R. A. Diversidade de invertebrados cavernícolas na Província Espeleológica de Arcos, Pains e Doloresópolis (MG): subsídios para a determinação de áreas prioritárias para conservação. 2010. 190 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2010.





LEGENDAS FOTOS

- Pág. 10 – Gruta do Janelão, PARNA Cavernas do Peruaçu/MG
- Págs. 11, 38 e 262 – Espeleotema em caverna de mármore, APA Morro da Pedreira/MG
- Págs. 40 – Toca da Barriguda, Campo Formoso/BA
- Págs. 41 e 260 – Espeleotema em caverna ferrífera, Conceição do Mato Dentro/MG
- Pág. 76 – Dobra em caverna ferrífera, Morro do Pilar/MG
- Pág. 78 – Prospeção no Monte Roraima, Venezuela
- Pág. 79 – Lapiás na APA Morro da Pedreira/MG
- Pág. 96 – Lapiás em São Desidério/BA
- Pág. 98 – Topografia na Gruta dos Brejões, APA Gruta dos Brejões-Vereda do Romão Gramacho/BA
- Págs. 99, 127, 219 e 257 – Espeleotemas em caverna quartzítica, Diamantina/MG
- Pág. 129 – Teia na caverna ferrífera CAI-03, Conceição do Mato Dentro/MG
- Pág. 130 – Microrganismos em caverna ferrífera, Conceição do Mato Dentro/MG
- Pág. 166 – Raízes em caverna ferrífera, Conceição do Mato Dentro/MG
- Pág. 168 – Espeleotemas na Gruta Santa Fé, Paracatu/MG
- Págs. 169 e 216 – Espeleotemas na Toca da Barriguda, Campo Formoso/BA
- Pág. 218 – Pannel rupestre na Gruta dos Desenhos, PARNA Cavernas do Peruaçu/MG
- Pág. 259 – Gruta do Janelão, PARNA Cavernas do Peruaçu/MG

Este livro foi composto em Frutiger e Warnock Pro para o ICMBio MMA – CECav
e teve o registro e distribuição em formato digital Adobe PDF.



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL



Pautado nas diretrizes do Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico para o fortalecimento da ação governamental e dos instrumentos de gestão do patrimônio espeleológico, esta obra é um guia básico de apoio técnico para a elaboração de estudos espeleológicos no processo de Licenciamento Ambiental. É resultado da experiência acumulada pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/CECAV à frente da gestão das cavernas brasileiras, definidas como bens da União. Os autores aqui reunidos discorrem, com riqueza de detalhes, sobre os temas fundamentais para a compreensão dos ambientes cársticos e das cavernas, além de tecerem considerações e recomendações acerca da aplicação direta da legislação vigente.