

GUIA

DE BOAS PRÁTICAS AMBIENTAIS
NA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO
EM ÁREAS CÁRSTICAS



COOPERAÇÃO
TÉCNICA
SBE VC RBMA



Sociedade
Brasileira de
Espeleologia
www.cavernas.org.br

LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ
HEROS AUGUSTO SANTOS LOBO
(Organizadores)

GUIA

DE BOAS PRÁTICAS AMBIENTAIS

NA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO
EM ÁREAS CÁRSTICAS

1ª Edição
Campinas SP
Sociedade Brasileira de Espeleologia
2016

Publicado em 2016 pela Sociedade Brasileira de Espeleologia. Todos os direitos reservados.
Este livro pode ser copiado, impresso ou redistribuído desde que em sua versão original e citada a fonte.

1º Edição – tiragem 1.000 exemplares (impresso)
A versão eletrônica desta obra está disponível em www.cavernas.org.br

PRODUÇÃO EDITORIAL

Sociedade Brasileira de Espeleologia
Caixa Postal 7031, Parque Taquaral, CEP 13076-970, Campinas SP.
(19) 3296-5421 - sbe@cavernas.org.br

REVISÃO

Camila Silva

FOTOS DA CAPA

Allan Calux, Leonardo Rodrigues

PROJETO GRÁFICO, DIAGRAMAÇÃO E LAYOUT DE CAPA

Sociedade Coletiva Comunicação LTDA

IMPRESSÃO E ACABAMENTO

Gráfica Mundo

Aviso Legal:

As opiniões e recomendações expressas neste Guia são de inteira responsabilidade dos autores e não representam necessariamente opiniões dos diretores, associados e funcionários da Sociedade Brasileira de Espeleologia, do Instituto dos Amigos da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica ou da Votorantim Cimentos. A autoria de cada capítulo é claramente indicada.

Como citar este Guia:

Sánchez, L.E.; Lobo, H.A.S. (Orgs.), Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016.

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

Guia de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas [livro eletrônico]
/ Luis Enrique Sánchez, Heros Augusto Santos Lobo (organizadores). -- Campinas, SP :
Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016.
84 Mb ; PDF.

Vários autores.
Bibliografia.
ISBN 978-85-64130-08-1

1. Arqueologia 2. Cavernas 3. Geomorfologia 4. Gestão ambiental 5. Meio ambiente -
Proteção 6. Minas e mineração 7. Regiões Cársticas I. Sánchez, Luiz Enrique. II. Lobo,
Heros Augusto Santos.

16-05180

CDD-551.4470981

Índices para catálogo sistemático:

1. Guia de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas :
Espeleologia : Geomorfologia 551.4470981

FICHA TÉCNICA

INICIATIVA DA COOPERAÇÃO TÉCNICA SBE – VC – IA-RBMA

Representantes da Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE

Marcelo Augusto Rasteiro
Teresa Maria Moniz de Aragão

Representantes da Votorantim Cimentos – VC

Patrícia Montenegro
Stefanie Linzmaier Felix Palma

Representantes do Instituto Amigos da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica – IA-RBMA

Clayton Ferreira Lino
Ana Maria Lopez Espinha
José Antonio Basso Scaleante

EQUIPE TÉCNICA

Coordenador Técnico

Luis Enrique Sánchez

Coordenação Executiva

Heros Augusto Santos Lobo
Regiane Velozo Dias
Helena Kowarick Spiritus
Stefanie Linzmaier Felix Palma

Planejamento Participativo

Patrícia Regina Rossi Cacciatori
Luciano Festa Mira

Coordenações Temáticas

Mylène Luíza Cunha Berbert-Born – Geossistema cárstico
Allan Silas Calux – Espeleologia
Eleonora Trajano – Biologia Subterrânea e Biodiversidade
Luiz Carlos Borges Ribeiro e Francisco Macedo Neto – Paleontologia
Elvis Pereira Barbosa – Arqueologia
Solange Silva-Sánchez – Desenvolvimento comunitário sustentável
Ana Claudia Neri – Sistematização das boas práticas e biodiversidade

SUMÁRIO

CARTAS INSTITUCIONAIS	06
INTRODUÇÃO	09
PARTE 1: O CARSTE, UM TIPO PARTICULAR DE AMBIENTE	12
PARTE 2: O ESTUDO DO CARSTE, BASE PARA O PLANEJAMENTO	28
Capítulo 1: GEOSSISTEMAS CÁRSTICOS	30
1.1 Introdução – Por que uma atenção especial ao Carste?	30
1.2 Carste – paisagem e aquífero	36
1.3 Sistemas e geossistemas – visão geral aplicada	50
1.4 O carste na ótica geossistêmica – “Geossistema Cárstico”	64
1.5 Fragilidade e vulnerabilidade dos ambientes cársticos	74
1.6 Retrato da importância dos ambientes cársticos	80
1.7 Fundamentação de boas práticas para o diagnóstico do carste	82
Referências	89
Capítulo 2: CAVERNAS	93
2.1 Introdução	93
2.2 Classificação das cavernas	94
2.3 Aspectos morfológicos, hidrológicos e sedimentares das cavernas carbonáticas	96
2.4 Aspectos espeleogenéticos, geocronológicos e paleoclimáticos	109
2.5 Conservação do patrimônio espeleológico	113
2.6 Avaliando o potencial espeleológico	114
2.7 Prospecção sistemática e levantamento de campo direcionado	115
2.8 Espeleotopografia, espeleometria e geoespeleologia	118
2.9 Monitoramento dos impactos ao patrimônio espeleológico	124
2.10 Achados fortuitos	124
Referências	125
Capítulo 3: BIODIVERSIDADE EM ÁREAS CÁRSTICAS	126
3.1 Introdução: as singularidades do carste	126
3.2 A paisagem cárstica e sua vegetação	126
3.3 Importância do carste: serviços ecossistêmicos	128
3.4 Atividades de mineração e seus impactos	130
3.5 Estudo da biodiversidade	136
Referências	137
Capítulo 4: BIOLOGIA SUBTERRÂNEA	138
4.1 Meio Subterrâneo	138
4.2 Estrutura e funcionamento dos ecossistemas subterrâneos	139
4.3 Classificação ecológico-evolutiva dos organismos subterrâneos	141
4.4 Importância e singularidades dos ecossistemas subterrâneos	145
4.5 O estudo da biota subterrânea	149
4.6 Área de influência sobre cavernas	160
4.7 Conservação	161
Referências	163

Capítulo 5: PALEONTOLOGIA	164
5.1 Noções e conceitos da paleontologia	164
5.2 O estudo da paleontologia e a importância dos fósseis	169
5.3 A paleontologia e suas principais subáreas	170
5.4 A paleontologia em áreas de carste	170
5.5 O Registro fóssil do carste brasileiro	173
5.6 Ocorrências fósseis em cavidades em outros países	178
5.7 A paleontologia e a mineração em áreas de carste	178
5.8 A exploração paleontologicamente correta	180
Referências	184
Capítulo 6: ARQUEOLOGIA	185
6.1 Arqueologia, o que é?	185
6.2 Arqueologia é história ou história é arqueologia também?	186
6.3 Origens da arqueologia no Brasil	187
6.4 Tipos de sítios arqueológicos	188
6.5 A arte rupestre	191
6.6 Arqueologia em áreas cársticas	193
6.7 Etapas da pesquisa em arqueologia	194
Referências	196
Capítulo 7: DESENVOLVIMENTO COMUNITÁRIO SUSTENTÁVEL E MINERAÇÃO EM ÁREAS CÁRSTICAS	197
7.1 Impactos sociais da mineração em regiões cársticas	197
7.2 Desenvolvimento comunitário e mineração	198
7.3 Estudos e levantamentos	200
7.4 Abordagem participativa: consulta e envolvimento público	201
Referências	207

PARTE 3: BOAS PRÁTICAS DE MINERAÇÃO EM ÁREAS CÁRSTICAS 209

Seção 1 Impactos da mineração de calcário sobre ambientes cársticos	210
Seção 2 Etapas de vida de uma mina	216
Seção 3 Recomendações de boas práticas	217
Seção 4 Exemplos	249

GLOSSÁRIO 257

EQUIPE TÉCNICA 261

AGRADECIMENTOS 263

As regiões cársticas, áreas com relevo marcado pela dissolução de rochas, têm em sua mais marcante expressão a ocorrência de cavernas calcárias, por vezes abrigando grutas e abismos de grande beleza e interesse científico. Estas áreas também são importantes do ponto de vista econômico e social, principalmente para a mineração na produção de cimento, cal e outras matérias-primas amplamente utilizadas pela indústria e na construção civil. A colocalização do patrimônio espeleológico e do bem mineral demanda um cuidado todo especial visando compatibilizar a exploração econômica e a conservação ambiental, histórica e cultural destes importantes sítios.

A Sociedade Brasileira de Espeleologia, desde sua fundação em 1969, tem se dedicado ao estudo e conservação de nossas cavernas, preocupação esta que se intensificou na última década, motivada por mudanças na legislação que fragilizaram a proteção do patrimônio espeleológico no Brasil e, ainda, não atenderam as necessidades do setor produtivo. A Sociedade tem se esforçado para o aprimoramento da legislação, o que acreditamos somente será alcançado com a aprovação de uma Lei dedicada à proteção ao patrimônio espeleológico, mas que trate também dos casos onde seja necessária e possível a exploração destas áreas.

Apesar do problema enfrentado atualmente, felizmente temos pessoas e entidades preocupadas com a questão, agindo não apenas para atender a legislação, mas sim preocupadas em deixar um legado positivo de sua atuação. Assim surgiu a Cooperação Técnica entre a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), Votorantim Cimentos (VC) e Reserva da Biosfera da Mata Atlântica (RBMA), uma iniciativa de entidades que aceitaram o desafio de entender os diferentes pontos de vista, buscando soluções para uma responsável gestão deste patrimônio que também pertence às gerações futuras.

Entre as iniciativas da Cooperação, uma das mais importantes é este *Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas*, um documento inovador que envolveu mineradores e pesquisadores de diversas áreas, apresentando caminhos e um sólido embasamento para a gestão responsável destes territórios.

O Guia é um importante passo, mas seu sucesso depende de sua ampla e voluntária aplicação pelas empresas de ponta do setor mineral, além do envolvimento de pesquisadores, profissionais, sociedade civil e poder público.

Com coragem e empenho construiremos um mundo melhor!



Marcelo Augusto Rasteiro
Presidente da Sociedade Brasileira de Espeleologia

A Votorantim Cimentos atua há mais de 80 anos na indústria da construção, produzindo cimento, concreto, argamassas, cales e agregados, materiais essenciais na vida das pessoas. E a base do nosso processo produtivo está na mineração do calcário.

No entanto, mais de 70% das cavernas no Brasil localizam-se em rochas calcárias (segundo dados do Cadastro Nacional de Cavernas do Brasil da Sociedade Brasileira de Espeleologia), justamente a matéria prima básica para a fabricação de cimento. Temos todos, portanto, o desafio de conciliar a conservação da biodiversidade, geodiversidade, questões culturais, cênicas e turísticas das cavernas com a necessidade do desenvolvimento da sociedade com o uso de sistemas construtivos que utilizem o cimento.

Deste modo, uma das formas de trabalhar este potencial conflito foi estreitar o diálogo com a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) e a Reserva da Biosfera da Mata Atlântica (RBMA). Um diálogo historicamente conturbado avançou e culminou em 2011 com a assinatura de um termo de parceria, para que os termos de extração e preservação fossem discutidos de forma conjunta, aberta e transparente.

Esta Cooperação já é uma grande vitória, pois conseguiu aproximar entidades com interesses distintos, muitas vezes divergentes, em torno do objetivo comum de lidar de forma adequada com o desafio da mineração em áreas com cavernas e Mata Atlântica de forma responsável.

Desenvolvemos juntos o *Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração em Calcário em Áreas Cársticas* – material inovador no setor da mineração, construído durante mais de três anos, a partir de muito diálogo entre comunidade científica, setor minerário e sociedades civis organizadas. Sua aplicação voluntária pelas empresas do setor irá perenizar um legado que deixaremos para a sociedade e futuras gerações.

Bem preparados para os desafios do presente, participativos e atentos na construção do futuro do setor e comprometidos com nosso propósito de perenidade - é assim que seguiremos construindo nosso legado por meio das obras em que estamos presentes, dos relacionamentos que construímos e do planejamento com visão sustentável de longo prazo.



Walter Dissinger

Diretor-presidente da Votorantim Cimentos



A Cooperação Técnica RBMA (Reserva da Biosfera da Mata Atlântica) – VC (Votorantim Cimentos) – SBE (Sociedade Brasileira de Espeleologia) é um arranjo inovador e ambicioso. Reúne entidades com focos diferenciados, distintas visões de mundo e representantes de setores que tradicionalmente vivenciam lados diferentes, muitas vezes conflituosos. A inovação maior da cooperação foi ao longo destes cinco anos. O desafio é gerar conhecimento, estratégias e metodologias que, além de significarem contribuições concretas, sejam úteis e replicáveis para a sociedade como um todo. Busca-se, em síntese, construir exemplos e ferramentas que colaborem para a sustentabilidade nos territórios da mineração que agreguem valor e diminuam os impactos desta atividade extrativa e que, ao mesmo tempo, gerem conservação do patrimônio natural e sociocultural existentes nestas áreas. É necessário que se crie condições para que se viabilize uma mineração sustentável gerando os bens e produtos deste importante setor e que se conserve e valorize a flora, a fauna, as cavernas, a água, e todos os serviços ambientais de interesse social nas unidades produtivas e seus entornos.

O presente *Guia de Boas Práticas Ambientais na Mineração de Calcário em Áreas Cársticas* é certamente uma das maiores e mais importantes contribuições nesta direção. Produto do conhecimento de grandes especialistas, longas discussões e grande esforço de sistematização e síntese, certamente será um divisor de águas no tema. Espera-se que, além de tornar-se um guia de uso cotidiano pelas empresas minerárias compromissadas com a sustentabilidade, sirva igualmente para o permanente aprimoramento da legislação, das políticas públicas e das de mercado em nosso país.

Clayton Ferreira Lino

*Presidente do Conselho Nacional da Reserva da
Biosfera da Mata Atlântica.*

INTRODUÇÃO

Luis Enrique Sánchez

Este Guia tem o propósito de contribuir para a disseminação de boas práticas ambientais na mineração de calcário em áreas cársticas. Foram reunidos especialistas de diversas disciplinas - com experiência profissional e atuação acadêmica - para elaborar um conjunto de recomendações que podem ajudar as empresas de mineração a mitigar os impactos de suas atividades sobre os recursos e as comunidades que vivem em regiões cársticas.

O Guia tem, ainda, função de: (1) prover informação condensada sobre os ambientes cársticos, seus processos formadores, sua importância ecológica e evolutiva e seu papel como provedor de recursos e serviços para a sociedade e (2) contribuir para conscientizar profissionais da mineração sobre a importância dos ambientes cársticos e sua vulnerabilidade.

Mediante a aplicação das recomendações do Guia, espera-se que as empresas de mineração possam aumentar a adesão de cada uma de suas operações às boas práticas do setor. Desta maneira, espera-se que sua aplicação contribua para:

- integração de objetivos de proteção do carste em políticas, procedimentos e controles gerenciais das empresas;
- melhoria da qualidade dos estudos ambientais;
- reduzir os riscos de uma empresa: (i) causar danos ambientais irreparáveis por falta de conhecimento ou insuficiente precaução, (ii) operar em situação de não conformidade legal, (iii) ter sua reputação afetada (riscos de imagem);
- facilitar a obtenção e manutenção de uma licença social para operar;
- propiciar que as gerações futuras tenham acesso e usufruam dos recursos e serviços fornecidos pelos ambientes cársticos.

É cada vez mais difundido, no âmbito da mineração, o entendimento de que o cumprimento dos requisitos legais, a geração de postos de trabalho e o recolhimento de impostos e contribuições são apenas parte das ações necessárias para as empresas serem bem recebidas pelas comunidades onde atuam. A aceitação - ou "licença social" - está se tornando vital para garantir a viabilidade e a permanência da mineração nos territórios ricos em recursos minerais. Ademais, os riscos para o negócio crescem à medida que diminui a aceitação social.

O Guia traz orientações para o planejamento e aplicação de práticas eficazes para mitigação de impactos socioambientais em áreas cársticas e para o entendimento da natureza e importância dos ambientes cársticos, assim como dos principais impactos da mineração sobre o carste e suas populações humanas.

As regiões cársticas são caracterizadas pela presença de rochas carbonáticas solúveis, o que lhes confere características únicas, a exemplo da ocorrência de cavernas e de rios subterrâneos, de habitats singulares e da frequente presença de sítios paleontológicos e arqueológicos. As particularidades que distinguem as regiões cársticas de outros tipos de ambientes devem ser bem compreendidas para que atividades econômicas possam ser desenvolvidas respeitando-se limites e restrições intrínsecas, de modo a resguardar, para as gerações futuras, a possibilidade de continuar a usufruir dos recursos e serviços que o carste fornece à sociedade.

Cobrindo cerca de 13% das terras emersas do globo - ou aproximadamente 18 milhões km², os ambientes cársticos são fonte de recursos hídricos para mais de 20% da população mundial. É também do carste que provém a maior parte dos bens minerais utilizados na fabricação de cimento, cuja produção anual mundial é da ordem de 4,2 bilhões de toneladas. Rochas carbonáticas também são utilizadas para vários outros fins, como a fabricação de cal, produção de brita para construção civil e de corretivos de acidez do solo no agronegócio, sendo também usadas como insumos para vários ramos da indústria, como fabricação de vidro, papel, cosméticos, fármacos etc.

Calcários e outras rochas carbonáticas estão entre os bens minerais de maior volume de produção no mundo, atrás, apenas, de rocha britada e carvão, e à frente de outros importantes bens minerais como o minério de ferro. Há milhares de minas de calcário em todo o mundo, desde pequenas minas artesanais até minas suprindo grandes fábricas de cimento.

À medida que a demanda por rochas carbonáticas continua aumentando - o crescimento da produção mundial de cimento nos dez anos entre 2005 e 2014, foi de 88%, segundo dados do *U.S. Geological Survey* -, empresas, governos e comunidades locais se deparam com desafios também crescentes para conciliar interesses, necessidades e perspectivas diferentes quanto ao uso e proteção dos ambientes cársticos.

A importância dos ambientes cársticos é incontestável. Um dos objetivos deste Guia é mostrar por que o carste é valioso e, portanto, por que decisões sobre a utilização de seus recursos e a ocupação de suas áreas devem ser orientadas pela precaução. A mineração de calcário tem especificidades que demandam cuidados e atenção especiais em razão do ambiente vulnerável em que se desenvolve.

O princípio básico segundo o qual as decisões de abertura de novas minas, assim como sua operação, expansão e desativação, *devem ser fundamentadas em sólida base de conhecimento* sobre o ambiente, seus recursos e as comunidades humanas, adquire uma relevância ainda maior quando se trata de ambientes cársticos. Essa é a principal mensagem deste Guia.

São vários os casos de atividades de mineração de calcário que causaram sérios impactos irreversíveis, como a perda de cavernas, a destruição de sítios arqueológicos ou paleontológicos sem o devido estudo e correspondente ganho de conhecimento, a perda de paisagens notáveis, a degradação da qualidade das águas ou a perda de nascentes, afetando comunidades a jusante, e mesmo a extinção de espécies.

Prevenir e mitigar esses e outros impactos adversos é o princípio que orienta este Guia.

* * *

Este Guia se destina primordialmente aos profissionais de empresas de mineração, órgãos governamentais e consultorias atuantes em planejamento, operação ou desativação de minas de calcário. Seu conteúdo pode também ser de interesse para comunidades, associações e demais entidades da sociedade civil com atuação em regiões onde há mineração de calcário.

A seleção dos temas e questões abordados e seus respectivos recortes seguiram diferentes critérios, adotados pelos especialistas, sempre com base nos princípios que nortearam a proposição deste Guia e na experiência e *expertise* de cada autor. Os especialistas que contribuíram com a elaboração do Guia realizaram um esforço de tratar de cada tema de forma objetiva e clara, cientes da missão de transmitir informação complexa para leitores não especialistas.

O emprego de uma linguagem acessível aos públicos heterogêneos aos quais se destina este Guia, de modo algum significou perda ou simplificação dos conteúdos das diferentes áreas do conhecimento aqui contempladas. Todo este esforço se refletiu no longo período de preparação do Guia, que envolveu intensas discussões e debates entre os autores.

* * *

Entre 1º de dezembro de 2015 e 18 de janeiro de 2016 foi realizada consulta pública. A consulta foi divulgada aos membros da Sociedade Brasileira de Espeleologia, aos colaboradores da Votorantim Cimentos, entre empresas de consultoria, universidades e outros grupos. A minuta do Guia ficou à disposição dos interessados junto com uma ficha de coleta de comentários. Foram recebidos 53 comentários de 9 pessoas. Todos os comentários foram considerados pelos autores e respostas foram enviadas aos respectivos participantes.

* * *

O Guia traz recomendações específicas para os ambientes cársticos. Por esse motivo, impactos ambientais que podem ser relevantes - como a degradação da qualidade do ar, perturbações decorrentes de emissões luminosas ou incômodos decorrentes de emissões de ruídos mas não específicos do carste, não são tratados aqui.

Por outro lado, recomendações de ordem geral para a avaliação de impactos e a gestão ambiental, tais como a necessidade de engajamento das partes interessadas, de integração de conhecimentos (inclusive o conhecimento local), de formação de equipes com habilidades e competências apropriadas e de trabalho multi ou interdisciplinar são mencionadas em vários capítulos, embora não sejam tratadas com destaque no Guia. Tais recomendações de ordem geral podem ser encontradas em diversas fontes, como associações profissionais - a exemplo da *International Association for Impact Assessment* -, e associações empresariais - como a *Cement Sustainability Initiative* e o *International Council on Mining and Metals*.

Entretanto, nunca é demais ressaltar a importância de uma postura ética face aos desafios da mineração no carste. As recomendações de boas práticas formuladas e apresentadas neste Guia partem do pressuposto que tal postura fundamenta as ações dos profissionais e demais agentes envolvidos na atividade de mineração em geral e na mineração no carste em particular. A ênfase neste aspecto justifica-se em razão das características peculiares do ambiente cárstico e de sua fragilidade, o que demanda uma atenção especial de modo a assegurar que as futuras gerações possam usufruir de seus recursos e serviços.

* * *

O foco do Guia é a mineração de calcário em áreas cársticas. Entretanto, contém informação relevante e recomendações aplicáveis também à mineração de outros bens minerais em ambientes cársticos, assim como informação e recomendações potencialmente aplicáveis ao planejamento da mineração em outros tipos de ambientes terrestres.

* * *

O Guia está estruturado em três partes. Na primeira, são resumidas as principais características dos ambientes cársticos em termos de processos formadores, importância ecológica e evolutiva, assim como seu papel como provedor de recursos e serviços para a sociedade. Com base nessas características, procura-se mostrar por que o carste é vulnerável e porque as atividades humanas realizadas nesse ambiente devem ser cuidadosamente planejadas e sua implantação e operação devem ser objeto de monitoramento e acompanhamento.

Na segunda parte, são apresentadas as contribuições relativas a cada uma das sete áreas temáticas escolhidas para o Guia. Informação e conhecimento sintetizados nesta parte formam a base sobre a qual são fundamentadas as boas práticas recomendadas.

A terceira parte apresenta recomendações de boas práticas para prevenir e mitigar impactos ambientais e sociais adversos decorrentes da mineração de calcário sobre os ambientes cársticos, ordenadas segundo as principais fases de vida de uma mina: estudos de viabilidade, implantação, operação, desativação e pós-fechamento. As recomendações são apresentadas na forma de quadros estruturados da seguinte maneira: (1) enunciado da recomendação (qual é a prática recomendada), (2) justificativa da recomendação (por que a prática é importante) e (3) exemplos de como implementar a recomendação.

* * *

O guia, em sua versão atual, não é considerado conclusivo – e talvez nunca o seja. A aplicação sistemática das práticas, aliada ao registro dos resultados obtidos, permitirá a constante atualização deste material. Trata-se de um princípio que norteou a sua elaboração, como proposta a ser testada em sua aplicação em distintas realidades.



Foto: Allan Calux.



PARTE 1

O CARSTE, UM TIPO PARTICULAR DE AMBIENTE

Nesta parte são resumidas as principais características dos ambientes cársticos em termos de processos formadores, importância ecológica e evolutiva, assim como seu papel como provedor de recursos e serviços para a sociedade. Com base nessas características, procura-se mostrar a vulnerabilidade do carste e por que as atividades humanas realizadas nesse ambiente devem ser cuidadosamente planejadas.

O CARSTE, UM TIPO PARTICULAR DE AMBIENTE

Mylène Luiza Cunha Berbert-Born, Eleonora Trajano, Allan Silas Calux, Elvis Pereira Barbosa, Luiz Carlos Borges Ribeiro, Francisco Macedo Neto, Luis Enrique Sánchez, Solange Silva Sánchez, Ana Claudia Neri, Heros Augusto Santos Lobo

O planeta Terra apresenta enorme diversidade de ambientes naturais, cada qual formado por um conjunto bem característico de processos e elementos físicos e biológicos que delineiam suas paisagens: manguezais, praias, desertos, deltas, lagos, a zona abissal dos oceanos, como também o carste, são alguns exemplos de ambientes naturais específicos.

O ambiente cárstico é um dos mais espetaculares, tendo em vista a paisagem, a biota e a dinâmica dos processos que ali ocorrem. É também um dos mais frágeis e de maior valor ambiental e cultural. Tais ambientes ocupam quase 15% da superfície emersa do planeta, onde afloram rochas carbonáticas em condições geográficas e climáticas favoráveis à dissolução (Ford e Williams 2007; Williams e Fong 2010). Esse tipo de rocha ocorre em todos os continentes. A título de exemplo, elas ocupam 35% do território da Europa, abarcando frações significativas de países como a Itália (15%), a Espanha (22%) e a França (33%) (Zwahlen 2003). No Brasil também há vastas áreas formadas por rochas carbonáticas, ocupando cerca de 200 mil km² do seu território total (Figura 1).

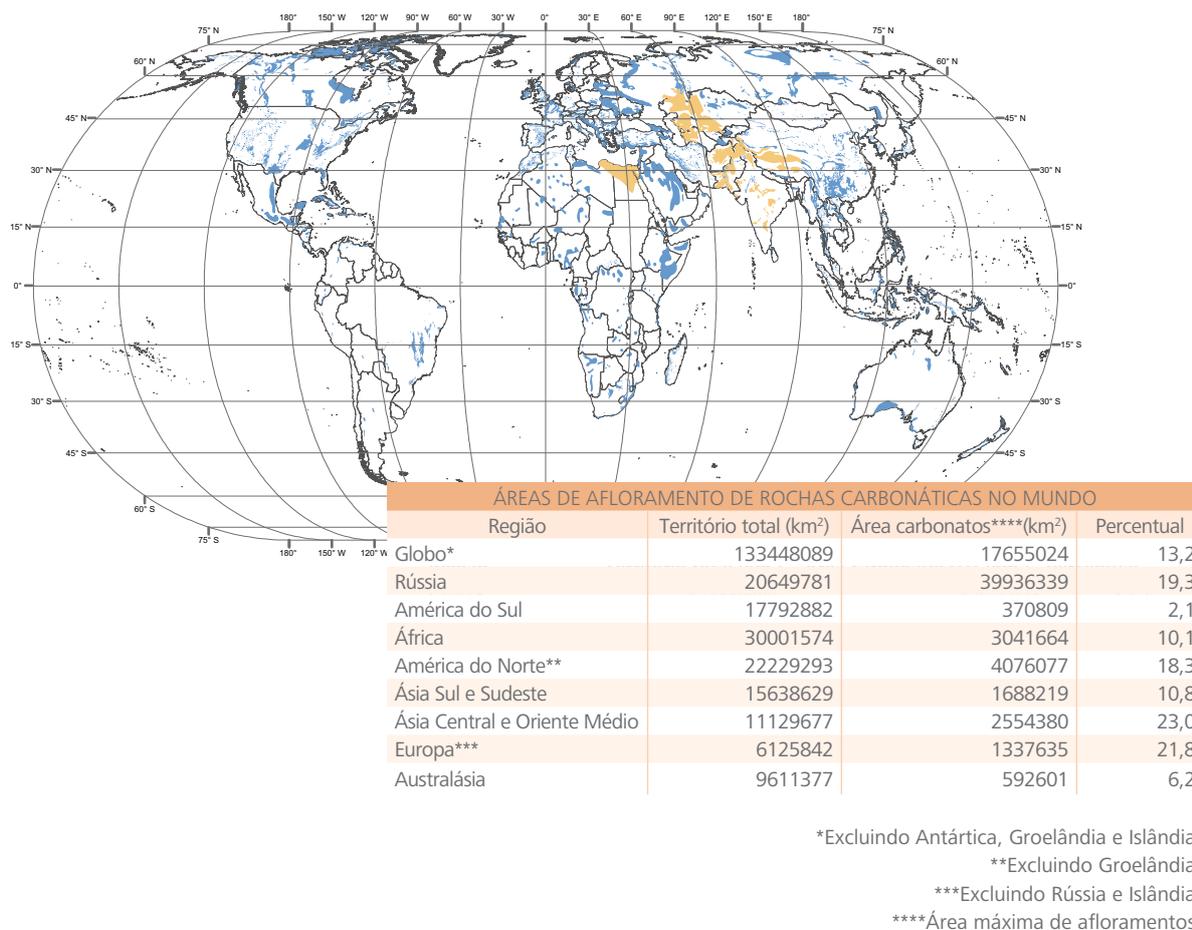


Figura 1. Mapa de rochas carbonáticas que afloram na superfície do Planeta - World Map of Carbonate Rocks Outcrops v.3.0. Em azul: rochas carbonáticas relativamente puras e contínuas; em laranja: rochas carbonáticas impuras em afloramentos descontínuos. Williams e Fong (2010). Layout elaborado por Mylène Berbert-Born a partir de shapefiles disponíveis em http://web.env.auckland.ac.nz/our_research/karst/ (The University of Auckland, New Zealand). Download em 04/12/2014.

O carste compreende terrenos de relevo geralmente acidentado, com um conjunto de feições muito características, como extensas exposições de rocha com superfícies rugosas e pontiagudas, muitas vezes formando verdadeiras “torres de pedra” que se destacam na paisagem, além de rios subterrâneos e depressões muito típicas de formato geralmente circular, chamadas dolinas (Figuras 2 e 3).

Como existe facilidade para a água se infiltrar através da superfície, pois o solo geralmente é raso e disposto sobre rocha bastante fissurada, a maior parte dos córregos existentes não tem fluxo permanente de água, ficando ativos somente no momento das chuvas mais intensas. Os poucos riachos perenes percorrem alguns trechos na superfície e muitas vezes desaparecem em sumidouros, podendo ressurgir em locais já muito distantes após longo trânsito subterrâneo. Em muitos casos, é possível adentrar alguns desses locais onde a água circula ou circulou abaixo da superfície, que são as cavernas, outra feição muito característica dos ambientes cársticos, popularmente chamadas de grutas, lapas, furnas e outras denominações que variam conforme a região.



Figura 2. Ressurgência de rio subterrâneo na região oeste da Bahia. Conduto subterrâneos formados pela dissolução da rocha calcária são muito típicos de ambientes cársticos. Foto: Rafael Costa da Silva



Figura 3. Maciço calcário lapiezado, característico dos relevos cársticos do Brasil Central. Foto: Mylène Berbert-Born.

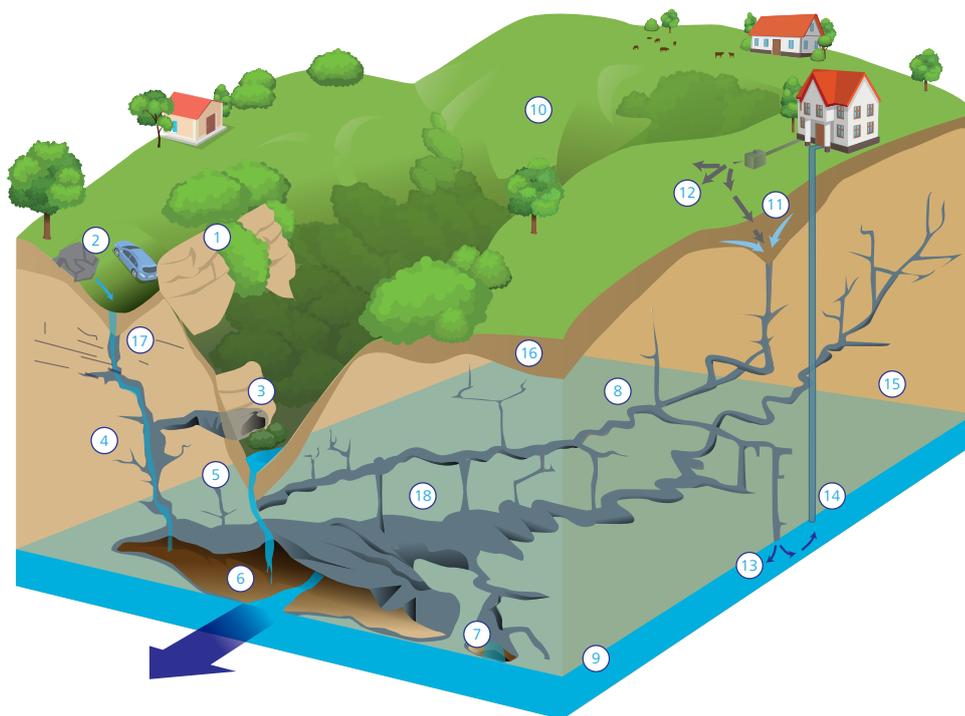
Esses aspectos mais marcantes e peculiares do carste – relevo irregular, afloramentos de rochas ruiformes, dolinas, circulação subterrânea da água e redes de cavernas (Figura 4) – decorrem de uma condição básica: a existência de rochas de composição carbonática, normalmente fraturadas, que são muito mais facilmente dissolvidas pela água do que qualquer outro tipo de rocha.

As rochas carbonáticas mais comuns são os calcários, os dolomitos e os mármore, todas constituídas por mais de 50% de minerais de carbonato de cálcio, como a calcita [CaCO_3]; ou de cálcio e magnésio, como a dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]. Pode haver maior ou menor proporção de outros minerais como sulfetos, sulfatos, fosfatos, óxidos e silicatos, mas principalmente, quantidades significativas de argilominerais, considerados “impurezas” da rocha carbonática que podem reduzir bastante o seu grau de solubilidade.

Além da composição química e mineral da rocha, o processo de dissolução também depende das condições químicas da água disponível, que precisa ter caráter ácido. É o caso da água de chuva contendo ácido carbônico (H_2CO_3), devido à assimilação (solubilização) do gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera e na matéria orgânica dos solos. Outros tipos de fluidos oriundos do próprio maciço rochoso, como soluções minerais ou termais formadas em profundidade, também podem atuar na dissolução da rocha.

A percolação da água através da rocha é facilitada pela existência de discontinuidades estruturais como planos de acamamento sedimentar, laminações composicionais, veios minerais, fraturas e falhas de origem tectônica. Essas estruturas vão sendo gradativamente alargadas pela dissolução, aumentando cada vez mais a capacidade de escoamento de água pelo meio subterrâneo. Há, portanto, um incremento progressivo da permeabilidade hídrica. O processo evolui conformando complexas redes de fissuras e pequenos canais articulados a condutos maiores que atuam como drenos subterrâneos da água. Alguns segmentos dessas redes subterrâneas podem ser acessíveis aos humanos, constituindo as cavernas (Figura 5).

As reações de dissolução da rocha só cessam quando a água se torna saturada em carbonatos dissolvidos, ou seja, quando esgota a sua capacidade de dissolução, momento em que os processos de erosão mecânica se tornam mais importantes na formação dos sistemas de drenagem.



- 1 - Torres calcárias uniformes. 2 - Dolina com sumidouro. 3 - Entrada de caverna em encosta.
- 4 - Abismos e infiltração vertical. 5 - Drenagem influente (infiltração pelo leito).
- 6 - Conduto subterrâneo principal. 7 - Conduto subterrâneo de extravasamento.
- 8 - Rede de condutos secundários. 9 - Lençol freático. 10 - Colinas cársticas com ravinas.
- 11 - Dolina encoberta. 12 - Fonte de infiltração de contaminantes (esgoto doméstico).
- 13 - Manancial subterrâneo contaminado. 14 - Poço tubular contaminado.
- 15 - Rocha carbonática. 16 - Solo. 17 - Epicarste. 18 - Endocarste.

Figura 4. Elementos da paisagem cárstica. Montagem: Daniel Borges

Modificado de MDC State Parks (<https://mostateparks.com/content/karst>), acesso em 17/6/2016.



Figura 5. Conduto subterrâneo em caverna: a morfologia e outras feições presentes nas cavernas indicam como a água circula no meio subterrâneo. A pressão da água, fraturas e camadas da rocha são alguns dos fatores condicionantes. Foto: Mylène Berbert-Born.

Com a existência dos espaços abertos no ambiente subterrâneo, muitos materiais da superfície acabam sendo carreados por rios, enxurradas, ou pelo rastejo de massas de solo ao longo de encostas, bem como pela infiltração progressiva através de fendas de dissolução ou mesmo pelo colapso da capa de rocha e solo sobre os vazios subterrâneos. Desta relação dinâmica entre a superfície e o meio subterrâneo surgem os clássicos relevos cársticos (Figura 6).

Embora o relevo cárstico seja normalmente irregular e bastante diversificado, suas formas e drenagem possuem uma clara organização global, estruturada de montante para jusante em áreas de absorção e captura hídrica, áreas de recepção e circulação (transmissão) da água e áreas de descarga hídrica. Vale destacar que o modo como se dá a recarga da água para o sistema subterrâneo - se é difusa em meio ao solo ou concentrada em alguns pontos como as dolinas, se é contínua ou em pulsos - e, a depender do volume e das características químicas iniciais da água, é questão determinante para o regime do fluxo subterrâneo. Conseqüentemente, é determinante para a configuração dos padrões geométricos, planimétricos e morfológicos das redes subterrâneas.

Mas é importante ressaltar que, a depender do estágio de evolução do terreno ou nível de entalhe topográfico, o fenômeno de carstificação também pode existir em profundidade sem nenhuma evidência superficial. O mesmo pode ocorrer quando há rochas não carstificáveis cobrindo rochas solúveis (carste subjacente e carste profundo), ou então espessas coberturas inconsolidadas (colúvios e aluviões) sobrepondo um relevo cárstico (paleocarste e carste encoberto ou sob manto).

Um tipo de feição muito característica do carste são as cavernas, vazios subterrâneos naturais grandes o suficiente para permitir o acesso humano. Cavernas têm formas e dimensões muito variadas. Suas entradas são normalmente expostas pela subsidência de solo e sedimentos, por colapso de detritos ou pela interceptação da cavidade pela evolução natural das vertentes por erosão (Figura 7). No entanto, uma grande quantidade de cavernas não possui entrada, permanecendo oclusas no interior do bloco rochoso.

Figura 6. Típico aspecto do relevo cárstico, antropizado: superfície ondulada e escarpa calcária com abertura de caverna delineando o contorno de uma depressão em bacia (dolina) que acolhe uma lagoa cárstica. As lagoas cársticas muitas vezes retratam o afloramento do lençol freático nas superfícies rebaixadas, ou são águas acumuladas devido ao solo argiloso mais impermeável que ocupa o fundo dessas bacias. Em vista da usual escassez de água superficial nos terrenos cársticos, e dos solos mais férteis presentes nessas "baixadas", esses locais costumam ser usados para cultivo agrícola, causando assoreamento de sumidouros e contaminação do aquífero por agrotóxicos. Lapa Vermelha de Pedro Leopoldo, Minas Gerais. Foto: Mylène Berbert-Born.





Figura 7. Entrada de caverna em Sumidouro. Gruta Angélica, Goiás. Foto: Allan Calux.

As cavernas de dissolução exibem registros do fluxo de água e das condições de sua formação. O estudo das formas observáveis no teto, nas paredes e no piso das cavernas permite interpretar a origem de uma caverna. As galerias correspondem às passagens predominantemente horizontais, enquanto os poços e as cúpulas são predominantemente verticais. Os poços (*shafts*) são geralmente formados em ambiente vadoso ou insaturado - ou seja, acima do nível da água subterrânea contida em um maciço rochoso - por água fluindo verticalmente ao longo de fraturas. As cúpulas, por sua vez, podem refletir a formação em ambiente transicional, no contato freático/vadoso.

As galerias também são diversas, podendo apresentar-se em forma de cânion, tubos, fissuras ou fendas, entre outras. Os cânions refletem um momento da história evolutiva da caverna onde há busca por equilíbrio hidrodinâmico: a água subterrânea, buscando atingir o nível de base local, entalha a rocha interceptando todos os obstáculos nesse percurso. Os tubos, por sua vez, evidenciam um fluxo freático ou vadoso sob pressão. As fissuras são espaços ampliados ao longo de descontinuidades planares da rocha, tais como falhas, fraturas e planos de acamamento que facilitam a circulação da água.

Os salões retratam espaços de grandes dimensões relativas, ou seja, são vazios mais amplos que os condutos próximos. São comumente formados na intersecção de dois ou mais condutos, onde é mais provável ocorrerem grandes colapsos ou abatimentos. Grandes salões também podem ser resultantes de erosão e dissolução remontante em sistemas de drenagem subterrânea, provocadas pelo refluxo da água e cheias (*overflow*) à montante de pontos onde há estrangulamento ou obstrução de condutos (pontos de redução da vazão de fluxo).

Uma característica marcante das cavernas são os espeleotemas, nome dado às formações resultantes da reprecipitação do carbonato de cálcio contido nas soluções aquosas que percolam o maciço rochoso. Quando a água de percolação, em lento fluxo, atinge uma caverna, altera-se o equilíbrio químico da solução e os íons dissolvidos "recombinam-se", formando novamente cristais sólidos (Figura 8).

As estalagmites - espeleotemas que crescem para o alto a partir do piso - são de particular interesse científico. Crescendo muito lentamente, suas finíssimas lâminas trazem os sinais da composição química da água que as originou ao gotejar, retratando assim padrões climáticos, tipo de vegetação, solo e outros aspectos do clima do passado, como períodos de maior ou menor pluviosidade, variações de temperatura e da composição atmosférica. Longos e acurados registros temporais de mudanças climáticas globais, regionais e locais ocorridas ao longo dos últimos milhares ou dezenas de milhares de anos (período Quaternário) podem então ser recuperados a partir dessas formações exclusivas ao carste, fazendo das cavernas excelentes fontes para o estudo dos paleoclimas, tema de grande interesse para uma melhor compreensão das mudanças climáticas globais.

Não apenas os espeleotemas, mas também os sedimentos depositados no interior das cavernas guardam o registro da história recente do planeta. As cavidades subterrâneas compreendem importante ambiente de fossilização por se tratarem de áreas de refúgio, alimentação, aprisionamento da fauna e também por acumular detritos minerais e biológicos carregados da superfície por fluxos aquosos. Concentrando boa parte dos registros paleontológicos da fauna fóssil disponíveis para os estudos durante o Pleistoceno.

O estudo dos fósseis em cavernas tem rendido importantíssimo conhecimento científico. No carste de Lagoa Santa, Minas Gerais, o naturalista Peter Lund escavou mais de uma centena de cavernas entre 1836 e 1844, reunindo fabulosa coleção da fauna pleistocênica. Cavernas de outras partes do Brasil têm propiciado achados paleontológicos relevantes, o que tem possibilitado preencher as lacunas acerca da evolução de diversas formas de vida, notadamente terrestres, contribuindo de maneira sistemática para o avanço da paleontologia do Quaternário, como, por exemplo, da denominada gruta do Urso Fóssil, no Ceará. Em 1979 foi encontrado nessa gruta um crânio quase completo de urso extinto desde o Pleistoceno. A Toca da Boa Vista, caverna da Bahia considerada a maior do hemisfério Sul, é outro exemplo de localidade muito rica em vestígios fósseis, como o de um primata gigante, extinto há 15 mil anos.

Achados de grande relevância também ocorreram pelos estudos de Lund, em cavernas de Minas Gerais, quando muitas ossadas humanas foram encontradas misturadas a fósseis de animais extintos.

Além dos fósseis que podem estar contidos nas cavernas, seja porque ficaram aprisionados ou foram arrastados pela água, em alguns casos a própria rocha carbonática onde se desenvolve a caverna pode conter fósseis. Como exemplos, as formações do período Eoceno (37 a 55 milhões de anos) no norte da França e a formação Sete Lagoas, do período Ediacariano (600 milhões de anos), onde recentemente foram encontrados fósseis que demonstram a ocorrência de mares rasos do antigo continente Gondwana. Ademais, as recorrentes estruturas estromatolíticas comprovam a exuberância das formas de vida nos mares durante o Proterozóico (2.500 – 600 milhões de anos). Ou seja, todo o registro da história evolutiva da vida no planeta está inserido em rochas carbonáticas, das formas mais antigas e primitivas até as mais recentes, representadas através de uma pluralidade de grupos fósseis, o que lhes confere grande significância para a ciência Paleontologia.



Figura 8. Estalactites do tipo “canudos de frescos”, um espeleotema bastante frequente nas cavernas. Assim como diversos outros tipos de espeleotemas, as estalactites se formam quando os íons dissolvidos na solução que percolou a rocha se precipitam (recristalizam) ao entrarem em equilíbrio com a atmosfera da caverna, mais comumente como cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3). Foto: Mylène Berbert-Born.



Figura 9. Pavimento de rocha calcária. A vegetação encontra nas ranhuras e fendas de dissolução formadas na rocha os pequenos acúmulos de solo residual que lhes servem de substrato. Foto: Mylène Berbert-Born.

Relevos cársticos ocorrem em todas as latitudes. Nas zonas intertropicais, muitas áreas cársticas são caracterizadas por um mosaico de formações vegetais, compostas por áreas florestadas e áreas com vegetação aberta. De modo geral, as áreas com florestas tendem a ser mais frequentes em locais onde o solo é mais profundo e ocorre maior retenção de água, enquanto as áreas com vegetação aberta são geralmente observadas em locais de solos rasos ou sobre a rocha exposta (Figura 9). Fatores como declividade e orientação das vertentes, luminosidade e tipo de substrato resultam na formação de microhabitats que conferem aos ambientes cársticos uma notável biodiversidade, abrigo espécies vegetais e animais que estão, muitas vezes, restritas a estes ambientes (Figura 10).

Além de ser um fator determinante na formação do carste, a água compõe ambientes que também se destacam nessas paisagens e podem constituir importantes habitats para a fauna. As águas superficiais, ainda que em quantidades comparativamente pequenas devido à dinâmica hídrica típica dos ambientes cársticos, formam sistemas complexos de ambientes lóticos (água corrente) e lênticos (sem correnteza), inclusive lagoas, que se conectam por canais subterrâneos naturais. Em função do regime de chuvas, esses ambientes podem passar por ciclos de cheia e seca ao longo do ano, chegando a secar completamente, importantes para a dinâmica da biota a eles associada, abrigo espécies animais residentes e não residentes.



Figura 10: Desfiladeiro cárstico com rio que propicia um habitat úmido perene, em contraste com a superfície, onde se observam formações vegetais de menor porte e caráter sazonal. Gruta da Igrejinha, Bahia. Foto: José Aloísio Cardoso.

Associada à diversidade de habitats, a frequente presença de espécies vegetais e animais endêmicos tornam várias áreas cársticas como de alta prioridade para conservação da biodiversidade. Porém, com poucas exceções, grande parte dos estudos de biodiversidade em áreas cársticas, concentra-se nos ambientes cavernícolas e sua fauna associada, sendo dada pouca atenção aos ambientes de superfície típicos do carste.

O meio subterrâneo compreende os conjuntos de espaços interconectados do subsolo, de tamanhos variáveis, formando grandes redes de espaços heterogêneos, que podem ser preenchidos por água ou ar. Essas redes de espaços contínuos podem se formar tanto em rocha maciça, especialmente as carbonáticas, quanto em depósitos relativamente profundos de sedimentos, como aqueles encontrados nas margens e sob rios e lagos e denominados meio intersticial. A unidade subterrânea biológica corresponde à unidade de habitat contínuo, seja um sistema, para a fauna aquática; seja o maciço rochoso, para a terrestre; independentemente da presença ou não de cavernas.

Em contraste com o meio superficial (chamado de epígeo), o subterrâneo (chamado de hipógeo) é caracterizado pela ausência permanente de luz e tendência à estabilidade ambiental. Nesse meio, a produção está restrita a bactérias quimiossintetizantes, sendo raros os casos em que essas bactérias sustentam um número expressivo de metazoários. Assim, os seres vivos encontrados (animais, fungos, protistas, bactérias não quimiossintetizantes) são basicamente sustentados por recursos alimentares importados do meio superficial:

- 1) detritos vegetais, restos de animais e plantas, matéria orgânica dissolvida e animais vivos carreados por rios, enxurradas e mesmo água de percolação;
- 2) animais que aí entram e saem regularmente (trogloxenos - ver abaixo), alimentando-se fora e depositando suas fezes (principalmente guano de morcegos) no interior das mesmas; os corpos desses animais que veem a morrer e de outros que caem por acidente também constituem fontes de alimento;
- 3) esporos, pólen, bactérias, os quais podem ser carregados por correntes de ar (“aeroplâncton”); e
- 4) raízes que penetram em grutas superficiais. No entanto, mesmo tomadas em conjunto, raramente estas fontes alimentares disponíveis no meio subterrâneo proporcionam uma quantidade de alimento semelhante à que existe no meio epígeo, onde a grande biomassa de organismos fotossintetizantes sustenta comunidades animais consideráveis.

Os organismos subterrâneos propriamente ditos são aqueles que têm uma relação ecológica definida com esse ambiente, que constitui parte ou todo do habitat da espécie. São organismos capazes, no mínimo, de se orientar espacialmente na escuridão. Eles são usualmente classificados em categorias de cunho ecológico evolutivo (independentes da classificação zoológica taxonômica):

- 1) troglóxenos – organismos encontrados regularmente no meio subterrâneo, mas que necessitam retornar periodicamente à superfície para completar seu ciclo de vida;
- 2) troglófilos – populações subterrâneas de espécies adaptadas para viver tanto no meio epígeo como no hipógeo, de modo que os indivíduos podem completar seu ciclo de vida em qualquer um dos dois meios, sendo que, se estiverem próximos à sua transição, podem deslocar-se entre os mesmos;
- 3) troglóbios – espécies exclusivamente subterrâneas, usualmente caracterizadas pela regressão de olhos e da pigmentação escura (melânica) da pele, em geral reduzidos ou ausentes nesses animais.



Figura 11. Exemplos de troglófilos: aranha errante (gênero *Ctenus*) predando grilo, gênero *Endecous*. Foto: Abel Perez Gonzalez.



Figura 12. Bagrinho troglóbrio brasileiro, com ausência de pigmentação melânica e de olhos. Foto: Dante Fenolio.

É importante ressaltar que troglófilos, troglófilos e troglóbios interagem entre si, sendo interdependentes e igualmente importantes do ponto de vista ecológico, contribuindo para a biodiversidade, (incluindo diversidade filogenética e funcional), como também genética, morfológica, ecológica etc. Portanto, devem ser objeto de atenção e cuidados para fins de conservação no seu todo.

A fauna subterrânea brasileira caracteriza-se pela alta diversidade, tanto de troglófilos, especialmente os terrestres, como de troglóbios. Entre os troglóbios aquáticos, destacam-se peixes e crustáceos relictos (consideram-se relictos animais sem parentes próximos conhecidos, devido à extinção da maior parte do grupo). A fauna de peixes troglóbios é conhecida mundialmente por sua diversidade, não só em riqueza de espécies (cerca de 30 espécies, a grande maioria bagres e cascudos), como também de habitats e grau de especialização ao meio subterrâneo. Entre os relictos subterrâneos aquáticos destacam-se os minúsculos crustáceos da Ordem Spelaeagriphacea, com distribuição em regiões do antigo supercontinente Gondwana (Austrália, África do Sul e Brasil) e um ícone da Serra da Bodoquena (Estado do Mato Grosso do Sul), e os isópodes Calabozoidea, com ocorrência na Venezuela e no Brasil, nos Estados do Mato Grosso e da Bahia.

No que diz respeito à fauna subterrânea terrestre, a grande diversidade encontra-se entre os aracnídeos, os principais predadores nas cavernas brasileiras, sobretudo aranhas (pelo menos de 33 famílias), os grandes amblipígeos e os minúsculos pseudoscorpíões, além de opiliões, aracnídeos onívoros com suas longas pernas, frequentemente confundidos com aranhas. São também comuns grilos e diplópodes (piolhos-de-cobra), entre outros.

Outra característica distintiva de cavernas de toda a América Latina é a diversidade de hábitos alimentares dos morcegos neotropicais, que incluem espécies estritamente insetívoras, que capturam presas em vôo ou pousadas, frugívoras, nectarívoras/polinívoras, predadoras, onívoras e hematófagas – de fato, os únicos morcegos vampiros em todo o mundo. Como consequência dessa diversidade de dietas, observa-se uma diversidade sem par nos tipos de guano disponíveis como substrato e fonte de alimento para os invertebrados cavernícolas, que incluem espécies estritamente associadas a este recurso.

Como intrinsecamente envolvem áreas de alta permeabilidade hídrica, as regiões cársticas apresentam algumas características importantes no que se refere à sua ocupação e ao uso de seus recursos por populações humanas. Além de menor disponibilidade de água superficial para o consumo, a vulnerabilidade à contaminação dos mananciais (fontes de água) é bem maior que a de outros ambientes, uma vez que poluentes infiltram e são carregados com maior facilidade e rapidez para os reservatórios subterrâneos, sem que haja meios e tempo suficientes para a sua filtragem e depuração.



Figura 13. Agrupamento de morcegos hematófagos Foto: Luis Fábio Silveira.

Além disso, a superfície está naturalmente sujeita a movimentos bruscos de subsidência (afundamentos), seja pelo colapso súbito dos vazios existentes em profundidade ou pelo deslocamento de grandes massas de solo para esses vazios. Ainda que sejam fenômenos da evolução natural das paisagens cársticas, abatimentos podem ser disparados, acelerados ou intensificados se as forças que controlam o estado de equilíbrio momentâneo forem perturbadas, por exemplo, a perda de sustentação da água subterrânea (redução da pressão hidrostática) sobre a cobertura pelo rebaiamento de um aquífero sobreexplorado. A sobrecarga excessiva de estruturas urbanas e alterações nas condições do escoamento natural são outros exemplos de intervenções que podem levar à desestabilização de massas sedimentares e à subsidência (Figura 14).

Por serem naturalmente muito dinâmicos, esses sistemas normalmente encontram-se em limiares de equilíbrio, de forma que pequenos distúrbios podem desencadear processos de grande magnitude e de expressão em escala geográfica regional. Por isso os ambientes cársticos são considerados muito frágeis – eles são sensíveis a alterações e vulneráveis à degradação.

As formas de interação entre populações humanas e os ambientes cársticos variam entre as regiões e ao longo da história. Muitas áreas cársticas da Europa, da Ásia e da América vêm sendo continuamente habitadas há milênios. Nessas regiões, não somente as populações humanas utilizavam os recursos do carste, como solo agrícola, águas superficiais e subterrâneas, como também certos locais - em particular as cavernas - tinham significado cultural particular. Oráculos, santuários, sítios cerimoniais são alguns usos de cavernas em várias culturas tanto no Ocidente quanto no Oriente.

Regiões cársticas são ricas em vestígios arqueológicos, com maior frequência associados ao exocarste, em feições como paredões e abrigos sob rocha. Embora a arqueologia no carste seja muitas vezes associada a sítios em cavernas, são raros os sítios arqueológicos em zonas afóticas, como as cavernas dos Pirineus e Cordilheira Cantábrica, como Lascaux, Altamira, famosas por suas pinturas rupestres de mamíferos extintos, e muitas outras situadas nessa região.

Pinturas rupestres são relativamente comuns em áreas cársticas (Figura 15), onde também podem ser encontrados outros vestígios arqueológicos, a exemplo de fogueiras, restos de alimentos, artefatos líticos e/ou cerâmicos (Figura 16), que podem estar depositados nas diversas camadas de sedimentos formados ao longo de milhares de anos. Abrigos sob rocha – locais protegidos encontrados na base de escarpas rochosas – provêm proteção contra chuva e vento e são locais propícios ao encontro de vestígios arqueológicos.

Cavernas têm rendido achados arqueológicos fundamentais. O primeiro achado do “homem de Neandertal”, hominídeo extinto há cerca de 29 mil anos, se deu em uma pequena gruta na Alemanha, descoberta devido à lavra de uma pedra de calcário. Cavernas em outros continentes também propiciaram achados arqueológicos da maior importância.



Figura 14. Dolina cônica de subsidência (esquerda) e dolina cilíndrica de colapso (abaixo), ambas características do relevo cárstico. São depressões formadas pelo desabamento de cavernas ou pela movimentação do solo para dentro dos espaços subterrâneos de dissolução, segundo processos que podem ser instantâneos ou gradativos, naturais ou induzidos por alterações provocadas no meio, configurando um fator de efetivo risco geológico. São feições particularmente importantes para o carste, pois capturam a água da chuva e convergem o escoamento superficial para determinados pontos de infiltração, podendo se tornar “portas” para o acesso direto de contaminantes até o aquífero cárstico.

Fotos: Mylène Berbert-Born e Antonio José Dourado.





Figura 15. Pinturas rupestres em paredão calcário na região cárstica de Pains, Minas Gerais.
Foto: Luis E. Sánchez.

Figura 16. Urna cerâmica encontrada no interior da gruta da Cerâmica, Bodoquena, Mato Grosso do Sul.
Foto: Rafael Rodrigues Camargo.



Aos usos do carste desde a pré-história, vieram se somar a exploração esportiva e o estudo científico das cavernas, desde meados do século XIX na Europa. Na atualidade, muitas regiões cársticas são fornecedoras de recursos não apenas às populações humanas que nela habitam, mas também à sociedade de um modo geral - recursos hídricos, minerais, paisagísticos, biológicos, genéticos.

Em vários países, as regiões cársticas não estiveram, historicamente, entre as de maior dinâmica populacional e econômica, e até hoje coincidem, de modo geral, com áreas de uso majoritariamente rural. A diversidade dessas regiões e dos modos de produção agrícola empregados forma um grande mosaico que adquire unidade pela questão da ruralidade. De fato, o espaço rural pressupõe um contato mais intenso de seus habitantes com o ambiente e os recursos naturais disponíveis, quando comparado aos centros urbanos. As populações rurais estabelecidas em regiões cársticas beneficiam-se de seus recursos, em particular de seus mananciais hídricos, além das possibilidades de usos diferenciados do território em razão das particularidades de sua configuração geográfica. Por outro lado, o emprego de técnicas inadequadas de manejo do solo e o uso intensivo de agrotóxicos podem provocar significativa degradação da qualidade ambiental.

Nas áreas cársticas rurais brasileiras predomina uma agricultura de base familiar ou de subsistência. Há, naturalmente, disparidades regionais muito fortes no contexto nacional, em certas regiões a agricultura familiar pode estar altamente integrada ao mercado, beneficiando-se dos principais avanços técnicos e de políticas governamentais desenhadas para o setor. Localidades rurais em áreas cársticas podem apresentar dinâmicas demográficas distintas, com populações esparsas ou relativamente adensadas, proximidade ou distância de centros urbanos, índices de desenvolvimento humano diferenciados, indicando ritmos distintos no avanço da qualidade de vida das pessoas. Em certos contextos, o rural pode estar integrado ou vinculado à vida urbana, despertando o interesse daqueles que vivem na cidade e que encontram no espaço rural uma sociabilidade que reafirma a identidade e as tradições locais, expressando-se em localidades utilizadas como segunda residência ou em atividades turísticas, sendo o carste mais um atrativo.

Há municípios com uma base econômica diversificada, capazes de gerar renda em função de sua própria dinâmica e inserção no mercado, ao passo que outros são predominantemente dependentes de políticas públicas de caráter assistencialista. As características das comunidades locais nessas regiões, sua maior ou menor capacidade de organização e participação, também são determinantes no modo como os recursos disponíveis são apropriados e utilizados.

Alguns municípios localizados em regiões cársticas apresentam baixo Índice de Desenvolvimento Humano-IDHM (abaixo de 0,599), como Campo Formoso, na Bahia, ou São Domingos, em Goiás, enquanto outros apresentam IDHM alto (acima de 0,700), como é o caso de Matozinhos e Lagoa Santa, influenciados pela dinâmica da região metropolitana de Belo Horizonte.

Ainda que seja o meio rural aquele mais frequentemente associado ao carste, alguns centros urbanos encontram-se próximos a regiões cársticas, fato intensificado por processos de urbanização e conurbação, como se observa, por exemplo, no carste de Lagoa Santa, ou na região metropolitana de Curitiba, onde o aquífero cárstico tem sido manancial de abastecimento urbano. A fragilidade dessas áreas e a intensa pressão da urbanização, associada à ocupação desordenada do solo, estão diretamente relacionados à ocorrência de acidentes, como rebaixamento do terreno e colapsos de solo, como aqueles registrados em Cajamar, São Paulo, e o município de Almirante Tamandaré, na grande Curitiba, Paraná.

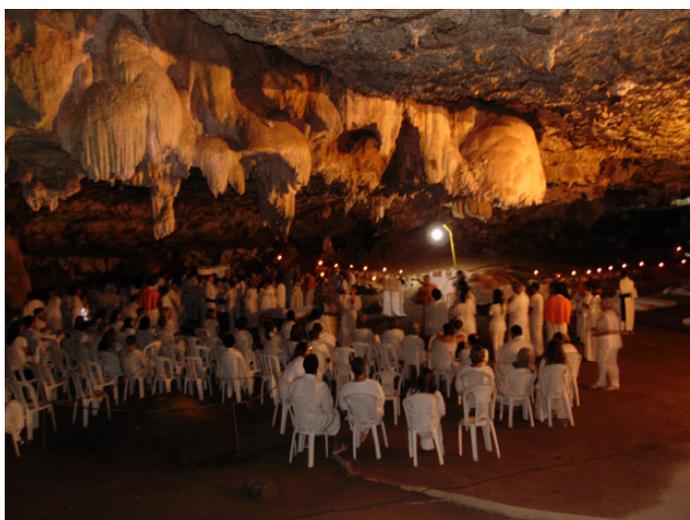
Para além das funções produtivas rurais, sejam elas agrícolas, pecuárias, silviculturais e mesmo minero-industriais desenvolvidas em áreas de carste, os próprios atributos naturais dessas regiões proporcionam uma diversidade de formas de uso, valorização e interação com o meio. O carste, ademais da importância que representa para as populações que ali vivem, também atrai visitantes e estudiosos que percorrem longas distâncias para explorar, investigar e desenvolver estudos técnicos e científicos. Além da pesquisa científica, da prática da espeleologia, das atividades recreativas e esportivas, cada vez mais frequentes, o turismo cultural ou religioso ocupa lugar de destaque.

De fato, algumas regiões cársticas continuam a constituir territórios marcados pelo simbolismo religioso. A identificação de cavernas com o espaço do sagrado, de manifestação religiosa, é recorrente no imaginário popular. Tomem-se como exemplos brasileiros a Romaria do sagrado Coração de Jesus na Lapa da Mangabeira em Ituaçu-BA (Figura 17), as Vibrações de Cura no Santuário do Roncador, em Cocalinho-MT (Fig. 18) ou a Festa da Virgem da Lapa, no município mineiro de Vazante, Minas Gerais, que reúnem milhares de peregrinos todos os anos, os cenotes de Yucatán (México), ou as cavernas de uso budista no Sudeste asiático.



Figura 17. Romaria no Santuário de Bom Jesus da Lapa, Bahia.
Foto: Elvis Barbosa

Figura 18. Vibrações de cura no Santuário do Roncador, Cocalinho, Mato Grosso.
Foto: Heros Lobo



O uso turístico, por outro lado, antes restrito a poucas cavidades que receberam grandes intervenções para acolher grupos de visitantes, tem se expandido e diversificado, incluindo formas de visitação de baixo impacto. O chamado espeleoturismo, associado ao segmento de ecoturismo, e o turismo de aventura podem se desenvolver como atividades que contribuem com a preservação do patrimônio espeleológico, além de gerar renda e valorizar as populações locais. No mundo todo, cavernas são atrações turísticas (Figuras 19 e 20). No Brasil, diversas cavernas e regiões cársticas já apresentam uma atividade turística consolidada como as grutas do Lago Azul, na Serra da Bodoquena, Mato Grosso do Sul; as cavernas da região do Parque Turístico do Alto Ribeira, Estado de São Paulo, ou, ainda, na Bahia e Circuito das Grutas, em Minas Gerais.

As formas de interação entre as populações humanas e as regiões cársticas precisam ser consideradas em suas múltiplas escalas, tanto na escala local quanto na municipal ou regional e devem ser objeto de estudo quando se busca identificar e avaliar as consequências de um novo projeto ou de um empreendimento existente.



Figura 19. Cueva de las Maravillas, Aracena, Espanha.
Foto: Heros Lobo

Figura 20. Gruta do Janelão, Parque Nacional da Cavernas do Peruaçu, Minas Gerais.
Foto: Heros Lobo



REFERÊNCIAS

Ford, D.; Williams, P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons, England, (2ªed.), Karst Hydrogeology and Geomorphology. Chichester: John Wiley & Sons, England, 562pp.

Williams, P.; Fong, Y.T. 2010. *World Map of Carbonate Rock Outcrops*, v.3.0. University of Auckland. New Zealand. http://web.env.auckland.ac.nz/our_research/karst/

Zwahlen, F. (ed.) 2003. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers – Final Report*. COST-European Cooperation in Science and Technology – Action 620, European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels 297pp.



Foto: Mylène Berbert-Born



PARTE 2

O ESTUDO DO CARSTE, BASE PARA O PLANEJAMENTO

As principais características dos ambientes cársticos, resumidas na Parte 1, são aqui apresentadas em maior detalhe. Com base nas peculiaridades dos elementos e processos cársticos, procura-se demonstrar a fragilidade desse ambiente e, a partir disso, a necessidade e importância da adoção de boas práticas nas atividades de mineração estabelecidas nesse tipo de ambiente.

CAPÍTULO 1: GEOSSISTEMAS CÁRSTICOS

Mylène Luiza Cunha Berbert-Born

1.1. INTRODUÇÃO - POR QUE UMA ATENÇÃO ESPECIAL AO CARSTE?

Terrenos cársticos ocupam parcela significativa da superfície do Planeta, algo em torno de 13% das terras emergidas considerando a distribuição de rochas carbonáticas que se encontram em condições geográficas e climáticas favoráveis à dissolução (Ford e Williams 2007; Williams e Fong 2010) (vide Figura 1, Parte 1). Conforme descrito na primeira parte deste Guia, são áreas realmente singulares, em que a dissolução natural de rochas como calcários, dolomitos e mármore leva ao desenvolvimento de redes de fissuras e condutos que podem configurar complexos sistemas de circulação de água pelo meio subterrâneo.

O fluxo da água através dos condutos cársticos é mais livre e concentrado, e por isso muito mais rápido (fluxo turbulento) do que a água permeando outros meios rochosos que sejam estritamente granulares, como nos arenitos, ou fraturados, como nos granitos e outras rochas ígneas e metamórficas (fluxo laminar em meio aos poros da rocha, ou em fraturas mais fechadas e menos interconectadas). A figura 1.1.1 ilustra como é a organização dos interstícios da rocha em meios porosos, fraturados e cársticos, capazes de armazenar e circular água sob diferentes condições hidráulicas.

A água que infiltra pela superfície dos terrenos cársticos escoar preferencialmente ao longo dos condutos em rotas subterrâneas que drenam rapidamente para locais onde há descarga livre novamente à superfície, chamados exutórios, que são as nascentes cársticas. Ao longo do seu rápido trajeto, os drenos principais vão recebendo parcelas da água que ficam estocadas de maneira difusa nos poros e fraturas da rocha. A água passa a infiltrar cada vez mais facilmente porque as conexões entre as redes subterrâneas e a superfície vão aumentando à medida que o escoamento para as nascentes se torna mais eficiente. Essa organização da drenagem por condutos subterrâneos, promotora do aumento expressivo da permeabilidade, é a razão pela qual as clássicas redes de drenagem superficial são mal estruturadas e mesmo inexistentes nos terrenos cársticos.

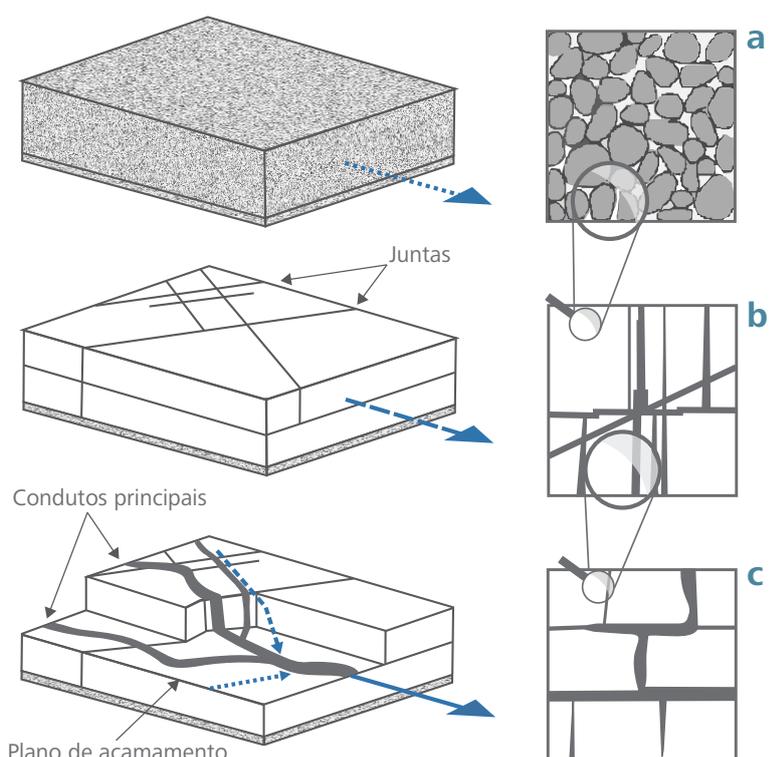


Figura 1.1.1. Diferentes meios aquíferos e respectivas condições de fluxo: (a) porosidade intergranular da matriz rochosa e fluxo laminar (seta pontilhada); (b) porosidade em fraturas ou fissural com fluxo predominantemente laminar ao longo das fraturas (seta tracejada); (c) porosidade de condutos cársticos ou de dissolução com fluxo turbulento (seta contínua), combinado ao fluxo intergranular e em fraturas ou pequenas fissuras de dissolução (caráter "bimodal"). Montagem de Mylène Berbert-Born. Modificado de Worthington (2003) e Kentucky Geological Survey (2012).

A fácil infiltração e o rápido escoamento subterrâneo acabam ocasionando o carreamento e perda de grandes parcelas de solo, um processo que ocorre de modo muito heterogêneo. Isso leva à configuração de um relevo morfológicamente irregular que se distingue bastante de outros tipos de relevo. O modelado e feições do relevo cárstico são, em suma, a expressão superficial da condição particular de drenagem subterrânea (White 2002; Goldscheider e Andreo 2007). A rocha exposta ou semi exposta com fraturas progressivamente alargadas pela dissolução e as depressões circulares formando bacias fechadas (dolinas), que capturam a água superficial e concentram o escoamento superficial em determinados pontos de infiltração, são algumas das feições típicas resultantes. Por sua vez, elas também atuam na promoção e no incremento da circulação subterrânea, retroalimentando o processo.

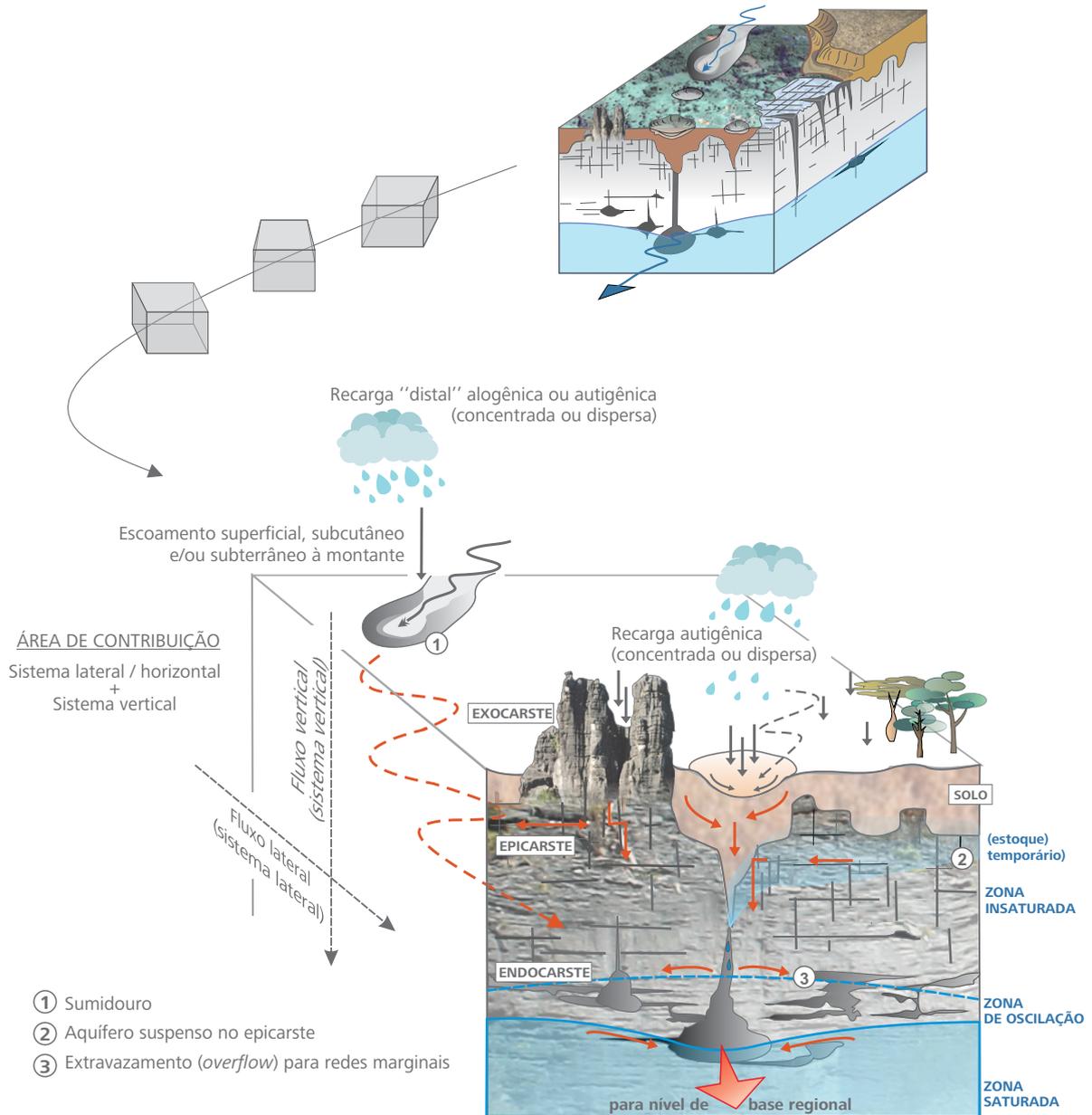


Figura 1.1.2. Principais compartimentos do sistema aquífero cárstico que funcionam de maneira integrada mediante diferentes mecanismos de atuação da água. A forma como esse aquífero se organiza e a maneira como ele armazena e transmite água, em condição de elevada permeabilidade, é causa e ao mesmo tempo consequência do peculiar relevo de formas negativas e positivas do carste. Destacam-se os seguintes aspectos: (a) as recargas dispersas e as recargas concentradas ou convergentes, distais e proximais, autigênicas e alogênicas, representadas pelas setas de cor preta; (b) os fluxos subsuperficiais e subterrâneos verticais e laterais, difusos e concentrados, assinalados com setas de cor vermelha; (c) a oscilação da água subterrânea, do nível de base (linha contínua) ao nível de máxima (tracejada em azul); (d) o solo e o exocarste, epicarste e endocarste; (e) as zonas saturada, insaturada e de oscilação do nível freático. Conceitos e explicações ao longo do texto. Ilustração: Mylène Berbert-Born.

Isso demonstra que o relevo cárstico, cuja superfície denomina-se *exocarste*, ao mesmo tempo é consequência e causa de uma organização hídrica subterrânea peculiar que retrata o aquífero¹ cárstico. O aquífero cárstico engloba desde a porção superior normalmente mais carstificada do bloco rochoso, chamada *epicarste*, até as porções mais profundas que se apresentam variavelmente carstificadas, que constituem o *endocarste*. O *endocarste* por sua vez envolve tanto a zona vadosa, ou insaturada, como a zona freática ou saturada do aquífero, conforme esquematizado na figura 1.1.2. As figuras 1.1.3 e 1.1.4 ilustram algumas feições características do relevo cárstico, em superfície e subsuperfície (ver outras imagens na Parte 1 do livro).

A estreita interação entre superfície (atmosfera, relevo e solos) e subterrâneo (porosidade da rocha e aquífero), que ocorre especialmente por intermédio da água, faz do carste um geossistema muito especial em diversos aspectos, entre os quais:

- São sistemas naturais muito sensíveis às condições climáticas, especialmente aos regimes de chuvas. Potencializadas pela convergência do escoamento superficial e subterrâneo, as chuvas produzem efeitos rápidos e intensos tais como oscilações de grandes amplitudes nos níveis freáticos, rápida inundação e sobrefluxo (extravasamento) de canais subterrâneos ou rápido escoamento entre pontos de recarga e descarga, citando alguns exemplos do grande dinamismo físico dos ambientes cársticos. Lembrando, também, a alta energia erosiva envolvida nesses processos que suscita intensa movimentação de materiais particulados.
- Por serem muito dinâmicos, interativos e complexos, pequenos distúrbios nesses sistemas podem ter reflexos imprevisíveis, com consequências que podem se manifestar a grandes distâncias, com magnitudes amplificadas e tempos de resposta inesperados. A forte sensibilidade, a complexidade e as incertezas envolvidas refletem a grande fragilidade dos sistemas cársticos e sua alta vulnerabilidade intrínseca (natural) à degradação. Os aspectos mais vulneráveis são: a água, mais suscetível à contaminação e ao esgotamento; o solo, muito sujeito à erosão e à salinização; a fauna cavernícola (ou intersticial), pouco tolerante a alterações em seu habitat; o patrimônio natural e cultural frequentemente associados às cavernas; e estas, que podem ser irremediavelmente degeneradas diante de perturbações na sua estrutura e dinâmica de funcionamento.
- São áreas de um modo geral carentes em recursos hídricos superficiais, indisponíveis para o consumo, ao tempo que o acesso aos mananciais subterrâneos nem sempre é fácil, assim como é delicado o seu manejo. A utilização desses mananciais precisa ser criteriosamente dimensionada, para que não sejam explorados além dos níveis mínimos que mantêm os escoamentos de base, que alimentam rios superficiais e nascentes nos períodos de seca. Oscilações e rebaixamentos induzidos pela exploração podem tornar as superfícies instáveis e elevar o risco de subsidências, ou seja, o colapso de rochas e solos que compõem a cobertura.

Por serem muito dinâmicos, interativos e complexos, pequenos distúrbios nos geossistemas cársticos podem ter reflexos imprevisíveis, com consequências que podem se manifestar a grandes distâncias, com magnitudes amplificadas e tempos de resposta inesperados. A forte sensibilidade, a complexidade e as incertezas envolvidas refletem a grande fragilidade dos sistemas cársticos e sua alta vulnerabilidade intrínseca à degradação.

É importante reconhecer, no entanto, que esse cenário peculiar nem sempre envolve a existência de um relevo cárstico característico, pois a inexistência de um “carste superficial” não descarta a possível existência de um “carste em profundidade”. Em muitas situações, porções mais profundas do bloco rochoso podem apresentar maior permeabilidade decorrente da dissolução carbonática mesmo estando sobrepostas por rochas não carstificáveis; ou ser o caso, como apontado no capítulo introdutório deste Guia (Parte 1), de um relevo cárstico soterrado ou desenvolvido sob espessas coberturas inconsolidadas, sem expressão significativa à superfície.

¹ Aquífero é qualquer formação rochosa capaz de acumular e circular água nos interstícios dos seus grãos minerais, fissuras (juntas, falhas, planos entre camadas) e demais espaços existentes, representando reservatórios exploráveis de água subterrânea. São esses reservatórios que mantêm o fluxo de base (ou mínimo) dos rios que correm pela superfície. As propriedades hidráulicas de cada tipo de aquífero – granular/poroso, fraturado/fissural e cárstico/conduto – são ditadas pela natureza geológica, considerando as características litológicas, estratigráficas e estruturais, e também pelas características geomorfológicas e climáticas vigentes.

Dadas a sua extensão e situação geográfica no globo, boa parte dos terrenos cársticos encontra-se de alguma maneira ocupada e os seus recursos naturais sob algum grau de pressão, em especial os mananciais subterrâneos frente à inerente escassez de água superficial. Para se ter melhor idéia, estima-se que 20 a 25% da população mundial depende especificamente da água subterrânea de aquíferos cársticos (Ford e Williams 2007). Só nos EUA, 40% de toda a água subterrânea potável é proveniente de áreas cársticas, que perfazem em torno de 20% da área do país (Quinland e Ewers 1986; Weary e Doctor 2014). Em alguns países da Europa, águas cársticas podem representar 50% do suprimento total de água potável, e o único recurso de água doce disponível em algumas regiões específicas (Andreo et al. 2006).



Figura 1.1.3. Aspectos do exocarste e do epicarste: (a) camada de solo sobre rochas calcárias com aspecto carstificado, retratando o epicarste – notar irregularidade e formas de dissolução no contato solo-rocha, e as fraturas destacadas na rocha; (b) torres calcárias aflorando em uma encosta como resultado da progressão erosiva do solo – notar pequenas bancadas de rocha (verrugas) na parte alta da vertente, demarcando a existência de um “relevo rochoso” sob a cobertura de solo; (c) “torres de pedra” configurando um -“exocarste” - notar, um pouco abaixo, fraturas verticais alargadas por dissolução preenchidas por solo residual, na porção mais superficial do epicarste. Fotos: Mylène Berbert-Born.

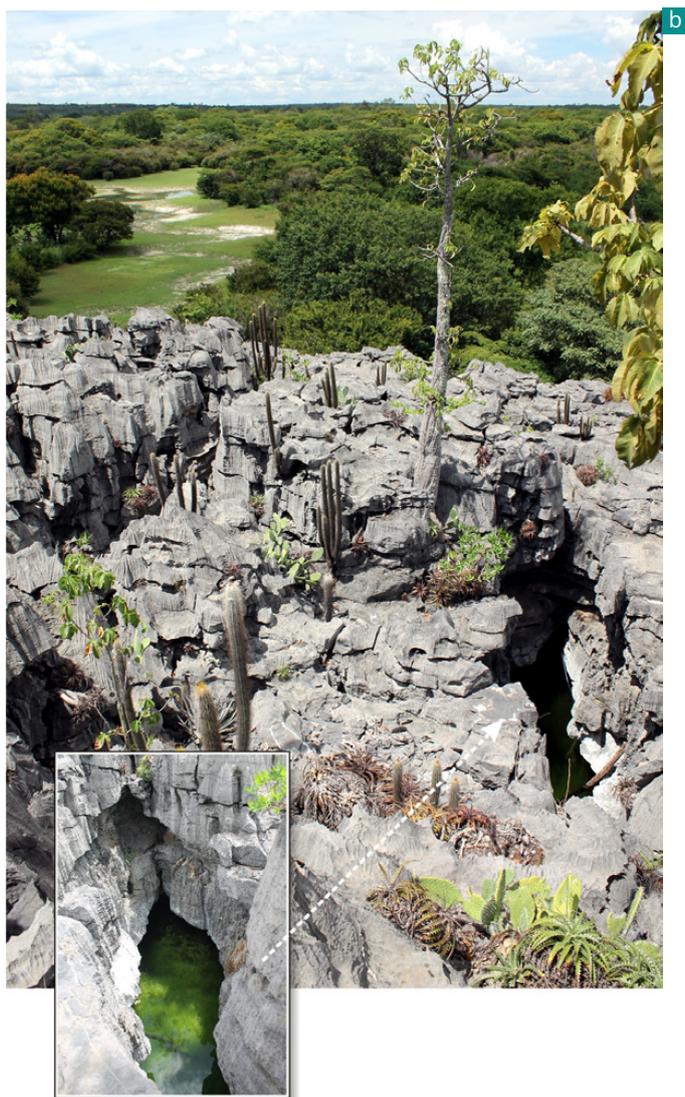
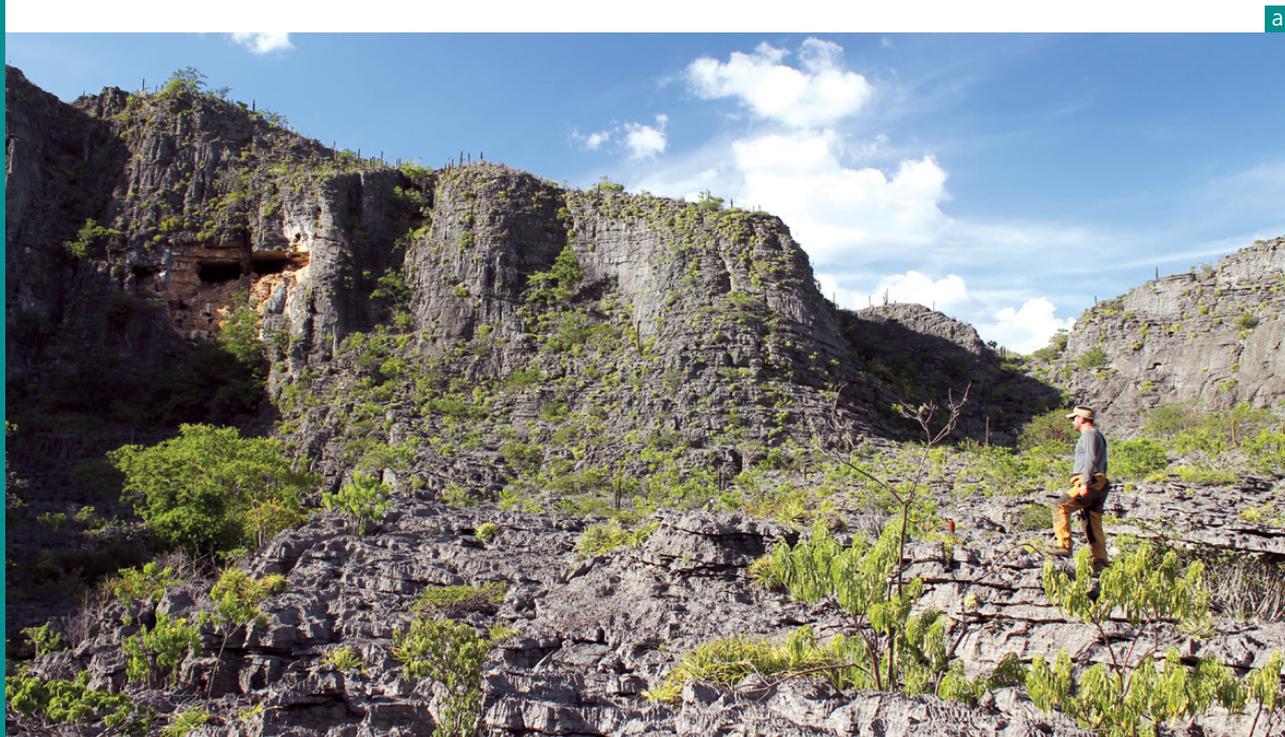


Figura 1.1.4. Aspectos do exocarste e do epicarste: (a) extenso pavimento calcário lapiezado retratando um exocarste exposto – notar condutos de dissolução interceptados à meia-altura do morro calcário, que poderiam ser considerados uma interface do endocarste; (b) topo de afloramento calcário com formas pontiagudas (lapiás) e fendas formadas pela dissolução da superfície da rocha, destacando-se em meio à planície onde ocorre descarga hídrica – no destaque dessa imagem, uma fenda na qual a água que infiltra fica temporariamente armazenada, drenando lentamente pelo epicarste.
Fotos: Mylène Berbert-Born.

Cerca de 2,5% da área continental do Brasil é constituída por rochas carbonáticas carstificáveis. Pode parecer pouco, mas quando se pondera a enorme diversidade de tipos de rochas (litologias) existentes no país é que se torna aparente a grande significância dessas áreas. A figura 1.1.5 ilustra a distribuição das grandes unidades geológicas (grupos e formações geológicas) que possuem rochas carbonáticas integrando suas associações litológicas. Importante notar que boa parte delas está situada em latitudes semiáridas, onde a carência de água superficial e consequente dependência de mananciais subterrâneos são agravadas.

Diante de todo esse quadro, o que justifica uma atenção especial aos ambientes cársticos é que, em vista dos diferenciais hidrogeológicos, geomorfológicos, ecológicos e os valores econômicos e culturais envolvidos, discutidos ao longo deste livro, distúrbios nas suas condições naturais têm um potencial de impacto e de degradação ambiental muito mais elevado do que em outros tipos de ambientes. A explicação permeia conceitos complexos como estabilidade, sensibilidade, vulnerabilidade e relevância de "sistemas ambientais naturais", que serão tratados no decorrer do presente capítulo.

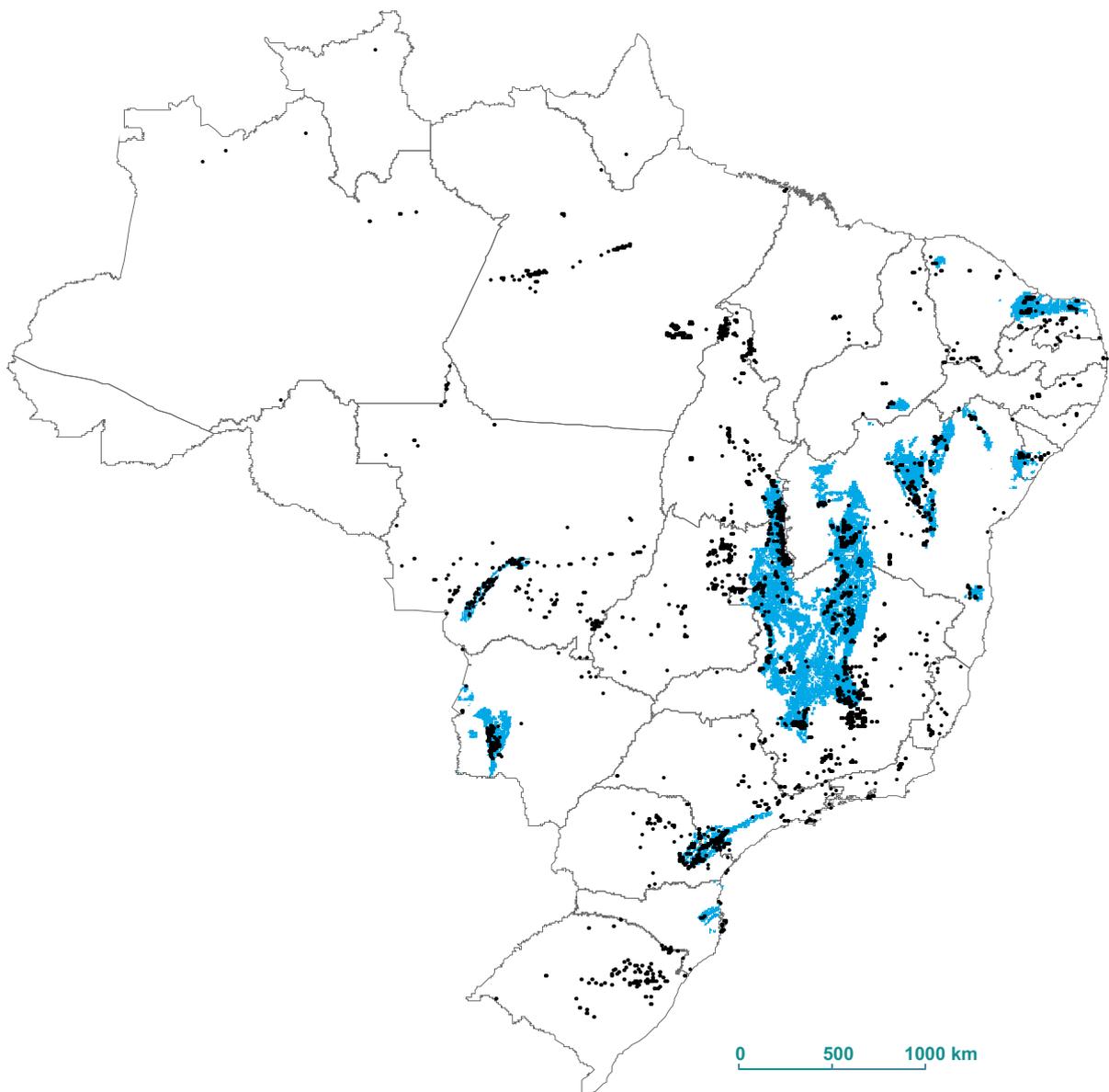


Figura 1.1.5. Mapa das áreas onde ocorrem unidades litoestratigráficas (grupo ou formação) que possuem rochas carbonáticas, mostradas em azul. Os pontos pretos indicam as cavernas cadastradas na Base de Dados Geoespacializados de Cavidades Naturais Subterrâneas do CECAV em 31/12/2015, muitas delas formadas em rochas não carbonáticas. Layout da figura elaborado por Mylène Berbert-Born por manipulação de dados geoespacializados das Regiões Cársticas do Brasil (CECAV 2009) disponíveis em <http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html>. Download em 19/05/2014.

1.2. CARSTE – PAISAGEM E AQUIFERO

Os diversos aspectos que distinguem o ambiente cárstico de outros tipos de ambientes naturais estão principalmente associados à carstificação – ou espeleogênese² – um fenômeno natural específico, expressivo e intrinsecamente heterogêneo que ocorre em terrenos com substrato rochoso carbonático, cujas manifestações físicas e biológicas são altamente relevantes do ponto de vista ambiental, econômico, científico e cultural. Compreender bem os fundamentos da carstificação é um requisito básico de qualquer estudo ambiental em área cárstica. É o que habilita reconhecer e interpretar os processos ativos e reliquiais mais importantes na configuração e funcionamento de determinado terreno cárstico em exame, para assim decifrar mais realisticamente como ele se comportará ao sofrer perturbações no seu estado natural.

A carstificação aqui considerada “típica” diz respeito a processos geoquímicos de dissolução envolvendo o sistema químico $\{H_2O-CO_2$ (ácido carbônico) \leftrightarrow $CaCO_3$ (rocha carbonática)}, com o protagonismo do gás carbônico (CO_2) como o fator de acidez da água, que lhe dá poder corrosivo sobre minerais carbonáticos. É também chamada de carstificação epigênica, uma vez que o agente da dissolução provém da superfície – águas meteóricas que absorvem o CO_2 da atmosfera e da biomassa superficial, e que circulam basicamente por ação gravitacional ou por pressão hidrostática. Nesse processo, quando o carbonato de cálcio (rocha) é dissolvido, tem-se uma solução composta de íons de cálcio³ (Ca^{2+}), bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}) cuja proporção, ou equilíbrio químico, é determinado pela concentração (pressão parcial) do CO_2 , pelo pH e temperatura da solução, pela cinética das reações químicas e aptidão do meio à difusão iônica (Dreybrodt et al. 1996; Liu e Dreybrodt 1997). Outras informações sobre esse sistema químico encontram-se no Capítulo 2 – Cavernas.

Em outro mecanismo de carstificação, conhecido como hipogênese, a dissolução é provocada por soluções termais ou fluidos mineralizados formados em maiores profundidades no próprio bloco rochoso. Embora relativamente menos frequente, este também é um processo muito significativo devido ao alto poder corrosivo das soluções, e das condições geológicas e hidrogeológicas normalmente envolvidas. A respeito dos diferentes tipos de processos de carstificação, é importante compreender que cada um tem certa dinâmica e padrões morfogenéticos próprios. Pode-se aprofundar no assunto da hipogênese consultando Klimchouk et. al (2000), Klimchouk (2015), e Audra e Palmer (2015). Neste capítulo será dado enfoque à epigênese, e não serão tratados aspectos de carstificação de rochas não carbonáticas.

Um ponto fundamental da carstificação carbonática, seja ela epigênica e especialmente a hipogênica, é que a taxa dissolutiva é muito elevada, ou seja, a dissolução é mais intensa comparativamente a sistemas químicos não carbonáticos. Assim, feições de intemperismo químico de grande escala e ampla distribuição espacial, que constituem os clássicos relevos cársticos, são formadas num intervalo de tempo relativamente rápido, numa relação sinérgica com a erosão mecânica.

Há diversos fatores que influem na intensidade ou velocidade em que ocorre a carstificação, de modo que, a depender do padrão hidroclimatológico reinante e do contexto geológico, pedológico e topográfico, as taxas de dissolução serão muito variáveis de local para local. Além do tipo de rocha, solo, vegetação e topografia, o volume e a distribuição temporal das chuvas, bem como a temperatura atmosférica, a insolação e a intensidade dos ventos, são todos aspectos que atuam de maneira combinada.

Alguns fatores podem ter surpreendente relevância regional ou local para o processo de carstificação, tais como os ventos, por exemplo, que interferem nas taxas de evaporação da água precipitada e, por conseguinte, na própria disponibilidade de água para a infiltração. A espessura dos solos que recobrem as rochas solúveis é outro aspecto de grande importância. Solos mais espessos costumam armazenar água, distribuindo-a mais difusamente para as descontinuidades da rocha situada abaixo. Quando a região apresenta uma pluviosidade mais alta com chuvas bem distribuídas ao longo dos meses, a água armazenada no solo tende a migrar de maneira regular para dentro do sistema rochoso; mas, se as chuvas são mal distribuídas, uma parte significativa da água pode ficar retida no solo durante certo período ou se perder por capilaridade nas longas estiagens, desta forma também reduzindo a disponibilidade da água para a carstificação. A vegetação e o solo, derivados das condições climáticas, são elementos-chave para a distribuição, regularização e renovação de soluções ácidas no sistema.

Os aspectos mencionados que dizem respeito à disponibilidade e química da água associam-se a outros variados fatores que ditam a sua dinâmica de circulação pelo meio rochoso, em especial: as descontinuidades estruturais da rocha, que propiciam passagens preferenciais às soluções; os gradientes topográficos e hidráulicos que, envolvendo as diferenças de elevação do terreno e da pressão da água, estabelecem os níveis de energia e o sentido da circulação; e finalmente o tempo, fator determinante do grau das transformações, ou seja, do estágio evolutivo dos processos.

2 Criação e evolução de uma permeabilidade organizada na rocha, desenvolvida como resultado da ampliação dissolutiva de uma porosidade previamente existente (Klimchouk et al. 2000, p.47).

3 Naturalmente, a dissolução de carbonatos de cálcio e magnésio também terá íons Mg^{2+} na solução.

Toda essa gama de fatores, combinados no espaço e no tempo, resulta na grande variedade de terrenos cársticos ao redor do mundo, diversificados quanto à expressividade e tipologia do relevo, organização hidrográfica e dinâmica hidrológica, conectividade ou fragmentação de compartimentos superficiais e subterrâneos, ocupação biológica, e quanto às potencialidades e limitações à ocupação do território.

Mais detalhes da carstificação epigênica e exemplos de ambientes cársticos existentes nos diversos continentes podem ser consultados em livros-textos como Gillieson (1996), Klimchouk et al. (2000), Palmer (2007) e Ford e Williams (2007).

O processo clássico da carstificação – da iniciação subterrânea aos sistemas de recarga-transmissão-descarga hídrica

Por uma série de motivos, o processo de dissolução acontece de modo bem heterogêneo em determinado contexto espacial, a começar devido à própria heterogeneidade mineral, textural, estrutural e estratigráfica da rocha. Também devido às condições muito variáveis de agressividade (acidez) da água que a percola e aos mecanismos de entrada e saída dessa água do compartimento rochoso, em determinado espaço e intervalo de tempo.

O poder de dissolução da água depende de uma combinação muito complexa de fatores físicoquímicos envolvendo a absorção do CO_2 superficial (atmosfera e solo), a eventual liberação do CO_2 novamente para a atmosfera durante o fluxo, e a evolução das reações químicas de equilíbrio com a rocha (sistema $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$). Como já assinalado, essas reações são influenciadas pela temperatura, condições de pH, conteúdo iônico e pelo modo como as soluções vão se diferenciando e sofrendo misturas ao longo do seu trajeto pelos interstícios da rocha. Já a solubilidade da rocha pode variar bastante em razão da composição mineralógica e até mesmo do próprio arranjo dos minerais presentes, afora a variável presença de fissuras que ela pode apresentar.

Partindo de uma escala de observação bem pequena, focando a composição e textura da rocha, além dos tipos minerais que podem ser mais ou menos solúveis de acordo com o caráter da solução que transita pelo meio rochoso, a solubilidade global também é influenciada pelos poros eventualmente deixados entre os grãos durante o processo de formação da rocha. A porosidade inicial da rocha já formada, chamada de porosidade primária, é uma das “portas de entrada” para as soluções que posteriormente atuarão no processo inverso à formação da rocha, ou seja, sua degradação por dissolução.

No caso das rochas calcárias bem puras, compostas quase exclusivamente por minerais de carbonato de cálcio, essa porosidade intergranular costuma ser insignificante porque é comum haver uma “cimentação” intersticial dos grãos, causada pela recristalização dos minerais carbonáticos preexistentes ou pela cristalização de fluidos carbonáticos percolantes ainda nas etapas iniciais da litificação (solidificação da rocha). A matriz rochosa adquire assim um caráter mais maciço e outros tipos de interstícios assumem papel preponderante no processo de carstificação, no caso, as juntas entre camadas e as fissuras formadas posteriormente, quando as rochas são expostas às tensões da litosfera. A “porosidade fissural” da rocha é muito importante nos primeiros estágios do processo de carstificação.

A questão fundamental para a carstificação é o acesso da água ligeiramente ácida aos minerais solúveis. Mas, para que o processo evolua, também é necessária a evasão e uma contínua renovação das soluções já neutralizadas (saturadas em carbonatos) no decorrer da dissolução. Planos de acamamento sedimentar e planos de fraturas, laminações tectônicas e complexos de falhas são estruturas contínuas, muitas vezes extensas e interconectadas por onde a água consegue infiltrar e circular mais facilmente se comparada aos poros intergranulares. Essas estruturas da rocha não se distribuem de forma totalmente aleatória; ao contrário, organizam-se com certa regularidade no espaço rochoso. Tal arcabouço de estruturas sistematicamente dispostas na rocha resulta de processos muito antigos de grande escala, relacionados à própria formação da rocha (processos deposicionais) ou a transformações de escala global ou continental sofridas posteriormente à sua consolidação (processos tectônicos).

Interessante que, entre todas as estruturas da rocha, alguns conjuntos são mais propensos à dissolução do que outros. Fraturas, laminações tectônicas e falhas são estruturas resultantes de um campo de esforços tectônicos com vetores de tensão compressiva (“pressão”) e distensiva (“alívio”). As estruturas que resultaram das tensões compressivas são mais fechadas do que aquelas formadas do alívio das tensões. Logo, estas últimas estão mais suscetíveis à percolação da água.

Pela lógica desse condicionamento da dissolução, rotas de fluxo da água assumem algumas direções preferenciais e, tal como a forma, extensão e o desenvolvimento de cavernas (condutos) e outras feições do relevo, apresentam alguns padrões regionais mais ou menos previsíveis. A repetição do caráter linear de certas feições cársticas, como vales retilíneos e escarpas alinhadas a conjuntos de dolinas, são exatamente decorrência da sua relação com determinadas estruturas da rocha.

Ao mesmo tempo em que permite certo controle sobre fenômenos e processos que ocorrem numa área, o condicionamento estrutural por outro lado motiva muitas incertezas, dando razão, por exemplo, a súbitos desvios de rotas, captura de drenagens, e um grau de complexidade no que diz respeito aos níveis altimétricos da água subterrânea.

Por tudo isso, entender o funcionamento do sistema cárstico requer conhecer muito bem o contexto tectônico regional e os diferentes compartimentos estruturais existentes, confrontando-os com a tipologia e organização espacial das feições de relevo, cujos padrões são reconhecidos a partir de análises morfométricas⁴ sistemáticas do terreno.

A identificação de grandes porções ou “blocos” do pacote rochoso que sejam mais ou menos homogêneos do ponto de vista estrutural, e também composicional e textural, é outro ponto importante, pois a maneira como esses blocos estão mutuamente arrançados também influencia o modo como a dissolução se desenvolve.

Por exemplo, uma porção, nível ou camada da rocha com maior conteúdo argiloso ou silicoso e menor grau de fraturamento, pode ser menos permeável à água e atuar como um “selante” local, retardando, concentrando ou redirecionando a percolação da água. Esse horizonte de contato entre porções composicionalmente distintas da rocha pode coordenar a iniciação do processo de dissolução num certo local e ser decisivo na evolução de determinada rede de condutos subterrâneos. Algumas partes do bloco rochoso também podem apresentar concentrações de determinados minerais capazes de incrementar localmente a acidez das soluções, ou podem simplesmente apresentar maior densidade local de fraturas que sejam mais abertas e interconectadas, favorecendo a percolação e a dissolução em detrimento de outras porções da rocha.

É comum encontrar, numa dada região, cavernas ou condutos de dissolução concentrados logo acima de um horizonte litológico marcante na estratigrafia local, como uma lente ou estrato mais silicoso ou argiloso e, portanto, menos permeável⁵. Quando as camadas são regionalmente contínuas e encontram-se horizontalizadas, as cavernas e outras feições de dissolução podem assumir, em função dessas camadas, uma disposição altimétrica regular com padrões morfológicos localmente bem definidos. Há vários exemplos dessa situação nas regiões onde afloram rochas siliciclásticas intercaladas com rochas carbonáticas próprias da estratigrafia horizontalizada do Grupo Bambuí, especialmente nos estados de Goiás, Minas Gerais e Bahia.

A coluna estratigráfica do vale do São Francisco no norte de Minas Gerais (Iglesias e Uhlein 2009), mostrada na figura 1.2.1, retrata uma típica sequência de unidades litológicas do Grupo Bambuí. Nela são apresentadas as subunidades aquíferas cársticas (calcários e dolomitos das formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré) que podem estar localmente “sustentadas” e dissolutivamente estruturadas pela existência das rochas menos permeáveis que se encontram intercaladas na sequência (siltitos, folhelhos e calcários argilosos da Formação Serra de Santa Helena e da base da Formação Sete Lagoas), representadas em alaranjado. Essas intercalações aparecem em frequência e espessuras variáveis de local para local, podendo ser mais ou menos expressivas, de acordo com a escala espacial considerada.

Uma questão importante da carstificação relacionada à organização litológica, estratigráfica e estrutural da rocha, de cunho prático, diz respeito à continuidade, isolamento ou conectividade de redes de condutos ou de sistemas aquíferos. Como um exemplo simplificado, no esquema da figura 1.2.2 são representados dois sistemas de condutos, assinalados como “1” e “2”, cujo acesso humano é hipoteticamente impraticável. Apenas pela observação direta do comportamento hidrológico das duas “saídas” dos sistemas, não há certeza se eles podem ou não estar conectados. Reconhecer a existência e a natureza de uma unidade impermeável possivelmente intercalada aos sistemas pode ajudar bastante a entender a estruturação, o funcionamento e a interação que pode haver entre eles.

Essa coordenação que a estratigrafia e as variações composicionais e estruturais da rocha (variações lito e tectofaciológicas) desempenham sobre a dissolução, em escala local ou regional, é um critério muito importante no exercício do reconhecimento dos sistemas cársticos. Caracterizar os pormenores da estratigrafia e da geologia estrutural, considerando o detalhe das variações faciológicas verticais e laterais que remontam tanto o ambiente deposicional como o contexto deformacional (geotectônico) da rocha, é um requisito diferencial dos estudos de diagnóstico ambiental em áreas cársticas.

Retomando o início do processo, antes da carstificação ser efetivamente disparada (*breakthrough* da carstificação) a água subterrânea é apenas intersticial num meio rochoso com fissuras que se apresentam cada vez mais fechadas com o aumento da profundidade. O nível erosivo local é coordenado pelo nível mais baixo de fluxo da água (fluxo de base), sendo marcado na superfície pelos fundos de vales, planícies e lagoas onde aflora o lençol freático. A superfície do lençol freático marca o nível abaixo do qual todos os interstícios da rocha são ocupados pela água, perfazendo a “zona saturada” do aquífero.

4 Avaliação das formas e suas relações espaciais com base nas medidas que as caracterizam individual e coletivamente.

5 Na terminologia hidrogeológica são chamados de “aquitarde”, unidade geológica com baixa porosidade e permeabilidade, e “aquiclude”, unidade impermeável.

Todos os interstícios de uma rocha calcária embebidos em água são locais em que se processam reações de dissolução, desde que a água não esteja saturada em carbonato e que haja condições de difusão iônica. Mas algumas regiões ou porções do bloco rochoso apresentam maior propensão dissolutiva que outras pelas razões mineralógicas já mencionadas, ou por concentrar descontinuidades estruturais, ou por causa das relações estratigráficas (relação entre unidades litológicas com diferentes solubilidades), ou, ainda, devido a fatores hidráulicos como pressão da água e mistura de soluções saturadas atuando combinadamente. Essas porções mais propensas à dissolução acabam funcionando como “horizontes de iniciação” da carstificação (*inception horizons*, Lowe 1992), locais a partir dos quais alguma das possíveis cadeias de processos dissolutivos é disparada. Explicações mais detalhadas sobre o estágio de iniciação da carstificação podem ser consultadas em Lowe (1999); Lowe e Gunn (1997), Palmer (2003) e Filippone (2009).

Uma das cadeias dissolutivas pode evoluir a partir da ampliação preferencial de estruturas que sejam originalmente mais abertas do que outras, e frequentemente na intersecção de fraturas distensivas com planos de acamamento. É muito comum que a dissolução seja mais expressiva na intersecção entre estruturas da rocha porque estes são pontos promissores de encontro e mistura de soluções com diferentes proveniências. As soluções podem ser desiguais quanto à saturação em carbonatos dissolvidos e, por conseguinte, quanto ao poder de dissolução, de tal modo que, nesses pontos, surgem novas reações de equilíbrio iônico com a rocha.

A coordenação que a estratigrafia e as variações composicionais e estruturais da rocha desempenha sobre a dissolução, em escala local ou regional, é um critério muito importante no reconhecimento dos sistemas cársticos. Caracterizar os pormenores da estratigrafia e da geologia estrutural, considerando o detalhe das variações faciológicas verticais e laterais que remontam tanto o ambiente deposicional como o contexto deformacional (geotectônico) da rocha, é um requisito diferencial dos estudos de diagnóstico ambiental em áreas cársticas.

A ampliação de uma condição intersticial de armazenamento de água, em que o deslocamento das soluções é muito lento (fluxo laminar) graças a diferenças regionais na carga hidráulica, para uma condição real de “conduto” hídrico, em que o fluxo se torna mais rápido e direcional (fluxo turbulento), começa a ocorrer quando surge um gradiente da pressão hidrostática. Ou seja, uma diferença da pressão da água entre dois pontos, de forma que a água passa a fluir das áreas de maior para as de menor pressão. Por exemplo, a erosão da superfície intercepta o lençol freático num dado momento, perdendo-se a resistência ao fluxo imposta pela rocha. Surge um forte diferencial de pressão e a capacidade da vazão subterrânea é ampliada substancialmente.

É realmente importante apreender que a iniciação e os primeiros traços da configuração espacial e geométrica de um sistema endocárstico estão criticamente relacionados a um determinado momento em que as condições de retenção da água subterrânea são rompidas, ocorrendo uma descarga mais livre da água em determinado ponto ou local.

No meio subterrâneo, o deslocamento da água em razão do gradiente hidráulico acontece seletivamente ao longo de rotas que encontrem a menor resistência à percolação. Tais rotas são ampliadas mais rapidamente justamente porque apresentam melhor condição de escoamento da água. Na medida em que aumenta a capacidade de drenagem da água nos canais ainda pequenos (“protocondutos”), conseqüentemente aumenta a velocidade de fluxo, que em um momento passa a ter caráter turbulento – mais ou menos quando o conduto atinge cerca de 5 mm de diâmetro (Ford et al. 1988). Esses canais um pouco mais desenvolvidos fazem convergir para si toda a água presente em poros, juntas e pequenos condutos periféricos que também vão sendo hierarquicamente ampliados, configurando uma rede de fluxo localmente mais volumosa.

Essa progressiva organização hierárquica de condutos de drenagem subterrânea acaba refletindo à superfície na configuração do relevo exocárstico, na medida em que a infiltração e o escoamento das águas superficiais (recarga) também vão sendo orientados para onde haja maior capacidade de escoamento subterrâneo. De modo que, tipicamente, na superfície cárstica há um apanhado complexo de formas negativas (dissolutivas) tais como as dolinas, mas também elementos como pavimentos rochosos desprovidos de solo e outras feições sinalizando locais em condições de boa drenagem hídrica subterrânea. Pode-se dizer que esses sistemas de drenagem subterrânea, que normalmente assumem um padrão ramificado, assemelham-se a uma típica rede de drenagem superficial hierarquizada, porém, com os níveis de base erosivos situados no interior dos maciços (Milanovic 1992), e as cabeceiras nos múltiplos pontos de absorção (infiltração) superficial.

Esta é a configuração de um sistema de drenagem cárstica envolvendo o fluxo “recarga – transmissão (fluxo/armazenamento) – descarga” hídrica, com suas respectivas zonas e mecanismos de absorção, circulação e evasão da água relativamente ao meio subterrâneo. Cada domínio reúne geoformas, materiais e condições hidráulicas próprias, cada qual exercendo determinada influência sobre o comportamento do sistema como um todo.

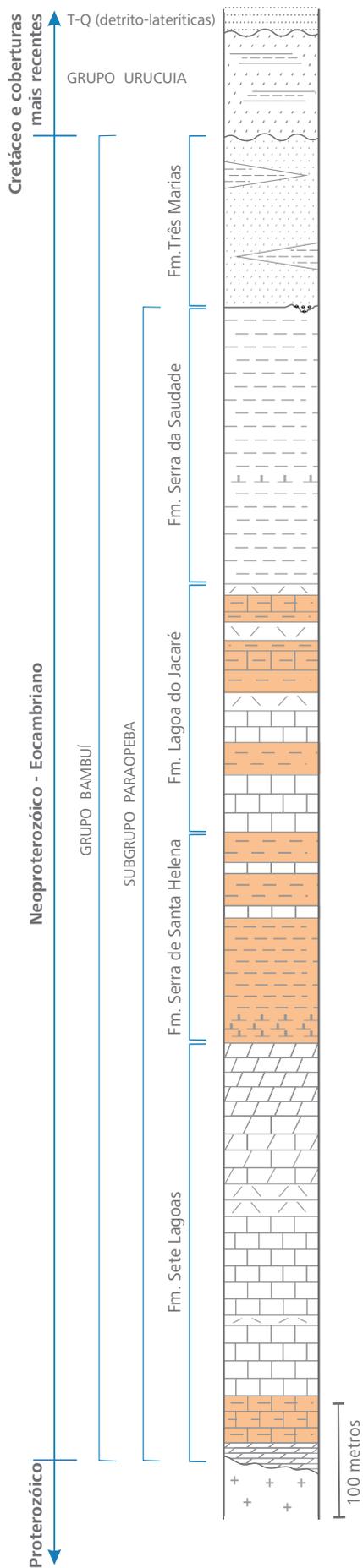


Figura 1.2.1. Coluna estratigráfica do Grupo Bambuí na região do vale do rio São Francisco na porção norte de Minas Gerais, caracterizada por unidades carbonáticas (cársticas) intercaladas por unidades siliciclásticas silto-argilosas (fissurais). O exemplo ilustra condições em que unidades menos permeáveis (em vermelho) podem constituir aquitardes, exercendo influência sobre padrões locais de carstificação. Montagem de Mylène Berbert-Born. Modificado de Iglesias e Uhlein (2009).

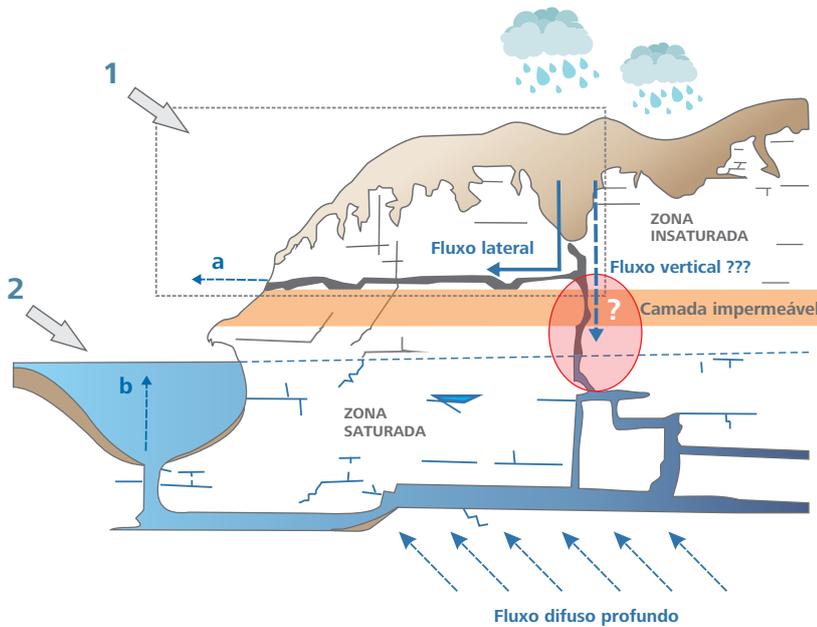


Figura 1.2.2. Camadas menos permeáveis (argilosas, silicosas, menos fraturadas...) funcionam como “selantes” dificultando ou retardando a infiltração vertical e favorecendo a percolação lateral. Esta condição pode ser determinante para o desenvolvimento de sistemas de condutos, tanto no que diz respeito à forma como também à posição, extensão e distribuição da rede no espaço. Isso pode ser muito importante na questão do isolamento ou conectividade entre sistemas aquíferos. Para compreender a estruturação e o funcionamento de sistemas cársticos é muito importante que a estratigrafia e a geologia estrutural local sejam conhecidas em detalhes. Dois sistemas (1, pontilhado) e (2) com locais de descarga muito próximos (a) e (b) podem funcionar de modo totalmente independente caso a conectividade sinalizada no círculo vermelho seja improvável em razão de uma unidade semiconfinante intercalada aos sistemas. Montagem de Mylène Berbert-Born. Modificado de Lee e Krothe (2001).

Tal como as bacias hidrográficas, esses sistemas servem como uma “célula de análise ambiental”, pois encerram uma cadeia completa de fluxo de matéria e energia vinculada a um conjunto controlado de elementos, parâmetros e variáveis.

O traçado dos sistemas recarga – fluxo/armazenamento – descarga pode ser então ponto de partida para o diagnóstico e avaliação de impactos sobre determinado ambiente cárstico. Nesse traçado, deve-se enfatizar com bastante atenção a organização e funcionamento das zonas de recarga, pois a dinâmica do sistema cárstico superficial-subterrâneo como um todo é sensivelmente dependente do modo como se dá o ingresso da água no sistema, interessando não apenas os volumes, mas também a distribuição espacial, as taxas (temporalidade e ritmos da absorção), a composição química, a carga sedimentar e eventuais cargas poluentes associadas. Todos esses aspectos estão relacionados com as condições da infiltração e do escoamento superficial, que podem ocorrer tanto de maneira concentrada, convergindo para determinados pontos como dolinas, sumidouros, fendas profundas no epicarste, como de maneira difusa, por exemplo, quando há dispersão pelo solo. A existência de mantos inconsolidados deve ser observada sempre com cuidado, pois abaixo deles pode haver um epicarste bem desenvolvido atuando na convergência da infiltração para porções mais carstificadas da rocha.

Um sistema cárstico de “recarga-fluxo/armazenamento-descarga” hídrica, integra zonas com geoformas, materiais e condições hidráulicas próprias, cada qual exercendo determinada influência sobre o sistema como um todo. Tal como as bacias hidrográficas, esses sistemas servem como uma “célula de análise ambiental”, pois encerram uma cadeia completa de fluxo de matéria e energia vinculada a um conjunto controlado de elementos, parâmetros e variáveis. O traçado desses sistemas pode ser ponto de partida para o diagnóstico e avaliação de impactos sobre ambientes cársticos.

O epicarste também pode ser considerado uma subzona bastante delicada no âmbito desse sistema, tanto pela sua relevância no processo de recarga dos sistemas subterrâneos, quanto pela dificuldade de ser visualizada, quando se encontra encoberta. Sendo a porção superficial do pacote rochoso que apresenta maior grau de carstificação, a permeabilidade é maior nessa zona comparativamente às porções rochosas subjacentes. Por causa dessa diferença de permeabilidade a infiltração tende a ser refreada causando um acúmulo de água nessas porções mais superficiais da rocha. Em decorrência, podem ser formados verdadeiros reservatórios superficiais atuando como “reguladores” da recarga subterrânea ao longo dos períodos secos e úmidos (Williams 1983, 2008). Por outro lado, estruturas preferencialmente carstificadas presentes nessas zonas podem atuar na drenagem da água que se encontra dispersa na cobertura, fazendo-a convergir para pontos específicos do sistema.

Assim, intervenções que causem modificações nos parâmetros do escoamento e da infiltração superficial em áreas de recarga, tais como mudanças no perfil topográfico e retirada da cobertura de solo, poderão ter reflexos significativos sobre todo o sistema até a jusante.

Até mesmo a retirada da cobertura vegetal pode causar impactos consideráveis, não somente de caráter físico, como a erosão decorrente, mas também de ordem química: redução da disponibilidade de CO_2 e do poder dissolutivo das soluções nas áreas desprovidas de vegetação; e incremento do CO_2 com renovação das soluções saturadas, em locais de acumulação de matéria orgânica.

Ainda no âmbito da zona recarga, todo aporte concentrado de água deve ser tratado com atenção especial, pois envolve locais de rápido acesso da água para o meio subterrâneo, com baixa capacidade de depuração e filtragem natural. Uma vez que a disponibilidade dos mananciais subterrâneos de regiões a jusante pode ser diretamente dependente do volume e da qualidade das águas que são injetadas nesses pontos, os impactos podem alcançar grande magnitude social e econômica. Todo o perímetro dessas áreas de recarga concentrada deve ter, portanto, um manejo adequado e o mais conservativo possível.

Outro aspecto fundamental da clássica cadeia genética e configuração de sistemas de drenagem cárstica aqui apresentada é a condição de escoamento (drenagem) do sistema hídrico: como visto, mais do que um parâmetro de dinâmica hídrica, o escoamento é um dos aspectos primordiais na própria estruturação do sistema.

As condições em que o escoamento se processa, dirigidas pelas características das áreas onde ocorre a descarga dos volumes subterrâneos (nascentes e ressurgências cársticas), chegam a influenciar no modo como se dá a captura hídrica nas cabeceiras e áreas de recarga. Consequentemente, influenciando também a própria condição química da água, que é variável conforme a cobertura de solo e vegetação, a dinâmica de infiltração e o tempo de residência (tempo em que fica em contato com a rocha) nas porções mais superficiais do bloco rochoso.

Sistemas que perdem a sua capacidade de vazão, por exemplo, por causa de barramento, assoreamento ou estrangulamento do fluxo, podem sofrer inundações remontantes com erosão associada. Rotas alternativas de fluxo podem surgir em decorrência, às vezes acompanhadas de alguma manifestação na superfície. Por outro lado, quando a capacidade de escoamento aumenta na descarga do sistema, o nível da água tende a baixar dando margem a processos erosivos. A capacidade de circulação e renovação das soluções aumenta, incrementando a dissolução do sistema. Neste caso pode ocorrer abandono de alguns canais e novas rotas de fluxo também podem ser estabelecidas em níveis inferiores.

Portanto, as zonas de descarga também são áreas sensíveis a intervenções. Além disso, são promitentes lugares para a compreensão da estrutura e do funcionamento dos sistemas subterrâneos, em especial as nascentes cársticas.

Nascentes cársticas equivalem aos exutórios superficiais de bacias hidrográficas, locais para onde converge todo o escoamento da água precipitada em certa área. Mais especificamente, em bacias cársticas as nascentes frequentemente representam o ponto de saída de toda água que escoou ou é temporariamente estocada num determinado compartimento ou rede de condutos e fissuras subsuperficiais conectados entre si e com a superfície (Mangin 1975, White 2002, Ford e Williams 2007). As condições hidrodinâmicas (vazão, ritmo de oscilações...) e as características da água (química, físicoquímica, orgânica...) nessa saída do sistema, monitoradas continuamente ao longo de um intervalo de tempo e comparadas, nesse mesmo tempo, às condições em que se dá a recarga no sistema (precipitação, contribuições de rios externos ao sistema, provimento artificial), podem dar indícios de retenções, dispersões, derivações no interior do sistema e reações químicas resultantes da interação com o meio. No balanço hídrico propriamente dito, em que são avaliados os volumes que entram e saem da bacia cárstica no intervalo de tempo, além das perdas por evapotranspiração devem ser descontadas as perdas de escoamento para fora da área de drenagem, além das retiradas artificiais (usos consuntivos diversos – indústria, agropecuária, abastecimento urbano etc.) que porventura ocorram no âmbito do sistema⁶.

· A dinâmica do sistema cárstico superficial-
· subterrâneo como um todo é sensivelmente
· dependente da organização e funcionamento
· das zonas de recarga. Mudanças na
· configuração física dessa zona com
· alterações nas condições naturais do
· aporte hídrico – seja quanto ao volume
· infiltrado, quanto à temporalidade e ritmo
· dos processos de absorção, ou quanto à
· composição química e carga poluente ou
· sedimentar da água absorvida – poderão
· se refletir sobre todo o sistema à jusante.
· As zonas de descarga também são áreas
· sensíveis a intervenções, pois definem a
· capacidade de escoamento dos sistemas
· de drenagem. Além disso, são promitentes
· lugares para a compreensão da estrutura e do
· funcionamento dos sistemas subterrâneos,
· em especial as nascentes cársticas, cujas
· características representam sinais de
· saída que ajudam a entender determinado
· processamento no interior do sistema.

6 Dependendo de como seja a cobertura pedológica, em termos de composição, extensão-distribuição e espessura, é importante estimar as razões infiltração/retenção capilar da água no solo, levando-se em consideração as condições de umidade do solo prévias ao momento do balanço hídrico.

Uma estratégia muito usada nesses estudos é o uso de algum elemento que possa ser inserido na entrada do sistema e seguramente detectado na saída, chamado *traçador*. Esses elementos são mais comumente substâncias diferenciadas do meio em estudo, mas também marcadores naturais que possam ser controlados na entrada e acompanhados na saída do sistema. Vale salientar que todos esses estudos também podem ser realizados em poços tubulares que estejam numa condição contextualmente representativa de um sistema aquífero ou de drenagem cárstica.

As informações hidrodinâmicas e hidroquímicas obtidas nas nascentes, e também em poços tubulares e segmentos de rios subterrâneos, podem ser retratadas em gráficos que desenham as curvas da variação temporal de diferentes parâmetros, entre os quais a vazão, temperatura, turbidez, pH, condutividade elétrica, concentração de metais dissolvidos, contaminantes e o sinal de recuperação de traçadores, entre outros. Nessa técnica, as curvas que registram a variação das vazões de escoamento ou descarga no decorrer de determinado tempo, denominadas hidrogramas (ou hidrógrafas), são combinadas às respectivas curvas de variação química (quimiogramas), e comparadas aos gráficos que descrevem os aspectos da recarga ou de algum estímulo que tenha sido produzido.

A figura 1.2.3 mostra padrões genéricos das “curvas de descarga” ou curvas de vazão (volume por unidade de tempo) que podem ser traçadas numa nascente cárstica, por exemplo, sinalizando o comportamento do sistema hídrico em resposta a algum evento de recarga do sistema.

A forma da curva representa o pulso do volume de recarga através do sistema, retratando basicamente a sua velocidade de propagação e as consequentes vazões máximas. Cada tipo de comportamento reflete a organização do aquífero combinando as características da recarga hídrica (concentrada ou dispersa), as condições de armazenamento (alto ou baixo) e as características do fluxo subterrâneo (em condutos ou difuso) dominantes no sistema (Smart e Hobbs 1986; Bonacci 1993).

Os sinais permitem diferenciar os sistemas com condições de rápido fluxo (em vermelho) daqueles de lenta resposta (em azul). O primeiro caso pode representar situações de intercâmbio hídrico mais direto entre superfície e subterrâneo (“sistemas abertos”), maior conectividade da porosidade de condutos, maior grau de carstificação, rotas mais curtas, retratando um maior grau de vulnerabilidade da nascente e respectivo sistema hídrico. Por outro lado, comportamentos mais “conservativos”, com respostas lentas, de uma maneira geral sugerem sistemas menos carstificados e mais homogêneos, o que assegura menor vulnerabilidade à respectiva nascente.

Com esse tipo de análise baseada na configuração e funcionamento do aquífero, Hobbs e Gunn (1998) sugerem quatro classes (grupos) de sistemas cujos limiares, ou situações “estritas” de recarga, armazenamento e fluxo da água refletem níveis gerais de sensibilidade do aquífero – hipersensíveis, muito sensíveis, moderadamente e pouco sensíveis – muito úteis para predições e avaliações de impacto. Porém, predições acerca do comportamento de aquíferos cársticos devem ser sempre cautelosas porque situações muito complexas podem estar envolvidas, tendo em vista o “continuum” de possíveis combinações das condições de recarga-armazenamento-fluxo, agravando-se quando hipóteses tais como a existência de múltiplos reservatórios e derivação entre sistemas sejam plausíveis.

Em qualquer caso, a interpretação envolve conceitos muito particulares relativos às propriedades aquíferas cársticas, que serão tratados resumidamente a seguir. Para conceitos mais aprofundados sobre hidrogeologia cárstica, em que são tratadas as especificidades espeleogenéticas de aquíferos livres (freáticos), semiconfinados e confinados⁷ podem ser consultados em Ford e Williams (2007) e Klimchouk (2015).

⁷ Enquanto os aquíferos livres possuem o topo ou superfície da zona saturada (lençol freático) apenas sob a pressão atmosférica, sendo “sustentados” por uma unidade basal menos permeável, os aquíferos confinados são unidades aquíferas (formações geológicas) delimitadas pela presença de unidades impermeáveis (ou pouco permeáveis) tanto na base como também no topo (limite superior), de forma que a água desses aquíferos geralmente encontra-se sob pressão maior que a atmosférica. É por causa dessa pressão que alguns poços perfurados em aquíferos confinados se tornam “jorrantes”.

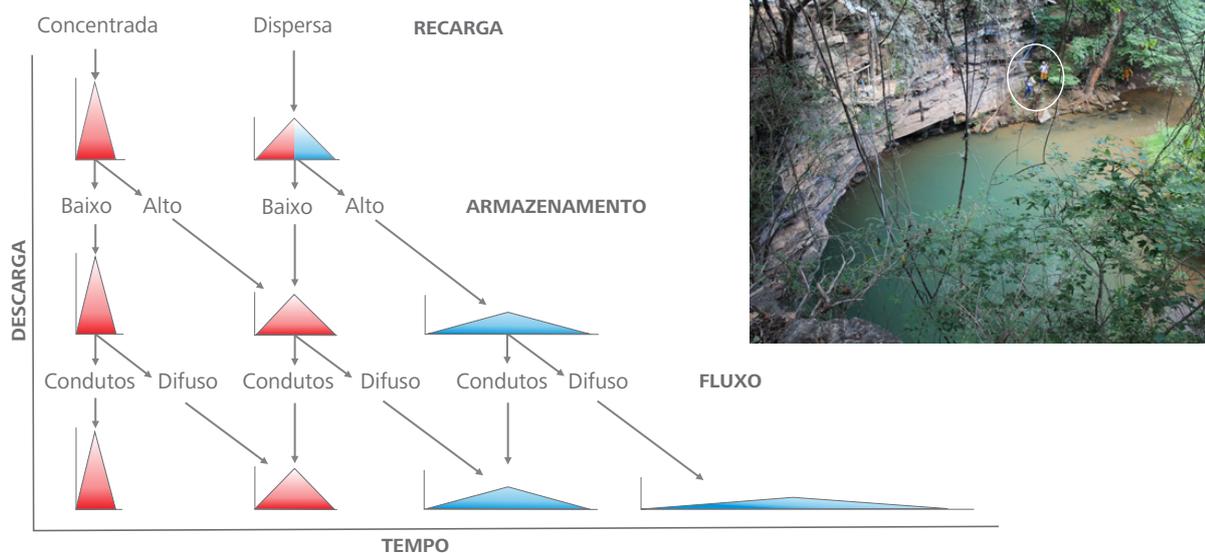


Figura 1.2.3. Padrões simplificados de curvas de descarga (hidrógrafas) que podem ser obtidas numa nascente cárstica como a da imagem (pessoas como escala), em resposta a um estímulo de recarga no correspondente sistema aquífero ou sistema de drenagem. Os traçados (respostas) derivam da combinação entre o tipo de recarga hídrica, as condições de armazenamento e as características do fluxo subterrâneo dominantes no sistema, conforme Smart e Hobbs (1986, modificado). As cores indicam a sensibilidade e o grau de vulnerabilidade de cada sistema: vermelho = mais sensíveis e vulneráveis; azul = mais estáveis e menos vulneráveis. Montagem e foto: Mylène Berbert-Born.

Características importantes do aquífero cárstico

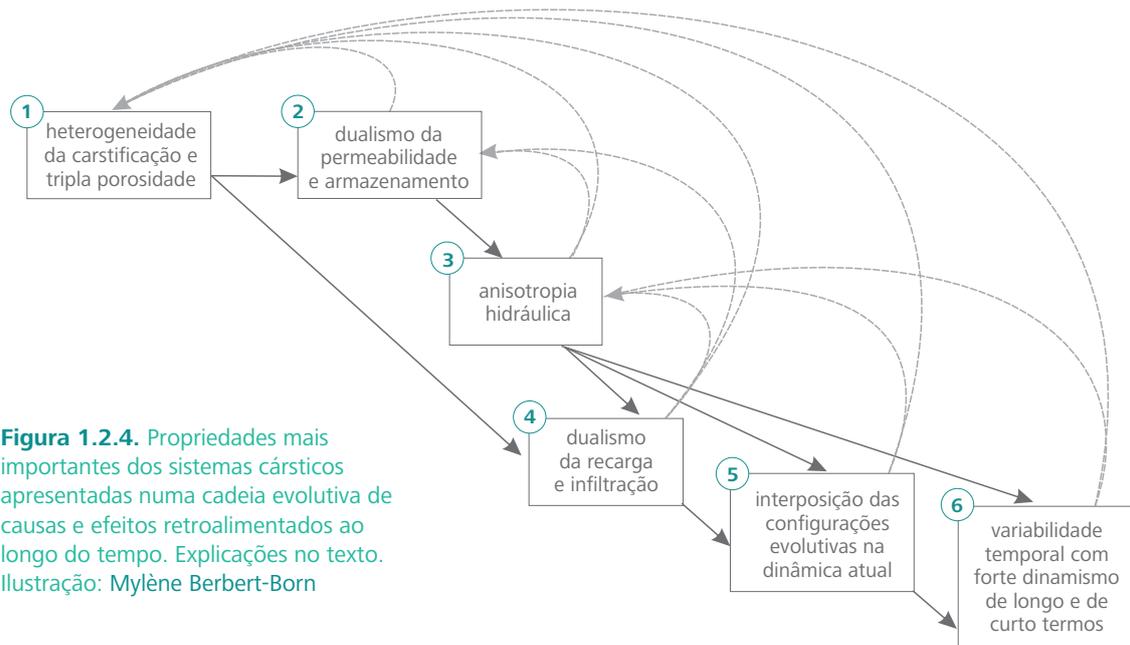
Boa síntese das propriedades físicas fundamentalmente relacionadas ao processo de carstificação é apresentada por Goldscheider et al. (2007), compreendendo seis aspectos pertinentes à condição aquífera do carste que precisam ser levados em consideração de uma maneira especial nos estudos ambientais. São aspectos hidrogeológicos que retratam o modelo conceitual geral da formação, estruturação e funcionamento de áreas cársticas. O modelo constitui uma cadeia genético-evolutiva de causas e consequências em *feedback* ou retroalimentação (Taylor e Greene 2008), conforme esquema da figura 1.2.4, enumerada e explanada a seguir.

(1) Heterogeneidade da carstificação e tripla porosidade da rocha

A dissolução diferencial da rocha, orientada pela organização litoestratigráfica e pelas estruturas sedimentares e tectônicas presentes num dado contexto geológico, configura uma terceira porosidade caracterizada por espaços mais volumosos que se concentram em algumas porções do pacote rochoso, articulando-se com a porosidade primária da matriz rochosa e a porosidade estrutural de fraturas também existentes na rocha. Conforme ilustrado na figura 1.2.5, essa tripla porosidade tem o seguinte caráter: porosidade granular relativamente uniforme da matriz rochosa (pouco expressiva em rochas carbonáticas puras) + porosidade “difusa” de fissuras (mais densamente disseminada na rocha) + porosidade “localizada” de sistemas de condutos de dissolução (concentrada em apenas algumas porções do bloco rochoso como um todo e organizada hierarquicamente). Cada tipo de porosidade tem características hidráulicas individuais bem distintas, e a combinação delas cria um padrão de armazenamento e circulação muito heterogêneo e peculiar, como apresentado nos próximos itens.

(2) Dualismo do fluxo e armazenamento da água

O aquífero cárstico pode ser considerado muito permeável e um ótimo reservatório se tomado globalmente, porém, numa condição muito heterogênea. Existe um dualismo caracterizado pela alta condutividade hidráulica (fluxo rápido), mas baixos volumes de armazenamento associados à parcela da macroporosidade de condutos cársticos, em meio a uma condição geral de menor permeabilidade (fluxo lento) das fraturas. Por sua vez, tomadas em conjunto e na perspectiva global do aquífero, estas apresentam os maiores volumes de água estocada. Isso significa que as condições hidráulicas são muito relativas frente à escala espacial considerada, com rebatimentos práticos para os estudos ambientais. A figura 1.2.6 ressalta diferentes domínios da porosidade, por conseguinte das condições hidráulicas, que podem existir dentro de um contexto regional cárstico. Os resultados de estudos centrados em um ou em outro domínio deverão ser circunstanciados adequadamente quanto a sua representatividade para todo o ambiente potencialmente afetado.



(3) Anisotropia hidráulica

É a condição de heterogeneidade ou variação espacial das propriedades hidráulicas em um meio aquífero, que no caso dos aquíferos cársticos resulta da coexistência de três tipos de porosidades distintas, entre as quais, a porosidade de condutos que se desenvolve de forma bastante irregular.

(4) Dualismo da recarga e infiltração

Como causa e também consequência do grau e organização da carstificação na superfície e no subterrâneo, há dualismos tanto no modo como na origem da recarga. Quanto ao modo, há parcelas da água precipitada (i) que infiltram de maneira difusa pelo solo e percolam lentamente a zona insaturada, inicialmente de maneira dispersa através da densa malha de fissuras que marca o topo do epicarste, convergindo gradativamente para rotas preferenciais de escoamento, na medida em que o fluxo migra para o endocarste; e (ii) cujo escoamento superficial converge diretamente para o meio subterrâneo, de maneira pontual e concentrada, alcançando rapidamente a zona saturada. Na primeira situação, além da infiltração difusa e bem distribuída permeando o solo, a coleta também pode ser dispersa através de múltiplos conjuntos de fendas e fraturas que afloram à superfície. A segunda condição por sua vez pode ocorrer tanto pelo direcionamento e concentração do escoamento superficial (e subcutâneo) para pontos específicos do terreno, ao fundo de dolinas ou depressões fechadas conforme já visto, como também por rios cujos leitos superficiais convertem subitamente para condutos subterrâneos (e.g. sumidouro de rio ou rio que perde água por infiltração em algum ponto do próprio leito); e ainda pela coleta direta da chuva por fendas profundas ou “chaminés” (*shafts* ou poços) que ligam a superfície diretamente aos condutos subterrâneos.

Quanto à origem da recarga, haverá uma parcela autigênica ou interna ao sistema ou bacia aquífera considerada, envolvendo as águas precipitadas diretamente sobre o carste, podendo também haver, em muitos casos, uma parcela alogênica ou externa, retratando contribuições hídricas provenientes de fora do sistema aquífero ou bacia. As contribuições alogênicas podem advir tanto da superfície, a partir de rios que adentram domínios cársticos trazendo águas não cársticas, como do próprio subterrâneo, a exemplo da transferência de águas entre diferentes unidades aquíferas. Todos esses aspectos da recarga encontram-se ilustrados na figura 1.1.2, apresentada ao início capítulo.

(5) Interposição de configurações evolutivas

A dissolução carbonática é um processo fisicoquímico que leva à decomposição e perda relativamente rápida da rocha, como já discutido. Esse fenômeno tem uma cadeia de consequências estabelecida de maneira igualmente célere, em que cenários geomorfológicos e hidrodinâmicos são modelados e remodelados rápida e progressivamente conforme variam as condições hidráulicas, os padrões de fluxo (condições fissurais de fluxo laminar evoluem para rede de condutos com fluxo turbulento), o aumento da conectividade e ulterior fragmentação dos sistemas, e a própria taxa ou velocidade dos processos evolutivos em razão da dinâmica crustal, das condições hidroclimáticas e química da água.

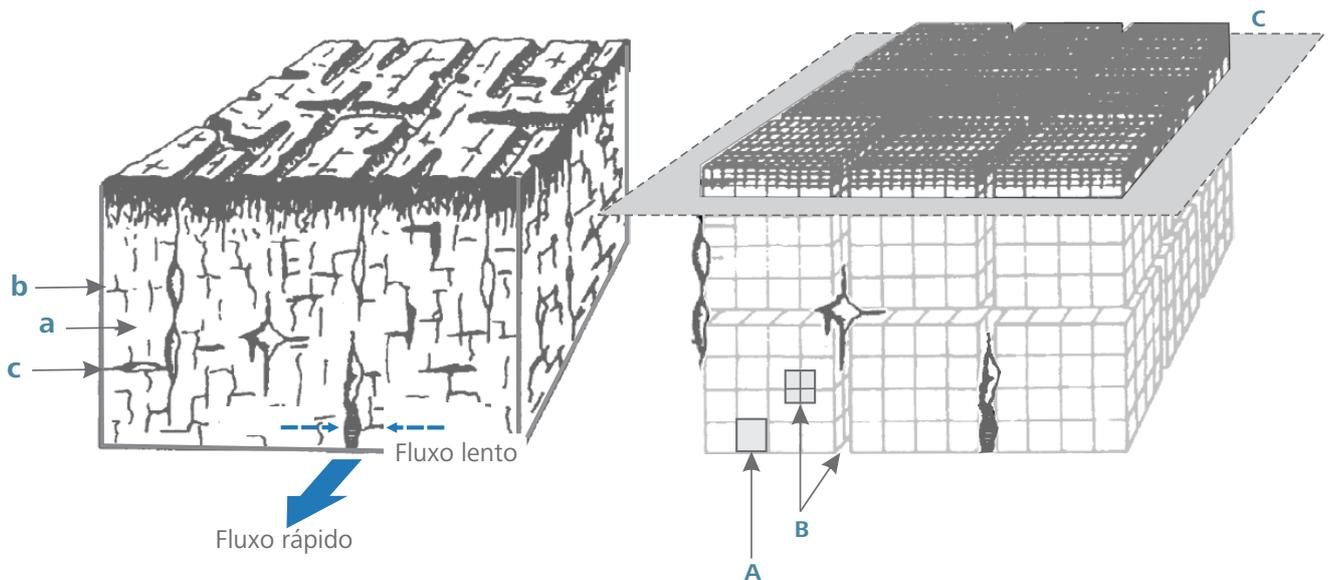


Figura 1.2.5. Modelo de organização da tripla porosidade cárstica, uma combinação espacialmente heterogênea das porosidades (a) granular (matriz rochosa), (b) de fissuras (ou fraturas) e (c) de condutos de dissolução. O bloco da esquerda mostra os condutos de dissolução atuando como drenos (receptores/condutores) da água que flui lentamente pelas fraturas e espaços intergranulares. O bloco da direita retrata um modelo conceitual simplificado para os aquíferos cársticos, representando a sua condição global de permeabilidade: redes de condutos de alta permeabilidade entremecendo um meio rochoso de baixa permeabilidade global. Nas diversas escalas, as diferentes porosidades constituem blocos ou “domínios” em que determinada condição prevalece: (A) permeabilidade muito baixa; (B) permeabilidade combinada de fissuras e condutos de dissolução drenantes; (C) parte mais superficial com maior grau de carstificação (epicarste), significativamente mais permeável do que as porções mais profundas do bloco rochoso. Essa diminuição da permeabilidade causa um retardo na infiltração vertical, favorecendo a formação de reservatórios mais superficiais. Montagem de Mylène Berbert-Born. Modificado de Drogue (1992).

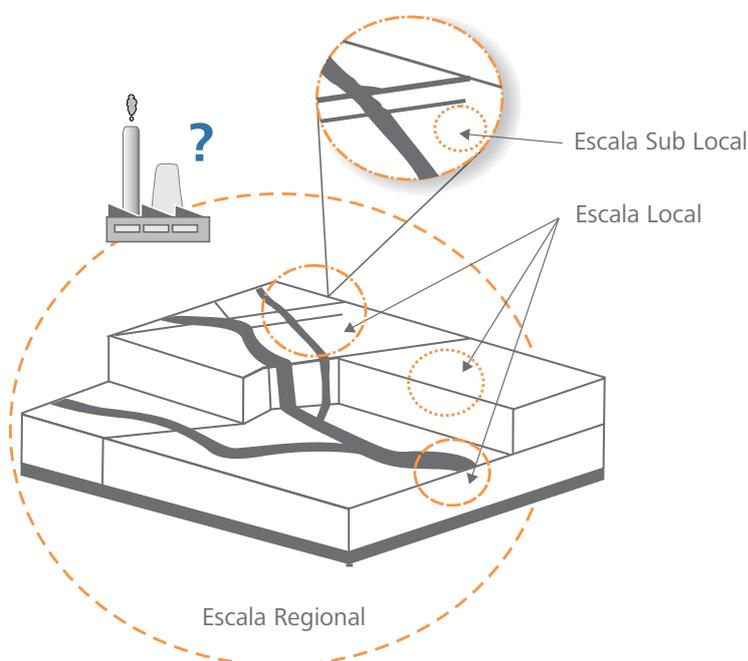


Figura 1.2.6. Heterogeneidade da tripla porosidade de aquíferos cársticos observada sob uma perspectiva escalar, considerando possíveis domínios espaciais onde prevalecem condições hidráulicas não representativas do contexto regional. É importante que empreendimentos ou atividades em áreas cársticas sejam contextualizados quanto à sua situação nesses possíveis domínios hidrogeológicos. Montagem de Mylène Berbert-Born. Modificado de Worthington (2003) a partir de Sauter (1992).

A figura 1.2.7 mostra a evolução (não cíclica) de um terreno cárstico com a progressão da carstificação, retratando a paulatina modelagem de um relevo com formas negativas de absorção hídrica e formas positivas residuais da erosão, que acompanha o incremento da porosidade de condutos e da conectividade das redes de drenagem. Os estágios mais avançados culminam com o isolamento e fossilização de fragmentos dos sistemas de drenagem mais antigos, geralmente associados a um significativo rebaixamento do nível de base regional.

Tais cenários ou estágios evolutivos vão sendo superados, mas frequentemente deixam algum registro do seu momento, algum aspecto, feição ou sinal representando uma “memória” do processo de evolução. Essa evolução às vezes pode ser reconstituída com relativa facilidade em vista da “clareza” das evidências preservadas; outras vezes é embaraçada porque as evidências já foram muito obliteradas e mesmo destruídas pelas fases subsequentes. A questão é que, no carste, os processos atuais podem ser influenciados em maior ou menor grau por remanescentes das configurações ambientais passadas, tornando muito frágeis os diagnósticos, análises e, especialmente, projeções e previsões que estejam amparadas estritamente na “arquitetura” mais evidente.

Assim, a existência de múltiplas estruturas morfogenéticas que, articuladas, comandam o funcionamento atual do carste configura um critério ambiental para estudos aprofundados que busquem reconstruir a história geodinâmica e os padrões evolutivos do ambiente, requisito especialmente útil ao diagnóstico de parâmetros – nem sempre muito explícitos –, que podem desempenhar papel importante sobre os processos ativos.

No carste, os processos atuais podem ser influenciados em maior ou menor grau por remanescentes das configurações ambientais passadas, tornando muito frágeis os diagnósticos, análises e, especialmente, projeções e previsões que estejam amparadas estritamente na “arquitetura” mais evidente.

O reconhecimento das estruturas ou padrões herdados de fases evolutivas pretéritas pode potencializar bastante programas de amostragem e monitoramento (hidroquímico, hidrodinâmico, sedimentológico, biológico etc.) porque tornam mais compreensíveis e previsíveis os fenômenos a serem descritos e analisados.

O reconhecimento dessas estruturas ou padrões herdados de fases evolutivas pretéritas pode potencializar os programas de amostragem e monitoramento (hidroquímico, hidrodinâmico, sedimentológico, biológico etc.) porque tornam mais compreensíveis e previsíveis os fenômenos a serem descritos e analisados. Pode favorecer ainda a “extrapolação dos padrões” para análises probabilísticas, uma ferramenta prospectiva por vezes muito útil. Tudo isso atua em favor de uma abordagem mais dirigida, a prognósticos mais precisos dos impactos produzidos por alguma perturbação no meio.

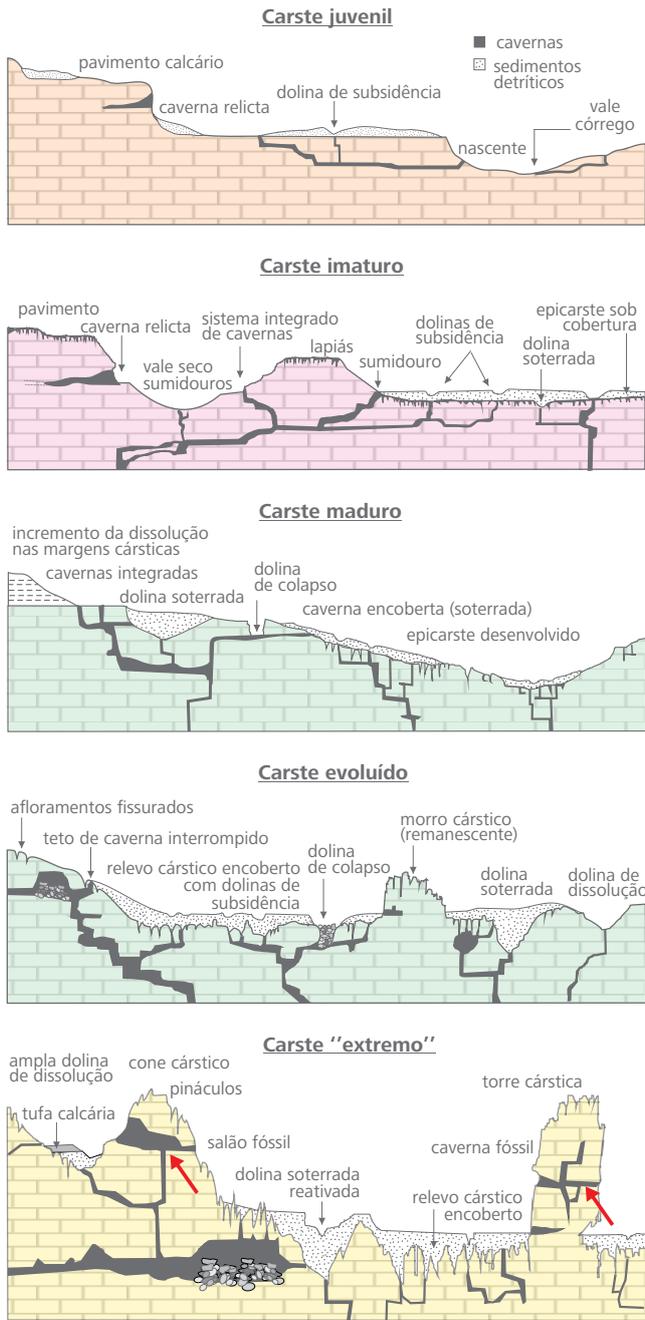
Em suma, a relação entre os processos ativos e seus agentes controladores muitas vezes encontra explicações em arcabouços passados que precisam ser remontados ou reconstituídos da melhor maneira possível.

(6) Variabilidade temporal e forte dinamismo hidráulico

A variabilidade temporal dos fenômenos hidráulicos (inversões de cargas hidráulicas, mudanças nos regimes e direções de fluxo, as amplitudes e variações de nível, e variações hidroquímicas temporais) com forte dinamismo de longo e de curto termos (rítmos, ciclos, respostas a estímulos pontuais), é uma das expressões ou consequências mais notáveis dos aspectos anteriormente listados. Uma característica que merece destaque é o que se pode chamar de “bimodalidade” ou caráter temporalmente bifásico muitas vezes apresentado pelos fenômenos hidráulicos nos sistemas cársticos, em função dos dualismos relativos aos tipos de infiltração, regimes de fluxo e organização dos reservatórios de água. Esse caráter manifesta-se notadamente por fenômenos que acontecem em pulsos, muitas vezes com retardos relativos a determinados estímulos como um evento de chuva torrencial. Esse comportamento bifásico reflete, num extremo, as fases ou parcelas mais rápidas e dinâmicas relacionadas à atividade dos condutos de dissolução, contrapondo, no outro extremo, as frações mais lentas relacionadas aos compartimentos fraturados ou maciços, ou a porções distais conectadas ao sistema. A condição de dinamismo tão peculiar aos sistemas cársticos é o reflexo mais assertivo da complexidade relativa à organização e ao funcionamento desses sistemas, que dificultam sobremaneira a gestão dos seus territórios.

Um exemplo de como o dinamismo hídrico pode ter reflexos na organização espacial das bacias aquíferas é ilustrado pela figura 1.2.8, em que se destaca a conectividade das redes de fissuras e condutos, e a ativação hidrológica de diferentes sistemas de drenagem a partir da oscilação sazonal do nível d’água. No esquema, os sistemas de drenagem identificados como (A) e (B) são independentes nos períodos secos, com padrões de fluxo e áreas de contribuição (bacias coletoras) distintas, cada qual ditando o comportamento das respectivas nascentes (a) e (b) à jusante.

EVOLUÇÃO DO RELEVO CÁRSTICO

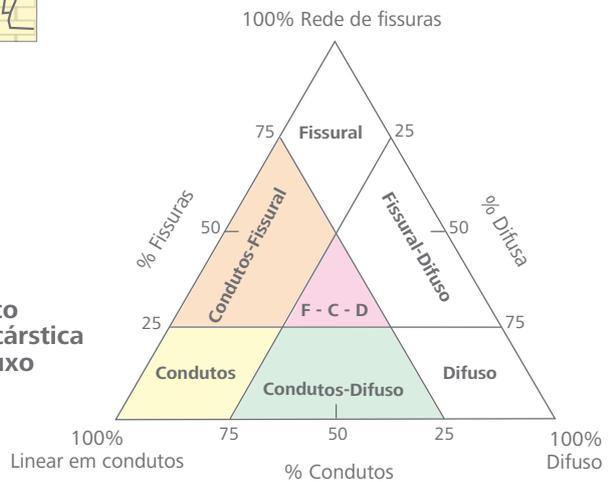


Aumenta a conectividade

Aumenta a fragmentação

Figura 1.2.7. Evolução de um terreno cárstico com a progressão da carstificação. O incremento da porosidade de condutos e da conectividade das redes de drenagem conduz à paulatina modelagem de um relevo com formas negativas de absorção hídrica e formas positivas residuais da erosão. O estágio mais avançado evidencia a situação de fragmentação e isolamento de segmentos de antigos sistemas de drenagem, assinalados pelas setas vermelhas (quadro inferior). Muitas feições remanescentes têm algum tipo de atuação na dinâmica recente, a exemplo de fragmentos de condutos inativos responsáveis pelo extravasamento e interligação de bacias aquíferas em períodos de cheia. Montagem de Mylène Berbert-Born. Modificado de Atkinson 1985 (diagrama abaixo) e de Waltham e Fookes 2005 (quadro à esquerda).

Desenvolvimento da porosidade cárstica e regimes de fluxo



A primeira situação retrata a configuração hidrológica de base do sistema regional. A conexão hídrica dos dois sistemas, estabelecida nas condições de cheia e conforme o gradiente hidráulico ilustrado pelas setas presentes no segundo quadro demonstra a ampliação da bacia de contribuição do sistema (B) e, portanto, novo conjunto de fatores influenciando o comportamento da nascente associada a ele. Trata-se de um exemplo mostrando como a “área de influência” de uma nascente pode variar no tempo.

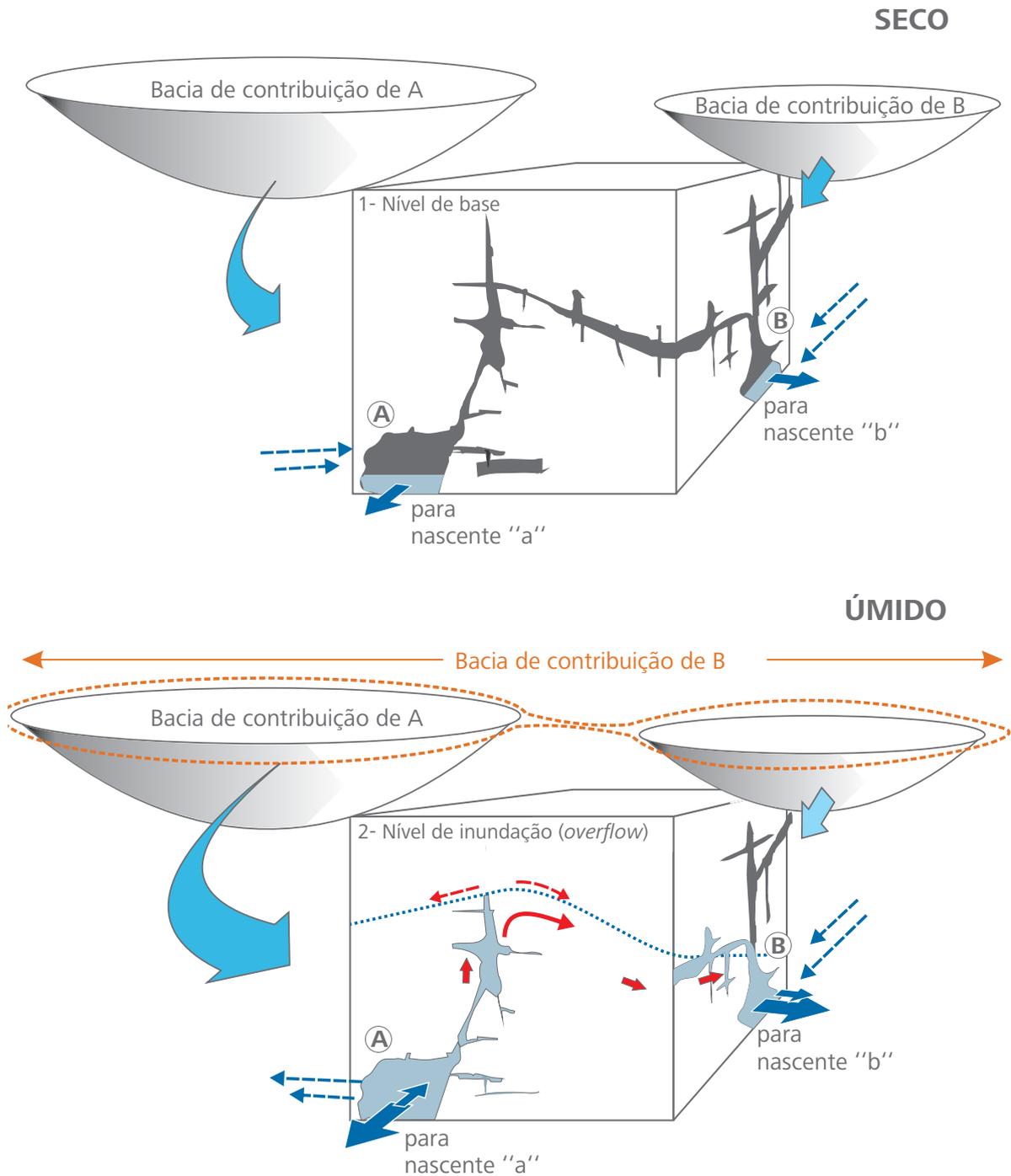


Figura 1.2.8. Conexão sazonal de dois sistemas de drenagem.

Nos períodos secos, os sistemas são mutuamente independentes, com bacias de contribuição distintas. Nos períodos úmidos os sistemas são conectados com o extravasamento (*overflow*) do sistema (A) para o sistema (B), de acordo com o gradiente assinalado pelas setas de fluxo vermelhas. A bacia hidrológica desse segundo sistema é momentaneamente ampliada, abarcando a área de contribuição do primeiro. Outras explicações no texto. Ilustração: Mylène Berbert-Born.

1.3. SISTEMAS E GEOSSISTEMAS – VISÃO GERAL APLICADA

Pensar sistemicamente é ser capaz de ver a floresta E as árvores (Senge, 1998). Analogamente, é enxergar o carste e os elementos da dissolução.

Floresta é um “conceito” que emerge da reunião de árvores cobrindo certa extensão de área, numa dada situação geográfica⁸. A diversidade de florestas retrata grande variedade de condições e processos que determinam os tipos específicos de árvores, sua distribuição, perfis, além dos mecanismos envolvidos na dinâmica do conjunto, incluídos clima, solo, fauna e suas respectivas interações. Da sinergia entre seus elementos específicos, regulada por fatores dominantes, é que a floresta adquire uma identidade global própria (Floresta Ombrófila densa/aberta, Floresta Estacional decidual/semidecidual, Caatinga arbórea, Floresta Plantada...) e funções específicas para si mesma e para o universo que a cerca, que são propriedades emergentes do “todo”. A estabilidade da floresta e sua vulnerabilidade frente a determinado “estímulo” dependem da sua constituição vegetal (árvores), substratos, mecanismos de interação, organização setorial e global de todos os constituintes; assim como a estabilidade e vulnerabilidade de cada árvore também dependem da própria condição da “unidade florestal” como um todo.

O carste deve ser entendido da mesma maneira, globalmente: um conjunto organizado de certos elementos característicos que existem sob circunstâncias específicas, relacionam-se e interagem coordenadamente mediante mecanismos ou processos definidos produzindo efeitos discerníveis, configurando assim um cenário ou mosaico de cenários com características próprias e comportamento típico, sendo por isso delimitável como um sistema distinto. Para uma visão verdadeiramente sistêmica do carste, é necessário que todos esses quesitos sejam reconhecidos: constituintes, estrutura, funcionamento e fatores controladores, bem como suas funções internas (autorreguladoras) e externas. Isso será esmiuçado no tópico 1.4 – Geossistema Cárstico.

Uma das questões cruciais de qualquer análise sistêmica é que, a partir de critérios de composição (constituintes), organização (estrutura) e comportamento (funcionamento) pode-se definir com maior acurácia, para dada escala analítica, as fronteiras ou os limites do cenário ou ambiente de análise, que é uma das premissas mais importantes da avaliação de impactos ambientais. Basicamente, o ambiente de análise é o que se busca reconhecer como o “todo” no qual as condições de estabilidade, sensibilidade e vulnerabilidade podem ser observadas com melhor nitidez.

Neste tópico são explorados estes e outros conceitos que ajudam a trabalhar os critérios da análise sistêmica na realidade dos ambientes cársticos, especialmente para as finalidades dos estudos de impacto ambiental.

Definindo um sistema

Quando é possível reconhecer, em meio a um universo qualquer concreto ou abstrato, certo conjunto de elementos organizados exercendo interações que produzem efeitos perceptíveis, de tal maneira que pode ser descrito um cenário com característica própria, comportamento típico e determinada finalidade ou função, tem-se delineado um sistema.

Nesses termos, a identificação de um sistema pressupõe o traçado de um limite suficientemente nítido, ainda que imaginário, que defina a sua abrangência; ou seja, uma fronteira em que os elementos e processos que o caracterizam podem ser discernidos do ambiente (meio) externo a ele. O limite é arbitrado em função de algum propósito ou foco de interesse, levando-se em consideração critérios composicionais, estruturais, funcionais ou finalísticos convenientes (Christofolletti 1999).

O mesmo contexto ambiental pode então conter inúmeros sistemas: de caráter espacial, temporal, conceitual etc.. Por exemplo, em certo espaço geográfico onde existem rochas carbonáticas carstificadas poderá haver, do ponto de vista funcional e composicional respectivamente, a sobreposição perfeita de dois sistemas hipógeos (subterrâneos): um sistema hidrológico e um sistema biológico aquático. E, relativamente a estes, a sobreposição parcial ou interseção de outros tipos de sistemas, a exemplo de sistemas sedimentares envolvendo erosão e agradação, sistemas faunísticos e florísticos. A figura 1.3.1 ilustra a situação.

⁸ Segundo definição da FAO-Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação: “Floresta – área medindo mais de 0,5ha com árvores maiores que 5m de altura e cobertura de copa superior a 10%, ou árvores capazes de alcançar estes parâmetros *in situ*. Isso não inclui terra que está predominantemente sob uso agrícola ou urbano”. (FAO 2012).

Por alguma conveniência analítica, todos os limites “temáticos” apontados no exemplo podem ser integrados para constituir o limite de um único sistema, seja um **ecossistema cárstico – determinada ocupação biológica de um meio físico específico**, ou um **geossistema cárstico – determinado meio físico com potencial específico de exploração biológica**. Vale dizer que, uma vez integrados, cada sistema toma a identidade de subsistemas interativos no sistema maior. Por causa do novo “conteúdo”, sobretudo dos resultados – agora visíveis – das interações dos subsistemas, é que o sistema maior adquire novas propriedades, que só aparecem sob a perspectiva do todo.

A despeito da subjetividade no “recorte” de um sistema, a delimitação é um aspecto fundamental para efeitos práticos da análise sistêmica. Um objetivo frequente em estudos ambientais é compreender como determinado ambiente reage quando suas condições estruturais são perturbadas, ou se os fatores que controlam seu funcionamento são alterados. Esse tipo de investigação muitas vezes é amparado por modelagens analíticas, usualmente modelos prescritivos (idealizam situações), prospectivos (exploram possibilidades) e preditivos (projetam situações), envolvendo ensaios de hipóteses e exploração de cenários sob condições controladas. Essas análises requerem parâmetros objetivos – quem/quanto/onde/quando – ainda que o propósito da modelagem seja justamente testar a coerência da delimitação do sistema ao critério escolhido.

Considerar a existência de limites não significa, no entanto, isolar ou fechar o sistema relativamente ao meio que o cerca. Particularmente no caso de sistemas ambientais naturais, trata-se de “sistemas abertos”, pois normalmente há interações com outros sistemas e troca de energia e matéria com o “ambiente externo” que garantem sua manutenção e funcionamento, conduzindo sua evolução no tempo. Essa relação com o seu meio externo é justamente o que mantém os sistemas dinâmicos e adaptáveis; do contrário, estariam sujeitos a uma evolução finita sempre previsível – o equilíbrio estável – unicamente coordenada pelo seu estado inicial⁹.

Acontece que, frente ao Princípio da Conservação da Energia (1ª Lei da Termodinâmica), os processos internos de um sistema que utilizam e “produzem” algum tipo de energia dependem necessariamente da entrada de insumos (energia e matéria). As entradas são as chamadas interações de “*input*”, identificadas relativamente à fronteira do sistema. Os fatores externos que controlam os processos internos constituem o ambiente influente do sistema, ou simplesmente o ambiente do sistema. Esse ambiente também retrata em si um sistema que, num sentido figurativo, pode ser chamado de “antecedente” (Christofoletti 1999). Quando é possível conferir limites geográficos ao ambiente influente ele toma caráter de **área de influência**, espaço físico reunindo os fatores que exercem influência relevante – direta ou indireta – sobre um sistema em foco.

Uma vez que energia e matéria adentrem continuamente o sistema, como é o caso de sistemas abertos, o fluxo interno gerado (“*throughput*”) não pode ficar unicamente circulando dentro do próprio sistema, acumulando no seu interior indefinidamente. A partir da configuração e interações dos componentes acontece algum tipo de processamento, sua transformação para novos estados (a “produção” interna do sistema), seu reuso nos diversos níveis de processos internos, eventualmente uma armazenagem temporária, e de alguma forma aquilo que entra no sistema sai numa condição em geral bastante diferente daquela que entrou.

A saída, que representa uma perda relativa do sistema, é também chamada condição de “*output*”, igualmente alusiva a uma fronteira convencional para o sistema. As interações que acontecem na saída do sistema retratam a influência que o próprio sistema também exerce sobre o ambiente externo, num contexto subsequente sob o ponto de vista relativo temporal, e em alguns casos até mesmo espacial quando se trata, por exemplo, de uma cadeia de “sistemas em cascata”. De forma que a saída (*output*) de um sistema pode ser a entrada (*input*) de outro “subsequente” (Chorley e Kennedy 1971; Christofoletti 1999).

Analogamente à área de influência “sobre” determinado sistema, o ambiente geográfico que recebe e é estimulado por aquilo que sai de um dado sistema (seu *output*) também faz parte da área de influência desse sistema. O que acontece no ambiente (externo) do sistema a partir do “*output*” pode retroagir sobre os fatores de “*input*”, estabelecendo-se uma cadeia não linear de causas e efeitos. De modo que, territorialmente falando, a área de influência de um sistema ambiental delimita o alcance espacial (geográfico) dos fatores, elementos e processos que interagem de maneira relevante com esse sistema, sempre tendo como referência as fronteiras estabelecidas para ele. Devido a questões de proximidade, convergência e afinidade para com o sistema, as áreas de influência devem ser observadas sempre com muita cautela, pois, além dos aspectos influentes mais notórios, nessas áreas existe uma probabilidade maior de residirem outros fatores governantes e governados que estejam circunstancialmente menos evidentes.

9 Conforme os Princípios da Termodinâmica: Primeira Lei – Princípio da Conservação da Energia, em que a energia (potencial x cinética) pode ser transformada de um tipo para outro, mas não pode ser criada nem perdida; e Segunda Lei – Princípio da Entropia, que trata da evolução de um sistema ao estado de equilíbrio termodinâmico. Em sistemas isolados, partindo-se de um estado energético inicial, ao longo do tempo há perda gradual da energia livre capaz de produzir trabalho, representando o aumento da entropia e do grau de irreversibilidade ou desordem do sistema (Chorley 1962).

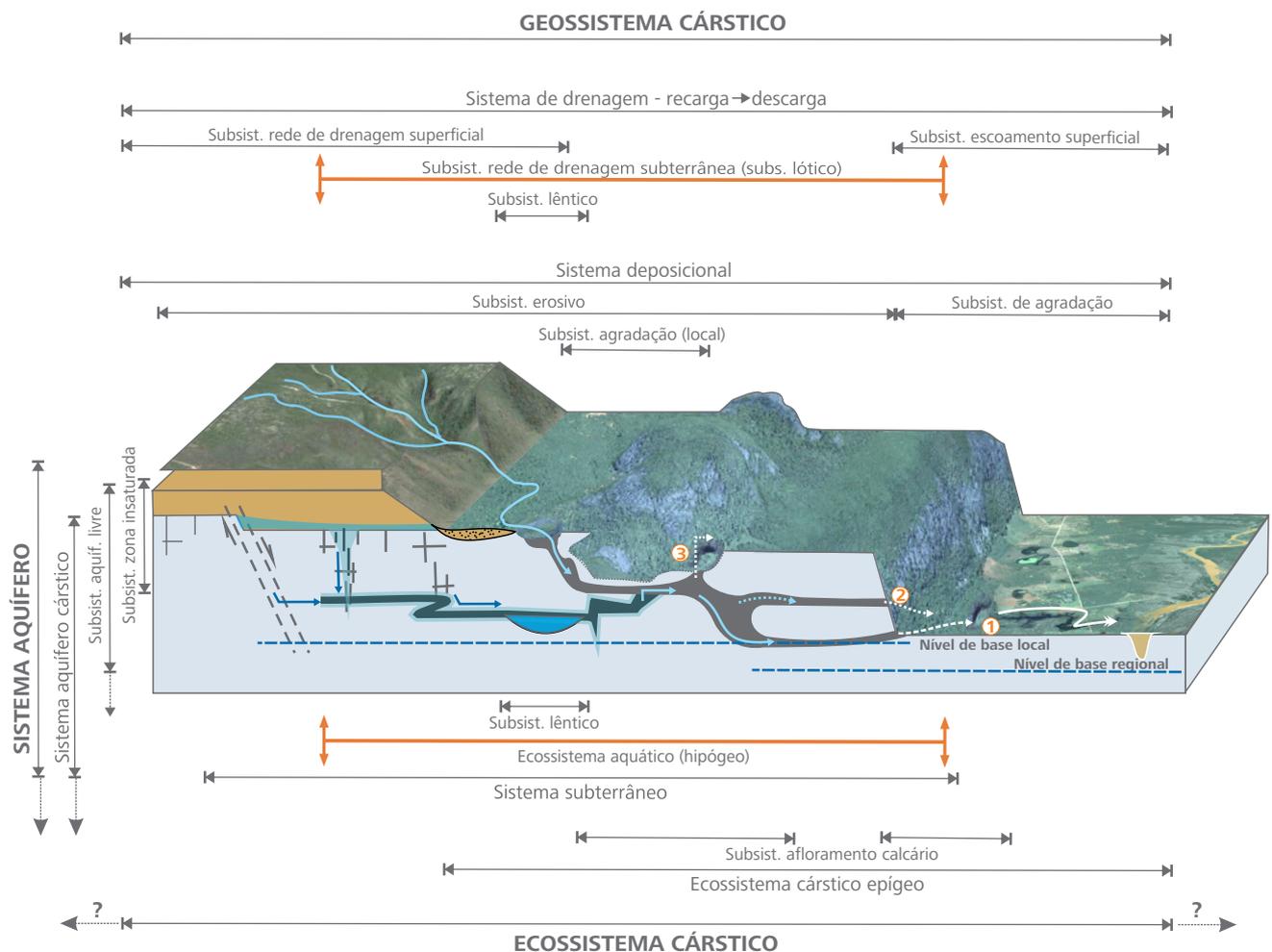


Figura 1.3.1. Alguns exemplos de sistemas e subsistemas articulados em um “espaço cárstico” (sobrepostos, com interseções, em cadeia...). (1) descarga de nível de base (mínimo); (2) descarga de cheia (transbordamento ou *overflow*); (3) estavelle – descarga eventual em períodos de alta hídrica. Explicações mais detalhadas no texto. Ilustração: Mylène Berbert-Born.

A figura 1.3.2 sintetiza simbolicamente um sistema e todos os aspectos que envolvem a sua definição. O sistema em destaque (vermelho) é definido em função de elementos que se relacionam e apresentam características específicas, no caso, estrelas com determinado padrão de cor, tamanho e forma sobressaindo em meio a um “universo” bastante denso e heterogêneo. O limite é arbitrado pelo espaço circular que circunscreve tal conjunto em específico, conforme o quadro (a) da figura. Os fatores e elementos que exercem influência e forte controle sobre o sistema (input) são representados pelas setas finas e grossas respectivamente, os quais compõem o “ambiente influente” do sistema (quadro b). Sistemas influenciados e controlados por tudo aquilo que “sai” do sistema também se encontram figurados por setas, incluindo ainda outro conjunto externo de elementos (“sistema subsequente”) que pode ser reconhecido pelas características “derivadas” do sistema em foco (estrelas também vermelhas, porém noutro tamanho e forma). Internamente, as redes de interação entre os componentes do sistema estão apenas esboçadas. Os quadros (c - d) são rapidamente explicados na legenda da figura, e estão relacionados aos conceitos que serão expostos à frente.

A questão das entradas e saídas de um sistema está realmente entre as mais importantes no escopo de qualquer análise sistêmica. Ela pode ser compreendida tal como um balanço de energia e massa: a diferença quantitativa entre o que entra e o que sai do sistema num certo intervalo de tempo é o que fica armazenado internamente naquele período estrito; enquanto a diferença qualitativa retrata os processamentos que ocorrem internamente.

Expresso de outra maneira, o balanço entrada-saída (*input-output*) espelha a própria configuração interna momentânea do sistema, o retrato de um estado transitório, função do tempo. Se não há variação do estado ao longo do tempo, ou há variação constante, então o sistema encontra-se perfeitamente ajustado aos fatores influentes externos, numa condição estável (de equilíbrio ou equilíbrio dinâmico) que será mantida enquanto as condições externas permanecerem inalteradas ou variáveis dentro da amplitude suportável pelo sistema (Howard 1965; Brunsten e Thornes 1979; Christofolletti 1979).

Vale destacar que muitos sistemas são estudados com base exclusivamente nas relações de entrada e saída – a análise dedutiva conhecida como “análise caixa preta”. Conforme abordado no tópico 1.2, em sistemas hidrológicos subterrâneos cársticos, que na maioria das vezes são inacessíveis para observações diretas, esse tipo de análise é bastante utilizado e fornece informações muito valiosas sobre a organização e o funcionamento do sistema, particularmente no que diz respeito às características do escoamento e condições de armazenamento subterrâneo da água ao longo do tempo (Mangin 1975). Basicamente, são realizados estudos comparativos das condições da recarga da água para o meio subsuperficial e subterrâneo, numa determinada área e intervalo de tempo, e das características da descarga dessa água novamente para a superfície. Nesse caso, o sistema representa uma bacia aquífera (vide tópico 1.2 – O processo clássico de dissolução).

Estrutura e estabilidade dos sistemas na perspectiva espaço-temporal

A estabilidade de um sistema, precipuamente relacionada às interações sistema-meio (sistema-“ambiente”), é uma condição essencialmente relativa, tanto em face da escala temporal como da escala espacial. Do ponto de vista de um sistema como um todo, pode haver um relativo equilíbrio num determinado momento graças à atuação de partes menores ou componentes do sistema que permanecem em “estado de reação” a algum estímulo de desequilíbrio, anulando-o ou atenuando-o na perspectiva da dimensão mais global do sistema. Isso porque cada componente e certos agrupamentos de componentes também representam (sub)sistemas com sua própria dinâmica de ganho-interações-processamento-perda em relação ao sistema maior, numa estrutura hierárquica (Von Bertalanffy 1975; Capra 1996). Deste modo, as partes de um sistema estável podem se apresentar em desequilíbrio relativo momentâneo.

Um dos aspectos práticos mais elementares relativos à estrutura hierárquica sistêmica é que os resultados de uma análise realizada num domínio escalar – espacial ou temporal – em geral não descrevem as condições de outro domínio escalar. Os métodos usados para o estudo numa escala podem ser inclusive inadequados para outra escala.

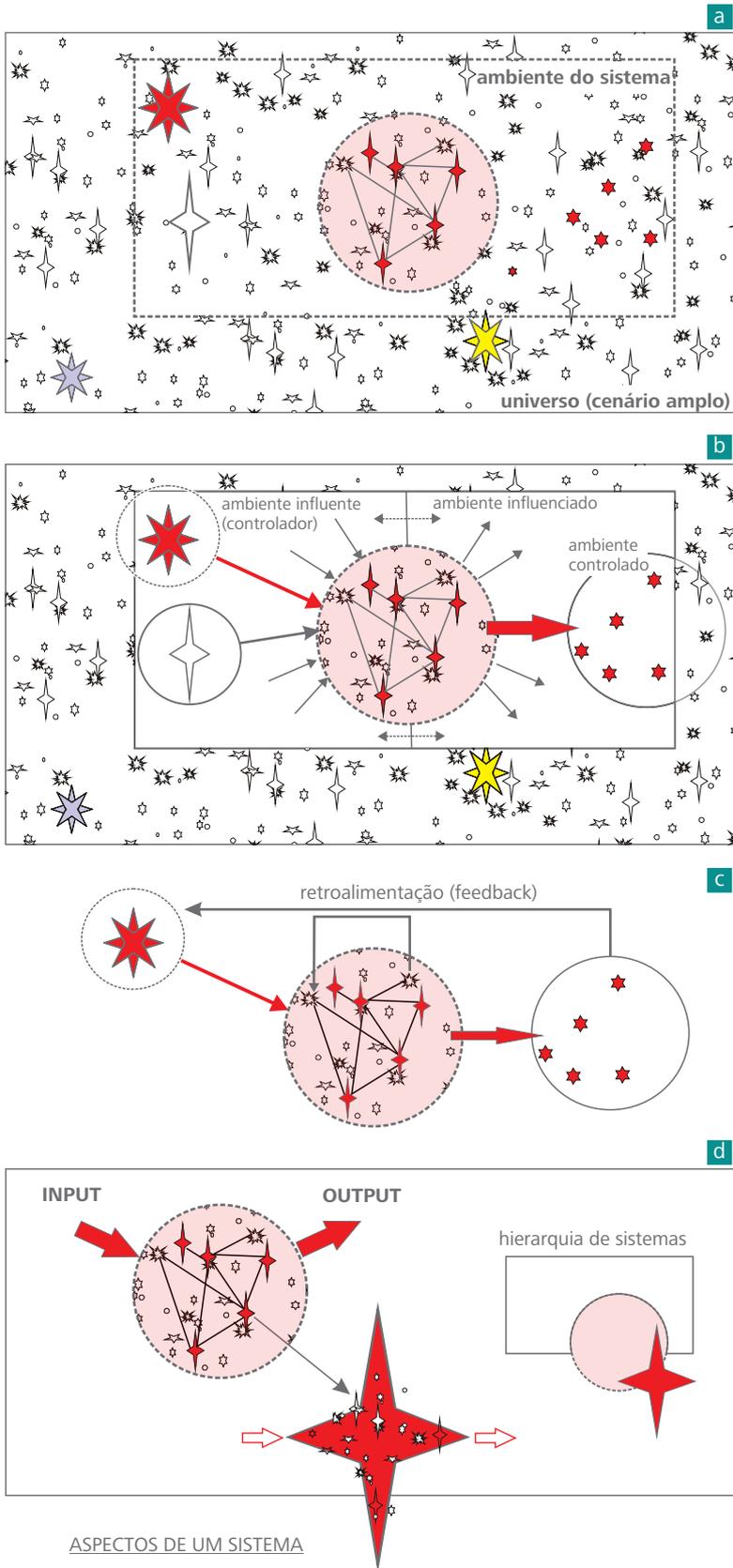
Um dos aspectos práticos mais elementares relativos à estrutura hierárquica sistêmica é que os resultados de uma análise realizada num domínio escalar – espacial ou temporal – em geral não descrevem as condições de outro domínio escalar. Os métodos usados para o estudo numa escala podem ser inclusive inadequados para outra escala.

A questão da escala hierárquica e temporal deve ser sempre bem definida e considerada com bastante atenção nos ambientes cársticos devido à sua extrema heterogeneidade.

A questão da escala hierárquica e temporal deve ser sempre bem definida e considerada com bastante atenção nos ambientes cársticos devido à sua extrema heterogeneidade constitucional e elevada dinâmica funcional, questão discutida mais detalhadamente no tópico 1.4 – Geossistema cárstico.

Para ilustrar a organização hierárquica de sistemas, a figura 1.3.3 apresenta simbolicamente um sistema natural dinâmico (variável no tempo) com seus componentes ou subsistemas mais gerais em forte interação mútua: componente biótico, físicoquímico e antrópico. Detalhando o esquema da figura, de forma a representar subsistemas delineados pelo critério estrutural e finalístico, o exemplo de um maciço calcário é explorado. Hipoteticamente, a água armazenada em meio às fendas do maciço é bombeada para a dessedentação de animais em uma propriedade rural. O maciço é analisado na perspectiva de um sistema, em que o perímetro do afloramento rochoso é tomado como a fronteira do sistema. Radiação solar (energia), água de chuva (matéria) e combustível para a bomba (matéria ou energia) são alguns exemplos de elementos de entrada para o sistema (*input*). Cada um dos três componentes tem elementos bem particulares em interação dentro do seu subsistema e com os demais subsistemas: determinada biocenose e uso antrópico do biótopo (geofácies) “maciço rochoso”. Cada um desses elementos por sua vez também se comporta como sistemas em escalas hierarquicamente menores: organismo-órgão-célula; lago-água-moléculas; bomba-motor-válvula.

A figura 1.3.4 traz uma representação diferente e bem elementar de um sistema genérico, desta vez centrada no critério funcional. O mesmo raciocínio da organização hierárquica de sistemas e subsistemas é válido, agora considerando toda a cadeia de fluxo de matéria e energia pelo sistema, desde a sua entrada (ou entradas) até sua saída (ou saídas). Neste fluxo, é fundamental que os elementos ou aspectos que exerçam regulação sobre os processos (os “reguladores”), ou que atuem no armazenamento ou retenção temporária de alguma quantidade da matéria ou energia (os “armazenadores”), sejam identificados. Mais detalhes sobre análise e modelagem de sistemas podem ser consultados em Christofolletti (1999).



- característica própria emergente
- componentes (subsistemas)
- partes (subsistemas)
- interações
- funcionamento
- limites
- ambiente de influência
- elementos de entrada (input)
- sistemas/fatores controladores
- elementos de saída (output)
- sistemas controlados
- função para os cenários

Figura 1.3.2. Representação simbólica de aspectos que caracterizam um sistema. O quadro (a) representa a totalidade de um cenário qualquer num dado momento T. Em meio à diversidade do cenário é possível distinguir um conjunto de elementos em interação que apresentam características específicas (estrelas vermelhas alongadas). Simbolicamente, dessa interação emerge uma “atmosfera” diferenciada que dá um caráter próprio ao sistema (o sombreado avermelhado). A linha pontilhada do retângulo destaca o entorno imediato e diretamente influente sobre o sistema. O quadro (b) traz uma representação mais explícita das interações do sistema com o seu ambiente, sendo influenciado por alguns elementos em especial (“fatores governantes”) e também exercendo influências através da troca de “informações” (energia e matéria) com o exterior. O quadro (c) simboliza que, num sistema, muitos processos podem suceder em circuitos de causa-efeito, em que os efeitos retroagem ampliando ou atenuando as causas originais. O quadro (d) destaca o “efeito escala” inerente a qualquer sistema, considerando que os limites são meramente convencionais: cada elemento ou parte do sistema conforma um subsistema com seus próprios processos internos e interações externas. Mais explicações ao longo do texto.
Ilustração: Mylène Berbert-Born.

Adentrando um pouco mais o caráter prático dos conceitos de estabilidade e equilíbrio de um ambiente, sobre o qual pesa a estrutura relacional e hierárquica de subsistemas com seus próprios mecanismos de funcionamento e graus diferenciados de sensibilidade a perturbações, toma-se outro exemplo de sistema (cárstico) hipotético: uma rede de condutos e fissuras limitada a certo espaço rochoso (componentes e limites definidos), que recebe o aporte de água da superfície e a transmite novamente à superfície após um tempo de circulação interna e armazenagem (função de armazenar e transmitir água pelo meio subterrâneo. Esse sistema é o único manancial para uma comunidade situada próxima, a qual capta a água numa nascente que representa o ponto de saída de toda a rede subterrânea (finalidade social de suprimento hídrico).

Por causa da morfologia e distribuição dos condutos (estrutura e arranjo do sistema), tal rede imaginária conforma dois ramos que constituem compartimentos hidráulicos distintos – o “ramo oeste”, com boa capacidade de vazão, e o “ramo leste”, apresentando trechos de estrangulamento (barramento) do fluxo. A figura 1.3.5 apresenta a situação de maneira esquemática. Toda a rede de drenagem encontra-se numa condição equilibrada de escoamento e armazenamento frente às recargas do sistema, suportando o acréscimo sazonal do aporte de água sem instabilidades estruturais apreciáveis (figura 1.3.5, quadros 1 e 2).

A figura mostra a existência de um conduto menor situado numa cota elevada, relativamente isolado, porém acessório à galeria principal. Nas condições hipotéticas de clima e uso da terra consideradas, esse conduto secundário encontra-se hidrológicamente inativo, o que lhe confere condições atmosféricas bastante estáveis (temperatura, umidade e pressão parcial de CO_2), e diferenciadas relativamente ao restante do sistema. Os biótopos e a exploração biológica nesse meio em particular também são singulares e encontram-se em elevada entropia (baixa energia potencial/livre).

Um momento em que o sistema seja subitamente sobrecarregado por um aumento severo e incomum do aporte de água, natural ou induzido, retrata uma mudança expressiva dos fatores externos controladores do sistema; por consequência, ocorre uma forte perturbação na dinâmica do fluxo da água pelo sistema, como mostra a figura. O conduto secundário superior torna-se hidrológicamente ativo apenas num episódio extremo como esse, funcionando como uma “válvula” reguladora do escoamento (figura 1.3.5, quadro 3 – “Caso A”). Aquela parte específica do sistema, que nas condições de longo termo adquirira uma condição estacionária (inatividade hídrica), sofre um total desequilíbrio: um biótopo restrito àquele pequeno compartimento pode ser, por exemplo, irreversivelmente destruído num único episódio em que o conduto secundário funcione como escape alternativo do sobrefluxo. Por outro lado, ao atuar suplementando a capacidade de escoamento do sistema, são evitadas grandes inundações à montante que poderiam envolver outros segmentos mais sensíveis, prevenindo-se o colapso do sistema.

A existência do “conduto-válvula” torna-se um mecanismo efetivo de auto regulação do sistema de drenagem exemplificado. A atividade desse componente específico do sistema é um exemplo da chamada retroalimentação negativa, ou “balanceamento” do distúrbio, circuitos de causa-efeito em que os efeitos retroagem atenuando ou “filtrando” as causas originais. No caso, o aumento incomum do aporte de água (distúrbio de entrada ou de *input*) gera um aumento da carga hidráulica e a inversão de gradientes na periferia do sistema, ativando condutos laterais que passam a atuar no escoamento do sistema (rompimento do estado de equilíbrio das partes periféricas do sistema), prevenindo inundações remontantes (amortecimento do distúrbio), garantindo assim um nível global de estabilidade e a manutenção do sistema como um todo. Observando o sistema numa escala de tempo maior que a escala do episódio de distúrbio, graças ao mecanismo de retroalimentação negativa ele permanece globalmente íntegro e em equilíbrio, sendo este um exemplo prático de auto-organização.

Por outro lado, considerando a inexistência de tais “válvulas” na estrutura do sistema, como acontece no ramo leste da rede de condutos, ou como aconteceria se o aparentemente inexpressivo conduto secundário do ramo oeste fosse obstruído (figura 1.3.5, quadro 3 – “Caso B”), o aumento exacerbado do aporte de água pode superar momentaneamente a capacidade de vazão, de forma que inundações remontantes podem vir a alcançar amplas áreas da superfície (figura 1.3.5, quadro 4). Como consequência, volumes significativos de sedimentos podem ser erodidos e remobilizados para dentro do sistema causando entupimento de condutos importantes (figura 1.3.5, quadro 5), alterando permanentemente a dinâmica hídrica, e consequentemente biológica, de todo o sistema.

Neste caso acontece o que se chama de retroalimentação positiva ou “reforço” do distúrbio: uma cadeia de processos em que uma alteração (e.g. aumento do aporte da água, obstrução de canal de escoamento...) gera um efeito sobre o sistema (sobrecarga hídrica) que tem um reflexo sobre parte do sistema (inundação remontante alcançando a superfície), o qual é responsável por outro efeito (erosão da superfície, ampliação da bacia coletora, remobilização de sedimentos e entupimento de canais) que amplifica o problema inicialmente gerado (aumento do aporte de água e redução adicional da capacidade de escoamento), por fim desestruturando o sistema de tal forma que a sua condição de vazão não suporta mais o retorno à condição original (normal) de recarga. A tendência é o agravamento das inundações, que podem alcançar outros pontos do sistema, causando mais erosão, mais escoamento superficial, mais aporte de água e sedimentos, mais assoreamento e redução da capacidade de vazão. Em algum momento todo o sistema de drenagem pode ser abandonado em favor de outra rota de escoamento que se apresente mais livre, surgindo um “novo ordenamento” da drenagem, totalmente distinto da precedente (figura 1.3.5, quadro 6).

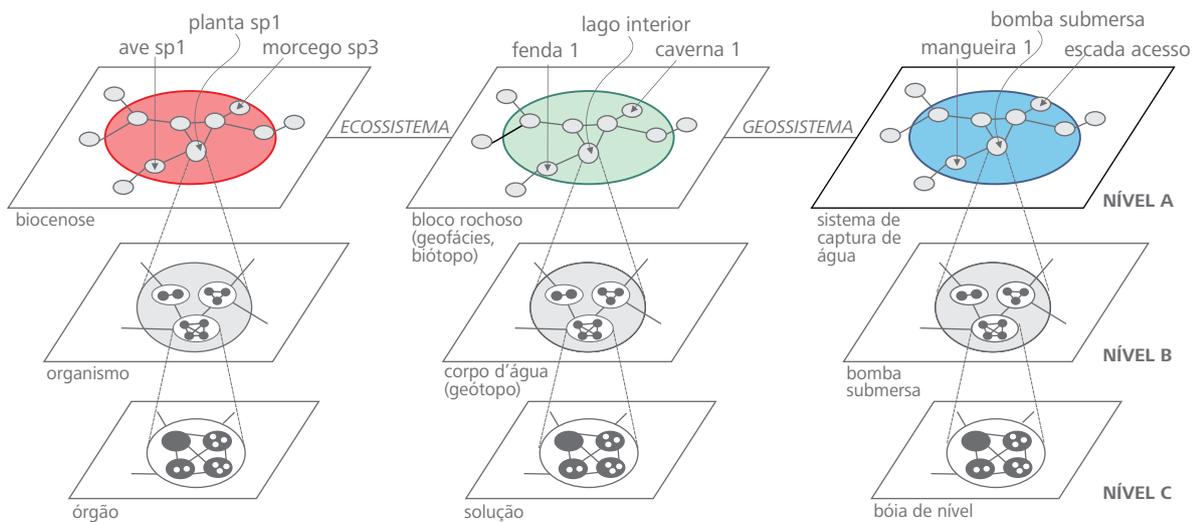
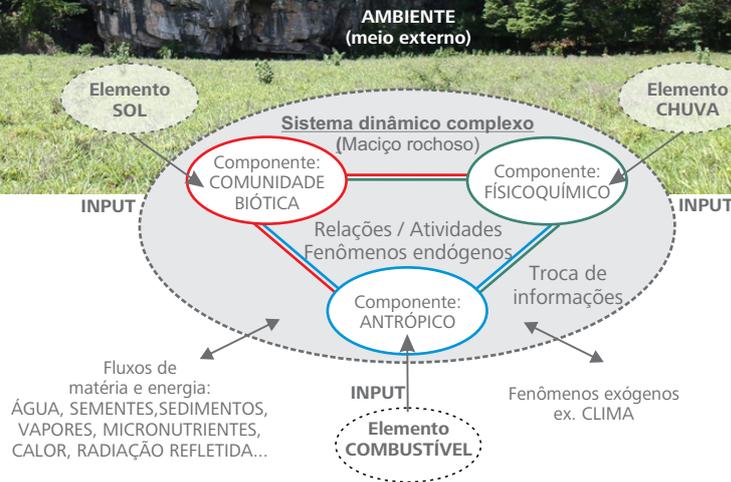


Figura 1.3.3. Representação de um sistema complexo dinâmico com seus componentes biótico, físicoquímico e antrópico, e respectivos subsistemas em hierarquia escalar. Os elementos de entrada (*input*) destacados (radiação solar, chuva e combustível) são exemplos de fatores externos que controlam o funcionamento e a organização do sistema, entre outros fluxos de entrada e também de saída de energia e matéria. Os elementos e interações entre o meio físico e biológico constituem o ecossistema. O geossistema representa o sistema natural físico que, em vista das suas características particulares num dado contexto, dá margem (tem potencial) a tipos específicos de exploração biológica, incluindo a antrópica. Montagem e foto: Mylène Berbert-Born. Esquema superior modificado de Aumond (2007); quadros inferiores modificados de Frank (1998) *apud* Aumond (2007).

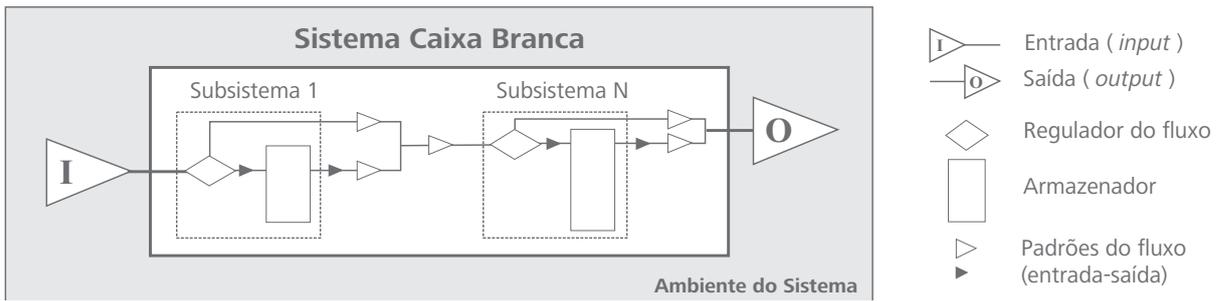


Figura 1.3.4. Representação elementar de um sistema genérico observando a sua organização e funcionamento. Neste caso, a estrutura de compartimentos ou subsistemas é conhecida, e a maneira como eles se relacionam é descrita a partir de uma cadeia de fluxos de matéria e energia que depende do papel e comportamento de cada componente do sistema (regulação, armazenamento etc.). Pela clareza da sua caracterização, são chamados sistemas do tipo “caixa branca”. Ilustração: Mylène Berbert-Born. Modificado de Christofolletti (1999).

No contexto temporal considerado para esse exemplo, é possível reconhecer que o processo de instabilidade apresenta um “primeiro” momento considerado crítico: a capacidade de escoamento *versus* a sobrecarga hídrica e o alcance da inundação. A partir desse momento o sistema pode evoluir de diferentes maneiras sofrendo retroalimentações (negativas ou positivas) e, de cada resposta evolutiva possível, novos pontos críticos e outros possíveis desdobramentos. Esses pontos críticos podem ser figurados como sequências de “pontos de bifurcação” na trajetória evolutiva do sistema, conforme a figura 1.3.6, em que cada “ramo” a ser percorrido só pode ser descrito probabilisticamente. No caso, envolvendo combinações entre diferentes parâmetros que definem as “flutuações do sistema”: excedentes de água x configurações dos condutos x conexões com a superfície x ativação/desativação de válvulas de fluxo x tipos de sedimentos envolvidos... Esse desenrolar de alternativas imprevisíveis é o que finalmente leva o sistema a transformações irreversíveis.

Um aspecto importante sobre o modo como os sistemas se comportam frente uma perturbação, especialmente pertinente aos sistemas mais complexos a exemplo de sistemas cársticos bem desenvolvidos, é o fato dos componentes e segmentos (subsistemas) apresentarem diferentes graus de sensibilidade à perturbação, reagindo de maneira muito heterogênea em termos da intensidade e tempo da resposta (reação e relaxamento) ao distúrbio.

Estes são conceitos trazidos bem superficialmente da concepção das estruturas dissipativas (Prigogine 1977, 1996, 2000), em que novos padrões de ordem acabam sendo criados a partir de estados de não-equilíbrio, um processo denominado ordem por flutuações.

Uma conclusão elementar é que, quanto mais complexo o sistema, mais imprevisível é a maneira como ele pode evoluir. Nesse sentido, um aspecto realmente importante sobre o modo como os sistemas se comportam frente uma perturbação, especialmente pertinente aos sistemas mais complexos, a exemplo de sistemas cársticos bem desenvolvidos, é o fato dos componentes e segmentos (subsistemas) apresentarem diferentes graus de sensibilidade à perturbação, reagindo de maneira muito heterogênea em termos de intensidade e tempo de resposta (reação e relaxamento) ao distúrbio.

Por apresentarem uma quantidade maior de componentes e interações, nos sistemas complexos há maior gama de possíveis reações às mudanças nos fatores externos. Os efeitos podem ser atenuados, tal como visto por dissipação da energia em alguma transformação pontual, ou então incrementados por sinergia entre as partes, ou pela propagação ou difusão de determinado impulso através de alguma cadeia de interações (Howard 1965; Brunsden e Thornes 1979; Christofolletti 1999). Pela mesma

razão, os efeitos e os ajustes podem ocorrer imediata e globalmente, em etapas e setorialmente, gradual e lentamente, ou ainda se manifestar com grande retardo após o distúrbio.

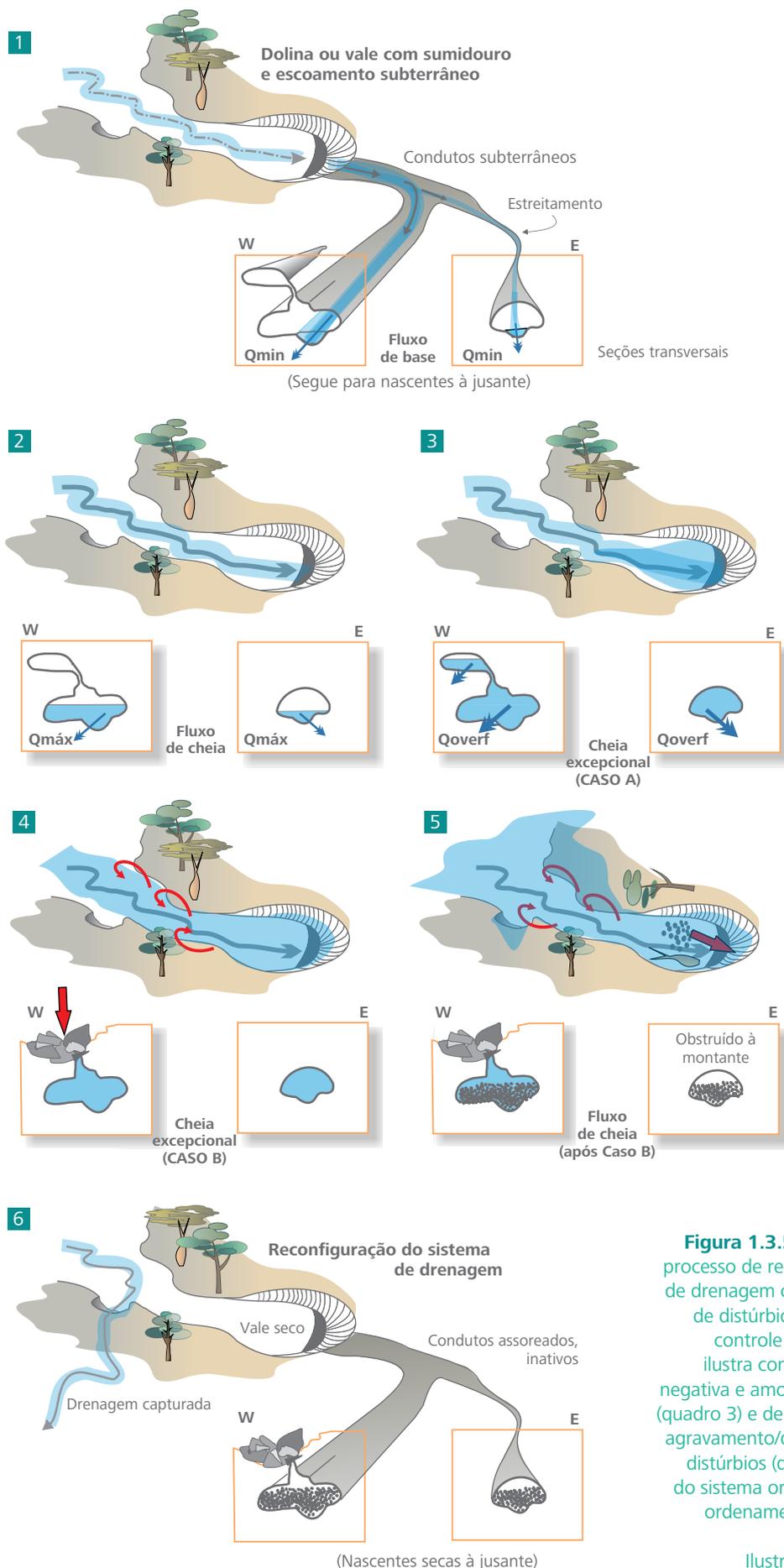


Figura 1.3.5. Exemplo esquemático de processo de reestruturação de um sistema de drenagem cárstica como consequência de distúrbios em alguns dos fatores de controle do escoamento. A situação ilustra condições de retroalimentação negativa e amortecimento de um distúrbio (quadro 3) e de retroalimentação positiva e agravamento/desencadeamento de novos distúrbios (quadros 4 e 5) até o colapso do sistema original em favor de um novo ordenamento (quadro 6). Explicações detalhadas no texto. Ilustração: Mylène Berbert-Born.

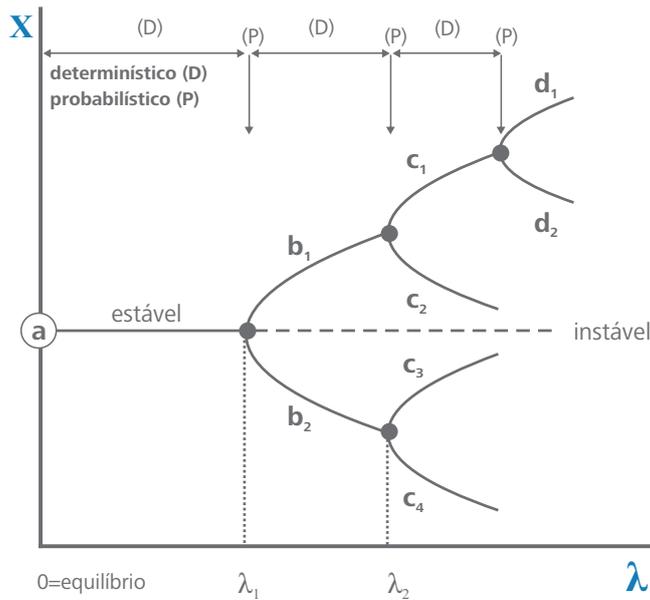


Figura 1.3.6. Representação das possíveis trajetórias evolutivas (bifurcações sucessivas) de um sistema em não-equilíbrio. Algumas condições críticas nesta trajetória retratam pontos de bifurcação a partir dos quais o sistema pode evoluir irreversivelmente de diferentes maneiras. X = estado evolutivo; λ = distanciamento da origem "(a) - estado de equilíbrio". Zonas Determinísticas entre os pontos de bifurcação probabilísticos. Mais explicações no texto. Montagem de Mylène Berbert-Born. Modificado de Prigogine (1996).

A retroalimentação positiva explica por que um pequeno distúrbio, como por exemplo, o assoreamento de um "simples conduto de caverna", pode causar efeitos de grande amplitude, sendo um mecanismo que tende a obscurecer os fatores originais que deram causa a determinado efeito (e.g. erosão de um talude). A retroalimentação negativa por sua vez mostra como um grande distúrbio pode ser surpreendentemente sublimado pelo ambiente, sendo um conceito particularmente útil para estratégias que visam a mitigação de impactos decorrentes de alterações impostas ao meio.

Por isso, até onde seja possível na análise ambiental, é sempre interessante modelar cadeias teóricas de bifurcações do sistema, em que os pontos (situações e elementos) de maior potencial de instabilidade e de incerteza – os "pontos críticos" – possam ser sugeridos destacadamente e, a partir deles, os respectivos fatores que poderão exercer influência no desdobramento de um ou de outro ramo evolutivo. Trata-se de uma modelagem mais complexa e abrangente de cadeias causa-efeito não lineares.

A retroalimentação positiva explica por que um pequeno distúrbio, como por exemplo, o assoreamento de um "simples conduto de caverna", pode causar efeitos de grande amplitude, sendo um mecanismo que tende a obscurecer os fatores originais que deram causa a determinado efeito (e.g. erosão de um talude). A retroalimentação negativa por sua vez mostra como um grande distúrbio pode ser surpreendentemente sublimado pelo ambiente, sendo um conceito particularmente útil para estratégias que visam a mitigação de impactos decorrentes de alterações impostas ao meio.

Bases para a análise sistêmica aplicada a estudos ambientais

Como visto, qualquer que seja a aplicação ou objetivo, a caracterização de um sistema começa pela definição de um critério de identidade e um primeiro esboço dos limites do sistema. A partir daí, especialmente quando se pretende avaliar as reações de determinado sistema a alguma perturbação ocasionada, é importante identificar os subsistemas que podem ser potencialmente afetados pela perturbação, em todos os seus níveis, e analisar o comportamento de cada um na perspectiva da estrutura hierárquica de interações "internas e externas" de "saída-entrada-saída" (*output* → *input* → *output*), conforme previamente exposto. Isso pressupõe que as propriedades individuais de cada subsistema sejam apreciadas sem perder de vista as relações mútuas existentes entre os subsistemas, e estes relativamente aos seus respectivos "ambientes" (seu entorno). Assim é feito o exame das relações causa-efeito lineares e circulares sob diferentes escalas.

Esse desmembramento articulado de um sistema em subsistemas é uma estratégia analítica para se identificar os fatores dominantes e os níveis de sensibilidade e estabilidade em cada escala espacial, para determinado intervalo de tempo, e assim verificar, com maior grau de controle, até onde se manifestam os efeitos da perturbação, ou seja, qual o seu alcance num sistema mais amplo. Em outras palavras, para verificar qual pode ser a **área de influência da perturbação**.

Trata-se de uma sistemática de “ajuste dinâmico de foco”, em que as condições ou propriedades globais (sob qualquer escala) vão sendo reveladas pelas propriedades, interações e reações das/entre as partes, que por sua vez são determinadas pela organização do todo. Essa idéia da “relação entre as partes” faz supor que a perda de alguma parte de um sistema maior ou a modificação da sua estrutura pode comprometer a interação dos seus constituintes, e vice-versa, eventualmente levando à descaracterização do sistema; ou pelo menos do “estado momentâneo” em que ele se encontra numa dada escala espacial (Von Bertalanffy, 2012; Capra, 1996; O’Connor - 1997; Comings, 2002; Morin, 2003; Reis Júnior e Perez Filho, 2006).

Na etapa inicial, os elementos internos precisam ser identificados e qualificados quanto aos seus atributos específicos (variáveis de estado como tamanho, massa, posição no espaço e no tempo etc.) e quanto à sua representatividade para o sistema, notando-se cuidadosamente a organização que define a estrutura do sistema. Essa etapa é comparável a um inventário descritivo. A partir desse “inventário geral” os elementos mais representativos ou dominantes já podem ser percebidos e, com a atenção sobre eles, pode ser verificado como se processam as interações, do que elas dependem ou o que as controlam, e o que produzem, configurando a “rede hierárquica”.

À medida em que os processos, insumos e produtos são reconhecidos na perspectiva da estrutura hierárquica, o nível de interdependência ou correlação entre os componentes se descortina. Quanto à percepção das interações, é necessário que a análise também leve em consideração a força (intensidade) das relações mútuas, o sinal (correlação direta ou inversa), a sensibilidade (grau de indução) e os mecanismos de interação (transferências, combinações, sinergia, fluxos, retroalimentação etc.), de forma que as funções de cada elemento dentro do sistema fiquem claras: regulação, recepção, armazenamento, retenção, produção, dissipação, amplificação, filtragem... (Christofolletti 1999).

Os fatores “externos”, que representam os insumos e as forças governantes dos processos, e a própria estrutura global do sistema, devem ser cuidadosamente considerados em qualquer análise sistêmica. Com esta caracterização, tem-se o retrato do funcionamento do sistema, que exprime o grau de complexidade e outros aspectos como a sua estabilidade e sensibilidade diante de distúrbios internos e externos, particularmente frente a mudanças nos fatores externos controladores. Mas está claro que tudo – complexidade, estabilidade e sensibilidade – é função da escala considerada ou grau hierárquico envolvido: **a escala é o ponto crítico da análise.**

Essa análise mais ampla e detalhada de um sistema, tal como se expõe, é conhecida como “análise caixa branca”, simbolizada na figura 1.3.4. Diferente do que possa parecer, não se trata de um procedimento exaustivo de extrema minúcia, mas uma análise racionalmente estruturada enfocando os aspectos que são realmente determinantes na estrutura e, principalmente, na dinâmica do sistema (estado e mudanças de estado), compreendendo elementos e suas propriedades, insumos, forças, interações, linhas de fluxo (lineares e circulares) e produtos ou resultados.

Conforme Senge (1998), simulações com milhares de variáveis e complexos conjuntos de detalhes (chamada “complexidade de detalhes”) podem nos distrair, impedindo que vejamos os padrões e os inter-relacionamentos principais. Por outro lado, é a “complexidade dinâmica” que permite ver os padrões mais profundos, subjacentes aos eventos e aos detalhes. *“A complexidade dinâmica aparece quando a mesma ação provoca efeitos drasticamente diferentes a curto e a longo prazos. Quando uma ação provoca um conjunto de consequências localmente e outro conjunto muito diferente de consequências em outra parte do sistema. Há complexidade dinâmica quando intervenções óbvias produzem consequências não óbvias.”* (Senge 1998).

Na verdade, a análise estruturada muitas vezes exige simplificações, abstrações, reduções ou extrapolações, que encontram grande apoio em modelos conceituais, gráficos e matemáticos. Na literatura técnica e acadêmica existe inúmeros exemplos de modelos, técnicas de modelagem e representação de sistemas ambientais que se distinguem pela natureza conceitual (princípios envolvidos), finalística (objetivos pretendidos) e instrumental (técnicas e equipamentos adotados).

O “desmembramento articulado” de um sistema em subsistemas é uma estratégia analítica para se identificar os fatores dominantes e os níveis de sensibilidade e estabilidade em cada escala espacial, para determinado intervalo de tempo, e assim verificar, com maior grau de controle, até onde se manifestam os efeitos da perturbação, ou seja, qual o seu alcance num sistema mais amplo. Em outras palavras, para verificar qual pode ser a área de influência da perturbação.

Trata-se de uma sistemática de “ajuste dinâmico de foco”, em que as condições ou propriedades globais (sob qualquer escala) vão sendo reveladas pelas propriedades, interações e reações das/entre as partes, que por sua vez são determinadas pela organização do todo. Essa ideia da “relação entre as partes” faz supor que a perda de alguma parte de um sistema maior ou a modificação da sua estrutura pode comprometer a interação dos seus constituintes, e vice-versa, eventualmente levando à descaracterização do sistema; ou pelo menos do “estado momentâneo” em que ele se encontra numa dada escala espacial.

Há modelos descritivos, sintéticos, simbólicos, de simulação e de julgamento-decisão (Christofoletti 1999), e os mais interessantes, precisos e eficazes aos seus propósitos são aqueles que realmente conseguem sintetizar a estrutura e o funcionamento do sistema considerando o “tempo” como uma das suas variáveis determinantes.

Os modelos que levam em consideração as mutações de estado do sistema sob variados panoramas temporais, robustamente calibrados pelos ritmos temporais que sejam relevantes para cada componente – pois há elementos sensíveis a diferentes ciclos: diário, estacional, anual, diuturno, mudanças críticas etc., apresentando diferentes graus ou índices de mutabilidade – são os que propiciam uma perspectiva de fato dinâmica ao sistema. As mudanças temporais de estado são outro aspecto associado à questão da escala hierárquica do sistema. De uma maneira geral, os níveis hierárquicos mais inferiores sofrem mutações em intervalos de tempo mais curto, enquanto os sistemas “maiores” e, portanto, mais complexos, normalmente aparentam transformações mais lentas (como um paralelo a Sochava 1977).

O bom diagnóstico da dinâmica dos sistemas é o que permite reconhecer os padrões e as tendências de estado, e só assim projetar a evolução aos estados futuros do sistema, seja sob condições naturais ou considerando a repercussão de distúrbios exercidos sobre ele. Este é um ensaio imprescindível para os estudos de impacto ambiental.

Geossistemas – breve revisão conceitual

O termo “geossistema” desponta quando os princípios da complexidade e organização hierárquica (complexidade organizada) e da visão holística (totalidade emergente da interação das partes, com funções próprias), que estão na essência do conceito de sistema tratado até aqui, são aplicados ao reconhecimento e análise do espaço geográfico, ou seja, quando são transpostos para a geografia física. Então, nos geossistemas interessam fundamentalmente as interações, o funcionamento e a dinâmica temporal ou sucessão de estados, e não a morfologia meramente (Sochava 1977).

Basicamente, geossistema é um “sistema ambiental físico” (Christofoletti 1999), cuja expressão ou fisionomia é a paisagem (Troppmaier e Galina 2006). De um modo mais abrangente, um geossistema é um sistema espacial concreto, com caráter territorial dinâmico (é um sistema aberto), conformado por elementos interativos de toda natureza que atuam na superfície terrestre dispostos num arcabouço hierárquico, podendo ser delimitado a partir de critérios funcionais, estruturais ou por alguma dinâmica geográfica peculiar, critérios estes sempre de ordem física.

Tomados em sua globalidade, os geossistemas são evidentemente constituídos por elementos biológicos e humanos, que são inerentes ao ambiente. Mas eles se diferenciam do ecossistema porque o foco deste são os organismos interagindo entre si e com o seu ambiente numa determinada unidade de área, constituindo um cenário que se possa considerar relativamente homogêneo ou característico sob o ponto de vista da organização e dinâmica biológica. De modo que um geossistema pode até ser coincidente com um ecossistema, mas em geral ele é mais amplo e complexo, muitas vezes englobando vários ecossistemas. A situação é equivalente para um sistema socioambiental: o ambiente é a base do comportamento humano e recurso indissociável da sua existência, mas o foco deste outro sistema está na organização, funcionamento e dinâmica humana, sob a influência do seu ambiente. A figura 1.3.7 expressa de maneira esquemática essas diferenças conceituais.

... O bom diagnóstico da dinâmica dos sistemas é o que permite reconhecer os padrões e as tendências de estado, e só assim projetar a evolução aos estados futuros do sistema, seja sob condições naturais ou considerando a repercussão de distúrbios exercidos sobre ele. Este é um ensaio imprescindível para os estudos de impacto ambiental.

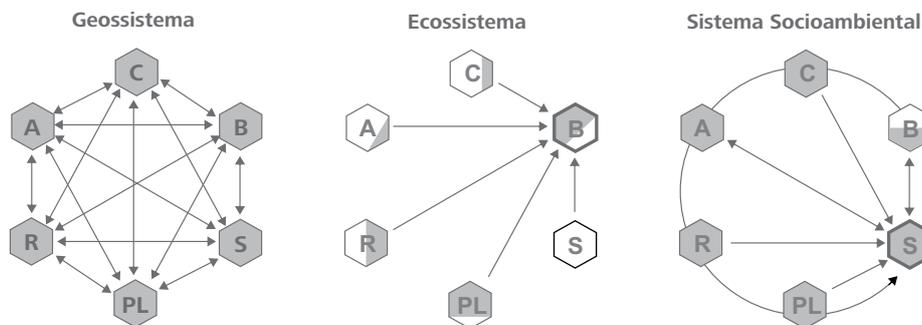


Figura 1.3.7. Comparação conceitual-estrutural esquemática entre geossistemas, ecossistema e sistema socioambiental. (C) Clima, (B) Biosfera, (S) Sociedade, (PL) Pedosfera e Litosfera, (R) Relevo, (A) Água. Montagem: Mylène Berbert-Born. Baseado em Christofoletti (1999, p.42) e modificado de Neves et al. (2014). Vide texto.

Importante colocar que, desde que o termo “*geossistema*” foi introduzido por Sochava (1977) como “conceito e método” para a análise de sistemas naturais físicos¹⁰, com fundamento na Teoria Geral do Sistema (TGP) de Von Bertalanffy (1951, 2012), tem havido diversificados entendimentos e muito debate a respeito da sua aplicabilidade (Bertrand 2004; Troppmair 1983; Christofolletti 1999; Monteiro 2000; Rodríguez e Silva 2002; Troppmair e Galina 2006; Reis Júnior e Perez Filho 2006; Bertrand e Bertrand 2007). As principais divergências residem em dois aspectos:

- (i) Conceitual – questão de considerar ou não, para a tipificação da unidade geossistêmica, a dimensão socioeconômica de dado ambiente (tomando-se o princípio de que o ambiente é a base do comportamento humano e recurso indissociável da sua existência); e
- (ii) Delimitação – a escala espacial ou abrangência do recorte sistêmico, que tem viés na definição de unidades taxonômicas escalares, em sua delimitação no território e representação cartográfica, que são quesitos da análise geográfica.

Note-se que, até certo ponto, o segundo aspecto é determinante sobre o primeiro, pois para escalas de abrangência muito ampla, mesmo as fortes intervenções humanas terão capacidade muito restrita (ou nula) para abalar estruturas fundamentais tais como uma unidade geológica ou determinada condição climática (Troppmair e Galina 2006).

Sobre a dimensão escalar e delimitação dos geossistemas, enquanto Sochava (1977) – expoente da chamada “linha de pensamento soviética” – concebe a possibilidade deles se desdobrarem de forma hierárquica em diferentes ordens escalares (desde que perceptíveis no terreno), sendo caracterizados por combinações de subunidades hierárquicas que formam grupamentos homogêneos e heterogêneos (geômero elementar, fácies, grupos de fácies, classes de fácies etc. e associações heterogêneas/geócoros de 1ª, 2ª, 3ª. etc. ordem), Georges Bertrand – expoente da chamada “linha de pensamento francês” – por sua vez trata por geossistema uma das seis unidades taxonômicas da paisagem (Bertrand 2004, apresentada em correlação com a escala geomorfológica de Cailleux e Tricart 1956): unidades superiores – zona, domínio e região natural – norteadas pelos elementos climáticos e estruturais; e unidades inferiores – **geossistema**, geofácies e geótopo – orientadas por elementos biogeográficos e antrópicos.

A classificação proposta por Bertrand (op.cit.) é ilustrada justamente a partir de um exemplo de área cárstica situada no norte da Espanha, constituída de três grandes maciços calcários formando uma espécie de cordilheira conhecida como Picos de Europa. Nela busca-se reconhecer combinações dinâmicas entre elementos físicos, biológicos e antrópicos (caracterizando paisagens totais), do que advém seu caráter temporal.

Vale ressaltar que a dimensão de alguns quilômetros quadrados a algumas centenas de quilômetros quadrados, sugerida por Bertrand para o nível taxonômico do geossistema, deve ser tomada como um referencial relativo. Todos os níveis, especialmente as unidades inferiores (geossistema, geofácies e geótopo), podem ser classificados usando o critério dos “sistemas de evolução”, que se fundamenta no reconhecimento de algum ou de alguns fatores dominantes, que podem ser a dinâmica biológica, a condição dinâmica global ou de estabilidade (geossistemas em biostasia e resistasia¹¹), ou mesmo o uso antrópico quando significativo, de forma que a abrangência das unidades estará bastante dependente do grau de complexidade das unidades, conforme ressalta Amorim (2012). Nisto a idéia de Bertrand se aproxima do conceito de ecodinâmica de Tricart (1977), e se diferencia da classificação taxonômica de Ross (1992) a qual se apoia essencialmente na fisionomia das formas de relevo (formato e tamanho, alusivas à gênese e idade).

Sintetizando a conceituação de Bertrand (2004, *passim*) para o geossistema:

“É o resultado da combinação de fatores geomorfológicos (natureza das rochas e dos mantos superficiais, valor do declive, dinâmica das vertentes...), climáticos (precipitações, temperatura...) e hidrológicos (lençóis freáticos epidérmicos e nascentes, pH das águas, tempos de ressecamento do solo...), que retratam determinado “potencial ecológico”. Os geossistemas não têm necessariamente uma grande homogeneidade fisionômica, sendo formado de paisagens diferentes ou “unidades fisionomicamente menores” – os geofácies, num “mosaico mutante” – que representam os diversos estágios da evolução do geossistemas.

10 “Em condições normais (a Geografia Física) deve estudar, não os componentes da natureza, mas as conexões entre eles; não se deve restringir à morfologia da paisagem e suas subdivisões mas, de preferência, projetar-se para o estudo de sua dinâmica, estrutura funcional, conexões, etc.” (Sochava 1977, pag.2)

11 (1) Geossistemas em biostasia: atividade geomorfofogenética fraca ou nula, equilíbrio solo-vegetação-clima, pouca erosão e transporte, predominam agentes e processos bioquímicos e a pedogênese; individualizados em quatro subtipos de acordo com sua maior ou menor estabilidade. (2) Geossistemas em resistasia: geomorfofôgenese dominante, erosão-transporte-acumulação causando mobilidade das vertentes com comprometimento do potencial ecológico; individualizados em dois subtipos de acordo com dois níveis de intensidade (Bertrand 2004).

Contudo, pode-se admitir que existe uma sorte de “contínuo” ecológico no interior de um mesmo geossistema, enquanto que a passagem de um geossistema ao outro é marcada por uma descontinuidade de ordem ecológica. Os geossistemas, como cada geofácies, se definem complementarmente por certo tipo de exploração biológica no espaço, havendo uma relação evidente – e dinâmica, no tempo e no espaço – entre o potencial ecológico e a valorização biológica. O geossistema entra em clímax quando há um equilíbrio entre o potencial ecológico e a exploração biológica, uma situação extremamente rara. O geótopo é a menor unidade homogênea diretamente discernível (não laboratorial) no terreno, por exemplo uma diacrise alargada pela dissolução, uma cabeceira de nascente, um fundo de vale que o sol nunca atinge, uma face montanhosa... biótopos cujas condições ecológicas são em geral muito diferentes das do geossistemas e geofácies dentro das quais elas se acham.”

V.B. Sochava por sua vez trata os geossistemas como formações essencialmente naturais experimentando os impactos social, econômico e tecnogênico que, no entanto, são examinados na condição de elementos influentes sobre a estrutura e a dinâmica do geossistemas:

“Influências antropogênicas dizem respeito a numerosos componentes naturais de um geossistema (mudanças de umidade e regime de salinidade dos solos, modificações da vegetação, poluição do ar). Todos esses índices determinam o estado variável de um geossistema em relação à estrutura primitiva e refletem-se em seu modelo. As ditas paisagens antropogênicas nada mais são do que estados variáveis de primitivos geossistemas naturais.” (Sochava 1977, pág. 7).

Já existe no Brasil uma grande quantidade de trabalhos aplicados à classificação da paisagem e análise geoambiental baseados no conceito geossistemas. Um exemplo pode ser visto em Vidal et al. (2014), em que são cartografadas “unidades funcionais” indicando-se as funções de componentes e compartimentos, tipos de geofluxos e produtos ambientais, lançados sobre uma base de sistemas ambientais. Também há importantes exemplos tratando da compartimentação geossistêmica de territórios estaduais, por exemplo, São Paulo (Troppmair 1983), Santa Catarina (Veado e Troppmair 2001) e Ceará (Rodriguez e Silva 2002). Entre esses exemplos, vale mencionar a técnica de representação esquemática utilizada na abordagem dos geossistemas do estado de São Paulo (Troppmair op.cit), retratando os componentes dominantes e o modo como eles se relacionam em cada geossistema, fazendo também figurar as intensidades das relações de dependência que, em última instância, sugerem os mecanismos de funcionamento atuantes. A figura 1.3.8 mostra o que este autor chamou de “figuras de sistemas”, cuja potencial variedade também ilustra a questão da geodiversidade.

O destaque que é dado aqui aos geossistemas tem uma razão especial: além de ser a base conceitual que permite identificar e tratar os ambientes cársticos na perspectiva verdadeiramente sistêmica, objeto do próximo tópico, os estudos de impacto são, nada menos, que estudos geossistêmicos, na medida em que a ação antrópica seja inserida na análise como elemento que exerce influência e mesmo transformações sobre a dinâmica espacial e temporal do território.

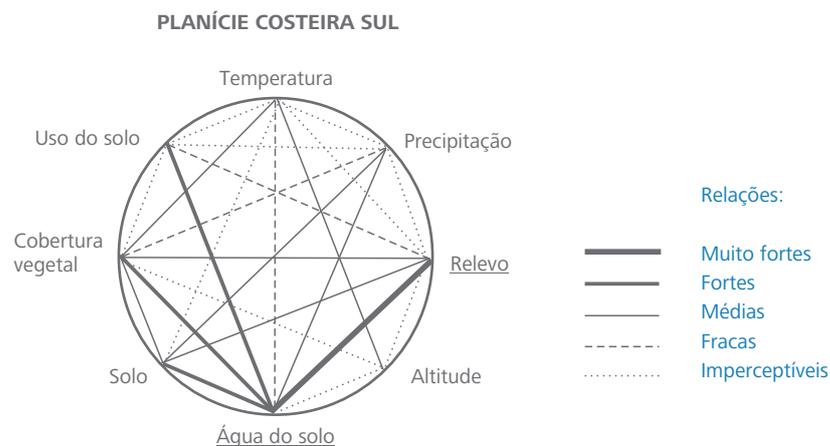


Figura 1.3.8. “Figura de sistema” representando um dos geossistemas delineados para o estado de São Paulo – a “Planície Costeira Sul” – por Troppmair (1983). Além das diferentes combinações possíveis para retratar as relações entre cada “componente”, as variáveis que os descrevem variam de um geossistema para outro. Montagem: Mylène Berbert-Born

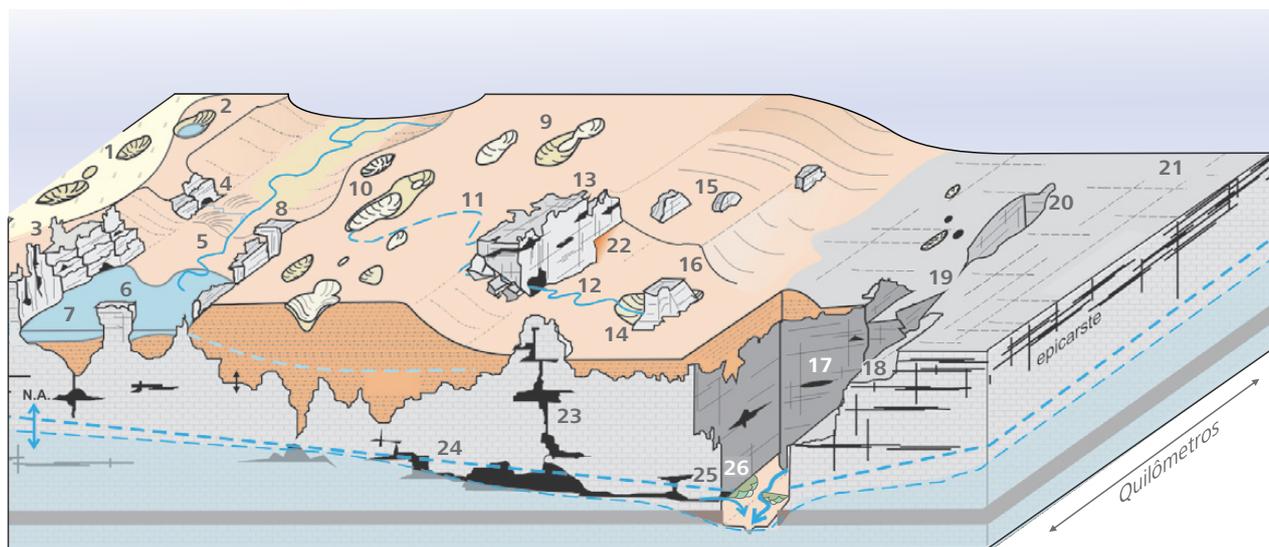
1.4. O carste na ótica geossistêmica – “Geossistema Cárstico”

Na literatura há muitas definições puramente descritivas sobre o que é o carste, apontando “determinado relevo com formas peculiares e muito características” – um critério de identidade muitas vezes usado também para o termo “sistema cárstico”. A percepção mais elementar acerca do carste é esta que envolve basicamente a estética das suas paisagens. A própria origem do termo carste, que significa “terreno rochoso” na derivação da palavra eslovena *kras*, remete a uma paisagem que tem determinado aspecto.

Em vista dos conceitos da abordagem sistêmica até então colocados, este é apenas o nível do discernimento das formas ou componentes (elementos característicos) de uma “unidade ambiental” chamada carste. Naturalmente, a percepção é guiada por características e magnitudes que são os atributos individuais ou coletivos desses elementos específicos, descritos segundo variáveis próprias. Por exemplo:

- “dolina^(componente) com profundidade^(atributo) maior que 100 metros^(variável)”;
- “lagos^(conjunto de componentes) em formato^(atributo) circular^(variável) com temperaturas^(atributo) homogêneas e constantes^(variável)”.

No foco estritamente descritivo de componentes característicos, a unidade ambiental “carste” pode ser circunscrita diretamente a partir desses elementos, sendo relativamente fácil delimitá-la pelo critério morfológico. A figura 1.4.1 ilustra típicos elementos da morfologia cárstica que poderiam ser usados para a delimitação do bloco cárstico: dolinas em planaltos, dolinas em vales aluvionais, uvalas, maciços de calcário aflorantes, torres, verrugas, vale escarpado (cânion), vale cego, sumidouros, ressurgências, lagoas cársticas, cavernas, poljé, além dos solos residuais derivados e transportados.



LEGENDA

- | | | |
|---|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1. campo de dolinas | 9. uvalas | 18. patamares |
| 2. dolina com lago | 10. dolina com sumidouro intermitente | 19. ponte natural |
| 3. maciço lapiezado com torres e bancadas | 11. drenagem subterrânea | 20. clarabóia / dolina de colapso |
| 4. surgência | 12. ressurgência | 21. pavimento calcário |
| 5. poljé | 13. escarpa calcária (“paredão”) | 22. abrigo sob rocha |
| 6. hume | 14. sumidouro | 23. abismo |
| 7. lagoa cárstica | 15. verrugas | 24. caverna |
| 8. torres | 16. afloramento em dolina | 25. ressurgência temporária |
| | 17. cânion cárstico | 26. tufas calcárias |

Figura 1.4.1. Elementos e feições típicas do relevo cárstico. Ilustração: Mylène Berbert-Born.

Porém, muitas outras questões ainda precisam ser consideradas para que o carste possa ser efetivamente compreendido como um sistema.

Em uma das frases que introduz o tópico 1.3 - Sistemas e Geossistemas estão embutidas diversas questões gerais cujas respostas elevam o ambiente cárstico à real condição de geossistema. Lembrando:

“O carste deve ser entendido globalmente (1), como um conjunto organizado de certos elementos peculiares (2) que existem sob circunstâncias específicas (3), relacionam-se e interagem coordenadamente mediante processos e mecanismos definidos (4), produzindo efeitos discerníveis (5), configurando assim um cenário ou mosaico de cenários com características próprias (6) e comportamento típico (7), sendo por isso delimitável como um sistema distinto (8).”

As questões assinaladas acima são as seguintes:

- (1) Que abrangência espacial e amplitude temporal podem ser consideradas para uma compreensão global sistêmica do carste?
- (2) Que elementos, notadamente de caráter físico, são peculiares aos sistemas cársticos?
- (3) Quais são os parâmetros fundamentais da existência de um sistema cárstico e os principais fatores que governam a sua evolução?
- (4) De que maneira os elementos se organizam e interagem?
- (5) Quais são os “efeitos” mais relevantes dos principais processos que ocorrem em sistemas cársticos, e que tipo de “funções” esses sistemas podem ter?
- (6) Qual ou quais seriam as “características emergentes” de sistemas cársticos?
- (7) Como é seu dinamismo e como tende a evoluir esses sistemas?
- (8) Como seria a “Figura de Sistema” que esquematiza a identidade do sistema cárstico?

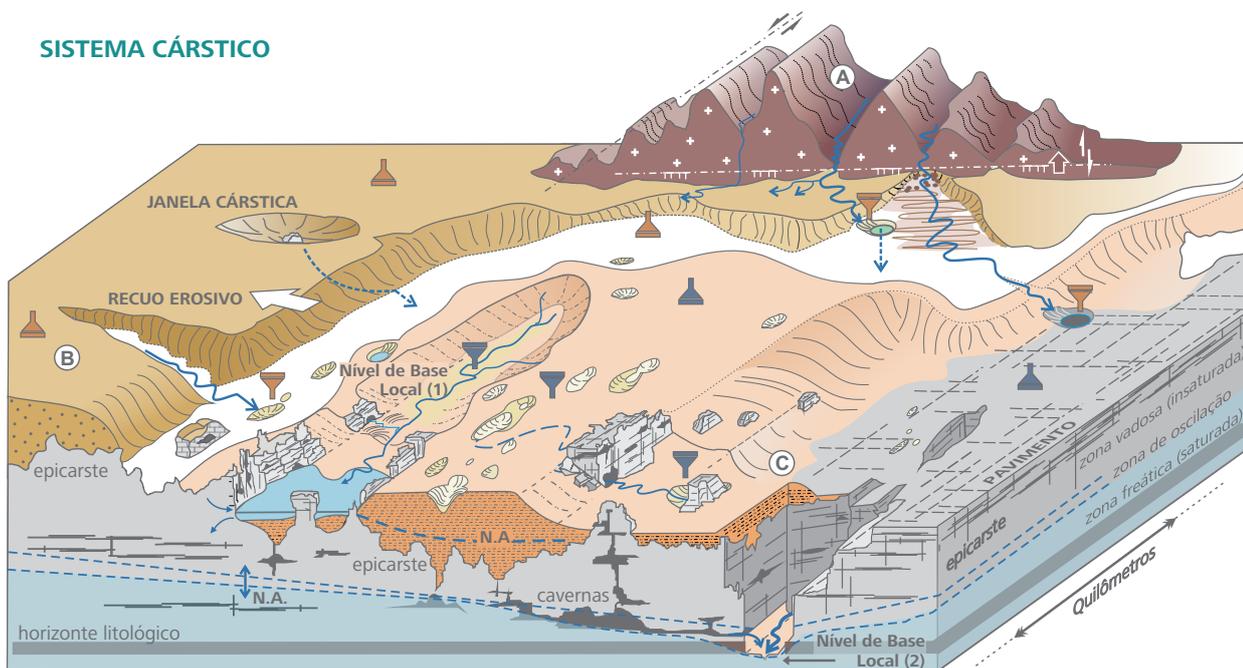
As respostas a essas perguntas encontram-se expressas na figura 1.4.2, envolvendo desde o amplo território ali representado (contexto regional) até os pequenos detalhes exibidos (subsistemas funcionais), tendo na essência a água como principal agente organizador do ambiente.

Com base no que foi exposto ao longo dos tópicos anteriores, essas respostas estão de algum modo vinculadas à configuração do aquífero cárstico que, de uma maneira simplificada, retrata sistemas de fluxo hídrico (sedimentar e biológico associados) com compartimentos de recarga – fluxo/armazenamento – descarga interdependentes funcionando em retroalimentação.

Levando-se em consideração que a água, juntamente com a rocha, são os maiores agentes de controle e importantes fatores limitantes para os sistemas cársticos, o modelo de vetores de fluxo da água, atuantes sobre/nos compartimentos característicos de ambientes cársticos, pode ser aplicado tanto à escala ampliada do geossistema global como à escala de uma simples seção de canal subterrâneo. Entre esses dois extremos de escala, essa mesma análise pode ser aplicada a qualquer outro subsistema, como os destacados na figura 1.4.2, desde que atendidos os critérios sistêmicos para a sua individualização.

· O modelo de vetores de fluxo da água,
 · atuantes sobre/nos compartimentos
 · característicos de ambientes cársticos,
 · pode ser aplicado tanto à escala
 · ampliada do geossistema global como à
 · escala de uma simples seção de canal
 · subterrâneo. Entre esses dois extremos
 · de escala, essa mesma análise pode ser
 · aplicada a qualquer outro subsistema,
 · desde que atendidos os critérios
 · sistêmicos para a sua individualização.

SISTEMA CÁRSTICO



LEGENDA

Aluviões	1	Aquíferos "suspensos", porosos restritos e/ou temporários
Colúvio arenoso		
Colúvio/elúvio sobre calcários	2	Aquífero poroso ou granular
Rochas areníticas		
Rochas carbonáticas (com intercalações pelíticas)	3	Aquífero cárstico e/ou cárstico-fissural (livre/semiconfinado)
Rochas cristalinas		
	4	Aquífero fissural

Recarga:

Alógênica	Difusa
Autigênica	Concentrada

Fluxo superficial
Fluxo subterrâneo
Linha/plano de falha
N.A. Nível da água (freático)

Macro compartimentos geomorfológicos:

- (A) Bloco montanhoso / Serra
- (B) Chapadão / Tabuleiro
- (C) Carste / Depressão cárstica

Aumenta a dissecação
Nível de Base Regional

SUBSISTEMAS CÁRSTICOS

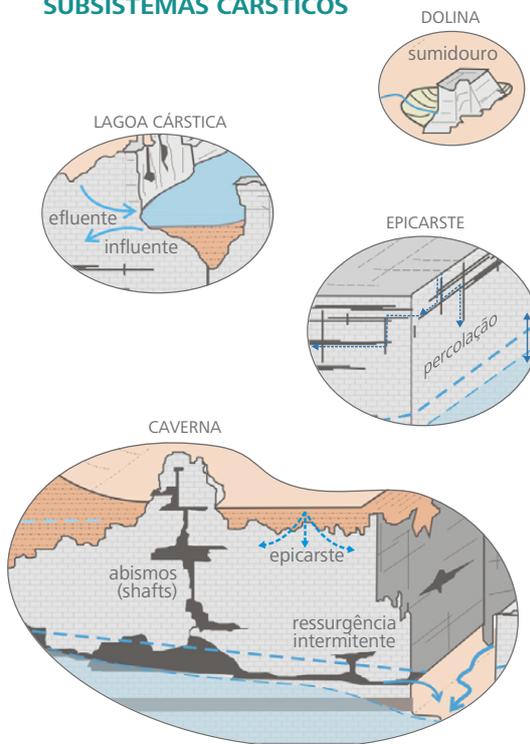


Figura 1.4.2. O Geossistema Cárstico integral – das recargas alógênicas à descarga regional – e alguns dos seus subsistemas: Lagoa cárstica; Caverna/Sistema de condutos; Seção do epicarste; Dolina. Os subsistemas não estão isolados no contexto do geossistemas; na sua análise, devem ser verificadas as entradas, a circulação (processamentos) e as saídas de matéria e energia, bem como as suas relações com os sistemas circundantes (anteriores e subsequentes). Ilustração: Mylène Berbert-Born

No esquema abaixo, as entradas e saídas de cada sistema de fluxo representam sistemas antecedentes e subsequentes relacionados. O subsistema caverna, por exemplo, pode ter uma ou mais dolinas como antecedentes, e também o epicarste e/ou determinada rede de fissuras associadas; e pode ter uma nascente como um dos seus sistemas subsequentes. Na perspectiva de sistemas em cadeia, a caverna representaria para a nascente uma de suas possíveis entradas:

ENTRADAS (água, sedimentos, nutrientes...) →

- no epicarste
- na dolina
- na caverna
- na nascente
- numa seção de conduto
- numa rede de fissuras
- numa unidade aquífera

[processamentos/armazenamentos peculiares a cada um]

→ SAÍDAS (água, sedimentos, nutrientes...)

Uma caverna de qualquer tipo, tendo como critério simples de delimitação o espaço que seja acessível (penetrável) ao ser humano, permite uma boa prática da análise sistêmica. Tratando-se de um “sistema aberto”, deverão ser considerados todos os aportes e fluxos relativos ao seu entorno, não apenas da água e do ar, como de outros tipos de materiais orgânicos e inorgânicos, o que inclui todo tipo de interação com as redes de fissuras e condutos de menor volume que estejam conectadas a ela. Sobre a perspectiva temporal da análise sistêmica, vale dizer que até mesmo uma caverna hidrologicamente inativa pode ser analisada qualitativamente na perspectiva das entradas-processamentos-saídas de água. Isso é feito com base em sinais reliquiais da atividade hídrica pretérita, como as formas de dissolução impressas na rocha, o arranjo da porosidade de condutos e fissuras, os sedimentos residuais, remobilizados ou precipitados. Nesses casos, evidentemente o objetivo não poderá ser algo como um balanço hídrico, mas é perfeitamente possível a reconstituição da dinâmica do meio e do histórico de processos que aconteceram no passado, sob a atuação de agentes adversos dos atuais.

Particularmente para esse exemplo da caverna, que são espaços especialmente protegidos (juridicamente), esse prisma sistêmico oferece uma melhor perspectiva para o reconhecimento dos fatores que a controlam e da abrangência da sua área de influência mais relevante. Torna-se mais fácil compreendê-la quando considerada um segmento de algum sistema maior, por exemplo, uma parcela específica de uma rede de espaços subterrâneos; um compartimento de um sistema aquífero; o subsistema de agradaciação de um sistema erosivo etc..

Já em nível regional, ou global, o conceito compreende um grande sistema de fluxo hídrico superfície → subterrâneo → superfície envolvendo todos os aportes alóctones (fluxos superficiais e subterrâneos provenientes de domínios não carbonáticos) e os exutórios regionais (rios de grande ordem que atravessam ou deixam o domínio cárstico, bem como as transmissões para aquíferos não cársticos).

Nessa concepção, o carste pode ser descrito como sucessões laterais e verticais de subsistemas, constituindo “fácies geoambientais” ou “geofácies” interdependentes. Em termos funcionais, tanto lateralmente como verticalmente, em qualquer escala ou considerando qualquer subsistema, a água sempre entrará num compartimento (ou entrou em algum momento) munida de determinada característica, percorrerá determinado meio interagindo com ele, modificando-o em alguma proporção (deixando algum registro quando não mais atuante), saindo através de outro compartimento com características diferenciadas (ou não) das originais.

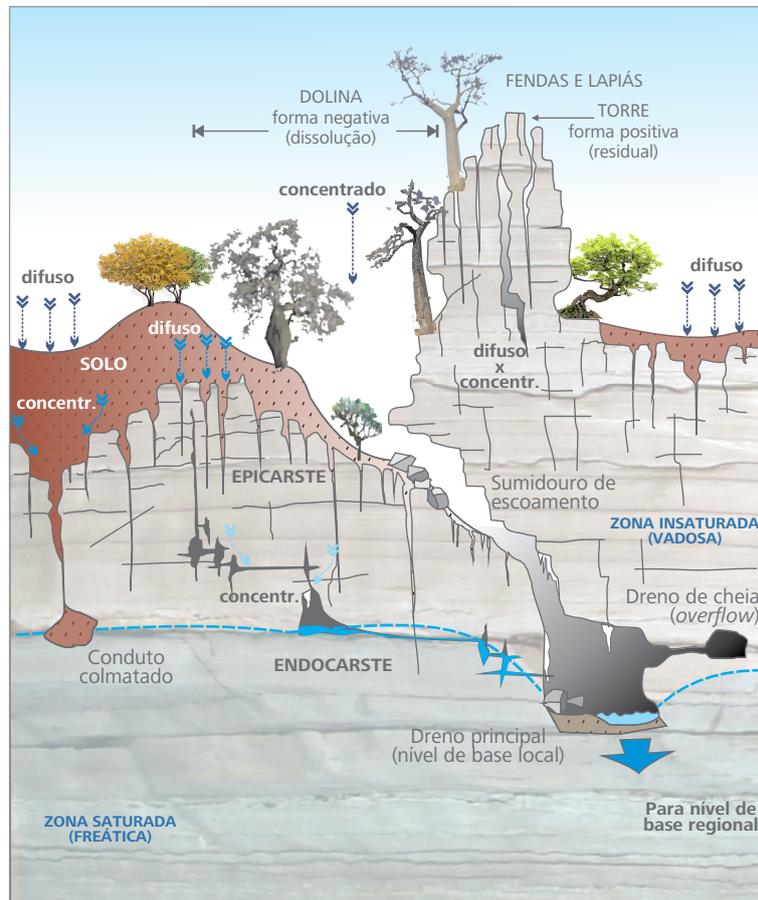
Finalmente, a figura 1.4.3 sintetiza os elementos e condições mais importantes para os geossistemas cársticos discutidos até aqui, trazendo como destaque, a título de ilustração, a conectividade e interdependência entre dois subsistemas de drenagem cárstica emblemáticos: dolina-caverna. Se um desses sistemas for analisado individualmente, o outro deverá ser considerado na perspectiva de sistema antecedente ou subsequente, caracterizando o ambiente de influência numa dada escala, ou numa dada extensão da cadeia de sistemas interdependentes.

Com base nessa síntese, os geossistemas cársticos podem ser representados esquematicamente conforme a figura 1.4.4, em que a célula conceitual básica de recarga-transmissão-descarga da água, quantificável através do balanço hídrico, é aplicável vertical e lateralmente, em qualquer compartimento e escala espacial.

Identificando um geossistema cárstico – exercício prático

No território esquematizado na figura 1.4.2 podem ser reconhecidos três amplos compartimentos topográficos bem distintos fisionomicamente, destacados como: (A) relevo montanhoso ou serrano onde há densa rede de drenagem com forte atuação erosiva; (B) extensa superfície tabuliforme, tal como uma chapada gradualmente dissecada por drenagens bem estruturadas; (C) área mais deprimida de topografia muito irregular com um apanhado diversificado de formas de relevo positivas e negativas, onde as drenagens superficiais apresentam-se muito mal organizadas.

Figura 1.4.3. Síntese dos elementos e condições mais importantes para os geossistemas cársticos. Ilustração: Mylène Berbert-Born



Compartimentações geomorfológicas abrangentes, tal como ilustrado pela figura 1.4.2, estão fundamentalmente relacionadas às diferentes associações de rochas existentes, estas por sua vez formadas, transformadas e estruturadas sob diferentes contextos geotectônicos¹² e gradativamente esculpidas e “redistribuídas” por processos de intemperismo e transporte, os quais são ditados pelas condições climáticas aliadas às forças gravitacionais. Existe, portanto, uma “equação genética” para essa compartimentação maior: diferentes rochas formadas e estruturadas em certo contexto geoambiental + transformações e modelagens por determinado conjunto de agentes e processos supergênicos = paisagem com fisionomia característica.

¹² Ambiência e regimes tectônicos: zonas da litosfera submetidas a compressões e distensões de diferentes magnitudes sob variados vetores de tensão, em decorrência do deslocamento das placas tectônicas sobre o manto terrestre convectivo.

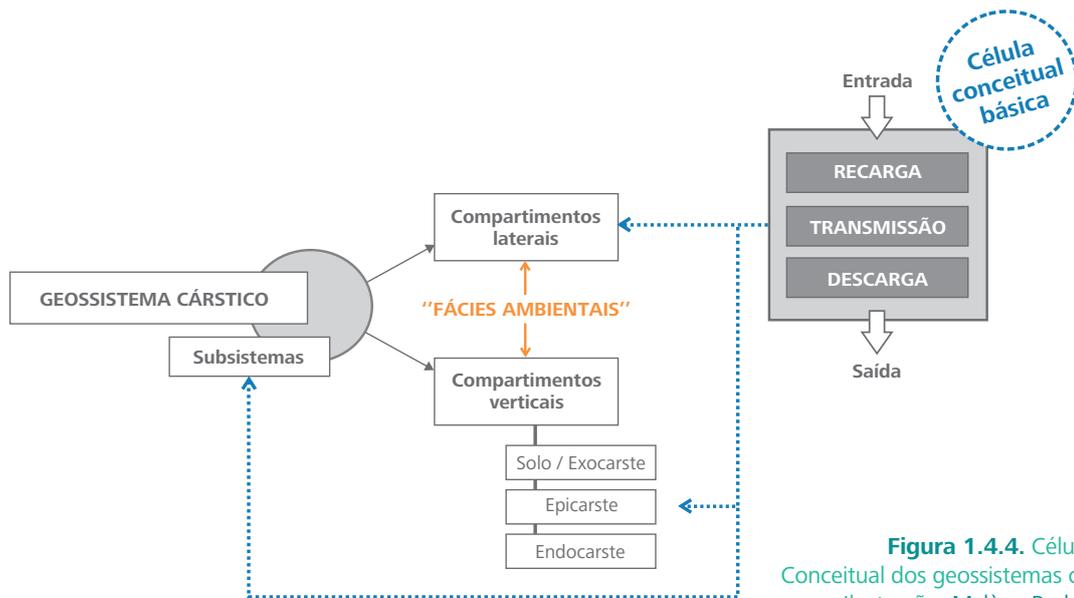


Figura 1.4.4. Célula Básica Conceitual dos geossistemas cársticos. Ilustração: Mylène Berbert-Born

A geomorfogênese de grande escala (geomorfologia regional) pode então ser considerada uma primeira aproximação ou critério preliminar para a delimitação de um geossistema cárstico de maior escala, que representaria todo o compartimento “C” da ilustração, onde se distinguem os componentes peculiares já assinalados na figura 1.4.1.

Todas essas feições ou modelado do relevo, que permitem individualizar claramente uma unidade territorial, na essência refletem uma condição de alta permeabilidade do substrato rochoso presente. O aumento da permeabilidade é a consequência da formação de redes de espaços no meio subterrâneo pela ação corrosiva da água, as quais se tornam progressivamente maiores e mais bem conectadas com o passar do tempo. A progressão da dissolução e, portanto, do grau de permeabilidade, é um dos fatores que dão margem à grande diversidade de terrenos cársticos existentes, posto que cada região pode se encontrar num estágio distinto de desenvolvimento (ver figura 1.2.7).

Até aqui, alguns quesitos já são satisfeitos no panorama sistêmico: fronteiras esboçadas (os limites entre compartimentos geomorfológicos regionais) delimitando um conjunto distinto de formas de relevo e materiais (feições e elementos característicos) cuja existência está vinculada a uma circunstância geoambiental particular: no caso, a combinação entre certa litologia (calcários e dolomitos), condição climática (presença de umidade) e gradiente topográfico (gerando um gradiente hidráulico e um potencial erosivo), tudo suscitando um processo em específico que é a dissolução carbonática (e demais fenômenos de erosão e acumulação associados), que tem como resultado primário o aumento expressivo da permeabilidade hidráulica.

Mas, nos geossistemas interessa ainda compreender a organização e as interações dos elementos constituintes, cujos padrões e mecanismos caracterizam a dinâmica temporal, a sucessão de estados do ambiente e o funcionamento do sistema ambiental de uma maneira geral.

Organização e funcionamento dos geossistemas cársticos

Deve-se ter em mente que organização e funcionamento são aspectos fortemente vinculados em qualquer sistema. À primeira vista, a paisagem cárstica pode parecer caótica, em razão da sua irregularidade e heterogeneidade; mas na verdade existe uma forte lógica na distribuição e na articulação dos elementos, em qualquer escala considerada. Por exemplo, em termos do relevo, algumas feições podem combinar-se repetidamente no espaço; alguns tipos de elementos morfológicos podem ocupar posições geográficas preferenciais; ou pode haver tendências quanto às dimensões ou expressividade de cada tipo de feição relativamente à sua situação geográfica. Vejamos:

- “lagos^(conjunto de componentes) circulares^(variável do atributo “forma”) dispersos^(arranjo) na planície do ribeirão^{(situação)”};
- “torres de pedra^(conjunto de um tipo de componente) com superfícies^(atributo) pontiagudas^(variável) alinhadas nas médias vertentes^(arranjo) da borda leste do platô^{(situação)”};
- “sistema dendrítico de tributários^(conjunto de componentes arranjados) perenes^(variável) à montante^(situação) do sumidouro^{(componente)”};
- “agrupamento de nascentes^(conjunto de componentes arranjados) intermitentes^(variável do atributo “dinâmica”) no sopé da serra^{(situação)”}.

Com a atenção apropriada é possível então individualizar subcompartimentos reunindo conjuntos de elementos em padrões de articulação que, ainda assim, mantêm um caráter preponderantemente morfológico. Então, "uma dezena de dolinas cônicas com sumidouros de escoamento, disseminadas num interflúvio em cotas acima de 650 metros" pode caracterizar, geomorfologicamente, um "planalto de dolinas". A figura 1.4.5 destaca alguns possíveis compartimentos morfológicos cársticos.

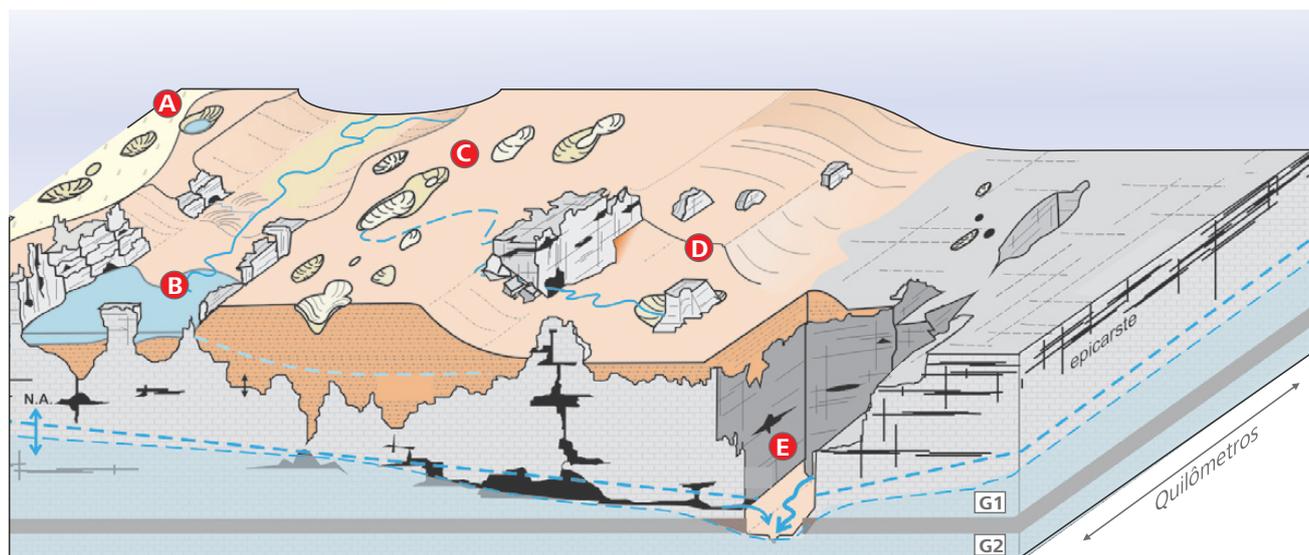
Mas é preciso ir um pouco além, saindo do âmbito meramente descritivo dessa compartimentação morfológica em busca das razões ou forças que governam a organização observada. Para começar, a própria combinação ou articulação entre componentes ou conjuntos de componentes, e especialmente entre os diversos compartimentos, sugere alguma relação ou interação entre eles.

Para facilitar o entendimento de uma série de conceitos importantes vinculados às relações de interação, toma-se uma análise reducionista enfocando a dolina que está destacada na figura 1.4.2. Ela é tratada como um "pequeno" sistema, ou subsistema, conforme detalhado à frente na figura 1.4.6 (a).

Esse subsistema com propriedades diferenciadas pode ser considerado um geofácies do geossistema maior, estando delimitado pelo critério morfológico. As fronteiras são o próprio contorno da dolina, materializado pela linha de quebra do relevo onde há súbito aumento das declividades das vertentes. O ambiente da dolina, também chamado "entorno" (ou área de influência mais relevante), corresponde a todo o perímetro onde possa acontecer algum tipo de interação com a dolina, por exemplo, a área de onde sejam importados água, sedimentos, fauna etc. que serão *inputs* para a dolina, e para onde sejam exportados todos os *outputs* provenientes da dolina, como vapores de água, elementos da fauna, flora etc. que tenham circulado pela dolina ou que tenham sido nela processados.

Os principais componentes da dolina exemplificada que podem estar se relacionando são:

- a escarpa que ocupa parte do perímetro da dolina (E);
- as vertentes e contorno da dolina (V) e (C);
- os materiais inconsolidados (solo) presentes na periferia, margens, vertentes e fundo da dolina (S);
- a vegetação, setorizada tal qual os solos (M) e (Ms);
- um sumidouro situado ao fundo da dolina que se prolonga em um canal subterrâneo (Su);
- toda a biota intersticial/cavernícola e não cavernícola (Bi) e (Be);
- o microclima (Mc).



Unidades geomorfológicas

- A. Campo de dolinas setentrional (carste encoberto)
- B. Poljé e vertentes do baixo ribeirão (carste exumado)
- C. Campo de dolinas meridional (planalto)
- D. "Serra do Calcário" (maciços e torres da encosta sul)
- E. Vale do rio (fluviocarste)

Unidades geológicas

- G1. Grupo "G", Subunidade "G1" (Membro 1, fácies 1...)
- G2. Grupo "G", Subunidade "G2" (Membro 2, fácies 2...)

Figura 1.4.5. Exemplo de compartimentação de um geossistema cárstico hipotético baseada em aspectos morfológicos. Ilustração: Mylène Berbert-Born.

Na caracterização das relações de dependência, sempre deve ser possível descrever a maneira e a intensidade como se expressam, observando se os elementos estão direta ou indiretamente associados, se são mutuamente dependentes ou influentes, ou se um é conseqüente do outro. As relações podem ser inicialmente verificadas a partir de duas perguntas simples: “perturbando um, afeta qual?” e “em quais intensidades?”. Para o exame da dolina ilustrada, o questionamento de algumas hipóteses ajuda a estruturar o quadro dos relacionamentos que está proposto na figura 1.4.6 (B):

Hipótese A – Eliminando a escarpa (perturbação muito intensa)

Hipótese B – Modificando ou eliminando parcialmente a escarpa (perturbação leve a moderada)

Hipótese C – Substituindo a mata da dolina por pastagem (perturbação muito intensa)

Hipótese D – Entupindo completamente o sumidouro (perturbação muito intensa)

Note-se pelo esquema de relacionamentos da figura que a escarpa aparece exercendo algum tipo de influência direta ou indireta sobre todo o elenco, sendo que a existência de alguns dos componentes do sistema depende diretamente da sua existência e configuração, no caso Ms, Su, Bi e Mc. Logo, a escarpa deve ser considerada um componente essencial ou limitante para o subsistema da dolina.

As relações de dependência entre componentes necessariamente expressam-se mediante a atuação de algum tipo de mecanismo de interação. Um importante exemplo de mecanismo de interação entre elementos e/ou compartimentos é o “fluxo ou transferência de matéria”, que pode ser subdividido em três diferentes processos: desagregação/remoção, movimentação, e deposição. Um fenômeno de assoreamento é o efeito da incorporação de materiais em um determinado espaço, no caso, sedimentos que foram remanejados a partir de outros locais. Nesses outros locais obviamente houve a supressão de materiais. O entalhe é o efeito na outra ponta desse mecanismo de transferência. Esses efeitos são materializados por feições morfológicas características, que de um lado são as formas de erosão (denudação) e de outro as formas de deposição (agração).

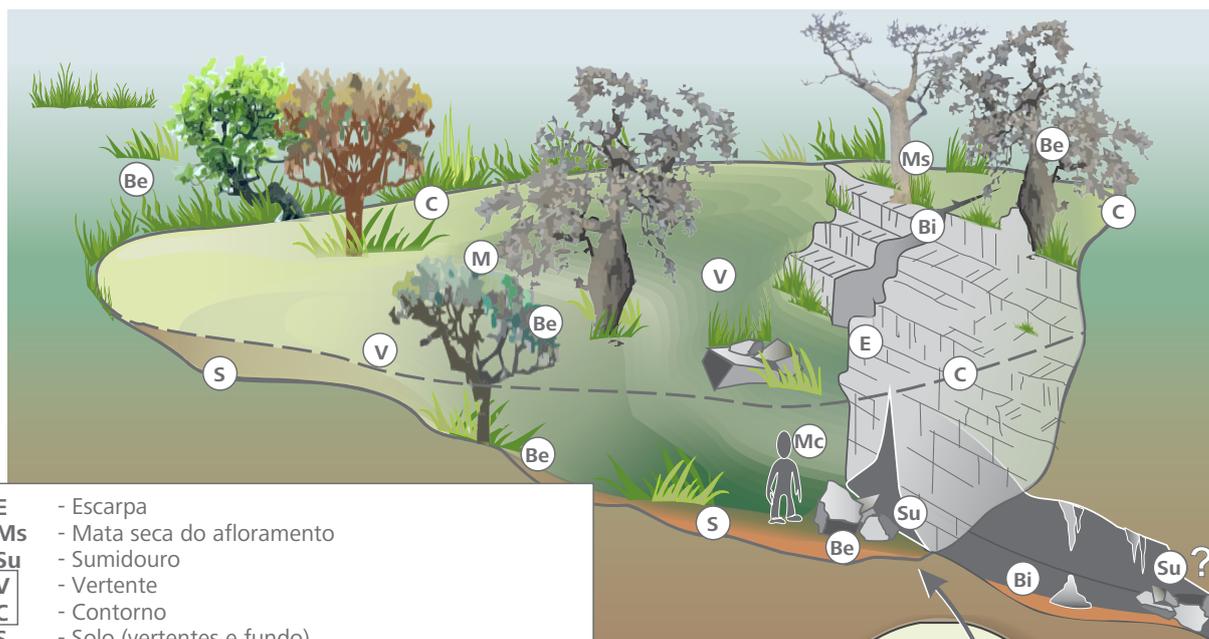
Todo mecanismo ao seu tempo precisa de uma força ou agente para ser processado, e sofre algum tipo de regulação. A transferência de matéria do exemplo em questão pode ser conduzida pela água (agente de transformação) respondendo à gravidade (força de transformação), e também pelo vento respondendo à dinâmica atmosférica; mas também poderia ocorrer em resposta a uma força ou a um novo estado de forças que passe a atuar, como o desbloqueio de algum anteparo. Água, vento e gravidade são sempre importantes fatores governantes de processos ambientais, além de um amplo rol de ações antrópicas.

A regulação, por sua vez, é realizada tanto por parâmetros passivos (variáveis) como a geometria da superfície (perfil, inclinação, extensão...), a natureza dos materiais na área fonte (granulometria, coesão/cimentação...), a cobertura vegetal e outros aspectos relativos ao balanço entre a infiltração e o escoamento; como também por parâmetros ativos tais como o volume da água, a intensidade do impacto das gotas sobre a superfície etc.. Vale destacar que alguns desses parâmetros de regulação são que definem o nível de estabilidade do “substrato de transformação”, ou seja, os limiares da resistência à transformação e a resiliência, que é a capacidade de recuperação frente um distúrbio. É o caso da maior ou menor propensão de escorregamento de massa, regulado pelas forças de atrito e coesão entre as partículas do solo. Solos mais coesos ou cimentados de uma maneira geral resistirão mais a fenômenos de escorregamento; solos com melhor drenagem vertical facilitam a dessaturação e aumentam a resiliência de encharcamento, dessa forma também prevenindo movimentos de massa. Ambas são condições que elevam o grau de estabilidade da vertente.

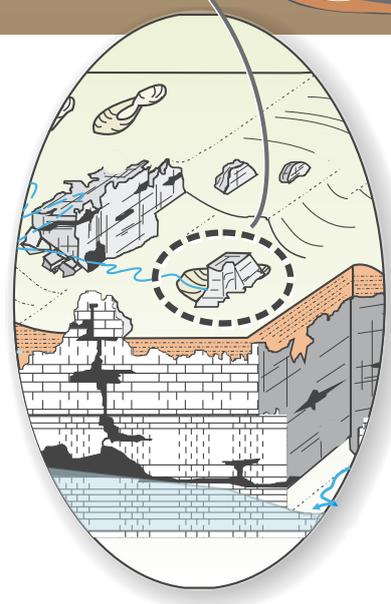
Por fim, o funcionamento do ambiente é compreendido na medida em que são conhecidos os mecanismos de interação dos elementos e compartimentos, e seus agentes correspondentes, bem como os resultados ou produtos dessas interações. Considerando algum objetivo mais específico que se tenha, por exemplo, realizar um balanço hídrico local para avaliar ganhos para o meio subterrâneo por contribuição da dolina, pode-se recorrer a uma simplificação analítica e analisar o sistema-dolina apenas na perspectiva da atuação da água, em seus aspectos físicos e químicos.

A seguir são relacionados, a título de ilustração, alguns dos principais “insumos” de energia e de matéria envolvidos na interação da dolina com o meio, e alguns possíveis produtos processados.

a **DOLINA-ESCARPA** T0 + T1



- | | |
|-----------|--|
| E | - Escarpa |
| Ms | - Mata seca do afloramento |
| Su | - Sumidouro |
| V | - Vertente |
| C | - Contorno |
| S | - Solo (vertentes e fundo) |
| M | - Mata (vertentes e fundo) |
| Mc | - Microclima na dolina |
| Bi | - Biota intersticial da rocha/troglóbios/trogloxenos |
| Be | - Biota não cavernícola e troglófilos |



b **Relacionamentos**

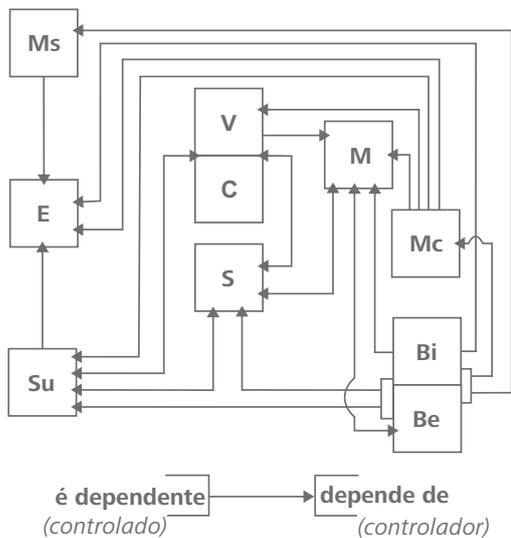


Figura 1.4.6. Aspectos levados em consideração na análise sistêmica de uma dolina, concebendo-a como um subsistema ou geofácies de um sistema hidrológico, num dado geossistema cárstico. Explicações ao longo do texto. Ilustração: Mylène Berbert-Born

ENERGIA

Energia que entra: radiação solar (ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos – curtas/ultravioleta), visível (luz), curtas-médias/infravermelho (calor); radiação terrestre e terrestre refletida (infravermelho termal).

Energia que sai: radiação solar refletida na superfície. Energias potenciais convertidas em trabalho na dolina: cinéticas (movimentos da água, movimentos de massa e partículas...); processos metabólicos, químicos e bioquímicos... (fotossíntese, decomposição, intemperismo...)

MATÉRIA

Matéria que entra: soluções e solutos – águas e compostos dissolvidos. Água de chuva (precipitação direta), água de escoamento superficial e subsuperficial (runoff), substâncias químicas dissolvidas; gases (incluindo o ar); particulados inorgânicos e orgânicos trazidos pela água, pelo vento (ar em movimento) e por animais; os próprios animais e vegetais (sementes, pólen etc.).

Matéria que sai: água (por escoamento superficial, infiltração, evapotranspiração); gases (convecção, evaporação, respiração, transpiração e decomposição); particulados inorgânicos e orgânicos levados pela água, pelo vento e por animais; os próprios animais e vegetais. Matéria de transformação na dolina (energia $\leftarrow \rightarrow$ matéria)

Todo o elenco que de alguma forma se relaciona com a dolina demarca um “campo de interação” da dolina. Se tomado em toda a sua amplitude, o campo de interação pode se estender enormemente. Alcançar, por exemplo, o contexto distante da formação dos vapores que após longo trajeto precipitarão sobre a dolina, uma vez que a composição química (isotópica) da água que entrará na dolina a partir da chuva poderá ser determinada já nesse contexto distante. A respeito da amplitude dos relacionamentos mantidos com a dolina, a função é um aspecto fundamental da análise sistêmica, pois preceitua o alcance daquelas relações que podem ser consideradas mais significativas dentro da grande teia de interações. Tendo sido identificadas as funções de um sistema, o alcance das relações “relevantes” pode ser definido pelo ponto em que uma perturbação passa a comprometer qualquer das suas efetivas funções. Nesse critério, não haverá um traçado único e permanente do que possa ser considerado o sistema mais interativo, tendo em vista que esse traçado dependerá do tipo e magnitude da perturbação, e sobre qual elemento ela estará incidindo.

Essa concepção é bastante pertinente ao que pode ser considerado como “área de influência relativa” à dolina. A área de influência relativa à função ecológica da população de morcegos terá traçado e alcance envolvendo a cadeia específica de elementos necessários, por exemplo, à função de polinização, os quais serão muito distintos da área necessária para garantir a função hidrológica de direcionamento do fluxo superficial para zonas preferenciais de escoamento subterrâneo. Estas funções foram identificadas como inerentes à dolina exemplificada. Mas pode ser que, a partir da sua contextualização num meio, em que as relações com outros sistemas passam a ser estruturadas, alguma função combinada (conjunta ou sequenciada) ou função complementar entre sistemas também seja revelada, por exemplo, a interação hipotética entre diferentes dolinas a partir de uma conexão subterrânea comum a todas, aumentando significativamente a complexidade da análise.

De maneira similar a esta rápida análise da dolina, vários outros subsistemas cársticos, a exemplo dos que foram destacados na figura 1.4.2, podem ser recortados e descritos na perspectiva de entrada de água/particulados/nutrientes/gases/energia (insumos e agentes) \rightarrow circulação/fluxo e processamentos dos insumos \rightarrow saída dos insumos (entrada/input - processamento/throughput - saída/output).

1.5. Fragilidade e vulnerabilidade dos ambientes cársticos

A fragilidade e a vulnerabilidade dos ambientes cársticos são discutidas neste tópico sob o referencial terminológico e conceitual relativo a sistemas, e a sistemas ambientais em particular, tratado nos tópicos 1.3 e 1.4.

Um ambiente estável é um ambiente resistente a perturbações; diante de um distúrbio ou pressão consegue manter-se íntegro, sem modificações significativas que possam comprometer a sua estrutura (componentes e interações), funcionamento (processos e atividades) e funções (finalidades ecológicas, sociais). Também são considerados estáveis aqueles ambientes que conseguem se recuperar facilmente de um distúrbio, reavendo rapidamente suas condições originais ou sendo capazes de ajustar-se sem comprometimento das suas características, demonstrando resiliência (Brunsden e Thornes 1979; Christofolletti 1999). Os impactos das perturbações sobre esses ambientes mais estáveis (resistentes ou resilientes) tendem a ser inexpressivos, em geral temporários, reversíveis e pouco abrangentes, pois os limiares de transformação não são facilmente alcançados.

Com o carste é diferente, os efeitos resultantes de perturbações podem ser intensos, abrangentes e, especialmente, costumam ter alto grau de incerteza, expressando o caráter de grande instabilidade desses ambientes. Um exemplo é o que ocorre quando há o rebaixamento do nível da água subterrânea para além dos limites da sua flutuação natural. Essa situação sinaliza a sobreexploração ou despejo das reservas reguladoras que garantem o equilíbrio entre o aporte e a descarga de um aquífero, ou aponta simplesmente a redução do aporte da água para o sistema hídrico subterrâneo. De toda maneira, é um desequilíbrio que compromete qualquer tipo de ambiente não só por colocar em risco os estoques permanentes do manancial subterrâneo, mas também por reduzir seriamente a contribuição ou descarga da água subterrânea para os corpos d'água superficiais. A consequência é a diminuição das vazões (volumes) e do escoamento de base (escoamento mínimo) dos períodos secos prejudicando as funções ecológicas dos cursos superficiais e a própria disponibilidade dos mananciais superficiais. Em áreas cársticas, onde a sazonalidade hídrica é especialmente marcante em vista da permeabilidade, a situação se torna mais grave, pois o débito adicional dos aportes d'água implica maior estresse ecológico nos períodos de estiagem e, conseqüentemente, dependência mais crítica dos períodos úmidos (figura 1.5.1).

Em áreas cársticas é realmente comum nascentes secarem e córregos perenes passarem à intermitência ou mesmo à permanente seca em decorrência da indisponibilidade dos aportes subterrâneos, exacerbando o déficit superficial. Como exemplo, no interflúvio entre os rios Corrente e Carinhanha, região cárstica no oeste do estado da Bahia conhecida como Serra do Ramalho, algumas nascentes ao sopé da serra calcária tornaram-se inativas no decorrer da primeira década do milênio, comprometendo a subsistência de pequenas comunidades rurais. O período foi marcado pela intensificação do desmatamento nos platôs da serra e conseqüente instalação de processos erosivos, com algumas implicações: (figuras 1.5.2 e 1.5.3):

(a) aumento do escoamento superficial, redução da infiltração e aumento da evapotranspiração nos compartimentos de recarga hídrica; e

(b) desativação de canais d'água alimentados pela infiltração difusa no solo e aumento da carga sedimentar para alguns canais preferenciais de drenagem, tanto superficiais como subterrâneos, com generalizado processo de assoreamento de alguns setores situados nas zonas de circulação e descarga hídrica.

Há outra questão importante relacionada à dinâmica hídrica além desse aspecto da disponibilidade da água. O rebaixamento do nível da água também é acompanhado pela perda da pressão hidrostática que, no carste, pode estar dando sustentação a pacotes de rocha e principalmente ao solo acima dos frequentes "vazios" de dissolução endocárstica, um desequilíbrio de forças que pode ocasionar afundamentos súbitos e grandes movimentos de massa: os colapsos ou subsidência de rocha e solos. Estas são transformações bruscas, significativas e praticamente irreversíveis – portanto intensas – na superfície e no próprio meio subterrâneo (e.g. entupimento permanente de canais subterrâneos pela injeção de solos).

No caso dos fenômenos de subsidência, é muito difícil conhecer os limiares do equilíbrio água-rocha-solo uma vez que, dada a heterogeneidade vertical e lateral da dissolução cárstica, é impraticável remontar a configuração do contato solo-rocha, a estruturação do epicarste (horizonte mais superficial e mais carstificado da rocha) e a carstificação mais profunda em toda a área potencialmente influenciada pelo rebaixamento do nível d'água.

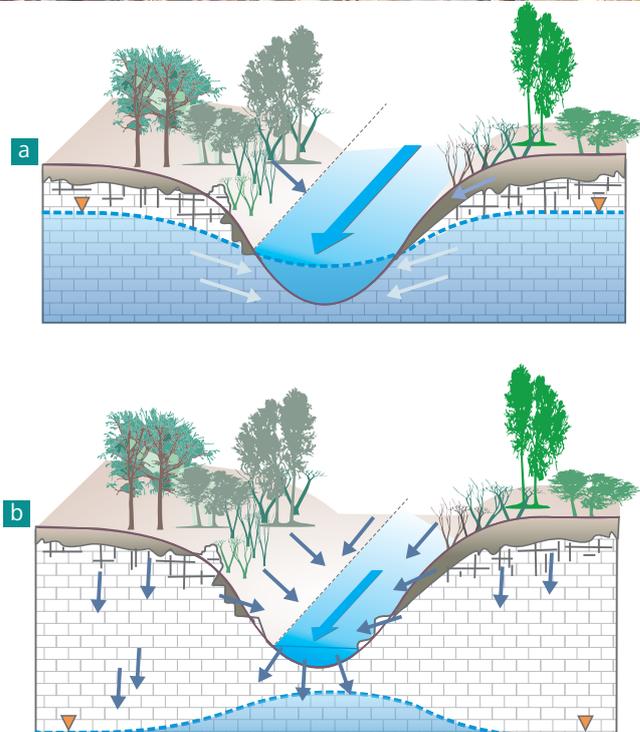


Figura 1.5.1. Leito de drenagem efêmera em substrato calcário. O fluxo no canal depende dos aportes de água do escoamento superficial (1), da percolação subsuperficial pelas fissuras que se concentram no topo do substrato rochoso (epicarste), em geral alimentada pelo armazenamento temporário de água no solo (2) e da descarga da zona aquífera saturada mais profunda, caso o canal intercepte o nível freático, perfazendo um somatório de contribuições que se avolumam de montante para jusante (3). O desequilíbrio em qualquer dos contribuintes terá reflexos sobre a dinâmica física, química e temporal da drenagem superficial. O destaque superior mostra uma pequena descarga do escoamento através de juntas da rocha; o destaque inferior ilustra a relação sazonal do aporte subterrâneo em razão das flutuações do nível freático local: comportamento efluente (a) e influente (b). Ao fundo da imagem principal, pessoa posicionada no canal servindo como escala. Fotos e ilustração: Mylène Berbert-Born.



Figura 1.5.2. Erosão decorrente da perda da cobertura vegetal. O escoamento superficial intensifica em volume e energia, aumentando a carga detrítica que, no carste, adentra os sistemas de circulação hídrica subterrânea através de sumidouros e fissuras de dissolução da rocha. Os condutos acabam sendo colmatados por sedimentos, detritos orgânicos, e materiais contaminantes que podem prejudicar importantes mananciais. (a1) Imagem aérea de área de recarga em relevo cárstico (Google Earth de 22/5/2013, coordenada central 13°33'06"lat.S e 43°51'03"long.W, imagem invertida) e (a2) visão em superfície de afloramento calcário lapiezado, recebendo carga sedimentar da erosão da encosta. (b) Erosão linear relacionada a atividade pecuária (desmatamento e trânsito de animais). (c) Escoamento superficial com alta carga detrítica. (d) Sedimentos, galhos e lixo carregados para um sumidouro, entulhando conduto subterrâneo. Fotos e ilustração: Mylène Berbert-Born.

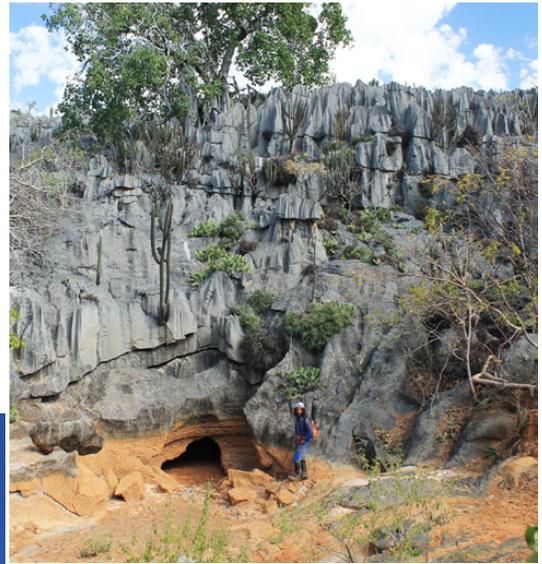
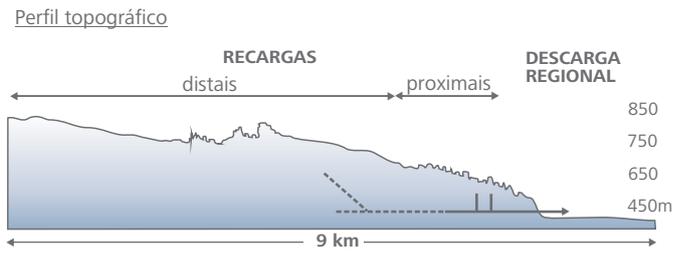


Figura 1.5.3. Nascentes cársticas em zonas de descarga hídrica. Processos de erosão nas áreas de recarga (vide figura 1.5.2) podem entupir condutos que transmitem a água para as zonas de descarga, secando ou alterando o fluxo nas ressurgências do sistema hídrico. Na foto maior, a remoção da mata ciliar também provoca o assoreamento das drenagens contribuindo para alterar a dinâmica da circulação subterrânea de sistemas situados à montante. No destaque ao alto, nascente cárstica sazonal na Serra do Ramalho, oeste da Bahia: algumas dessas nascentes tornaram-se inativas nos últimos 15 anos, possivelmente devido aos desmatamentos no topo da serra calcária. Fotos: Mylene Berbert-Born.

Algo válido apenas para áreas relativamente pequenas mediante métodos geofísicos e sondagens em geral dispendiosas, noutros casos restando considerar estimativas probabilísticas de maior ou menor risco para o fenômeno a partir da existência de indícios.

Além disso, contaminações de cursos d'água também podem ser amplamente disseminadas em áreas cársticas quando são alcançados condutos subterrâneos interligados, que caracterizam a típica porosidade secundária de aquíferos de dissolução (aquíferos cársticos), retratando exemplo de impacto que pode se estender por grandes áreas. Só que, nesses aquíferos, a extensão, a orientação e o grau de conectividade envolvendo a malha de condutos, fraturas e poros da matriz rochosa são aspectos extremamente incertos, agravado pelo fato de que podem existir compartimentos que interagem apenas durante alguns períodos e, ainda, locais que funcionam como reservatórios temporários de volumes indeterminados de água. Nessas condições, prever a velocidade e o alcance da contaminação pode ser muito difícil; por conseguinte, problemático discriminar a repercussão temporal sobre a saúde das populações humanas e comunidades faunísticas que utilizam a água, um cenário bastante desfavorável à remediação.

Acontece ainda que mesmo pequenas perturbações podem repercutir amplamente sobre a configuração e funcionamento dos ambientes cársticos, especialmente porque a estrutura desses ambientes – uma estrutura de componentes fortemente interligados e interdependentes – enseja efeitos em cadeia.

A drenagem de uma pequena área naturalmente alagada pode ser explorada como outro exemplo de reação em cadeia que pode ocorrer a partir de distúrbios pontuais numa área cárstica. O dreno pode subitamente favorecer o escoamento de uma zona aquífera que se encontrava num limiar de carga hidráulica, promovendo um novo desenho dos gradientes hidráulicos a partir do rebaixamento do nível freático à montante. O aumento desses gradientes à montante pode induzir a transferência de estoques de água armazenados em compartimentos superficiais (epicarste e solo) para níveis mais profundos, podendo assim diminuir a disponibilidade hídrica para a cobertura vegetal e ainda modificar as condições mecânicas do solo (retração de argilas; compressão de areias...). Além disso, o rebaixamento do nível freático pode secar poços e nascentes à montante do dreno. Os reservatórios superficiais de água formados nos períodos chuvosos são aqueles que muitas vezes garantem o lento aporte de água para as zonas mais profundas durante a seca, ajudando a manter determinado nível mínimo e vazões de base das drenagens locais. A mudança na dinâmica de infiltração e armazenamento superficial induzida pelo dreno, levando à redução ou exaustão desses estoques, pode tornar mais críticos os déficits de seca, comprometendo diversas funções hídricas desse período.

· Mesmo pequenas perturbações
· podem repercutir amplamente
· sobre a configuração e
· funcionamento dos ambientes
· cársticos, especialmente porque
· a estrutura desses ambientes –
· uma estrutura de componentes
· fortemente interligados e
· interdependentes – enseja
· efeitos em cadeia.

As reações em cadeia disparadas por pequenos distúrbios mostram que o carste é um ambiente via de regra sensível, em “limiares de transformação”. A estabilidade e a sensibilidade dos ambientes cársticos podem ser compreendidas melhor a partir de duas perspectivas extremas, considerando-se em uma ponta os compartimentos hidrologicamente ativos e muito dinâmicos, e na outra ponta os compartimentos “confinados” que não possuem mais atividade hídrica. Logicamente, entre essas duas condições há várias outras possíveis em termos de dinamismo e “grau” de isolamento, entre as quais:

- compartimentos não confinados com atividade hídrica permanente e constante (“invariável no tempo” – em estado estacionário de curto e médio termo), situados na zona insaturada/vadosa ou na zona saturada/freática;
- compartimentos já inativos hidrologicamente, mas nem por isso confinados, ocorrências na zona insaturada em conexões com a superfície ou com compartimentos dinâmicos;
- compartimentos confinados em zona saturada renovável (condição de aquífero confinado a semiconfinado).

Estas são algumas entre outras situações “intermediárias” que mostram a coexistência de locais no sistema cárstico com níveis de sensibilidade bem distintos. Ocorre que, de uma maneira muito heterogênea e peculiar, e em razão da sua natureza estrutural e da dinâmica evolutiva discutidas anteriormente, no carste existe uma compartimentação muito bem estabelecida, tanto lateral – de montante (recarga) para jusante (descarga hídrica) – quanto vertical (solo – epicarste – rocha insaturada – rocha saturada). Esses compartimentos laterais e verticais se superpõem no espaço de modo complexo, como abordado no tópico 1.4. Como resultado, compartimentos mais ativos e dinâmicos – notadamente pela atuação da água – estão muitas vezes justapostos a compartimentos em estado de isolamento e “confinamento” quase pleno, figurando a forte heterogeneidade característica dos ambientes cársticos.

Sabe-se que água é um agente de transformação e também um recurso de readaptação e renovação do ambiente, especialmente quando há condições de fluxo. Uma pegada pode ser prontamente apagada em um leito de rio, mas pode permanecer gravada por longo tempo onde não haja a ação da água ou de algum outro elemento potencialmente transformador. Os locais mais confinados encontram-se em condição mais estável, sujeitos a nenhuma ou mínimas flutuações naturais do ambiente circundante; porém, são potencialmente menos resistentes e menos resilientes às perturbações que os atinjam, sendo portanto mais sensíveis do que os compartimentos hidrologicamente ativos. O rompimento de um estado de confinamento dá margem a alterações significativas no ambiente físico que podem, a título de exemplo, comprometer seriamente a sobrevivência de espécies muito adaptadas à pequena amplitude de condições originais do meio (conforme seção Biologia Subterrânea).

Por outro lado, os compartimentos do carste hidrologicamente mais dinâmicos são aqueles cujas respostas aos agentes controladores de curto termo (variações climáticas sazonais, por exemplo) se expressam em grandes flutuações processuais. Sob outro ponto de vista, o forte dinamismo, que se aproxima da definição mais global do carste, também caracteriza condição de elevada sensibilidade ambiental. Justamente porque os ambientes cársticos se encontram em condições naturais normalmente extremas – grandes variações sazonais do nível d'água, energia de fluxo d'água muito variável, perfis de encostas em ângulos elevados, fauna extremamente adaptada etc. – os limiares de equilíbrio estão sempre próximos da ruptura, de forma que já existe um grande potencial natural para que sucedam transformações significativas caso ocorram mudanças nos agentes controladores externos.

Mas é importante considerar que as transformações naturais são um *continuum* de autoajustes do ambiente diante das condições emergentes da sua própria evolução natural, compreendendo os chamados “controladores internos”; as transformações não são necessariamente induzidas por mudanças nos fatores externos que controlam o ambiente como seria, por exemplo, uma mudança no influxo de água para o ambiente. A diferença é que autoajuste e autorregulação são mecanismos de adaptação que buscam a conservação (persistência) ou “sobrevivência” do ambiente em novos estados de equilíbrio (“homeostase dinâmica”, Chorley e Kennedy 1971) – a chamada “retroalimentação negativa” (Christofolletti 1979, 1999), em que os efeitos dos distúrbios são amenizados ou neutralizados pelas próprias reações do sistema –, enquanto alterações agudas dos parâmetros controladores externos e internos podem levar à ruptura do equilíbrio e à rápida destruição do ambiente ou a prejuízos significativos que irão requerer grandes adaptações em busca de um novo equilíbrio (ver exemplo da figura 1.3.5).

A existência dessa perspectiva de “dano e perda” de uma condição original diante de uma perturbação de estado que possa ser considerada aguda mesmo tendo pequena magnitude vem retratar o caráter de alta suscetibilidade e vulnerabilidade do carste. Claro que se trata de uma generalização, abstraída da grande diversidade de “fatores de momento e espaço” que controlam os estágios evolutivos do ambiente, o ritmo e a predisposição a transformações. Nesse sentido, os fatores controladores mais importantes devem ser reconhecidos previamente a qualquer intervenção pretendida.

Em síntese, fica nítido que a magnitude e extensão das alterações (impactos) em um ambiente não dependem apenas da ação ou fator que as motive (magnitude, abrangência, frequência etc.), mas também do quão sensível e complexo, ou seja, propenso a mudanças, possa se encontrar o ambiente sobre o qual elas incidem, num dado momento (Brundsen e Thornes 1979). Conforme Sánchez (2013, p.125-126), o “potencial de impacto ambiental” é assinalado confrontando-se a solicitação ou pressão da ação com a vulnerabilidade do meio, ponderando-se adicionalmente a perspectiva da importância do ambiente como um “critério social”. O potencial de impacto evidentemente cresce diante de solicitações maiores sobre ambientes mais vulneráveis e importantes, como ilustrado na figura 1.5.4.

Os ambientes cársticos ocupam a área sombreada da figura; onde o limiar para que o impacto seja considerado significativo é menor quando comparado a outros tipos de ambientes. Esta é a melhor representação de que obras e ações sobre ambientes cársticos normalmente envolvem um alto potencial de impacto, ainda que as solicitações impostas sejam relativamente pequenas.

· A magnitude e extensão
· das alterações (impactos)
· em um ambiente não
· dependem apenas da
· ação ou fator que as
· motive (magnitude,
· abrangência, frequência
· etc.), mas também do
· quão sensível e complexo,
· ou seja, propenso a
· mudanças, possa se
· encontrar o ambiente
· sobre o qual elas incidem,
· num dado momento.

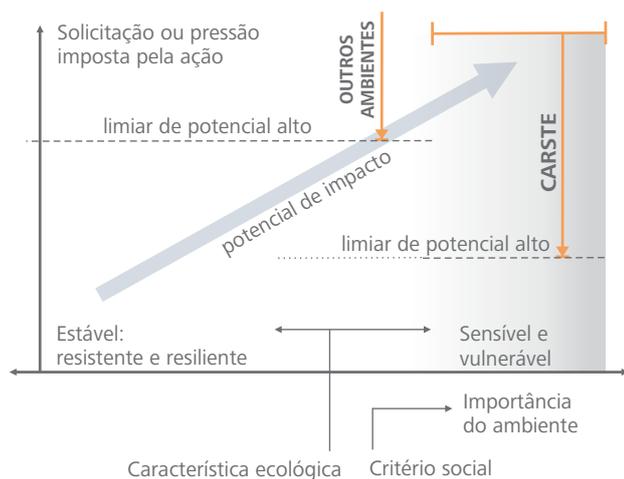


Figura 1.5.4. Potencial de impacto em função das características do meio e da pressão sobre ele. Ilustração: Mylène Berbert-Born. Modificado de Sánchez (2013).

1.6. Retrato da importância dos ambientes cársticos

Adentrando a perspectiva da importância do carste, cabe observar a existência de diversos programas científicos e governamentais voltados especificamente para o conhecimento, controle e proteção desses ambientes, articulados interdisciplinarmente e muitas vezes em ampla cooperação internacional, o que na prática demonstra a forte preocupação para com eles. Isso atesta a importância e a condição de vulnerabilidade dos ambientes cársticos, respaldando seu posicionamento na porção direita da figura 1.5.4.

Um exemplo emblemático é a operação conjunta que a Unesco e a União Internacional de Ciências Geológicas (*International Union of Geological Sciences – IUGS*) realizam há 25 anos, com programas internacionais voltados à compreensão da natureza cárstica. Desde 1990 foram cinco programas específicos (*International Geoscience Programme – IGCP*):

IGCP 299	Geologia, clima, hidrologia e formação do carste	1990-1994
IGCP 379	Processos cársticos e o ciclo global de carbono	1995-1999
IGCP 448	Correlação mundial da hidrogeologia cárstica e ecossistemas relevantes	2000-2004
IGCP 513	Estudo mundial dos aquíferos e recursos hídricos cársticos	2005-2010
IGCP/SIDA 598	Mudanças ambientais e sustentabilidade em sistemas cársticos	2011-2015

(Fonte: Tales Set in Stone – 40 Years of the International Geoscience Programme (IGCP) – Unesco/IUGS, Derbyshire (2012), <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002152/215219e.pdf>)

A preocupação com a integridade das áreas cársticas, em vista dos seus valores naturais, culturais, científicos e, especialmente, da importância e vulnerabilidade dos seus recursos hídricos, também está amplamente destacada nas trinta e uma “Diretrizes para a Proteção de Cavernas e Áreas Cársticas” (*Guidelines for Cave and Karst Protection*, Watson et al. 1997), um documento-guia direcionado à gestão de áreas cársticas elaborado pela Comissão Mundial de Áreas Protegidas da União Internacional para a Conservação da Natureza e dos Recursos Naturais (*World Commission on Protected Areas of the International Union for Conservation of Nature – WCPA-IUCN*).

Outro exemplo pode ser tomado da “Ação 620 – Vulnerabilidade e mapeamento de risco para a proteção de aquíferos carbonáticos (cársticos)” desenvolvida pela Cooperação Européia em Ciência e Tecnologia (*European Cooperation in Science and Technology – COST*) em apoio à gestão das áreas cársticas europeias e seus recursos hídricos, a partir da consolidação de uma metodologia de avaliação da vulnerabilidade aquífera – método “COP+K” – e da identificação de áreas de recarga mais vulneráveis à poluição (Zwahlen 2003).

Mapas de vulnerabilidade de aquíferos cársticos vêm sendo elaborados há bastante tempo, notadamente em países que dependem fortemente dos recursos hídricos associados aos terrenos cársticos, como é o caso dos Estados Unidos e do Canadá. O Serviço Geológico dos Estados Unidos (*USGS*) mantém um grupo de pesquisadores em terrenos cársticos (*Karst Interest Group – KIG*) especialmente concentrados nos extensos e importantíssimos aquíferos cársticos do país. No Canadá, em particular por iniciativa governamental da província da Columbia Britânica, tem sido reservada ampla atenção para o manejo de florestas e recursos hídricos de áreas cársticas, com ações de inventário de feições cársticas e recursos associados, mapeamento do potencial cárstico e classificação de áreas por grau de vulnerabilidade (B.C. Ministry of Forests 2001, 2003; Pike et al. 2010).

Também em nível mundial, a Comissão de Carste da Associação Internacional de Hidrogeólogos (Karst Commission of the International Association of Hydrogeologists-IAH) vem trabalhando desde 2012 num projeto para a elaboração do primeiro mapa mundial de aquíferos cársticos (World Karst Aquifer Mapping Project - WOKAM), que deve ser concluído em 2016.

No Brasil, medidas visando a gestão de grandes aquíferos cársticos são muito recentes e começaram pioneiramente na bacia hidrográfica do rio São Francisco com o projeto “Avaliação hidrogeológica dos sistemas aquíferos cársticos e fissuro-cársticos na região hidrográfica do São Francisco, com vistas à gestão compartilhada de recursos hídricos” (Agência Nacional de Águas-ANA, inédito). Cerca de 20% da área dessa bacia é formada por rochas carbonáticas que constituem três extensos sistemas aquíferos cársticos associados às rochas dos Grupos Bambuí, Una e Formação Caatinga. Embora sejam armazenadores e transmissores de volumes enormes de água para o rio São Francisco, atuando na regulação do seu fluxo de base, só agora desperta-se para a importância desses aquíferos, num oportuno momento em que o Plano de Recursos Hídricos da Bacia está sendo reformulado para uma nova década de ações. Vale lembrar que rio São Francisco é estratégico para os programas de desenvolvimento regional traçados pelo governo federal e governos estaduais de seis unidades da federação, os quais se baseiam em grandes projetos de irrigação e na integração de bacias (ou projeto da transposição do rio São Francisco para regiões nordestinas de grande déficit hídrico).

Ainda no âmbito da Bacia do São Francisco, também vale menção às ações coordenadas de longo prazo do “Plano de Ação Nacional para a Conservação do Patrimônio Espeleológico nas áreas cársticas da Bacia do rio São Francisco – PAN São Francisco” (2012-2017, com fases subseqüentes previstas), que incluem diversas questões regionais e locais do meio físico, biótico e socioeconômico relacionadas aos ambientes cársticos, como fomento a linhas de pesquisas sobre o carste, avaliação de riscos geológicos e geotécnicos, estudos de valoração dos serviços ambientais prestados pelos ambientes cársticos, e muitos outros (Cavalcanti et al. 2012).

Em conclusão, o status da peculiaridade ambiental e importância intrínseca dos ambientes cársticos deve ser um permanente referencial para circunstanciar projetos de uso e ocupação desses ambientes a uma avaliação de impacto baseada em diagnósticos mais amplos espacial e temporalmente do que aqueles necessários em outros tipos de terrenos, mais detalhados e integrados tematicamente, e específicos tecnologicamente.

Nesse sentido, o “Manual de Normas e Procedimentos para Licenciamento Ambiental do Setor de Extração Mineral” (MMA/IBAMA 2001) é muito pertinente em reconhecer os terrenos cársticos como “ambientes especialmente sensíveis a impactos sobre as águas e a fauna subterrânea, ao patrimônio espeleológico e ao patrimônio arqueopaleontológico” (pág.45), preceituando que os estudos ambientais e o plano de controle ambiental enfatizem os aspectos mais vulneráveis do carste frente às atividades minerárias.

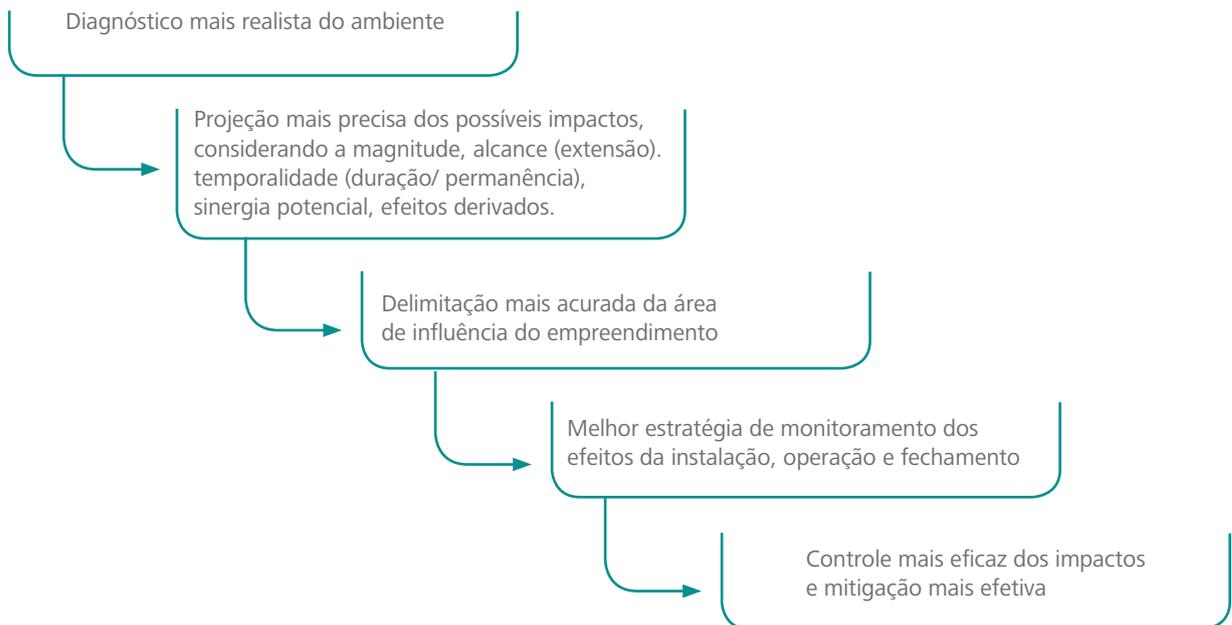
1.7. FUNDAMENTAÇÃO DE BOAS PRÁTICAS PARA O DIAGNÓSTICO DO CARSTE

O diferencial dos estudos ambientais em áreas cársticas se concentra naquilo que as diferencia nitidamente das outras áreas, em que pesam: a importância ambiental, científica e cultural; a sensibilidade estrutural e funcional do meio (fragilidade ecológica); e o elevado grau de incertezas diante da complexidade hidrológica dessas áreas. Muitas vezes é difícil caracterizar com precisão o funcionamento de um sistema cárstico, e esse aspecto é crítico aos estudos porque pode levar a inconsistências e lacunas na identificação e interpretação dos impactos decorrentes de ações ou atividades projetadas sobre elas, acarretando imprecisões sobretudo no traçado das suas áreas de influência. Reconhecer essa condição crítica é o primeiro grande passo para uma avaliação de impacto ambiental consistente.

Em outras palavras, os aspectos categoricamente distintivos do carste – associados ao fenômeno da carstificação – são os próprios **critérios ambientais e os requisitos** para abordagens diferenciadas de diagnóstico, que subsidiarão prognóstico, mitigação, monitoramento, recuperação, reabilitação e compensação realmente apropriados ao carste. Algumas condições importantes precisam ser observadas no âmbito dos estudos ambientais e avaliação de impactos:

- a)** abrangência espacial (extensão geográfica) suficientemente ampla que possibilite, de acordo com um modelo conceitual pré-estabelecido para o sistema cárstico, identificar sistemas superfície-subterrâneo contínuos e mosaicos de sistemas integrados do ponto de vista físico e biológico, assegurando minimamente que as bacias aquíferas ou sistemas de fluxo hídrico e biológico subterrâneo potencialmente afetados sejam abarcados com suas respectivas áreas de contribuição hídrica e demais áreas de influência;
- b)** amplitude temporal que propicie a caracterização das condições-padrão do ambiente, permitindo discriminar os ritmos e amplitudes dos processos físicos e biológicos existentes (condições de base e variações cíclicas), e ainda, na medida do possível, a descrição de fenômenos e comportamentos críticos (não-padrão);
- c)** resolução espacial (mais “detalhes”) e temporal (maior “frequência”) que garantam boa representatividade em meio à grande heterogeneidade, diversidade e dinamismo do meio cárstico, em que pesem as rápidas flutuações das condições hidrológicas e demais alterações em resposta a oscilações climáticas e outros estímulos sobre o meio;
- d)** rigor metodológico de ferramentas e procedimentos apropriados às especificidades do carste;
- e)** caráter transdisciplinar efetivo – hierarquia, sequenciamento e comprometimento mútuo das abordagens disciplinares.

As boas práticas para a mineração em áreas cársticas de alguma forma derivam desses requisitos, tendo como principais ideais:



Justificativas

a) Principais razões para estudos espacialmente mais abrangentes:

1. A organização e o funcionamento de sistemas cársticos são frequentemente coordenados por fatores regionais, notadamente as relações litoestratigráficas de unidades maiores e a hidrologia regional

Nota.

A hidrologia regional envolve as condições específicas de drenagem de uma área geográfica ampla, via de regra balizadas por um importante rio de grande ordem ou grau hierárquico, o qual coordena a descarga e o gradiente hidráulico regional. Levam-se em consideração os padrões regionais de precipitação e os mecanismos de infiltração (recarga), escoamento, evaporação e armazenagem hídrica dominantes.

2. Análises regionais de morfogênese e morfodinâmica da paisagem são fundamentais para remontar a evolução do ambiente e assim reconhecer os parâmetros governantes da sua organização e comportamento, atuais e pretéritos.
3. O modelo conceitual do geossistema cárstico envolvido, ou seja, do sistema ambiental mais amplo, precisa ser definido para que os compartimentos funcionais potencialmente afetados pelos distúrbios provocados no ambiente possam ser reconhecidos com razoável nível de precisão, facultando o traçado mais preciso da área de influência do empreendimento.
4. A macroporosidade de condutos típica do substrato rochoso cárstico retrata espaços conectados no meio subterrâneo, ligados à superfície de maneira pontual ou disseminada, formando redes que podem se estender de maneira heterogênea por grandes áreas. Assim, constituem compartimentos ambientais física e biologicamente contínuos, de tal maneira integrados que os efeitos da perturbação de um segmento do sistema podem se manifestar a grandes distâncias.

Nota.

Comumente, essas redes configuram uma malha de fissuras e espaços que se avolumam em torno de alguns condutos de maior calibre e permeabilidade, os quais atuam como drenos de todo o sistema. Quanto melhor a condição de drenagem ou escoamento subterrâneo através desses condutos, mais amplos eles tendem a ser, e mais desenvolvida e extensa toda a rede de espaços associada a eles. Nesses amplos sistemas de fluxo, diversos tipos de materiais podem ser transportados por grandes distâncias, desde a superfície até pontos remotos que funcionam como exutórios do sistema subterrâneo, seja pelo poder da água, mobilizados pela força da gravidade e também pelas trocas propiciadas pela própria fauna que transita pelo sistema. O escoamento torna-se cada vez mais fácil com a ampliação progressiva dos canais, e o nível de base tende ao rebaixamento, promovendo a morfogênese. Conforme a erosão evolui, o sistema de escoamento original (rede de condutos) é dissecado e fragmentado, deixando alguns segmentos hidrologicamente inativos. Nesse contexto, as cavernas nada mais são que os espaços mais volumosos da rede, cujos volumes podem comportar uma pessoa. Todos os aspectos que caracterizam uma caverna – sua morfologia, geometria, posição no espaço e todos os elementos presentes no seu interior tais como água, gases, sedimentos terrígenos, espeleotemas, nutrientes e fauna – devem ser observados e compreendidos sobre essa perspectiva espacial, funcional e temporal maior. Nessas condições de conectividade e extensão, ainda é importante considerar que a chance de acontecerem interações entre diferentes elementos disponíveis no sistema, e efeitos sinérgicos delas decorrentes, assim como ocorrerem as chamadas reações em cadeia, é significativamente potencializada.

5. A formação da macroporosidade de condutos e todos os aspectos derivados da sua formação também suscitam condições ambientais muito heterogêneas e contrastantes mesmo em pequenos espaços geográficos, de forma que características muito pontuais não desvendam o funcionamento sistêmico do ambiente.

Nota.

As propriedades hidráulicas dos aquíferos cársticos são fundamentalmente determinadas pela combinação de três tipos de porosidade que coexistem em rochas carbonáticas – a porosidade intergranular, de fissuras e de condutos. Cada tipo de porosidade propicia condições muito contrastantes quanto à capacidade de armazenamento da água e os regimes de escoamento – difuso ou concentrado, laminar ou turbulento. Ocorre que a combinação da tripla porosidade é muito variável de região para região, e mesmo de local para local de uma mesma região. Além das diferenças da composição, textura e estruturas da própria rocha que definem primariamente as porosidades granular e fissural, cada região também se encontra num estágio diferente de carstificação, portanto, com a porosidade de condutos mais ou menos desenvolvida. De maneira geral, regiões mais carstificadas estão sujeitas a grandes heterogeneidades e contrastes hidráulicos: zonas de alta permeabilidade e baixa capacidade de armazenamento, representadas pelos sistemas de drenagem de condutos, concentradas linearmente em meio a blocos de permeabilidade baixa até muito baixa e boa capacidade de armazenamento, onde jazem conjuntos de fraturas menos abertas e mais restritamente conectadas. Em estudos de diagnóstico ambiental de áreas cársticas, a primeira questão é estabelecer um modelo geral para a tripla-porosidade, pesando sobretudo a avaliação do padrão da carstificação (grau, arranjo espacial e fatores de controle), além de dados geológicos e hidrogeológicos mais detalhados.

6. Os aspectos anteriores exprimem o elevado grau de incerteza envolvido na caracterização do ambiente e, conseqüentemente, certo grau de insegurança dos traçados das áreas de influência dos empreendimentos. Isso pressupõe estudos e medidas de controle sempre mais conservadores.

b) Principais razões para estudos de diagnóstico de longo prazo (alguns ciclos hidrológicos):

1. Muitos fenômenos, que revelam facetas importantes do funcionamento e organização do carste, só se manifestam durante eventos climáticos críticos, sendo altamente desejável circunstanciá-los na cronologia dos estudos. Um exemplo relevante diz respeito ao traçado dos limites das bacias hidrográficas e aquíferas, portanto, das áreas de contribuição hídrica, que no carste podem variar significativamente em vista de conexões que só se tornam ativas a partir de “sobrefluxos” e inundações do sistema (*overflow*).

Nota.

Não se trata de valorizar excessivamente os eventos excepcionais mas, especialmente para o carste, é fundamental conhecer o comportamento do ambiente no intervalo de oscilações máximas e mínimas dos principais parâmetros ambientais, que no caso da água aplica-se fundamentalmente à avaliação das disponibilidades hídricas. Nesse sentido, boas contextualizações históricas dos parâmetros climáticos são essenciais para, de pronto, avaliar a conjuntura temporal dos estudos.

2. Por outro lado, as condições de base (constantes ambientais mínimas), notadamente o fluxo de base (*underflow*), também precisam ser bem estabelecidas, sendo necessário afastar diagnósticos e modelagens que sejam baseados apenas em condições pouco convencionais ou anômalas do sistema, ou que sejam falhos quanto aos ritmos de curto, médio e longo termo (oscilações possíveis).

Nota.

O modelo conceitual do geossistema precisa considerar os ritmos padrão e não-padrão do ambiente, propiciando projeções mais apuradas dos efeitos de perturbações provocadas no ambiente.

3. Ambientes cársticos são muito propensos a efeitos secundários, em cadeia, cumulativos, sinérgicos e com algum retardo após o distúrbio sofrido – do que decorre seu alto grau de fragilidade (sensível e vulnerável); de modo que alguns ensaios e testes sobre o comportamento do ambiente necessitam maior detalhamento e também maior tempo de aplicação e de avaliação.

Nota.

Salientando que, além dos ensaios e testes integrantes dos estudos de diagnóstico, que podem apresentar respostas de maior prazo, e das próprias perturbações naturais que geram ou resultam efeitos em cadeia/cumulativos/sinérgicos, também é importante levar em conta outras perturbações não naturais decorrentes dos cenários mais globais de uso e ocupação, vigentes e projetados, às quais o ambiente está sujeito em contexto temporal mais amplo.

Observação: A partir de um aparato de informações que ofereça um bom grau de segurança ambiental para a instalação do empreendimento, o diagnóstico do meio deve ser continuamente apurado ao longo de toda a vida da mina e após o seu fechamento, sendo progressivamente refinado com a produção sistemática de novos dados e incorporação de informações produzidas por outras fontes. A concepção dos “estudos de longo prazo” pelo viés do refinamento progressivo do diagnóstico ao longo da operação do empreendimento amplia muito o conceito do monitoramento de efeitos, meramente voltado às perturbações exercidas pelo empreendimento. Nessa condição, pode-se atentar para um programa específico de Estudos Permanentes de Diagnóstico, o qual tenha sempre em foco a análise de sinergias da ocupação do território como um todo. A ferramenta para o diagnóstico continuado – a Base de Dados (física) - e ao mesmo tempo um dos seus produtos - os Arquivos de Dados (informações produzidas) – é a composição de um acervo histórico de informações em constante ampliação e atualização.

c) Principais razões para estudos com maior resolução espacial e temporal:

1. Como amplamente tratado, o fenômeno da carstificação confere grande heterogeneidade aos parâmetros ambientais, podendo haver mudanças expressivas das condições e características do ambiente em curtas distâncias. Se a paisagem cárstica integrasse simbolicamente um quebra-cabeça, suas peças seriam pequenas e cada uma apresentaria grandes contrastes relativamente às peças vizinhas. O carste pode ser então compreendido como um complexo mosaico de subsistemas horizontais (laterais) e verticais com características próprias que, no entanto, interagem fortemente. Caracterizar o ambiente cárstico e compreender o seu funcionamento requer maior atenção sobre cada peça ou segmento do sistema (estudos espacialmente detalhados), sem perder de vista o que cada uma representa na paisagem ou sistema global (estudos espacialmente abrangentes).

Nota.

Um exemplo que retrata o “mosaico” de subsistemas em interação, cada qual necessitando atenção detalhada, diz respeito aos compartimentos laterais e verticais de recarga, armazenamento-circulação e descarga de um sistema de drenagem, em que pesam, citando alguns aspectos: (i) a influência das formas de relevo nas cabeceiras e áreas de recarga (formas de absorção e dispersão); (ii) arranjo da tripla porosidade nas zonas de circulação (fluxo) e armazenamento; (iii) padrão do relevo e da exudação do sistema nas áreas de descarga; (iv) composição, espessura e arranjo das coberturas inconsolidadas (padrão de infiltração e escoamento/armazenagem subsuperficial); (v) características do epicarste (grau e organização da carstificação subsuperficial e sob coberturas), que coordenam a dispersão/concentração e aceleração/retardo da infiltração.

2. Ambientes cársticos são altamente dinâmicos porque ocorrem processos rápidos (ex. morfogênese acelerada), vigorosos (ex. inundações, subsidências), condições energéticas amplamente variáveis no tempo e espaço (ex. oscilações da carga hidráulica e inversões de gradientes hidráulicos, com variações nos limites das bacias), ritmos de pequena frequência e grandes amplitudes (ex. variações hidroquímicas sazonais; pulsos sedimentares), e grande sensibilidade ao comportamento dos parâmetros controladores, particularmente às variações climáticas (ex. rápidas variações hidroquímicas e hidrodinâmicas relacionadas a eventos climáticos específicos). Para avaliar o comportamento do ambiente e, a partir da sua dinâmica, o seu arranjo estrutural, é necessário observar o modo como as rápidas mudanças acontecem, desde o seu estímulo inicial (reação) até o retorno às condições precedentes ao estímulo (relaxamento). Nessa análise, também é importante observar a recorrência (ritmo) dessas variações de curto termo, combinando-se estudos de curto e longo prazo.

Nota.

Outro aspecto importante é que, em vista da heterogeneidade e anisotropia características, o modelo conceitual do geossistema cárstico será mais próximo da realidade quanto mais bem calibrado por um volume satisfatório de dados. Em vista dessas mesmas características, vale ressaltar que dados tomados regularmente no espaço e no tempo, não costumam ser plenamente aplicáveis ao carste. O planejamento e aquisição dos dados devem ser realizados de maneira orientada a partir da análise combinada de parâmetros geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, espeleológicos e geomorfológicos, garantindo-se ainda a cobertura de situações de resposta improvável.

d) Principais razões para o rigor metodológico e disciplinas aperfeiçoadas:

1. Pelas razões anteriormente expostas, muitas das técnicas e métodos tradicionais usualmente adotados nos estudos de diagnóstico, avaliação de impactos e controle ambiental são pouco eficazes para o meio cárstico, a exemplo dos estudos clássicos de hidrogeologia, que podem apresentar grandes imprecisões quanto aos levantamentos potenciométricos, falsos significados decorrentes de falhas na configuração espacial e temporal de testes hidráulicos e de levantamentos hidroquímicos, modelagens de regimes de escoamento não aplicáveis ao meio, análises de vulnerabilidade baseadas em parâmetros inadequados, citando alguns.

Nota.

Pode-se de dizer que as principais adaptações se referem às estratégias de abordagem espacial e temporal, i.e., à definição das redes de observação, de tomada de dados e de amostragens, em que pesam, por exemplo, monitoramentos de tempo contínuo e um bom planejamento para a recuperação de sinais de resposta a eventos naturais ou artificialmente induzidos sobre o meio.

2. Por outro lado, procedimentos muitas vezes vilipendiados nos estudos ambientais, em vista de simplificações e restrições de custo e de prazo, são aqueles que apresentam respostas sensivelmente potencializadas no carste, tornando-se muitas vezes indispensáveis para o seu diagnóstico e controle. Alguns exemplos relevantes são citados na nota a seguir.

Nota.

- (i) Uso de traçadores artificiais (comumente corantes) e naturais (biológicos, isótopos estáveis e radiogênicos) nos estudos hidrológicos e hidrogeológicos envolvendo ensaios durante diferentes condições hidroclimáticas. Essa ferramenta é particularmente útil para o traçado de rotas subterrâneas, delimitação de bacias, verificação de áreas fonte dos fluidos percolantes, bem como para estudos hidrodinâmicos em que são avaliados os regimes de escoamento e armazenamento dos sistemas.
- (ii) Elaboração de hidrogramas (hidrógrafas) e quimiogramas de tempo contínuo, que são gráficos que desenham o comportamento temporal (ininterrupto) de determinados parâmetros associados ao escoamento (natural e de ensaios traçadores e hidráulicos), normalmente tomados em nascentes e janelas cársticas ou ainda em poços de monitoramento. Essas curvas representam sinais hidrodinâmicos característicos, que elucidam aspectos da configuração estrutural-espacial-funcional da porosidade cárstica.
- (iii) Técnicas de análise espacial digital envolvendo: processamentos espectrais de imagens orbitais, pertinentes às litologias carbonáticas e organização do relevo; morfometria da superfície em escala de detalhe com enfoque das feições cársticas (forma, dimensão, distribuição, arranjo etc.), apoiada em ferramentas matemáticas e estatísticas; automações analíticas e classificações supervisionadas diversas; modelagens cartográficas (álgebra de mapas, análises cronológicas) e análises tridimensionais que integram relevo superficial e diversos parâmetros do meio subterrâneo. Todas essas ferramentas e técnicas são consideradas essenciais para estudos analíticos/reducionistas e de síntese/sistêmicos que tratam da morfodinâmica do geossistema cárstico.

- (iv) Consideração de parâmetros específicos do ambiente para análises de vulnerabilidade aquífera (grau de carstificação, formas de absorção e dispersão, regimes de infiltração e escoamento, espessuras de horizontes pedológicos e litológicos, características das zonas aquíferas insaturada e saturada etc.), adotando-se princípios que levem efetivamente em conta a alta porém localizada permeabilidade hídrica e os meios para a dispersão, difusão ou concentração do escoamento hídrico.
- (v) Geofísica terrestre rasa múltipla para atender variadas condições do carste, envolvendo métodos elétricos (resistividade elétrica a partir de sondagens e caminhamentos), eletromagnéticos (condutividade elétrica e GPR) e gamaespectrométricos, gravimétrico (de densidade) e sísmicos de refração e reflexão (ensaios crosshole, MASW). Sobre a geofísica, vale reconhecer que todos os métodos citados são fluentemente aplicados à pesquisa mineral e aos estudos geotécnicos de instalação e operação da mina, mas, nos estudos cársticos, são considerados particularmente úteis para se avaliar as relações entre a cobertura inconsolidada e substrato rochoso, com especial atenção à configuração do “epicarste” – um compartimento muito importante no mecanismo estrutural e funcional do carste. E, ainda, para a avaliação da espessura e estrutura da zona insaturada (profundidades freáticas), espessura da cobertura carbonática e relações com litologias não carbonáticas (aquicludes e aquitardes), exame das relações verticais e laterais entre pequenos aquíferos, identificação de fissuras e canais subterrâneos com e sem atividade hídrica (grau de carstificação e arranjo das estruturas cársticas), entre outros aspectos.

Vale destacar que, conforme a conveniência e os objetivos pontuais da técnica geofísica aplicada, que devem estar muito bem definidos, todas elas estão sujeitas a um planejamento bastante meticuloso da aquisição dos dados (disposição da rede de emissores e receptores de sinais) orientado por análises prévias detalhadas do ambiente. Dadas as propriedades heterogêneas e anisotrópicas do carste, a geofísica aplicada a esse tipo de ambiente deve ser compreendida como uma estratégia de caráter essencialmente complementar às observações diretas, que não podem ser renunciadas nem preteridas.

3. Alguns aspectos ambientais são decorrência exclusiva do processo de carstificação, não havendo, ao menos na mesma proporção, equivalentes em ambientes não cársticos. A tripla porosidade é um exemplo de aspecto singular, propiciando regimes de fluxo turbulento associados a complexos sistemas de drenagem subterrânea, com sistemas sedimentares (erosão x agradação) e ecossistemas vinculados igualmente únicos e com alto grau de vulnerabilidade. Esses sistemas de drenagem por sua vez são influenciados por relações também singulares de recarga-descarga, com o protagonismo de algumas formas de relevo (as dolinas e nascentes cársticas, por exemplo), das coberturas pedológicas e do epicarste. Ocorre que, diferentemente dos processos que acontecem na superfície em ambientes não cársticos, grande parte dos processos cársticos subterrâneos não estão visíveis, de modo que se torna necessário recorrer a métodos e análises indiretas, valorizando-se estudos de balanço de entrada-e-saída dos sistemas (análises tipo “caixa preta”), para os quais as nascentes cársticas são de extrema valia. Nessas condições de difícil observação do meio, qualquer “janela” que permita observações diretas torna-se particularmente profícua e por isso deve ser levada em alta conta. Esse é o caso das cavernas, que viabilizam o ingresso a partes desses “sistemas oclusos”; e dos poços de monitoramento do comportamento hídrico, que também devem ser explorados ao máximo.

Nota.

As informações presentes nessas “janelas” do meio subterrâneo devem ser exploradas de maneira criteriosa e sistemática, notadamente os elementos morfoestruturais e demais parâmetros físicos e biológicos das cavernas, não só em vista do grande valor dessas informações para se compreender a organização, tipologia e o funcionamento dos sistemas cársticos, mas também para se tirar o melhor proveito da energia geralmente envolvida nos estudos espeleológicos. Nesse sentido, devem ser observadas as boas técnicas de mapeamento subterrâneo (levantamento, tratamento e análise de dados espeleotopográficos), os critérios e métodos para análises morfoestruturais e morfodinâmicas (aspectos morfológicos, geométricos e sedimentares de detalhe), os métodos especiais para estudos de hidrodinâmica, hidroquímica e para os estudos de biologia subterrânea.

4. Há fatores exclusivos que regulam a configuração e o funcionamento do ambiente cárstico, considerados especialmente sensíveis frente a distúrbios provocados no meio. Não obstante, são aspectos frequentemente menosprezados nos estudos de diagnóstico e de impacto ambiental de meios cársticos. Dois exemplos particularmente importantes podem ser citados: a condição química e fisicoquímica das águas que percolam o meio subterrâneo e a característica das descargas hídricas e regimes de escoamento, ambas decisivas no processo de dissolução carbonática e, por conseguinte, na constituição dos sistemas aquíferos cársticos. Ao primeiro aspecto estão associadas as condições de agressividade das soluções e competência para a dissolução da rocha, e ao segundo, as condições de renovação das soluções e eficiência difusiva (difusão iônica), necessárias à continuidade do processo de carstificação.

Nota.

Modificações em qualquer parâmetro que exerça influência sobre as propriedades dissolutivas da água (acidez, temperatura, volume, permanência, turbulência etc.), tais como mudanças qualitativas ou quantitativas da cobertura pedológica e vegetal, e dos regimes de infiltração, armazenamento e escoamento hídrico, sempre devem receber cuidadosa atenção.

e) Principais razões para a transdisciplinaridade efetiva:

1. A análise sistêmica facilita e dá mais robustez aos estudos ambientais em geossistemas cársticos. A análise sistêmica é transdisciplinar por conceituação e princípio.

Nota.

Os fundamentos da análise sistêmica são identificar e delimitar unidades composicionais, organizacionais e/ou funcionais homogêneas controladas por um conjunto de fatores notáveis, sendo essencial caracterizar: os componentes, o modo como se organizam no espaço e a(s) maneira(s) como interagem, exercem influência ou são influenciados; os produtos e alterações resultantes, suas funções e finalidades diversas (ecológicas, econômicas etc.); os parâmetros de controle mais importantes (fundamentais à sua constituição e equilíbrio – as entradas, e mesmo as saídas do sistema quando estas representam parâmetros controladores); e os aspectos que se tornam fatores de controle de sistemas subsequentes. Essas análises privilegiam a ordem de levantamento das informações, em que perguntas-chave específicas a cada caso e condição vão sendo paulatinamente desvendadas por dados que conciliem todos os campos do conhecimento necessários àquele momento. É uma abordagem bastante diferente do usual levantamento de blocos temáticos ou disciplinares tomados por equipes individualizadas, cujas informações são apenas sobrepostas em momentos considerados convenientes do processo, em geral na fase de conclusão dos trabalhos, como mera integração de materiais para fins de apresentação dos resultados. Na perspectiva sistêmica, uma pergunta circunda permanentemente as equipes participantes: *“Como o meu método e os meus dados atendem aos seus?”*.

2. As repercussões de distúrbios causados em ambientes cársticos são frequentemente desproporcionais aos distúrbios em si, pois esses ambientes estão particularmente suscetíveis a processos de retroalimentação positiva. Ou seja, uma perturbação que desencadeia uma sequência de efeitos que ao final amplificam ou agravam os impactos, gerando fortes instabilidades no sistema e até mesmo o seu colapso funcional ou estrutural. Este é um dos fortes motivos para a adoção da análise sistêmica apoiada nos levantamentos em cadência temporal e na modelagem de cenários a partir da simulação de pontos críticos do sistema ambiental.

Nota.

Vale reconhecer que retroalimentações negativas, proporcionadas por sistemas capazes de atenuar os efeitos dos distúrbios provocados sobre ele, também são bem plausíveis em ambientes cársticos, sendo importante considerá-las em favor do próprio empreendimento. Nos dois casos, retroalimentações positivas e negativas, apurar a potencialização ou a atenuação de distúrbios num dado sistema requer examinar os pormenores estruturais do sistema e como os seus atributos funcionam de maneira integrada, contando com estudos transdisciplinares refinados alçados em cronogramas apropriados.

REFERÊNCIAS

- ANA-Agência Nacional de Águas (inédito). Avaliação hidrogeológica dos sistemas aquíferos cársticos e fissuro-cársticos na Região Hidrográfica do São Francisco, com vistas à gestão integrada e compartilhada de recursos hídricos. Consórcio PROJETEC-TECHNE, Contrato 037/ANA/2013 [D.O.U. 30 de julho de 2013 p.116]
- Amorim, R.R. 2012. Um novo olhar na geografia para os conceitos e aplicações de geossistemas, sistemas antrópicos e sistemas ambientais. *Caminhos de Geografia* (Rev. on line), 13(41):80-101. <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhos-degeografia/article/view/16613>
- Andreo, B.; Goldscheider, N.; Vadillo, I.; Vías, J.M.; Neukum, C.; Sinreich, M.; Jiménez, P.; Brechenmacher, J.; Carrasco, F.; Hötzl, H.; Perles, M.J.; Zwahlen, F. 2006. Karst groundwater protection: First application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Sci.Total Environment*, 357:54-73.
- Atkinson, T.C. 1985. Present and future directions in karst hydrogeology. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, T108:293-296.
- Audra, P.; Palmer, A.N. 2015. Research frontiers in speleogenesis. Dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. *Acta Carsologica* 44/33, 315-348.
- Aumond, J.J. 2007. *Adoção de uma nova abordagem para recuperação de área degradada por mineração*. Florianópolis: PPGEC-UFSC, Tese de Doutorado, 265pp.
- Back, W.; Herman, J.S.; Paloc, H. (eds.) 1992. Hydrogeology of Selected Karst Regions. *Int. Contr. Hydrogeology*, 13, 494pp.
- British Columbia Ministry of Forests 2001. Karst Inventory Standards and Vulnerability Assessment Procedures for British Columbia. For. Prc. Br, Victoria, B.C. 112pp. <https://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/mr/Mr099.pdf>
- British Columbia Ministry of Forests 2003. Karst Management handbook for British Columbia. For. Prc. Br, Victoria, B.C. 69pp. <http://www.for.gov.bc.ca/hfp/fordev/karst/karstbmp.pdf>
- Bertrand, G. 2004. Paisagem e geografia física global. Esboço Metodológico. Tradução de Olga Cruz. R. RA'É GA, Curitiba: Ed. UFPR, 8:141-152.
- Bertrand, C.; Bertrand, G. 2007. *Uma geografia transversal e de travessias: o meio ambiente através dos territórios e das temporalidades*. Organizado por Messias Modesto dos Passos. Maringá, Ed. Massoni, 332pp.
- Bonacci, O. 1993. Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers. *Hydrol.Sci.J.* 38(1):51-62.
- Brunsdon, D.; Thornes, J.B. 1979. *Landscape sensitivity and change*. *Trans.Inst.British Geographers*, 4(4):463-484.
- Cailleux, A.; Tricart, J. 1956. Le problème de la classification des faits géomorphologiques. *Ann.Géogr.* 3490, 65:162-185.
- Capra, F. 1996. *A teia da vida: uma nova compreensão científica dos sistemas vivos*. São Paulo: Cutrix, 256pp.
- Cavalcanti, L.F.; Lima, M.F.; Medeiros, R.C.S.; Meguerditchian, I. (org.) 2012. Plano de Ação Nacional para a conservação do Patrimônio Espeleológico nas áreas cársticas da Bacia do rio São Francisco. ICMBio, *Série Espécies Ameaçadas* no 27, 141pp. http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-plano-de-acao/pan-cavernas/livro_cavernas.pdf
- CECAV/ICMBio 2009. Regiões Cársticas do Brasil, 2009. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas <http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html>. Acesso em 21/03/2016.
- Christofoletti, A. 1979. *Análise de sistemas em geografia*. São Paulo, HUCITECH, EDUSP, 106p.
- Christofoletti, A. 1999 (6ªed.). *Modelagem de sistemas ambientais*. São Pulo, Edgard Blucher, 236pp.
- Chorley, R.J. 1962. Geomorphology and General Systems Theory. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper 500-B*, 10pp.

- Chorley, R.J.; Kennedy, B.A. 1971. *Physical Geography: a system approach*. London: Prentice Hall Inc.Co., 370pp.
- Corning, P. 2002. The re-emergence of "emergence": A venerable concept in search of a theory. *Complexity*, 7(6):18-30.
- Derbyshire, E. 2012. Tales Set in Stone – 40 Years of the International Geoscience Programme (IGCP) – Unesco/IUGS (Open access), Paris, France, 140pp. <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002152/215219e.pdf>
- Dreybrodt, W.; Laukner, J.; Zaihua, L.; Svensson, U.; Buhmann, D. 1996. The kinetics of the reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$. *Geoch.Cosmoch.Acta* 60(18):3375-3381.
- Drogue, C. 1992. Hydrodynamics of karstic aquifers: Experimental sites in the Mediterranean Karst, Southern France. In: Back, W.; Herman, J.S.; Paloc, H. (eds.). *Hydrogeology of Selected Karst Regions. Int. Contr. Hydrogeology*, 13:133-149.
- FAO 2012. FRA 2015: Terms and Definitions. Food and Agriculture organization of the United Nations, Working Paper 180, Rome, 31pp. <http://www.fao.org/docrep/017/ap862e/ap862e00.pdf>
- Filippone, M. 2009. *Spatial analysis of karst conduit networks and determination of parameters controlling the speleogenesis along preferential lithostratigraphic horizons*. Thèse de doctorat 4376, Éc. Polyt. Féd. de Lausanne, 166pp. (Articles in Appendices)
- Ford, D.; Williams, P. 2007 (2ªed.). *Karst hydrogeology and geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons, England, 562pp.
- Frank, B. 1998. *Apostilas da disciplina metodologia da pesquisa ambiental*. Blumenau: FURB.
- Goldscheider, N.; Andreo, B. 2007. The geological and geomorphological framework. In: Goldscheider, N.; Drew, D. (eds.). *Methods in karst hydrogeology*. IAH, London: Taylor & Francis, 9-23p.
- Goldscheider, N.; Drew, D.; Worthington, S. 2007. Introduction. In: *Goldscheider, N.; Drew, D. (eds.). Methods in karst hydrogeology*. IAH, London: Taylor & Francis, 1-8p.
- Gillieson, D. 1996. *Caves: Processes, Development and Management*. Oxford: Blackwell, UK, 324pp.
- Howard, A.D. 1965. Geomorphological systems – Equilibrium and Dynamics. *Am.J.Science*, 263:302-312.
- Hobbs, S.L.; Gunn, J. 1998. The hydrogeological effect of quarrying karstified limestone: options for prediction and mitigation. *Quat.J.Eng.Geology* 31:147-157.
- Iglesias, M.; Uhlein, A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Rev.Bras.Geociências (on line)*, 39(2):256-266. http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0375-75362009000200006&lng=pt&nrm=isso.
- Kentucky Geological Survey 2012. Introduction to karst groundwater. <https://www.uky.edu/KGS/water/general/karst/karstintro.htm>, Acesso 30/03/2015.
- Klimchouk, A.B.; Ford, D.C.; Palmer, A.N.; Dreybrodt, W. (eds.) 2000. *Speleogenesis: Evolution of karst aquifers*. Nat. Spel. Society, Huntsville, Alabama, 527pp.
- Klimchouk, A.B.; Sasowsky, I.D.; Mylroie, J.; Engel, S.A.; Engel, A.S. 2014. Hypogene Cave Morphologies. Selected papers and abstracts of the symposium held February 2 through 7, 2014, San Salvador Island, Bahamas. Karst Waters Institute *Special Publication 18*, Leesburg: Karst Waters Institute 111 pp.
- Klimchouk, A. 2015. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta Carsologica* 44(3):289-313.
- Lee, E.S., Krothe, N.J.C. 2001. A four-component mixing model for water in a karst terrain in South-central Indiana, USA, using solute concentration and stable isotopes as tracers. *Chem.Geology* 179:129-143.
- Liu, Z.; Dreybrodt, W. 1997. Dissolution kinetics of calcium carbonate minerals in $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ solutions in turbulent flow: the role of the diffusion boundary layer and the slow reaction $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$. *Geoch.Cosmoch. Acta* 61:2879-2889.

- Lowe, D.J. 1992. *The origin of limestone caverns: an inception horizon hypothesis*. Ph.D. Dissertation. Manchester Polytechnic University, U.K., 512pp.
- Lowe, D.J. 1999. Why and how are caves “organized”: does the past offer a key to present. *Acta Carsologica*, 28/2 (7): 121-144.
- Lowe, D.J.; Gunn, J. 1997. Carbonate speleogenesis: An inception horizon hypothesis. *Acta Carsologica* 26/2 (38):457-488.
- Mangin, A. 1975. *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Thèse Univ. Dijon. 124p.
- Milanovic, P. 1992. Hydrogeological characteristics of geosyncline karst aquifers with an example of the Trebisnjica Catchment. In: Back, W.; Herman, J.S.; Paloc, H. (eds.). *Hydrogeology of Selected Karst Regions*. Int. *Contr. Hydrogeology*, 13:213-228.
- MMA/IBAMA 2001. *Manual de Normas e Procedimentos para Licenciamento Ambiental do Setor de Extração Mineral*. Prog.Prot.Melh.Qual.Ambiental, Sec.Qual.Amb.Assent.Humanos, 127pp. http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/MANUAL_mineracao.pdf
- Monteiro, C.A.F 2000. *Geossistemas: A história de uma procura*. São Paulo: Contexto, 127pp.
- Morin, E. 2003. *O método-1: A natureza da natureza*. São Paulo: Sulina, 480pp.
- Neves, C.E.; Machado, G.; Hirata, C.A.; Stipp, N.A.F. 2014. A importância dos geossistemas na pesquisa geográfica: uma análise a partir da correlação com o ecossistema. *Soc.&Nat.*, 26(2):271-285.
- O'Connor, I.M. 1997. *The art of system thinking: Essencial Skills for creativity and problem solving*. London: Thorsens, 264pp.
- Ford, D.C.; Palmer, A.N.; White, W.B. 1988. Landform development; Karst. In: Back, W.; Rosenshein, J.S.; Seaber, P.R. (eds.) *Hydrogeology*. Boulder, Colorado, Geol.Soc.Amer., v.O-2:401-412.
- Palmer, A.N. 2003. *Speleogenesis in carbonate rocks*. *Speleol. Evol. Karst Aquifers*. 1(1), 11p.. http://www.speleogenesis.info/pdf/SG1/Palmer/Palmer_Evo02_screen.pdf
- Palmer, A.N. 2007. *Cave Geology*. Dayton: Cave Books, 454pp.
- Pike, R.G.; Redding, T.E.; Moore, R.D.; Winkler, R.D.; Bladon, K.D. (eds.) 2010. Compendium of forest hydrology and geomorphology in British Columbia. B.C. Min. For. Range, For.Sci. Prog., Victoria, B.C. and FORREX Forum for Research and Extension in Natural Resources, Kamloops, B.C. Land Manag.Handb. 66. <https://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/lmh/Lmh66.htm>
- Prigogine, Y. 1977. Time, structure and fluctuations. In: Frängsmyr, T.; Forsén, S. (eds.) 1993. *Nobel Lectures in Chemistry (1971-1980)*, Singapore: World Scientific, p.263-285.
- Prigogine, I. 1996 (2ªed.). *O fim as certezas. Tempo, caos e as leis da natureza*. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: FEU, 203pp.
- Prigogine, Y. 2000. *As Leis do Caos*. Tradução de Roberto Leal Ferreira. São Paulo: FEU, 109pp.
- Quinlan, J.F.; Ewers, R.O. 1986. Reliable monitoring in karst terranes: It can be done, but not by EPA-approved method. *Ground Water Monitoring Review*, 6(1):4-6.
- Reis Júnior, D.F.C.; Perez Filho, A. 2006. Esperando a Teoria: Do Holismo Geossistêmico aos Geossistemas. VI Simp.Nac. Geomorfologia e Reg.Conf.Geomorphology, Goiânia: UFG. Anais 1:1-25.
- Rodriguez, J.M.M.; Silva, E.V. 2002. A classificação das paisagens a partir de uma visão geossistêmica. *Mercator* 1(1):95-112.
- Ross, J.L.S. 1992. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Rev.Dep.Geogr. USP*, 6:17-30.
- Sánchez, L.E. 2013 (2ªed.). *Avaliação de impacto ambiental: Conceitos e métodos*. São Paulo: Oficina de Textos, 582pp.
- Sauter, M. 1992. Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquelle, Malm, SW Germany). *Tubinger Geowissenschaftliche Arbeiten*, C13, 150pp.
- Senge, P.M. 1998 (3ªed.). *A Quinta Disciplina – Arte e prática da organização que aprende*. São Paulo: Best Seller, 441pp.

- Smart, P.L.; Hobbs, S.L. 1986. Characterization of carbonate aquifers: A conceptual base. *Proc. of the Environmental Problems in Karst Terranes and their Solutions Conference*, National Water Well Association, Bowling Green, Kentucky, 1-14p.
- Sochava, V.B. 1977. O estudo de geossistemas. *Métodos em Questão*. São Paulo: IGEOG-USP, 16:1-51.
- Taylor, C.J.; Greene, E.A. 2008. Hydrogeologic characterization and methods used in the investigation of karst hydrology. In: Rosenberg, D.O.; LaBaugh, J.W.. Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water, *USGS Techniques and Methods 4-D2*, 75-114.
- Tricart, J. 1977. *Ecodinâmica*. Rio de Janeiro: FIBGE/Supren, 97pp.
- Tropmair, H. 1983. Ecossistemas e geossistemas do Estado de São Paulo. *Bol. Geog. Teorética*, 13(25):27-36.
- Tropmair, H. 2000 (4ªed.). *Biogeografia e Meio Ambiente*. Rio Claro: e. 259pp.
- Tropmair, H.; Galina, M.H. 2006. Geossistemas. *Rev. Geogr. UFC*, 5(10):79-89.
- Veado, R.W.A.; Tropmair, H. 2001. Geossistemas do Estado de Santa Catarina. In: Gerardi, L.H.O.; Mendes, I.A. (org.). *Teoria, técnica, espaços e atividades. Temas de Geografia Contemporânea*. Rio Claro: UNESP-AGETEO, p.379-400.
- Vidal, M.R.; Silva, E.V.; Rodriguez, J.M.M.; Mascarenhas, A.L.S. 2014. Análise de modelos funcionais em paisagens litorâneas. *Belém: IHGP*, 1(1):107-122.
- Von Bertalanffy, L. 1951. An outline of general system theory. *Jour. British Phil. Sci.*, 1:134-165.
- Von Bertalanffy, L. 2012 (6ªed.). *Teoria Geral dos Sistemas. Fundamentos, desenvolvimento e aplicações*. Tradução de Francisco M. Guimarães. Petrópolis, Ed. Vozes, 360pp.
- Waltham, A.C.; Fookes, P.G. 2005. Engineering classification of karst ground conditions. *Spel. Evol. Karst Aquifers*. (Virt. Sci. Journal www.speleogenesis.info) 3(1), 20p..
- Watson, J.; Hamilton-Smith, E.; Gillieson, D.; Kiernan, K. (eds.) 1997. *Guidelines for cave and karst protection*. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 53pp.
- Weary, D.J.; Doctor, D.H. 2014. Karst in the United States: A digital map compilation and database: *U.S. Geological Survey Open-File Report 2014-1156*, 23pp. <http://pubs.usgs.gov/of/2014/1156/pdf/of2014-1156.pdf>
- White, W.B. 2002. Karst hydrology: recent developments and open questions. *Eng. Geology*, 65:85-105.
- Williams, P.W. 1983. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *J. Hydrol.* 61:45-67.
- Williams, P.W. 2008. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. *Int. J. Speleology*, 37:1-10. <http://scholarcommons.usf.edu/ijs/vol37/iss1/1>. Acesso em 29/06/2016
- Williams, P.; Fong, Y.T. 2010. *World Map of Carbonate Rock Outcrops*, v3.0. University of Auckland, New Zealand. http://web.env.auckland.ac.nz/our_research/karst/
- Worthington, S.R.H. 2003. A comprehensive strategy for understanding flow in carbonate aquifer. *Spel. Evol. Karst Aquifers*. (Virt. Sci. Journal) 1(1), 8p.. http://speleogenesis-info.isth.info/directory/karstbase/pdf/seka_pdf4493.pdf
- Zwahlen, F. (ed.) 2003. *Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers – Final Report*. COST-European Cooperation in Science and Technology – Action 620, European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development, Brussels, 297pp.

CAPÍTULO 2: CAVERNAS

Allan Silas Calux
Heros Augusto Santos Lobo

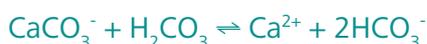
2.1. INTRODUÇÃO

Cavernas são vazios subterrâneos naturais e grandes o suficiente para permitir o acesso humano. Esta definição antropocêntrica é largamente utilizada no mundo todo, sendo adotada inclusive pela *Union Internationale de Spéléologie*, entidade que congrega sociedades espeleológicas de diversos países.

Elas podem se formar em diversos tipos de rochas, sendo mais comum nas carbonáticas, como calcários e dolomitos, siliciclásticas, como quartzitos e arenitos, e ferríferas, como jaspelitos, itabiritos e couraças ferruginosas laterizadas em diversos estágios de lixiviação/enriquecimento.

Em uma paisagem cárstica, cujo condicionante fundamental é a rocha, o processo denominado dissolução é o agente mais importante na formação do relevo (Sweeting, 1973; Jennings, 1985; White, 1988; Ford & Williams, 1997). Isto ocorre porque os minerais predominantes nas rochas carbonáticas, o carbonato de cálcio e, secundariamente, de magnésio, são altamente solúveis em água.

O processo de dissolução dos carbonatos depende do equilíbrio químico do sistema gás carbônico-água-carbonato de cálcio ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$). De forma simplificada, o processo básico para geração das formas exocársticas (feições superficiais) e endocársticas (cavernas) pode ser representado pelas seguintes equações:



Equação 2.1. Sistema químico gás-carbônico-água-carbonato de cálcio: equações básicas.

2.2. CLASSIFICAÇÃO DAS CAVERNAS

As cavernas podem ser classificadas segundo sua gênese, seus atributos dimensionais (ou espeleométricos), suas características hidrogeológicas, morfológicas e atmosféricas.

Na **classificação genética**, as cavernas podem ser primárias ou secundárias (Auler & Piló, 2011). As cavernas primárias são aquelas contemporâneas à formação da rocha hospedeira, sendo o melhor exemplo as cavidades vulcânicas, formadas no interior dos tubos de lava. As cavernas secundárias são aquelas que se desenvolvem após a formação da rocha, o que inclui a maior parte das cavernas conhecidas no mundo. Outra forma de classificar as cavernas segundo sua gênese distingue alguns tipos como: fluvial, vadosa, freática, marinha, eólica, coluvionar (tálus) e suas formas mistas (Jiménez et al., 1984). As cavernas fluviais são aquelas formadas pela ação abrasiva de rios e córregos, localizando-se normalmente nas bordas destas drenagens; as vadosas são aquelas formadas em ambiente subaéreo, com infiltração vertical; as freáticas são formadas completamente embaixo d'água; as marinhas, tal como as cavernas fluviais, são formadas pela ação abrasiva da água, mas neste caso de água do mar; as cavernas eólicas se formam pela ação abrasiva do vento; as coluvionares, também chamadas de tálus, são um tipo bastante peculiar e desenvolvem-se a partir do "empilhamento" de grandes blocos de rocha formando espaços vazios sob eles. Uma terceira forma de classificação espeleogenética distingue três tipos de cavernas: (i) epigênicas, quando formadas a partir da ação de água meteórica; (ii) paragênicas, quando a caverna é preenchida por sedimentos e a água que circula em seu interior passa a "escavar" o teto das galerias; e (iii) hipogênicas, quando elaboradas em ambiente saturado de água, associados à ascensão de águas profundas (Palmer, 2003; Palmer 2011).

A **classificação espeleométrica**, pouco usual, tende a distinguir as cavernas segundo seus parâmetros dimensionais. Em território cubano, por exemplo, a Sociedad Espeleológica de Cuba definiu que as cavidades devem ser divididas em sete classes: abrigo rochoso, gruta, cueva, caverna, gran caverna, sistema subterrâneo, sistemas com canais fluviais e galerias sem comunicação (Jiménez et al., 1984). Cada uma destas classes é definida pela forma de seus salões e galerias associada a parâmetros dimensionais. Um paralelo no Brasil pôde ser observado em meados da década de 1970 (Lino, 1975), quando definiu-se que caverna seria o termo geral utilizado para definir uma cavidade natural subterrânea, distinguindo as tipologias: gruta, que seriam cavernas com desenvolvimento predominantemente horizontal; abrigo sob rocha, ou seja, cavidades pouco profundas; toca, que corresponderia a cavidades com dimensão intermediária entre os abrigos e as grutas, com desenvolvimento inferior a 20 metros; e abismo, que seria utilizado para cavidades naturais predominantemente verticais. Esta definição foi amplamente difundida por meio das normas e convenções espeleométricas do Comitê de Cadastro e Mapeamento da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE, 1991). No entanto, este tipo de classificação caiu em desuso no sentido original do conceito, sendo utilizada na literatura científica especializada de forma livre.

A **classificação hidrogeológica** distingue as cavernas segundo seu funcionamento e origem da água que a percorre. Segundo o seu funcionamento, são divididas em cinco classes: permanentes, intermitentes, estacionais, ocasionais e inativas. As permanentes são aquelas cujas drenagens fluem o ano todo. As intermitentes são aquelas onde o fluxo de água se interrompe em determinadas épocas e se reativa em outras. As estacionais são aquelas ativadas durante eventos pluviais. As ocasionais são aquelas ocupadas excepcionalmente por algum evento, como uma inundação episódica. As inativas ou fósseis são as cavernas que se desconectaram do sistema fluvial, não apresentando mais drenagens. Em relação à origem da drenagem, são divididas em: autóctones, cuja recarga é resultado da acumulação pluvial no próprio maciço cárstico; alóctone, quando a recarga ocorre em áreas não cársticas, normalmente contíguas; e mistas, quando apresentam componentes alogênicos e autogênicos.

A **classificação morfológica**, bastante utilizada, distingue as cavernas segundo seus padrões planimétricos, ou seja, as formas observadas em suas representações em mapas (Palmer, 1991; 2003). A vantagem da utilização desta classificação está relacionada ao fato de que o padrão morfológico e a organização dos condutos, por serem produto dos processos atuantes sob os materiais existentes (rocha e sedimentos), refletem o tipo de recarga/descarga e os condicionamentos hidrodinâmicos e estruturais (Figura 2.1). A classificação morfológica é a que parece melhor traduzir a história evolutiva das cavernas, permitindo, junto com outros elementos, interpretações paleoambientais.

PADRÃO PLANIMÉTRICO		Curvilíneo ramificado	Retilíneo ramificado	Anastomosado	Reticulado (network)	Espongiforme	Ramiforme
							
FONTE DE ÁGUAS "AGRESSIVAS"	Dolina	●	●	●	●		
	Sumidouro	●	●	●	●	●	
	Infiltrações uniformes				●	●	
	Mistura de duas fontes				●	●	●
	Hipogênica			●	●	●	●
ESTRUTURAS DOMINANTES	Bandamento planoparalelo	●		●		●	●
	Fraturas		●		●		●
	Matriz porosa					●	●

Figura 2.1. Padrões planimétricos mais comuns em cavernas carbonáticas. Os círculos de tamanho variado representam a abundância relativa dos tipos de caverna em cada uma das categorias listadas. Montagem de Allan Calux. Modificado de Palmer (2003).

A **classificação atmosférica** é utilizada quando da necessidade de compreender os padrões de circulação e concentração de ar em ambientes vadosos. A complexidade desta classificação depende de fatores como a quantidade de entradas que a caverna tem com a superfície e a posição espacial relativa destes acessos entre si e em relação à altitude. De um modo geral, as classificações mais usuais são os sacos de ar (inferior e superior) e os dutos de ventilação. O saco de ar inferior, também conhecido como "armadilha para captura do ar frio" (cold trap), ocorre quando existem níveis de condutos que se desenvolvem abaixo do eixo horizontal da caverna (figura 2.2A). O saco de ar superior, ou "armadilha para captura do ar quente" (hot trap), ocorre quando há desenvolvimento de condutos acima do eixo horizontal (Figura 2.2B). Em cavernas com entradas distintas, as diferenças da densidade e da temperatura do ar entre a atmosfera cavernícola e o microclima externo resultam em fluxo de ar (Figura 2.2C). A interpretação e classificação dos padrões atmosféricos, além de atender aos estudos climáticos e de conservação, também contribui para a realização de estudos paleoambientais.

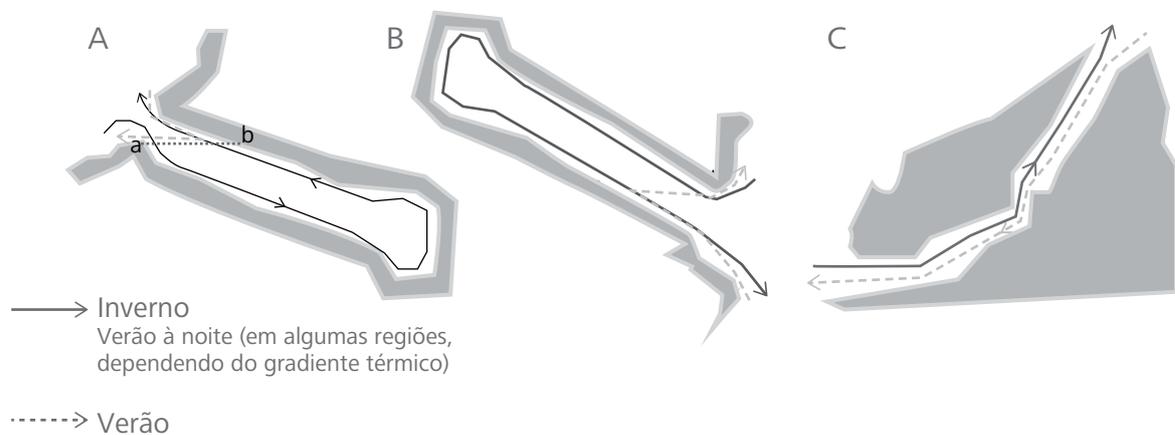


Figura 2.2. Padrões gerais simplificados de circulação de ar em cavernas. Ilustração: Heros Lobo. Modificado de Eraso (1969), Cigna (2004) e Lobo (2011).

2.3. ASPECTOS MORFOLÓGICOS, HIDROLÓGICOS E SEDIMENTARES DAS CAVERNAS CARBONÁTICAS

Um dos aspectos mais importantes de uma caverna são os registros que ela contém acerca do fluxo de água e de suas condições de formação (Sweeting, 1973). As características que permitem estas interpretações estão inscritas no teto, nas paredes e no piso das cavernas. Para se determinar a origem de uma caverna é preciso examinar os padrões gerais, a natureza das galerias e os detalhes de cada conduto (Palmer, 2007). Estes registros guardam informações preciosas sobre a evolução do relevo, incluindo o comportamento dos rios superficiais e subterrâneos.

As **entradas** das cavernas podem apresentar diversas configurações, tais quais nascentes, sumidouros, aberturas na base de dolinas, abismos verticais, entre outras. Elas são normalmente expostas pela subsidência de solo e sedimentos, por colapso de detritos (Figura 2.3) ou pela interceptação da cavidade pela evolução natural das vertentes, por meio do recuo das frentes erosivas (Figura 2.4). No entanto, é importante salientar que uma grande quantidade de cavernas não possui entrada acessível ao ser humano. Estas cavidades são conhecidas como “cavernas oclusas” e estão inseridas no interior dos maciços rochosos. Na continuidade, exemplos gerais são ilustrados nas Figuras 2.5 a 2.9.

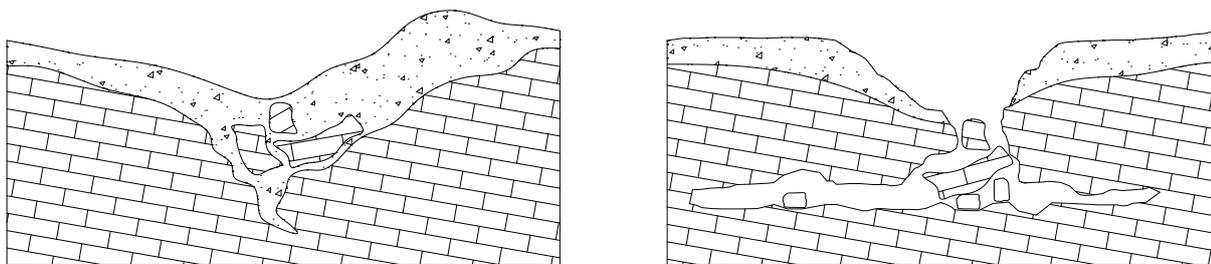


Figura 2.3. Entrada de caverna elaborada a partir de subsidência e colapso doliniforme. Ilustração: Allan Calux.

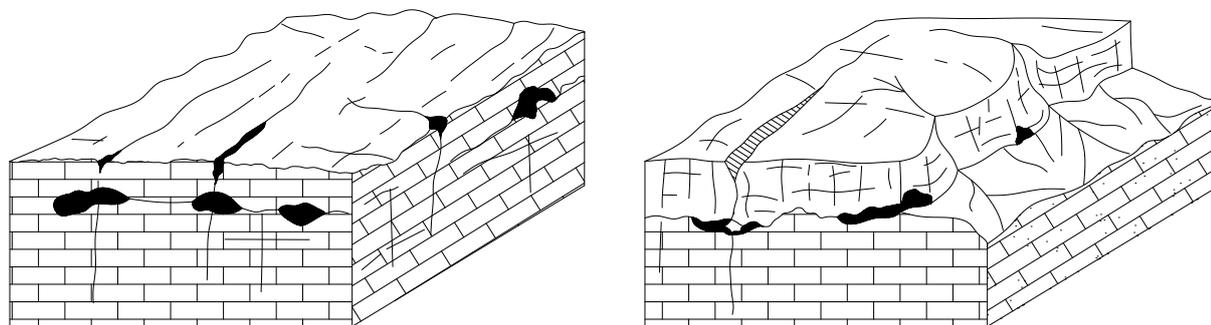
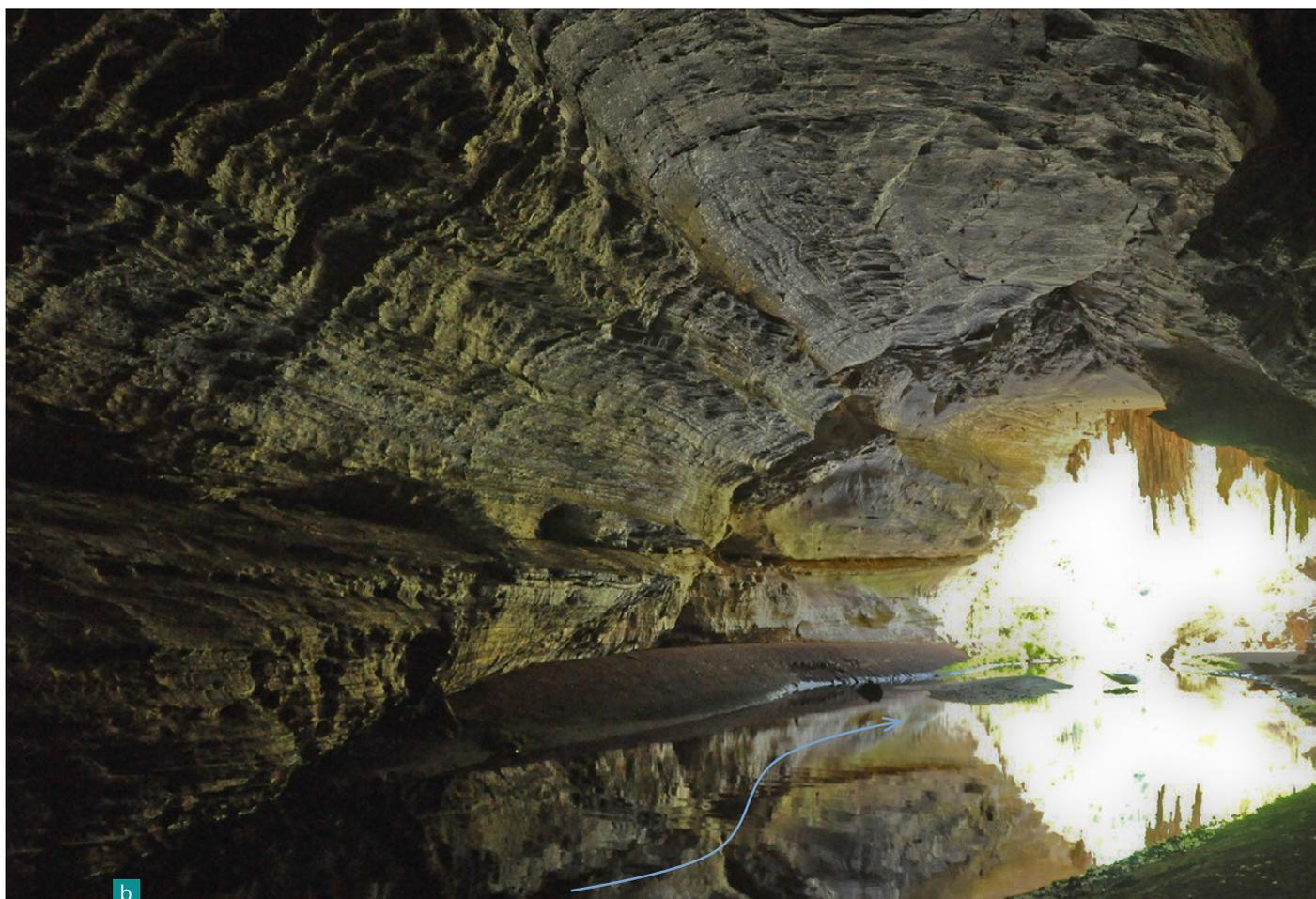


Figura 2.4. Cavidades oclusas interceptadas por meio da evolução das frentes erosivas. Ilustração: Allan Calux.



a

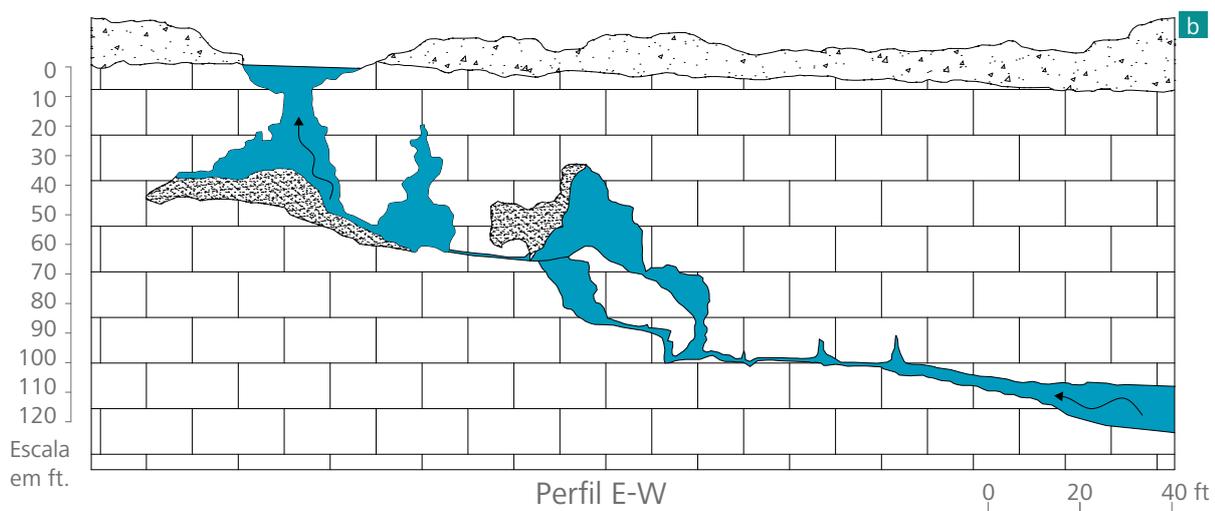


b

Figura 2.5. (a) Sumidouro da Gruta Angélica no Parque Estadual Terra Ronca, Goiás: drenagem destacada pela seta azul. (b) Ressurgência da Gruta Cascudos, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, Minas Gerais. Fotos: Allan Calux.



a



b

Figura 2.6. (a) Ressurgência Blue Hole Spring, caverna submersa localizada em Ichetucknee Springs State Park, Flórida; (b) Perfil esquemático da mesma cavidade. Foto e Montagem: Allan Calux.



Figura 2.7. Ressurgência da Gruta Troncos, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, Minas Gerais. Foto: Allan Calux.



Figura 2.8. Gruta do Janelão, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu: (a) Entrada da “Dolina dos Macacos”; e (b) Dolina vista de baixo. Fotos: Allan Calux.



a

b

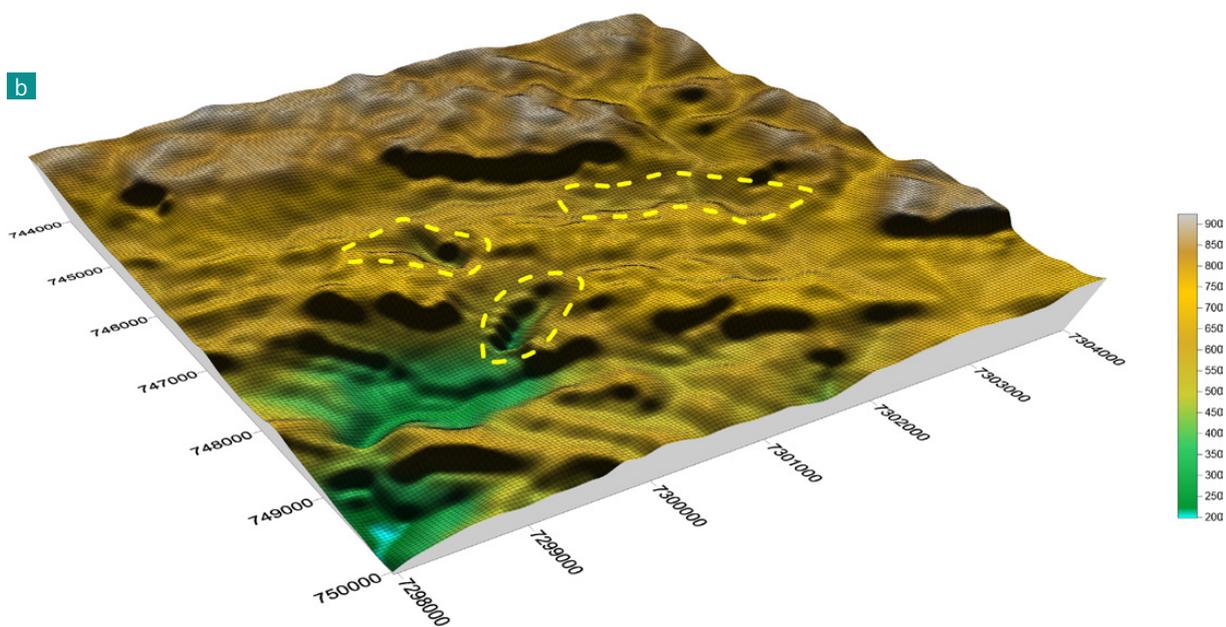
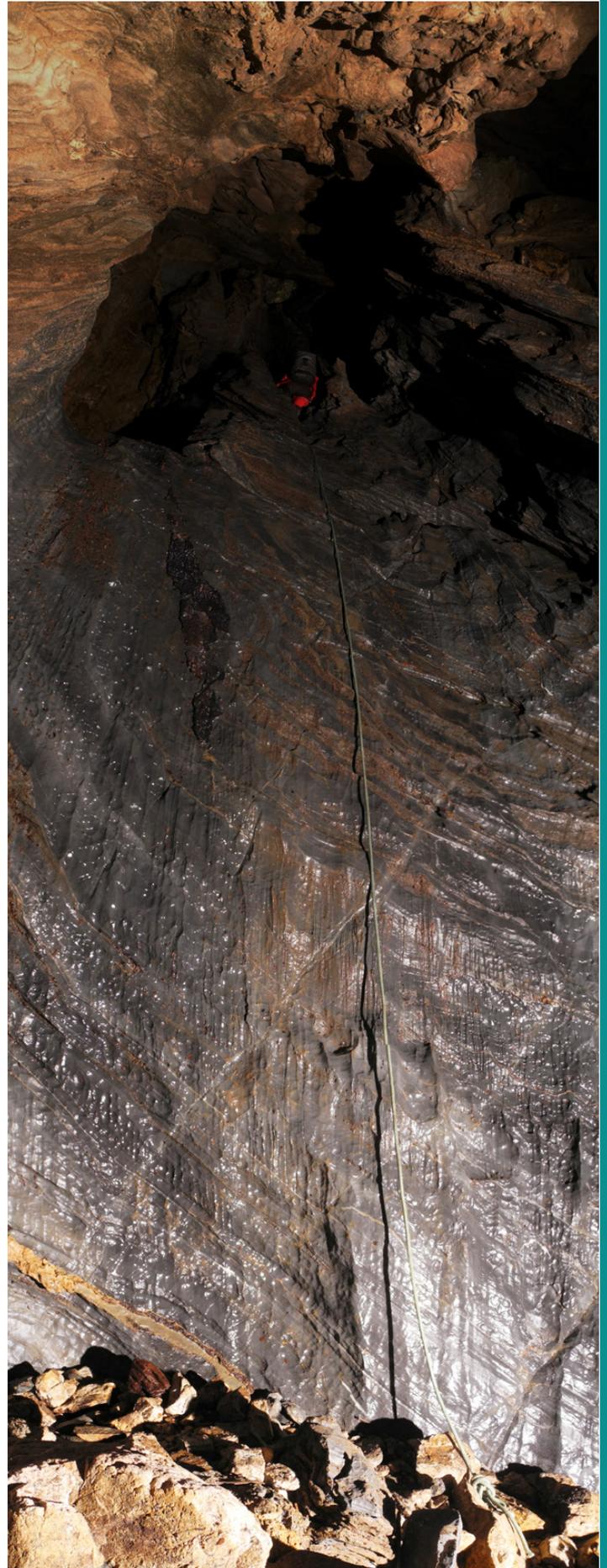


Figura 2.9. (a) Gruta da Temimina III – PETAR, Vale do Ribeira, São Paulo. Notar no centro da fotografia o espeleólogo de macacão vermelho; (b) Modelo tridimensional de relevo, com destaque (em amarelo) para as depressões doliniformes. Notar que as drenagens que alimentam têm suas nascentes a quilômetros da região dos sumidouros da caverna. Foto e montagem: Allan Calux.

As cavernas carbonáticas, em sua maioria, consistem de uma matriz de condutos com passagens que se interligam (Palmer, 2007). Estas passagens são denominadas de condutos de dissolução e podem apresentar diversas formas, dimensões e padrões de desenvolvimento. As galerias correspondem a passagens predominantemente horizontais, enquanto poços e cúpulas são predominantemente verticais.

Cada uma dessas passagens reflete a natureza e o padrão de fluxo de água que a formou, o que permite a interpretação acerca da origem da caverna (Palmer, 1991; 2007). Os poços, por exemplo, são formados na maioria das vezes em ambiente vadoso (acima do nível da água subterrânea contida em um maciço rochoso) por água fluindo verticalmente ao longo de fraturas. Neste caso, o controle hidrodinâmico, ou seja, a injeção de água, tende a predominar sobre as estruturas pré-existentes e o fluxo predominantemente vertical fica registrado por meio de sulcos orientados segundo vetores gravitacionais, (Figura 2.10) que muitas vezes “truncam” fraturas e bandamentos.

Figura 2.10. Poço na caverna Abismo do Sumidouro, feições elaboradas em ambiente vadoso, orientadas por vetores gravitacionais (vertical).
Fotos: Allan Calux.



As galerias também são diversas, podendo apresentar seção transversal em forma de cânion, tubos, fissuras, entre outras (Figura 2.11). Os cânions refletem um momento da história evolutiva da caverna onde há tendência ao equilíbrio hidrodinâmico: a drenagem subterrânea, buscando atingir o nível de base local – que pode ser uma drenagem externa, uma camada de rocha impermeável, entre outros – entalha a rocha, interceptando todos os obstáculos em busca do nível freático. Os tubos, por sua vez, evidenciam um fluxo freático ou vadoso sob pressão. As fissuras correspondem a fraturas ou falhas onde a água foi beneficiada pela facilidade de circulação gerada por essas descontinuidades estruturais, ampliando-as verticalmente e horizontalmente. Os salões (Figura 2.12) correspondem a espaços de grandes dimensões relativas, ou seja, são vazios mais amplos que os condutos próximos. Podem ser formados a partir da intersecção de dois ou mais condutos, por meio de grandes colapsos ou abatimentos, ou exclusivamente por dissolução, embora este último processo seja menos comum.



Figura 2.11. Exemplo de antiga galeria subterrânea em forma de “fechadura” na Gruta do Baú, Minas Gerais. A porção superior apresenta forma de “tubo” e foi formada na fase de evolução freática da antiga caverna, enquanto que a porção subjacente, o cânion, é resultado do entalhamento da drenagem em ambiente vadoso. Foto e ilustração: Allan Calux.



Figura 2.12. Salões ornamentados na Gruta do Seo Jonas, Vale do Ribeira (SP). Fotos: Allan Calux.

As cavernas são muitas vezes preenchidas por depósitos sedimentares. Estas deposições podem ser de dois tipos: clásticas e químicas/bioquímicas.

Os sedimentos clásticos correspondem a todos os detritos transportados e depositados nos condutos das cavernas e retrabalhados por ação fluvial ou gravitacional. Podem ser classificados segundo sua origem, granulometria e arredondamento. Em relação à origem, podem ser autogênicos: gerados no interior da caverna ou do maciço rochoso pelo acúmulo residual de minerais não carbonáticos da rocha; ou alogênicos: gerados a partir da erosão de solo e rocha e transportados para o interior da caverna por córregos e rios ou por movimentos de massa (deslizamentos, escorregamentos etc.). A classificação granulométrica leva em consideração a dimensão do material depositado, que pode variar de silte/argila à matacão (Quadro 2.1). A classificação do arredondamento, como o próprio nome diz, consiste em avaliar o material depositado segundo seu grau de arredondamento, que pode variar de anguloso a arredondado (Quadro 2.2). O grau de arredondamento está diretamente relacionado ao transporte deste material. Quando mais distante a origem, maior o arredondamento e vice versa.

Quadro 2.1. Classificação granulométrica.

Classe	Dimensão (mm)
Argila	<0,002
Silte	0,002 < x < 0,070
Areia	0,07 < x < 2,0
Grânulo	2,0 < x < 4,0
Seixo	4,0 < x < 64,0
Calhau	64,0 < x < 256,0
Matacão	x > 256,0

Quadro 2.2. Grau de arredondamento e esfericidade.

	Muito anguloso	Anguloso	Subanguloso	Subar-redondado	Arredondado	Muito arredondado
Alta esfericidade						
Média esfericidade						
Baixa esfericidade						

Embora não possa ser tomado como regra, sedimentos cascalhentos, ou seja, de granulometria seixo a matacão, tendem a apresentar origem autóctone e maior angulosidade. Os sedimentos terrígenos, de granulometria variando de silte-argila a grânulo, tendem a ter origem alóctone ou mista. Algumas feições endocársticas como cones de abateamento (Figura 2.13), leques sedimentares, dentre outros, estão associados a esta dinâmica de acumulação sedimentar.

Os depósitos clásticos em cavernas são importantes por diversos motivos, mas principalmente por permitir análises acerca dos processos geomorfológicos e paleoambientais de regiões (Auler et al., 2005). No carste de Arcos-Pains-Doresópolis (MG), por exemplo, leques aluviais expelidos das cavernas durante o Pleistoceno serviram como ferramenta para investigações morfotectônicas (Saadi, 1991).



Figura 2.13. Gruta do Janelão, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, Minas Gerais: cone de sedimentos clásticos, produto do abatimento do substrato sobrejacente. Foto: Allan Calux.

Modificações no padrão de circulação de rios subterrâneos, registrados em sedimentos aprisionados nas cavernas, protegidos das intempéries, podem permitir estudos paleoambientais envolvendo datações de terraços e determinação de taxas de denudação.

Os depósitos sedimentares químicos, os denominados espeleotemas, representam as feições endocársticas de maior apelo cênico, compreendendo centenas de formas de variados tamanhos, cor, textura, estrutura e mineralogia gerados por meio de processos de dissolução e precipitação. Podem ser classificados de diversas maneiras, mas a mais comumente utilizada é aquela em que considera o ambiente de formação. Três, são as classes: 1) depósitos de águas circulantes/gotejantes; 2) depósitos de águas estagnadas; e 3) depósitos de exsudação. No entanto, a maioria dos espeleotemas é formada pela junção de mais de um destes tipos de processos, o que dificulta uma classificação mais exata.

Nas cavernas carbonáticas, os espeleotemas mais comuns são as estalactites, estalagmites, cortinas, colunas e concreções de piso em geral, que se formam a partir do gotejamento e/ou escorrimento e precipitação de solução rica em carbonato de cálcio (Vide Equação 2.1). Os minerais mais comuns são a calcita CaCO_3 , a aragonita, que é um polimorfo da calcita (apresenta a mesma fórmula química, mas hábito de cristalização distinto), e a gipsita $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. A coloração dominante é branca, com variações associadas à presença de outros minerais em solução. À presença de ferro resulta em espeleotemas alaranjados a avermelhados, manganês resulta em colorações variando do marrom ao preto-azulado, enquanto que óxidos de cobre geram espeleotemas de coloração azulada (Figura 2.14). Para mais informações, consultar Hill & Forti (1997).

Coralóides, microcoralóides, helictites e heligmites também são espeleotemas comuns, formados normalmente por processo de exsudação. O tamanho, a cor, o brilho e o hábito de cristalização dependerá dos minerais dissolvidos. Calcita normalmente resulta em feições arredondadas e suaves (Figura 2.15-b), enquanto que aragonita resulta em feições pontiagudas (Figura 2.16-d).

O represamento de água pode gerar espeleotemas formados em ambiente de água estagnada. Pérolas de caverna (Figura 2.15-c e 2.15-d), jangadas (Figura 2.16-c) e clavas são exemplos de formações deste tipo de deposição. As primeiras são resultado do capeamento sucessivo de uma partícula insolúvel presente no interior de uma bacia preenchida por água rica em carbonato de cálcio. Jangadas são feições que resultam da precipitação na borda de um represamento. Clavas, por fim, se formam a partir do capeamento sucessivo e oscilação do nível da água estagnada.

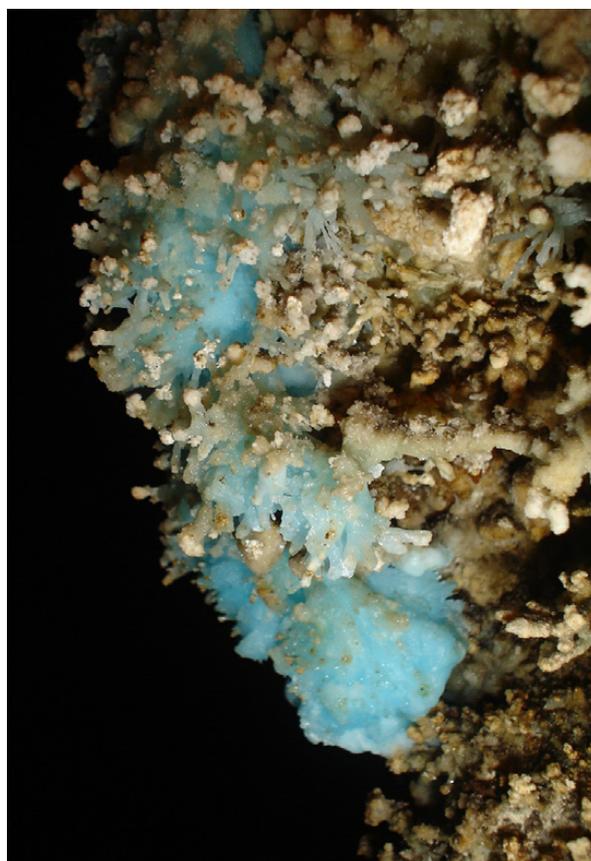


Figura 2.14. Espeleotemas de coloração azulada devido a “contaminação” natural de minerais de cobre na Gruta Azuias, Vale do Ribeira (SP). Fotos: Allan Calux.



Figura 2.15. Gruta São Bernardo, Parque Estadual Terra Ronca (PETeR): (a) Estalactites de dimensões métricas na zona de uma das entradas da caverna; (b) Coralóides botrioidais, depósito de exsudação; (c) e (d) Pérolas de caverna com geometria cilíndrica e esférica, espeleotemas formados em ambiente de água estagnada (represas de calcita). Fotos: Allan Calux.



a



b



c



d

Figura 2.16. Espeleotemas do Salão Taquêupa, na Caverna Santana, PETAR: (a) e b) Flor de aragonita; (c) Jangadas e dentes-de-cão, espeleotemas formados em ambiente de águas estagnadas; (d) Helictite de aragonita em estalactite. Fotos: Allan Calux.

2.4. ASPECTOS ESPELEOGENÉTICOS, GEOCRONOLÓGICOS E PALEOCLIMÁTICOS

Uma caverna calcária, como detalhado anteriormente, é por definição um vazio na rocha, produto da remoção química e mecânica de matéria. Para que ela se forme, é necessário que as águas subterrâneas dissolvam a rocha com rapidez suficiente, antes que a rocha seja removida pela erosão superficial (Palmer, 2003). Em outras palavras, a formação dos condutos e galerias precisa acontecer antes que a evolução da paisagem intercepte essas feições subterrâneas, extinguindo-as. Como as rochas carbonáticas são muito suscetíveis à ação de agentes intempéricos, há consenso de que a evolução dos sistemas cársticos ocorre predominantemente no período geológico denominado Quaternário, que teve início há 1,8 milhão de anos, embora possam se desenvolver sob contextos geomorfológicos herdados de períodos mais antigos.

A maioria das cavernas começa a se formar em profundidade, abaixo do lençol freático (zona saturada). Nesta fase inicial, a protocaverna consiste de um tubo cilíndrico de menos de 1 cm de diâmetro, cujo alargamento resultará na conformação de uma caverna propriamente dita. Quando o canal subterrâneo atinge mais de 1 centímetro, o fluxo da água é convertido de laminar em turbulento. Esta fase freática de evolução está intimamente relacionada à organização inicial dos aquíferos cársticos, quando são então estabelecidas as conexões hidrológicas de recarga e descarga do sistema.

Após esta fase de ampliação horizontal das galerias e condutos subterrâneos, a dinâmica evolutiva dependerá do contexto geomorfológico. Em relevos estáveis ou associados a processos de soerguimento, o rebaixamento dos níveis de base local faz com que a expansão da caverna seja orientada por vetores gravitacionais (verticais) em ambiente vadoso (subaéreo). Este modelo evolutivo é denominado epigênese. Há evidências de que cerca de 90% das cavernas conhecidas no mundo tenham essa origem (Palmer, 2011). No Brasil, cavernas formadas por processos epigênicos podem ser encontradas em diversas áreas cársticas, como o Vale do Ribeira, no sudoeste do Estado de São Paulo, por exemplo (Figura 2.17).

Por outro lado, se o sistema cárstico desenvolver-se em relevo deprimido, os condutos das cavidades tenderão a ser preenchidos pelo acúmulo progressivo de sedimentos, resultando em uma circulação de águas subterrâneas progressivamente ascendentes. Essa circulação resultará na escavação do teto das cavernas, que só cessará caso alguma mudança ambiental interrompa a dinâmica de acumulação, como eventos neotectônicos, por exemplo. Este modelo espeleogenético é denominado paragênese e ocorre principalmente em áreas onde a rocha carbonática encontra-se sob espesso manto de solo (carste encoberto), como Lagoa Santa (Figura 2.18), ou zonas deprimidas, como o Pantanal mato-grossense, por exemplo.

Algumas cavernas se formam em grande profundidade, onde a dinâmica de circulação de fluidos obedece a dinâmicas hidrotermais, ou seja, com rotas que se estabelecem independentemente dos vetores gravitacionais. Neste modelo evolutivo, denominado hipogênese, o fluxo tende a ser ascendente, abrupto. A Toca da Boa Vista, a maior caverna brasileira, com mais de 100 quilômetros de desenvolvimento, é exemplo de cavidade formada a partir deste processo (Auler & Smart, 2002).

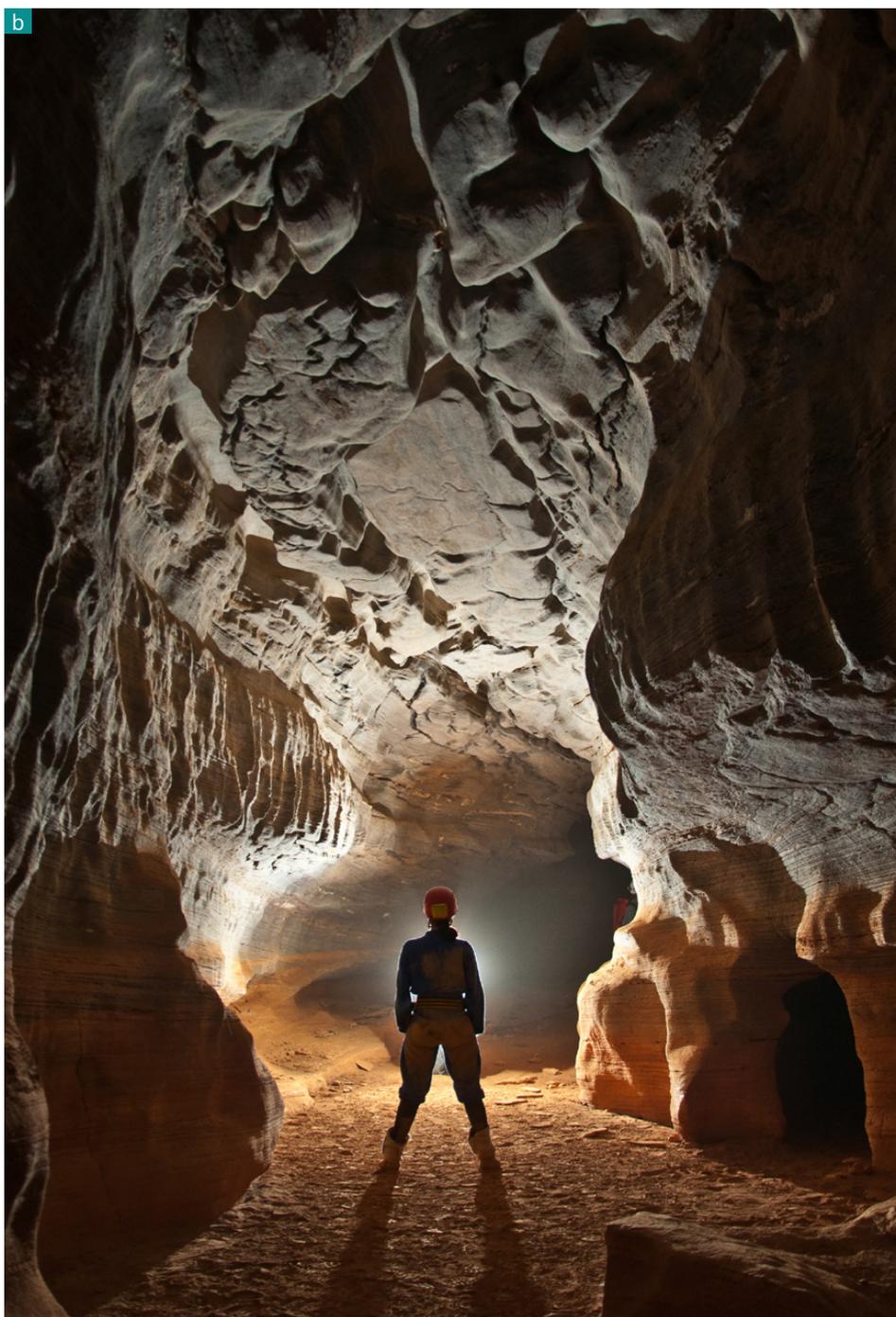
As cavernas, dada a relativa estabilidade que estão submetidas, são ambientes muito propícios à preservação de indicadores paleoambientais. Alguns pesquisadores defendem que a zona de entrada tende a ser mais rica em vestígios de ocupação humana e animal pré-histórica, ao passo que as zonas mais profundas podem preservar sedimentos clásticos e químicos que podem fornecer diversas evidências (Auler et al., 2005). Os principais elementos, fonte de informação das condições climáticas pretéritas, são os sedimentos clásticos, os registros de oscilação do lençol freático (NA), os espeleotemas e os vestígios arqueológicos e paleontológicos (Quadro 2.3).



Figura 2.17. Vale do Ribeira (SP): (a) Visão geral do vale do rio Betari, Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira; (b), (c) e (d) Abismo do Zero, caverna tipicamente epigênica no Vale do Ribeira. Fotos: Allan Calux.



Figura 2.18. Gruta Túneis, Parque Estadual do Sumidouro, exemplo de cavidade paragenética na região de Lagoa Santa, Minas Gerais: (a) Teto escavado pela ação de drenagens em salão preenchido no passado; e (b) Pendentes (posição central/superior), feições típicas de cavernas paragenéticas. Fotos: Allan Calux.



Quadro 2.3. Indicadores paleoclimáticos passíveis de estudos em ambientes endocársticos.

ELEMENTO	INDICADORES	TÉCNICA DE ANÁLISE	USO POTENCIAL
Sedimentos Clásticos	Terraços fluviais	Datação radiométrica, isotópica e cosmogênica (14C, U/Th/Pb, Be10), paleomagnetismo, termoluminescência	Paleoclima, sedimentologia, geomorfologia fluvial
Oscilações do lençol freático	Precipitação de espeleotemas subaquáticos Níveis de água saturada precipitados nas paredes Varves (sedimentação alternada)	Datação radiométrica e isotópica (14C, U/Th, Be10) e paleomagnetismo	Paleoclima, estudos tectônicos e neotectônicos
Análise de espeleotemas	Pólen aprisionado em espeleotemas	Palinologia	Paleovegetação
	Frequência e taxa de crescimento de espeleotemas	Datação radiométrica (U/Th/Pb)	Paleoclima
	Petrologia e mineralogia	Difração de raios-X Fluorescência de raios-X Microscopia petrográfica	Paleoclima
	Elementos-traço		Paleoclima, paleovegetação
	Isótopos estáveis de oxigênio e carbono	Datações isotópicas (18O) Inclusões fluidas	Paleoclima (temperatura) Paleovegetação
	Luminescência		Paleoclima
	Posição e direção de coralóides	Análise visual comparativa	Paleocirculação atmosférica
Paleontologia	Tafonomia e cronologia	Datações radiométricas (14C, U/Th/Pb)	Paleoclima / Paleofauna

Fontes: Hill & Forti (1997); Auler et al. (2005).

De fato, centenas de cavernas estudadas em todo o mundo têm fornecido relevantes informações em estudos geomorfológicos, sedimentológicos, paleofaunísticos e paleoclimáticos. Apenas para citar alguns exemplos, na China o monitoramento de ressurgências tem sido utilizado para entender o balanço de carbono na atmosfera. No Brasil, pesquisas pioneiras realizadas em todo o território nacional têm revelado importantes descobertas acerca das mudanças climáticas ocorridas nos últimos 600 mil anos (FIORAVANTI, 2009), demonstrando inclusive que o clima do Nordeste do Brasil assumiu as características atuais apenas nos últimos 4 mil anos, sendo mais úmido no passado. Na Europa, nos Estados Unidos e no Brasil, uma rede de pesquisadores tem se valido de técnicas de datação com isótopos cosmogênicos (Be10 e Al14) para determinar taxas de “entalhamento” dos canais fluviais subterrâneos (De Waele et al., 2012; Laureano & Karmann, 2013).

2.5. CONSERVAÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO

As cavernas são ambientes frágeis, formados ao longo de centenas de milhares de anos. Constituem ambientes únicos e relativamente estáveis, porém vulneráveis. O grande desafio da conservação de cavernas está relacionado ao reconhecimento de sua importância biológica, geológica, histórica e cultural (Sessegolo et al., 2006). Além disso, as cavernas vêm sendo cada vez mais reconhecidas também pela importância ecológica, climática, econômica e social.

A importância de uma caverna também precisa ser observada em função de sua localização específica. Algumas cavernas possuem maior importância local, enquanto outras adquirem status global. A variação localizacional, em conjunto com outras variáveis inerentes às cavernas, como as litologias, formas e processos que as formam, estão entre os elementos que caracterizam a sua diversidade, também denominada recentemente como geodiversidade.

A geodiversidade, como um ramo da diversidade natural, é decorrente da profusão de ambientes geológicos, fenômenos e processos ativos. A ação destes fenômenos e processos, por sua vez, culmina na produção e transformação de elementos como as rochas, minerais, fósseis, solos e outros depósitos superficiais e ambientes (Stanley, 2000). No entanto, nem toda a geodiversidade pode ou mesmo deve ser conservada. A estratégia mais adotada é a separação de parcelas representativas, para a adoção de estratégias de conservação biológica – quando o foco maior estiver na vida que os elementos da geodiversidade abrigam – ou da geoconservação – quando o enfoque se voltar para elementos representativos da geodiversidade, denominados por Brilha (2005) como geossítios.

Os critérios para a seleção de elementos representativos são definidos tanto por legislações específicas de cada país como por acordos supranacionais. No caso das cavernas, Lobo & Boggiani (2013) defendem a adoção de critérios de representatividade e singularidade para a sua caracterização como patrimônio espeleológico. Neste sentido, a compreensão de patrimônio também se refere aos elementos que possuem interesse difuso e coletivo, mas sem focar somente na percepção humana sobre a natureza. Para tanto, deve-se adotar a Convenção para a Proteção Mundial e Cultural de 1972 da UNESCO, a qual ressalta determinados atributos que distinguem as parcelas das áreas naturais – dentre as quais, as cavernas – para efeito de conservação no âmbito dos Patrimônios da Humanidade. Alguns destes atributos se destacam como exemplos: os fenômenos superlativos; a importância estética; os exemplos marcantes de estágios da história da Terra ou de processos ecológicos e biológicos evolutivos; e os habitats para a conservação *in situ* da diversidade biológica. Tais aspectos são abordados mundialmente por diversas estratégias de conservação, tanto de habitats e biomas quanto, mais recentemente, de iniciativas de geoconservação. A geoconservação emerge como um ramo dos estudos e propostas práticas para a conservação da natureza. Nesse contexto, a geoconservação aplicada às cavernas ou sistemas de cavernas é compreendida como a adoção de estratégias e ações de conservação de parcelas representativas do patrimônio espeleológico.

Conservar uma caverna ou sistemas de cavernas significa garantir a o equilíbrio geoecológico, a sua integridade física e estética e a manutenção dos processos evolutivos (circulação de água e ar, transporte de sedimentos, entre outros). Uma conservação efetiva se inicia pela compreensão das inter-relações entre o ambiente subterrâneo e o ambiente superficial, sobretudo no que diz respeito a dinâmica de transporte de alimentos para o seu interior, o chamado aporte trófico. Desta forma, a conservação de uma caverna ou sistema de cavernas, na maioria dos casos, não é efetiva se os limites práticos de proteção estiverem focados apenas na caverna em si. É preciso considerar as relações entre a caverna e o ambiente que a cerca, sobretudo aspectos da dinâmica de recarga do sistema e a área de forrageio de espécies viventes em seu interior, para compreender os limites espaciais mais adequados para sua manutenção.

O objetivo da adoção destas estratégias de conservação em perspectiva ampla é evitar os possíveis impactos antrópicos negativos ao ambiente cavernícola. Dentre as atividades potencialmente causadoras de impactos, além da supressão direta por atividades de mineração, destacam-se as culturas agrícolas de grande porte, a atividade madeireira, a pecuária e até mesmo a expansão das malhas urbanas. O desenvolvimento destas atividades normalmente leva à alteração da paisagem superficial e a remoção da cobertura vegetal existente. Tais alterações podem resultar na redução do aporte de alimentos para os organismos viventes na caverna, a alteração no microclima local e na redução da taxa de infiltração de águas meteóricas (águas de chuva), entre outras consequências. Um exemplo de problemas decorrentes destas modificações é a alteração na recarga e volume dos aquíferos, de forma que algumas drenagens subterrâneas podem simplesmente secar. Outra consequência é o aumento das taxas de erosão no solo e transporte de sedimentos terrígenos por meio dos córregos e rios, levando ao assoreamento de drenagens subterrâneas conectadas a estes rios superficiais. Além disso, a expansão urbana – ou mesmo a ocupação urbana em áreas rurais quando desenvolvida de forma desordenada – pode resultar na contaminação de aquíferos cársticos responsáveis pelo abastecimento de água de diversos grupos humanos. Sobre este e outros problemas, mais informações podem ser obtidas no Capítulo 6 desta mesma parte do Guia.

2.6. AVALIANDO O POTENCIAL ESPELEOLÓGICO

De maneira geral, a avaliação de potencial espeleológico pode ser definida como um processo remoto que busca estabelecer o grau de favorabilidade para a ocorrência de cavidades naturais subterrâneas em um determinado recorte espacial. Deve ser realizada na fase de estudo da viabilidade econômico-financeira, uma vez que impacta diretamente o uso potencial do recurso mineral.

A avaliação consiste em uma etapa importante no conjunto de estudos ambientais relacionados à espeleologia, sobretudo em áreas onde há escassez de informações. Saber onde há maior ou menor potencial para ocorrência de cavernas pode subsidiar a tomada de decisão tanto nas esferas públicas, subsidiando políticas de ordenamento territorial, quanto privadas, facilitando a tomada de decisões e melhorando a acurácia dos estudos de viabilidade, reduzindo riscos, prazos e custos. Além dos objetivos estratégicos e de gestão, a avaliação de potencial busca também racionalizar os esforços de campo e garantir levantamentos prospectivos eficazes e seguros do ponto de vista dos riscos ocupacionais.

A avaliação do potencial para ocorrência de cavernas por meio de análises remotas (fotointerpretação, classificações remotas assistidas e semi-assistida, análise multicritério etc.) sempre fez parte da práxis espeleológica. Com o objetivo de encontrar as melhores rotas de acesso, os espeleólogos sempre se “debruçaram” sobre os mapas procurando feições típicas tais quais dolinas, sumidouros e ressurgências. As bases cartográficas mais utilizadas nestas análises são: geologia (litoestratigrafia e estruturas), geomorfologia (compartimentos, declividade, hipsometria), hidrografia (hierarquia fluvial e morfologia), hidrogeologia, topografia, entre outros. Algumas etapas são comuns a todos eles:

- i. Levantamento bibliográfico e cartográfico: etapa fundamental para que seja constituído o quadro geral da área de estudo. É importante saber se já foram realizados estudos anteriores, se estes estudos identificaram cavernas ou outras feições de interesse, onde estão essas feições etc. O levantamento cartográfico deve ser feito em escala compatível com os objetivos do levantamento. Estudos regionais devem ser feitos com mapas de menor escala, enquanto que estudos locais prescindem de produtos cartográficos em escala de detalhe.
- ii. Levantamento de bases de dados espeleológicos: é importante consultar os bancos de dados espeleológicos. O Brasil possui duas bases, uma gerenciada pelo Centro de Estudos e Conservação de Cavernas (CECAV) e outra da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE);
- iii. Hipóteses de trabalho: estão relacionadas à interpretação que se tem acerca da evolução geomorfológica da área em questão e dos processos espeleogenéticos associados ao desenvolvimento do modelado.
- iv. Desenvolvimento teórico do modelo: elaborado a partir das hipóteses de trabalho, com vistas a reconhecer a “assinatura paisagística” que traduza os processos geradores das feições cársticas, em especial das cavernas;
- v. Aplicação do modelo: segundo o modelo teórico, que normalmente é operacionalizado em plataformas SIG (Sistemas de Informações Geográficas) por meio de análise multicritério, lógica booleana, entre outras;
- vi. Controle de campo: para controle dos resultados e refinamento/ajuste do modelo.

2.7. PROSPECÇÃO SISTEMÁTICA E LEVANTAMENTO DE CAMPO DIRECIONADO

A prospecção, etapa fundamental do estudo espeleológico, corresponde a um conjunto de tarefas que busca identificar e inventariar cavernas e feições exocársticas como dolinas, sumidouros, ressurgências, vales secos, vales cegos, entre outras. Este inventário pode ter caráter amostral, direcionado a algum objetivo específico, ou sistemático, uma caracterização preliminar do patrimônio espeleológico, um “inventário básico” da área alvo que subsidiará os diagnósticos posteriores. Prospecções direcionadas normalmente concentram-se nas áreas com maior potencial para ocorrência de cavernas, enquanto que as prospecções sistemáticas precisam cobrir toda a área de estudo. O Quadro 2.4 apresenta uma síntese das principais características destas duas modalidades:

Quadro 2.4. Síntese das principais características da prospecção direcionada e da prospecção sistemática.

PROSPECÇÃO DIRECIONADA	PROSPECÇÃO SISTEMÁTICA
- Caráter amostral;	- Caráter sistemático;
- Objetivos específicos:	- Objetivos gerais:
- Levantamento localizado;	- Levantamento amplo;
- Foco: áreas com maior potencial espeleológico;	- Foco: área de estudo global;
- Escopo orientado aos objetivos específicos;	- Escopo orientado ao inventário do patrimônio;
- Informação: formulários específicos, orientados aos objetivos do projeto, armazenamento em planilhas;	- Informação: formulários padronizados, armazenamento em bancos de dados informatizados.
- Registro do caminhamento: facultativo;	- Registro do caminhamento: obrigatório;
- Exemplos: avaliações preliminares do patrimônio espeleológico, análises de risco, compensação espeleológica, etc.	- Exemplos: licenciamento ambiental, zoneamentos, políticas de ordenamento territorial, etc.

Fonte: Calux (2011).

A organização de um levantamento prospectivo deve levar em consideração o detalhamento da malha de prospecção e os métodos de controle do caminhamento. O detalhamento da malha de prospecção é pertinente apenas em estudos sistemáticos, cujo registro do caminhamento realizado em campo é obrigatório. Este assunto será tratado adiante. Em relação aos métodos de controle, existem basicamente três: i) os orientados por uma malha de pontos; ii) os definidos por linhas-controle; e, por fim, iii) os delimitados por polígonos/quadrantes (Figura 2.19).

No método da malha de pontos, um profissional mais experiente determina com base em análises remotas (fotointerpretação) pontos de interesse que são carregados nos receptores GPS das equipes de campo. Com base neste planejamento prévio, as equipes buscam sucessivamente os pontos pré-determinados.

O método da linha-controle é bastante semelhante ao método dos pontos, mas ao invés de uma malha, as equipes recebem linhas em seus receptores GPS, que devem ser seguidas de maneira aproximada. Este método dá mais autonomia às equipes de campo, que podem fazer curtas incursões fora dos limites destas linhas.

O método dos polígonos/quadrantes consiste na delimitação de áreas de com base em características de interesse. Ele oferece autonomia permitindo que decisões sejam tomadas *in loco*, com base nas características da paisagem, alinhadas com os objetivos do projeto.

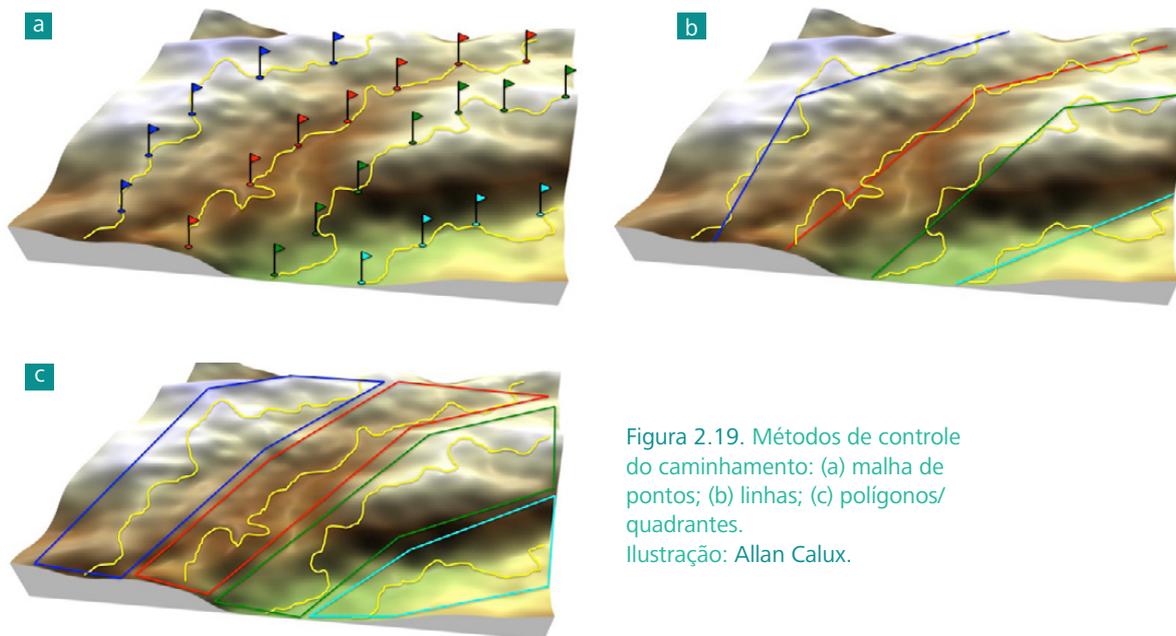


Figura 2.19. Métodos de controle do caminhamento: (a) malha de pontos; (b) linhas; (c) polígonos/quadrantes. Ilustração: Allan Calux.

A eficácia de cada um destes métodos depende da experiência da equipe de campo. O método do polígono/quadrante, tendo em vista o alto grau de autonomia em campo, é recomendado apenas para equipes com muita experiência. O método das linhas, de ação limitada, deve ser utilizado por equipes com relativa experiência, enquanto que o método de pontos é aconselhável para equipes com menor experiência (Figura 2.20).

Figura 2.20 – Métodos de controle do caminhamento e experiência das equipes de campo.



Apesar dos diversos métodos de levantamento, fica a seguinte dúvida: como avaliar se o esforço amostral foi suficiente? Como demonstrado anteriormente, em levantamentos sistemáticos é obrigatório o registro do caminhamento realizado em campo. Este registro resulta em uma malha de caminhamento e a suficiência amostral pode ser medida a partir destes dados. Embora não existam métodos ou parâmetros legais para essa “medição”, algumas propostas têm surgido nos estudos espeleológicos relacionados ao licenciamento ambiental: a matriz de caminhamento e o coeficiente de recobrimento.

A Matriz de Caminhamento consiste em um método cuja suficiência é medida a partir da comparação entre a densidade de caminhamento em compartimentos operacionais e uma matriz de parâmetros empíricos. A densidade de caminhamento corresponde à razão entre a soma das distâncias percorridas em campo dentro de uma unidade operacional e a área de sua superfície (Equação 2.2), medida preferencialmente em km/km². Os compartimentos operacionais correspondem a espaços definidos por meio da topologia do empreendimento, suas estruturas e o potencial espeleológico. A Matriz de Caminhamento, de base empírica, procura estabelecer qual é o esforço mínimo necessário em cada um dos compartimentos definidos (Tabela 2.1).

Equação 2.2. Densidade de caminhamento.

$$D_c = \frac{dt}{A_s}$$

Onde,
 d_c = [km/km²]: densidade de caminhamento;
 dt = [km]: distância total percorrida na área de estudo; e
 A_s = [km²]: área de superfície.

Tabela 2.1. Matriz de Caminhamento.

TOPOLOGIA	ESTRUTURA	POTENCIAL ESPELEOLÓGICO (km/km ²)			
		Muito Alto	Alto	Médio	Improvável
Linear (Ex: estradas, ferrovias, LTs)	Eixo linear	1	0,5	0,25	-
	Entorno	5	-	-	-
Poligonal de pequeno e médio porte (Ex: empreend. minerários)	Cava	20	10	5	3
	PDEs	20	10	5	3
	Barragens	20	10	5	3
	Demais estruturas	0,1	0,025	0,005	-
Poligonal de grande porte (Ex: UHEs)	Entorno	10	2 a 5	1 a 2	1
	Reservatório	15	2 a 5	1 a 2	1
	Entorno	5	1 a 2	0,1	0,01
	AID	1	0,25	0,01	-

O Coeficiente de Recobrimento corresponde à razão da área coberta durante a prospecção e a área da superfície (Equação 2.3). A área recoberta é calculada a partir da definição do “horizonte de visão” das equipes em campo, determinada principalmente pela cobertura vegetal e pelas condições de relevo. Os maiores desafios deste método são a heterogeneidade do horizonte de visão das equipes nos diversos compartimentos da paisagem e a ausência de parâmetros comparativos. A Figura 2.21 traz um exemplo hipotético de como este valor poderia ser calculado.

Equação 2.3. Coeficiente de recobrimento

$$C_r = \frac{A_v}{A_s}$$

Onde,
 C_r = [adimensional]: coeficiente de reconhecimento;
 A_v = [km²]: área visualizada na área de estudo;
 A_s = [km²]: área de superfície.

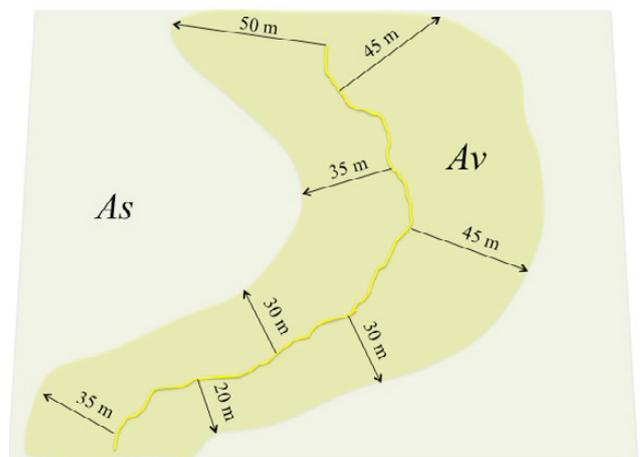


Figura 2.21. Exemplo de cálculo do percentual de recobrimento em uma área de prospecção hipotética: a linha amarela corresponde a um caminhamento hipotético e a área em amarelo à área de visada.

Ilustração: Allan Calux

2.8. ESPELEOTOPOGRAFIA, ESPELEOMETRIA E GEOESPELEOLOGIA

O levantamento espeleotopográfico é uma atividade técnica que busca representar o arranjo geométrico das rotas subterrâneas e as feições internas de uma caverna. Os métodos empregados derivam de adaptações dos tradicionais levantamentos topográficos de superfície. Utilizando bússola, clinômetro e trena (Figura 2.22), os espeleotopógrafos medem ângulos, distâncias e fazem desenhos em campo. Posteriormente, com o auxílio de *softwares* específicos, os dados de campo são tratados e traduzidos em um mapa (Figura 2.23 e 2.24).



Figura 2.22. Equipamentos utilizados em levantamentos espeleotopográfico: (a) Trena de PVC; (b) Trena a laser; (c) Bússola e clinômetro de visada. Fotos: Allan Calux.

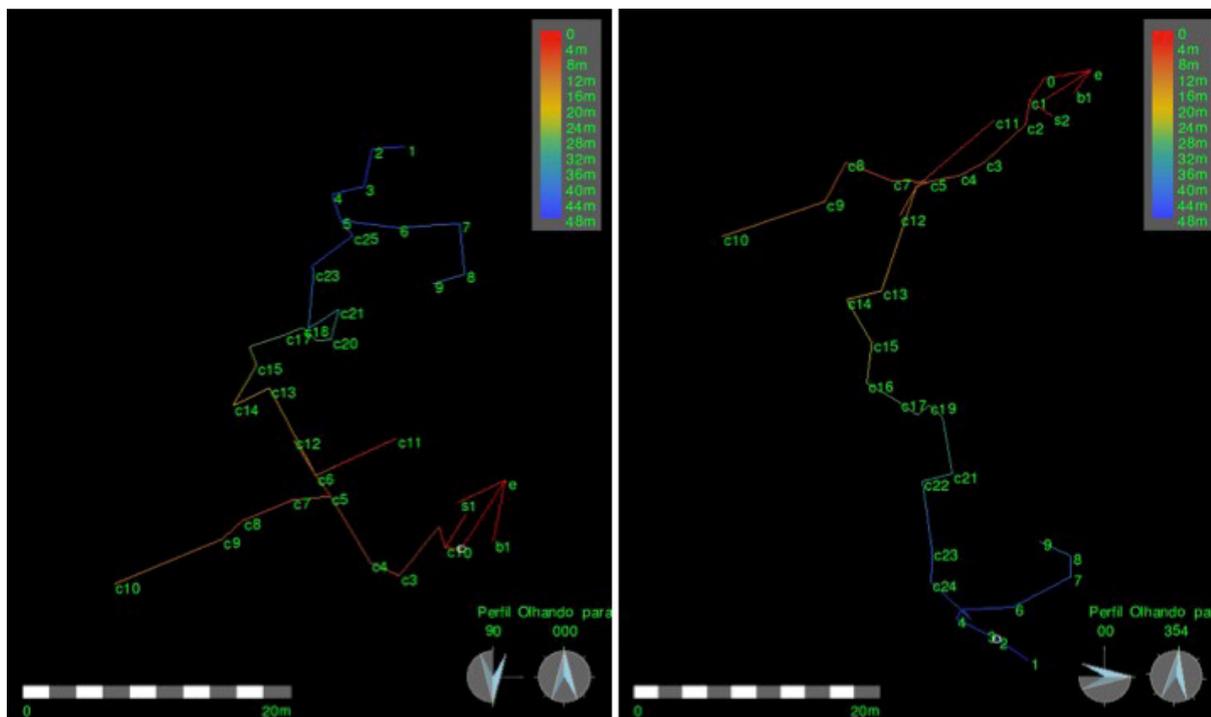


Figura 2.23. Linhas de trena de um levantamento espeleotopográfico hipotético tratado em *software* Survox: a) planta e b) seção. Montagem: Allan Calux.

Abismo do Zero

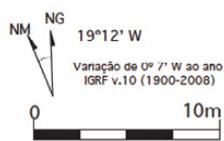
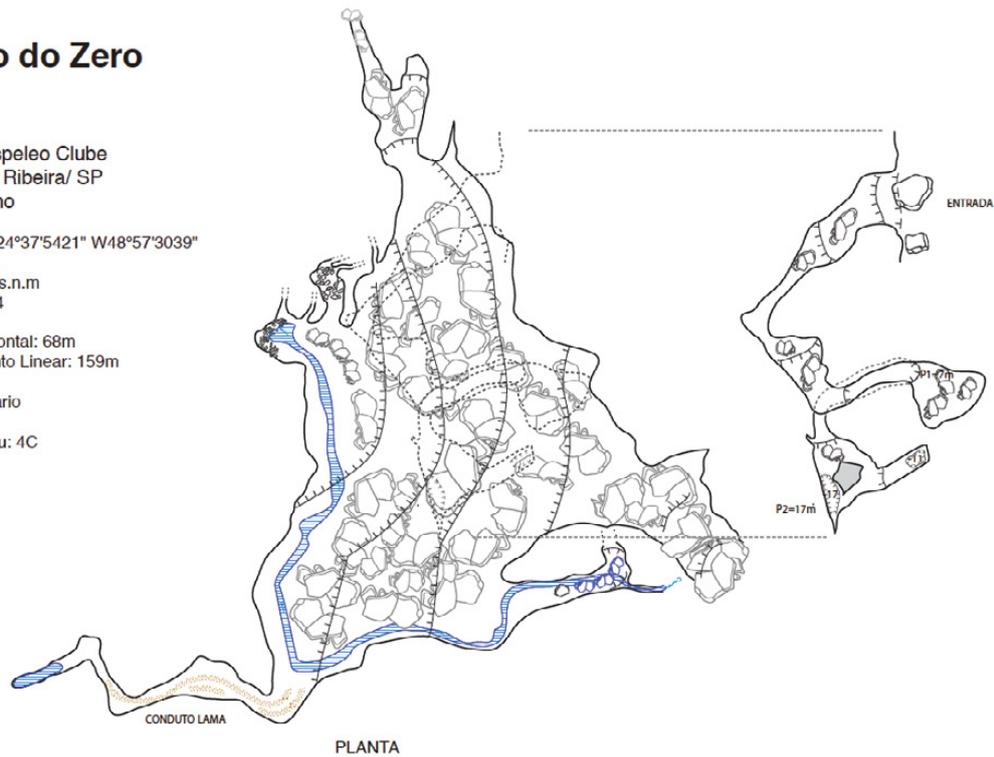
SP-168
R*SP-168

Meandros Espeleó Clube
Município de Ribeira/ SP
Bairro Saltinho

Localização: S24°37'5421" W48°57'3039"
Datum WGS84
Altitude: 490m s.n.m
Datum: WGS84

Projeção Horizontal: 68m
Desenvolvimento Linear: 159m
Desnível: 53m
Litologia: calcário

Topografia Grau: 4C
Método: BCRA
set/2008



Convenções:		

Figura 2.24. Exemplo de um mapa finalizado. Ilustração: Allan Calux

Em um estudo espeleológico, o mapa da caverna constitui a base a partir da qual se realizam todos os demais estudos, sejam eles geoespeleológicos, espeleoclimáticos, bioespeleológicos, arqueológicos, paleontológicos, ou de qualquer outra natureza. Para que um estudo espeleológico seja consistente, o mapa espeleotopográfico é ferramenta obrigatória.

A precisão do levantamento espeleotopográfico pode ser classificada segundo dois métodos principais, o *BCRA Survey Grades* (2002) e o *UIS Mapping Grades* (2010). No método BCRA, provavelmente o mais utilizado no mundo, a precisão é classificada a partir de duas graduações, uma relacionada ao erro de fechamento de linhas de trena e outra, ao detalhamento das seções (Tabela 2.2). No método UIS, a classificação é mais complexa e é realizada com base em uma graduação das linhas de trena, do detalhamento da planta baixa e de um sufixo qualificativo (Tabela 2.3).

Um produto do levantamento espeleotopográfico são os atributos espeleométricos. No Brasil, os mais utiliza-

Tabela 2.2. Classificação BCRA.

Grau Topografia	Descrição
Grau 2	A ser usado, somente se necessário (ver nota 7), 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 ± 50 cm; erro de posição da base menor que 50 cm.
Grau 4	A ser usado, somente se necessário (ver nota 7), 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 1 cm e erro de posição da base menor que 10 cm.
Grau 6	Levantamento magnético com precisão maior que a de Grau 5 (ver nota 5).
Grau X	Levantamento topográfico utilizando-se teodolito ou Estação Total ao invés de bússola (ver notas 6 e 10).

1. A tabela acima é um sumário e deve ser utilizada 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” destas definições, sem que se 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 10 cm 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 $\pm 2,5$ 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 as Tabela 1 e 2 em suas publicações, não sendo necessária permissão da BCRA para isso. Entretanto, as tabelas não podem ser reproduzidas 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 a mão com régua, escalímetro e transferidor.

Grau de detalhamento	Descrição
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.

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.

Fonte: Day (2002).

Tabela 2.3. Classificação UIS.

Grau Topografia	Descrição	Precisão			
		Distância	Bússola	Clinômetro	Acurácia
-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.	0,5 m	5°	-	10%
4	Topografia com bússola e trena, usando estações fixas escolhidas deliberadamente. Desníveis medidos por clinômetro ou pelos componentes horizontal e vertical.	0,1 m	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.	0,05 m	1°	1°	2%
6	Topografia ou triangulação usando instrumentos calibrados, montados em tripés, para direção e inclinação. distância por trena calibrada, taquiometria precisa ou DistoX.	0,02 cm	0,25°	0,25°	1%
X	Topografia feita com teodolito ou meios comparáveis.	Variável			Variável
Grau Mapa	Descrição				
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 de estar em escala, dimensões das passagens pode ser estimada. 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.				
Grau Qualificação	Descrição				
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.				

Fonte: UIS (2012).

dos são: projeção horizontal, desnível, área e volume.

Para o cálculo da *projeção horizontal*, deve-se utilizar o princípio da descontinuidade, que desconsidera a largura dos condutos no cálculo final. Deste modo, a soma do comprimento de um conduto é feita em seu eixo central. No cruzamento entre dois condutos esta medição é interrompida de modo a não incluir o comprimento lateral do novo conduto (Figura 2.25). O desnível é o resultado da diferença altimétrica entre o piso mais elevado e o piso mais rebaixado da caverna (Figura 2.25). Em casos de presença de patamares, paleopisos ou nível superior, sua altura deve ser considerada no cálculo do desnível.

A *área* deve ser calculada por meio de programas específicos. O mais usual é que sejam utilizados softwares CAD a partir

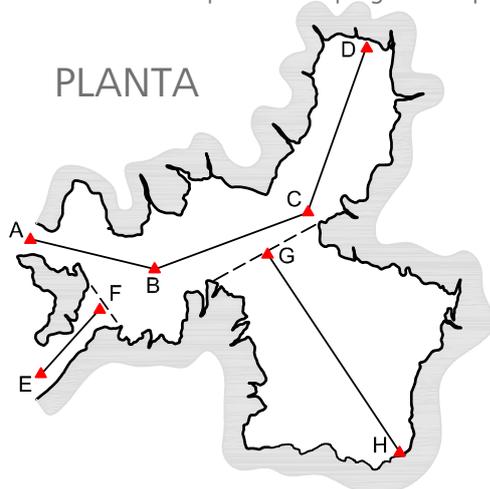


Figura 2.25. Medição da projeção horizontal de acordo com o método da descontinuidade e do desnível de uma caverna hipotética. Fonte: Calux (2013).

$$\text{PROJEÇÃO HORIZONTAL (PH)} \\ \text{PH} = \overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CD} + \overline{EF} + \overline{GH} + \dots + \overline{NN}$$

Desnível (D)

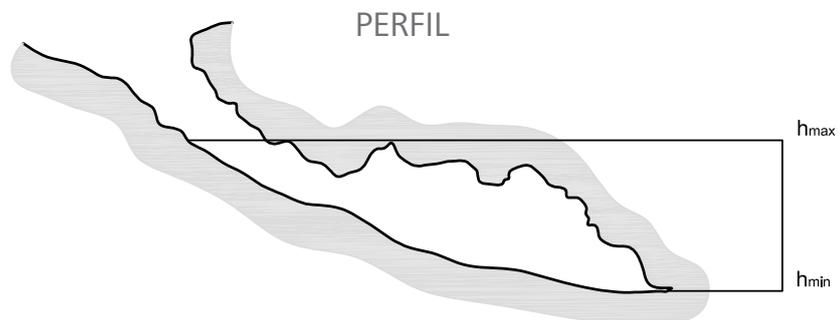
$$D = h_{\text{max}} - h_{\text{min}}$$

Onde:

D = desnível

h_{max} = altura máxima do piso

h_{min} = altura mínima do piso



da planta baixa das cavernas. Em caso de ocorrência de pilares, as suas áreas devem ser calculadas individualmente e subtraídas do valor total medido. A área total é o resultado da soma da área da planta baixa de todos os níveis de piso, descontadas as áreas dos pilares (Figura 2.26). O *volume* é o produto entre a área total da caverna e a altura média de suas galerias e poços. Para a obtenção da altura média, é necessário que sejam feitas seções em pontos representativos da cavidade onde existam mudanças morfológicas do piso, teto e paredes. Para que se calcule um valor mais próximo da realidade são feitas seções longitudinais sempre no eixo central do conduto e o maior número possível de seções transversais. Quanto mais seções forem consideradas, maior será a precisão no cálculo do volume (Figura 2.26). No entanto, a melhor maneira de se calcular este parâmetro é utilizando escaneamento a laser.

O diagnóstico geoespeleológico envolve descrição e análise dos atributos litoestruturais, morfológicos, hidrológicos, sedimentares e espeleogenéticos das cavernas, bem como dos elementos superficiais (exocársticos) que caracterizam o ambiente cárstico da área de estudo.

A análise litoestrutural busca caracterizar as rochas nas quais as cavernas estão inseridas, que devem ser descritas e analisadas química e mineralogicamente. Estruturas como bandamento, foliação, fraturas (tectônicas e atectônicas), dobras e falhas devem ser descritas e medidas. Essas estruturas representam descontinuidades importantes que condicionam a circulação de matéria e energia no interior do sistema, interferindo diretamente no processo de gênese e desenvolvimento das cavernas. Muitas vezes essas estruturas controlam a morfologia, além de condicionarem processos de abatimentos em paredes e teto.

Na análise morfológica, o objetivo é identificar evidências de processos responsáveis pela iniciação e desenvolvimento

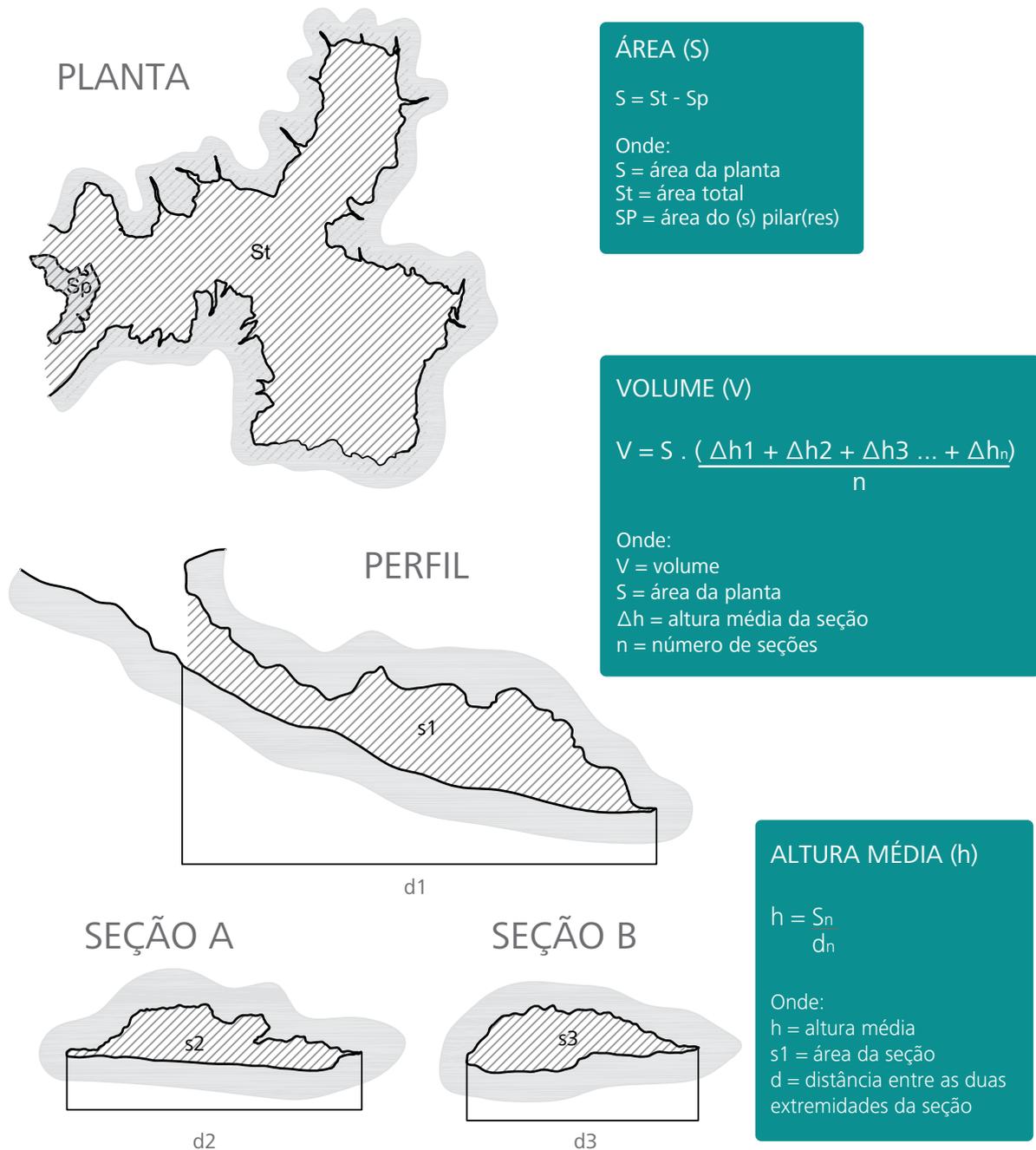


Figura 2.26. Medição da área e do volume de uma caverna hipotética. Fonte: Calux (2013).

das cavernas. A análise de feições em diversas escalas de observação (micro-meso-macro) permite inferências acerca do ambiente de formação e desenvolvimento das cavidades. Uma ferramenta muito importante nesta análise são os mapas espeleotopográficos, uma vez que a análise dos padrões planimétricos auxiliam na interpretação da evolução espeleogenética.

A dinâmica hidrológica também precisa ser avaliada segundo perspectivas sistêmicas. Um sistema cárstico pode ser considerado como um filtro que transforma um sinal de entrada (input) em um sinal de saída (output) e o seu funcionamento precisa ser determinado.

Depósitos de sedimentos clásticos devem ser classificados segundo sua granulometria, arredondamento e coloração, de modo a fornecer indícios sobre sua origem e sedimentação. Os depósitos orgânicos também devem ser descritos, quando existentes, uma vez que constituem importante fonte de recursos tróficos. Os depósitos químicos (espeleotemas) devem ser identificados, descritos e fotografados. Quando possível, é conveniente que sejam realizados estudos petrográficos e mineralógicos.

2.9. MONITORAMENTO DOS IMPACTOS AO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO

Durante as etapas de implantação e operação, devem-se monitorar as cavernas e suas respectivas áreas de influência. O monitoramento constitui instrumento fundamental para análise de cavernas e, no caso do licenciamento ambiental, visa garantir que as mesmas não sofrerão impacto durante as atividades do empreendimento. É recomendável que esteja estruturado na forma de um “plano de gestão” com métodos, metas, indicadores e instrumentos de avaliação bem definidos.

Muitas vezes é necessário expandir ainda mais o conhecimento acerca do patrimônio espeleológico inserido no contexto do empreendimento em atividades que podem envolver novas campanhas de prospecção exocársticas e aprofundamento dos estudos diagnóstico (hidrologia, geoespeleologia, bioespeleologia, entre outros). O objetivo destes estudos é proporcionar uma melhor compreensão a respeito da dinâmica evolutiva do conjunto espeleológico de forma a garantir a continuidade dos processos e o equilíbrio do ecossistema subterrâneo.

Cada contexto exigirá um conjunto de subtemas a serem monitorados, no entanto, os mais recorrentes são:

- Monitoramento sismográfico;
- Monitoramento hidrológico e hidrogeológico;
- Monitoramento geoestrutural;
- Monitoramento fotográfico;
- Monitoramento atmosférico do gradiente entre o clima regional, microclima e espeleoclima.

2.10. ACHADOS FORTUITOS

Estimativas conservadoras indicam que apenas 5% da rede de drenagem subterrânea seja acessível ao ser humano (Palmer, 1991). Boa parte desta rede corresponde a macrocavidades não acessíveis, denominadas cavernas oclusas. Em algumas situações é possível indentificá-las por meio de estudos geofísicos, no entanto, na maior parte das vezes, os resultados são inconclusivos, sobretudo quando as cavidades oclusas se localizam em porções profundas dos maciços rochosos.

Desta forma, é possível que durante a operação da mina o avanço da lavra intercepte estes vazios subterrâneos. Quando isto acontece, deve-se paralisar imediatamente a operação e comunicar as autoridades ambientais competentes. Esta cavidade deverá ser avaliada em todos os seus aspectos espeleométricos, biológicos e ambientais, antes que outras medidas – de supressão ou conservação – sejam tomadas. No entanto, na maior parte das vezes, estas cavidades interceptadas não são passíveis de estudo por apresentarem risco laboral iminente. Nestes casos, é necessário negociar com o órgão ambiental competente a melhor solução possível para o encaminhamento.

REFERÊNCIAS

- AULER, A. S.; PILÓ, L. B.; SAADI, A. 2005. *Ambientes Cársticos*. In: SOUZA, C. R. G.; SUGUIU, K.; OLIVEIRA, A. M. S.; OLIVEIRA, P. E. (orgs). *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto. Holus Editora, 2005. p. 321-342.
- AULER, A. S.; SMART, P. L. 2002. Toca da Boa Vista (Campo Formoso), BA: a maior caverna do hemisfério sul. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M.L.C. (Edit.) 2002. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP) - Brasília 2002; 554pp; ilustr.
- BRILHA, J. 2005. Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica. São Paulo: Palimage. 190 p.
- CALUX, A. S. 2013. Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em formação ferrífera no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013. 218 p. Dissertação (Mestrado em Análise Ambiental). Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências.
- CIGNA, A.A 2004. Climate of caves. In: GUNN, J. (Ed.) *Encyclopedia of caves and karst science*. London: Taylor & Francis. p.467-475.
- DUBOIS, C.; QUINIF, Y.; BAELE, J. M.; BARRIQUAND, L.; BINI, A.; BRUXELLES, L.; DANDURAND, G.; HAVRON, C.; KAUFMANN, O.; LANS, B.; MAIRE, R.; MARTIN, J.; RODET, J.; ROWBERRY, M. D.; TOGNINI, P.; VERGARI, A. 2014. *The process of ghost-rock karstification and its role in formation of cave systems*. Earth-Science Reviews. v.131. p. 116-148.
- DE WAELE, J.; FERRARESE, F.; GRANGER, D.; SAURO, F. 2012. *Landscape evolution in the Tacchi area (Central-East Sardinia) based on karst and fluvial morphology and age of cave sediments*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, v. 35, p. 119-127.
- ERASO, A. 1969. La corrosión climática em las cavernas. *Boletín Geológico y Minero*, v.80, n.6, p.564-581.
- FIORAVANTI, C. 2009. História de Águas Antigas: resquícios de chuvas em cavernas ajudam a reconstituir o clima dos últimos milhares de anos. Revista FAPESP, Ed. 157, mar/2009. p. 66-69.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. 2007. *Karst Hydrology and Geomorphology*. Wiley, England, 562p.
- HILL, C.A.; FORTI, P. 1997. *Cave minerals of the world*. 2.ed. Huntsville: NSS. 464 p.
- JENNINGS, J. N. 1985. *Karst Geomorphology*. Basil Blackwell, Oxford, 293p.
- JIMÉNEZ, A. N.; BAYES, N. V.; GONZALEZ, M. A.; RODRIGUEZ, J. M.; VINENT, M. I.; GONZALEZ, A. G. 1984. *Cuevas y Carsos*. La Habana: Editora Militar. 431 p.
- LAUREANO, L. F. V.; KARMANN, I. 2013. Sedimentos clásticos em sistemas de cavernas e suas contribuições em estudos geomorfológicos: uma contribuição. Revista Brasileira de Geomorfologia. v.14, no 01. p. 23-33.
- LOBO, H.A.S. 2011. Estudo da dinâmica atmosférica subterrânea na determinação da capacidade de carga turística na caverna de Santana (PETAR, Iporanga-SP). Tese de doutorado em Geociências e Meio Ambiente, UNESP, Rio Claro. 392 p.
- LOBO, H.A.S. & BOGGIANI, P. 2013. Cavernas como patrimônio geológico. *Boletim Paranaense de Geociências*, v.70, p. 190-199.
- PALMER, A. 1991. *Cave Geology*. Dayton, Ohio: Cave Books. 454p.
- PALMER, A. 2003. *Speleogenesis in carbonate rocks*. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, v.1 (1), 11p.
- PALMER, A. 2011. *Distinction between epigenic and hypogenic maze caves*. In: Geomorphology. v.134. p. 9-22.
- PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W. 1988. *As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA) – Brasil*. Anais 1º Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe, Belo Horizonte, pp. 179-186.
- SAADI, A. 1991. Ensaio sobre a morfotectônica de Minas Gerais: tensões intraplaca, descontinuidades crustais e morfogênese. 300 p. Tese (Professor Titular) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- SESSEGOLO, G.; ROCHA, L. F. S.; LIMA, F. F. 2006. *Conhecendo cavernas: Região Metropolitana de Curitiba*. Curitiba: GEEP-Açungui. 108 p.
- STANLEY, M. 2000. Geodiversity. *Earth Heritage*, v.14, p.15-18.
- SWEETING, M. M. 1973. *Karst Landforms*. Columbia University Press, New York, 362p.
- UIS – INTERNATIONAL UNION OF SPELEOLOGY. 2012. *UIS Mapping grades*. Disponível em: <http://www.uisic.uis-speleo.org/UISmappingGrades.pdf>. Acesso em: 11.abr.2016.
- UNESCO. 1972. *Convenção para a proteção do patrimônio mundial, cultural e natural*. Disponível em: <http://whc.unesco.org/archive/convention-pt.pdf>. Acesso em: 13.ago.2013.
- WHITE, W. B. 1988. *Geomorphology and Hidrology of Karst Terrains*. New York: Oxford University Press. 464 p.

CAPÍTULO 3:

BIODIVERSIDADE EM ÁREAS CÁRSTICAS

*Eleonora Trajano
Ana Claudia Neri*

3.1. INTRODUÇÃO: AS SINGULARIDADES DO CARSTE

A Conservação tem por objetivo preservar amostras significativas da biodiversidade, incluindo os processos e padrões que a geram. Esta definição clássica pode ser expandida para a geodiversidade, que só recentemente passou também a ser foco de preocupação dos conservacionistas. Portanto, atualmente fala-se em amostras representativas da diversidade ambiental de modo geral. A questão é justamente determinar no que consistem tais amostras, seus limites espaciais e temporais.

Em termos de prioridade para a conservação, as áreas e sistemas que contêm elementos particulares, únicos, singulares, que não são encontrados em outro lugar, adquirem especial importância, e quanto maiores forem essas diferenças, mais urgente torna-se sua preservação. Isto porque tais sistemas contribuem, por si, com uma parcela importante da diversidade natural e, se forem destruídos ou alterados de forma significativa, a consequência será uma perda importante da diversidade geral do planeta. Além disso, serviços ecossistêmicos prestados por esses sistemas, que podem ser fundamentais ao funcionamento equilibrado e integrado dos ecossistemas e à saúde ambiental, serão perdidos, sem possibilidade de reposição ou substituição, frequentemente gerando grandes prejuízos sociais e econômicos (Quadro 1).

O carste, com seus componentes epígeos e subterrâneos, geológicos e biológicos, apresenta muitas singularidades em relação aos ambientes não cársticos. Isto decorre do fato de que condições para que a dissolução química da rocha, processo determinante da paisagem cárstica, ocorrem em áreas delimitadas, as quais ocupam, no total, cerca de 13 % das terras emersas do globo.

A paisagem cárstica, caracterizada por feições superficiais como paredões escarpados, vales profundos e encaixados, torres e depressões do terreno (por exemplo, dolinas) – epicarste ou exocarste – e por drenagens predominantemente subterrâneas, através de condutos, os quais, quando grandes o suficientes para o acesso humano são chamado cavernas – endocarste –, forma-se em áreas de afloramento de rochas solúveis, sobretudo as carbonáticas. Outras rochas solúveis, embora menos que as carbonáticas, tais como as siliciclásticas (cujo principal componente é a sílica) também podem sofrer processos de carstificação. É importante lembrar que, além de um grau razoável de solubilidade, outras condições são também necessárias à carstificação, como a presença de discontinuidades na rocha por onde a água possa percolar, tais como planos de acamamento (separação entre camadas de diferentes tipos de sedimento, devido a mudanças no ambiente de sedimentação) e fraturas, causadas por processos de metamorfismo a grandes profundidades na crosta terrestre. Ou seja, nem toda rocha carbonática é carstificável ou carstificada, portanto nem sempre os locais de interesse para mineração de calcário são áreas cársticas.

3.2. A PAISAGEM CÁRSTICA E SUA VEGETAÇÃO

A drenagem predominantemente subterrânea tem um efeito importante no ambiente de superfície, condicionando um tipo de vegetação bastante característico. Frequentemente, o solo do carste é pouco espesso ou mesmo quase inexistente, deixando exposta a rocha, sobretudo nas partes mais altas, de onde o sedimento é facilmente lixiviado. Essas características podem criar condições de semiaridez. Por outro lado, em depressões do terreno, como dolinas, é mantido um clima mais úmido e ameno, pelo sombreamento e proximidade do lençol freático.

Assim sendo, principalmente nas zonas intertropicais, onde as diferenças entre as condições de sombreamento e de exposição direta ao sol são mais acentuadas, a vegetação típica do carste é um mosaico de formações mais abertas nos platôs e topos de afloramentos, constituídas por elementos arbóreos e arbustivos caducifólios (perdem as folhas durante parte do ano) espaçados entre si, com presença frequente de plantas xerofíticas (adaptadas à seca), tais como cactos, e manchas de vegetação mais densa e alta, típica de zonas úmidas, nas depressões e vales de

rios. No Brasil, esse tipo de paisagem é comum em áreas cársticas de regiões com menor disponibilidade hídrica, como aquelas nos domínios da Caatinga e Cerrado (Figura 1A). Na área de drenagem da bacia do São Francisco, em Minas Gerais e Bahia, este tipo de vegetação é conhecido como Mata Seca. Este termo foi incorporado à literatura científica no fim do século 19 pelo dinamarquês E. Warming, que esteve em Lagoa Santa/MG integrando a equipe de P. Lund e seguiu a designação local, mas atualmente muitos o utilizam para florestas tropicais secas em geral, não necessariamente associadas ao carste.

Essa combinação de fatores, onde também importam a declividade e orientação das vertentes, gera uma biodiversidade notável, com espécies endêmicas, i.e., geograficamente restritas. As manchas de vegetação mais densa podem representar importantes refúgios para espécies umbrófilas, intolerantes à exposição direta ao sol e à seca. Segundo Batori et al. (2014), que estudaram a vegetação de dolinas em diferentes regiões da Hungria, essas feições são importantes reservatórios de espécies para muitas plantas vasculares, portanto de particular interesse para conservação, tornando-se refúgios de biodiversidade cada vez mais importantes em vista do aquecimento global (Figura 1B).

Essas manchas de vegetação higrófila (“amantes da umidade”) teriam chegado a esses atuais refúgios com a expansão de florestas úmidas por ocasião de paleoclimas mais úmidos que o atual. O último pico interglacial ocorreu há cerca de 5.000 anos e, atualmente, dentro de condições naturais, o planeta Terra estaria rumo a uma fase glacial, mais seca. A progressiva diminuição das condições gerais de alta umidade associadas às fases interglaciais dos ciclos paleoclimáticos provoca a retração das florestas e sua substituição por formações abertas, tolerantes à menor disponibilidade de água, mas deixando para trás pequenas ilhas de vegetação úmida nos refúgios representados pelas dolinas e outras depressões cársticas. Portanto, além de reservatórios de biodiversidade, estas tem também elevado valor científico, como testemunhos de climas passados.

Por outro lado, em áreas cársticas situadas em regiões atualmente úmidas, com alta precipitação anual, como as dos domínios das Matas Atlântica e Amazônica, frequentemente encontra-se o chamado carste encoberto, com solo mais espesso e vegetação mais homogênea, conforme observado no Alto vale do Rio Ribeira, sudeste do Brasil (Figura 1C).

Rodrigues & Travassos (2013) enfatizam a importância do conceito de “matas secas” para a paisagem cárstica. Remontando ao século 19, este termo, inicialmente citado por Warming como o nome local para a vegetação sobre rochas calcárias, seria atualmente usado para as Florestas Tropicais Secas, estreitamente ligadas à “carstosfera”, como “parte da litosfera que serve como arena para o carste”. No entanto, é importante frisar que, na atualidade, a designação “matas secas” refere-se a formações florestais submetidas a regimes climáticos sazonais, independentemente da litologia. Estas formações têm sido também denominadas Matas Secas Decíduas, Matas Calcófilas, Matas Secas em Solo Calcário, Matas Calcárias, Florestas Estacionais Deciduais de Encosta. No Brasil, matas secas são amplamente distribuídas no Cerrado, também com ocorrência na Caatinga e no Pantanal, sobretudo como manchas de vegetação, nos Estados da Bahia, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Tocantins (Rodrigues & Travassos, op. cit.).

A perda de parte das folhas durante a estação seca é uma importante característica do funcionamento desse sistema. Além de diminuir consideravelmente a perda de água por evapotranspiração, como estratégia de sobrevivência da vegetação à fase de estresse hídrico, essa biomassa foliar descartada é disponibilizada como nutrientes para importação ao endocarste.

Matas decíduas, por seu aspecto pouco luxuriante que sugere baixa riqueza, sobretudo na época seca, têm seu valor sistematicamente subestimado, recebendo pouca ou nenhuma atenção. Esta é uma falsa noção. Estudos realizados na China mostram que mesmo a ideia de baixa biomassa epígea em áreas abertas não encontra paralelo na subsuperfície – a biomassa de raízes tanto em áreas cársticas cobertas por matas como naquelas cobertas por vegetação herbácea e arbustiva é a mesma, de onde se conclui que a restauração de terrenos cársticos degradados, mesmo no caso daqueles com vegetação aberta, de baixa biomassa superficial, aumenta significativamente o estoque regional subterrâneo de carbono.

No Brasil, os poucos estudos florísticos detalhados no carste foram realizados em localidades da bacia do Alto São Francisco (p. ex., Januária, Pains), em Minas Gerais, região de importância histórica pois foi aqui que E. Warming, acompanhando o renomado paleontólogo P. Lund, fez suas primeiras observações sobre vegetação associada a calcários. Esses estudos revelam uma alta diversidade de espécies.

Até o momento, não há dados comparativos suficientes que permitam concluir se existem elementos florísticos ou faunísticos exclusivos do carste brasileiro. Representantes de alguns táxons litófilos (com preferência por substratos rochosos) são evidentemente comuns nas áreas cársticas do país, porém não exclusivas destas. É o caso de bromélias, várias orquídeas, cactos, andorinhões, mocós (roedor de médio porte aparentado ao preá, típico do cerrado e caatinga) etc. Muitos estudos ainda são necessários, tanto em áreas cársticas como não-cársticas, para uma compreensão da ecologia dessa importante e frágil paisagem.



Figura 1. Distintos padrões de vegetação em áreas de carste, variando em função de sua posição em relação às zonas climáticas do globo e localização relativa no terreno. a) Xerófitas e árvores caducifólias em São Desidério, Bahia (acima). Na mesma região e na mesma época do ano, a vegetação permanece preservada no interior de uma dolina (b esquerda abaixo); c) Densa vegetação cobrindo a área cárstica do vale do rio Betari (direita abaixo), no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira, São Paulo. Fotos: Heros Lobo.

3.3. IMPORTÂNCIA DO CARSTE: SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS

Dentre os muitos serviços providos pelos ecossistemas, o carste tem importante papel em diversos, tais como suprimento de água, através de nascentes, reservatórios e, principalmente, aquíferos; polinização e controle biológico, provendo abrigos para, respectivamente, espécies-chave para a reprodução de plantas (caso dos morcegos nectarívoros/polinívoros) e para predadores importantes de insetos (sobretudo morcegos insetívoros) (ver Quadro 1); refúgio de espécies ameaçadas de extinção; recreação e cultura, por seu valor científico, estético, artístico e educacional, proporcionando oportunidades de turismo de natureza, esportes de aventura.



QUADRO 1. Serviços ecossistêmicos prestados por morcegos

Estudo realizado em meados da década de 2000 no Texas mostrou que a eliminação de pragas de uma plantação de algodão de 4.000 hectares por uma espécie de morcegos insetívoros, *Tadarida brasiliensis*, representa uma economia anual de cerca de US\$ 740.000. Em outro estudo, no México, o valor dos serviços de controle de pragas por essa espécie no Estado de Nuevo León foi estimado na faixa de US\$ 480.000 – 1,2 milhão. No sul do Texas, o controle de pragas por morcegos diminuiria o dano a plantações em 25-50 % (Kunz et al., 2011). Note-se que *T. brasiliensis* é uma espécie tipicamente cavernícola na América do Norte, formando populações imensas no Novo México, que emergem de forma sincronizada no crepúsculo, em um espetáculo que atrai turistas de todo o mundo; portanto, aos serviços de controle de praga soma-se o valor econômico da atividade turística.

De modo geral, a eficiência do controle de insetos através da predação por morcegos não diminui ao longo do tempo, ao contrário do que ocorre com o uso de agrotóxicos ou mesmo de plantas geneticamente modificadas para resistir a pragas da agricultura. Com o tempo, os insetos adaptam-se às defesas químicas dessas plantas, o que implica na necessidade do desenvolvimento de espécies mais resistentes, em pesquisas cada vez mais dispendiosas, tornando o produto cada vez mais caro, em um círculo vicioso que, no final das contas, nos coloca em uma posição de dependência das empresas de biotecnologia. Muito mais prático, lógico e barato é deixar o serviço de controle de pragas por conta dos morcegos, protegendo seus abrigos.

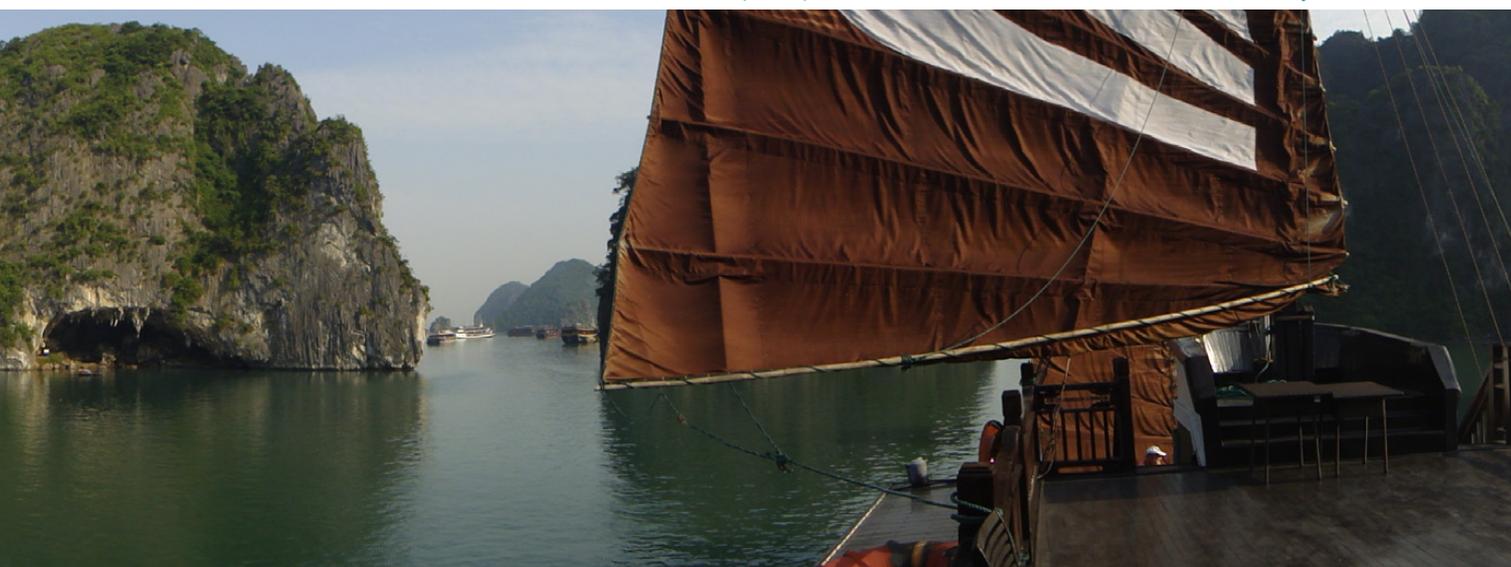
Os glossófagos, da família Phyllostomidae, na região Neotropical, assim como vários megaquirópteros (“raposas-voadoras”), família Pteropidae, do sudeste asiático, alimentam-se de néctar e pólen, realizando assim a polinização das espécies de planta utilizadas. Várias dessas plantas são adaptadas para a polinização por morcegos, sendo destes dependentes para sua reprodução, de modo que a extinção da espécie polinizadora levaria à extinção concomitante da planta. É o caso da banana, originária do sudeste asiático, e do cacto que fornece a matéria-prima para a tequila. A banana que comemos foi domesticada e não tem sementes, reproduzindo-se assexuadamente, por brotamento; ou seja, as bananas atuais são clones, praticamente sem diversidade genética, o que as torna altamente vulneráveis a doenças (imensas plantações já foram perdidas por essa razão).

As poucas espécies de megaquirópteros que polinizam bananas estão ameaçadas de extinção, portanto a banana selvagem também, de modo que, se houver uma grande epidemia e as bananas domesticadas forem perdidas não será mais possível re-domesticá-las novamente e teremos perdido um alimento importante. A tequila é um produto importante para vários países hispano-americanos, tanto do ponto de vista econômico como cultural, de modo que a proteção às poucas espécies polinizadoras de sua fonte é de alto interesse.

Várias espécies de morcegos também contribuem para a regeneração de florestas. Morcegos frugívoros são muito mais eficientes na promoção da recuperação de áreas degradadas que o reflorestamento realizado por humanos. Morcegos eliminam fezes em vôo, que é rápido, resultando em uma “chuva de sementes”. Como esses animais podem voar por longas distâncias, seu papel como dispersores de sementes é altamente relevante. Assim como no caso dos polinizadores, há espécies de plantas que dependem basicamente de morcegos para sua dispersão.

Mesmo os morcegos hematófagos, de tão triste e muitas vezes imerecida má reputação (casos de raiva humana foram, erroneamente atribuídos à transmissão por morcegos), prestam importante serviço à humanidade. Sua saliva contém um potente anti-coagulante, que vem sendo utilizado no estudo de novos fármacos para o combate a doenças do sistema circulatório, que afligem milhões de pessoas.

Figura 2. Baía de Ha Long, um dos destinos mais populares do Vietnã, situada no norte do país, quase na fronteira com a China. Foto: Eleonora Trajano



Do ponto de vista do uso, paisagens cársticas têm grande valor estético e, conseqüentemente, econômico, à medida que sustentam atividades de turismo e outros aspectos do lazer. Tais atividades podem representar um ativo importante para a economia de certas regiões ou mesmo países. Um exemplo bem conhecido é o turismo na Baía de Ha Long, no Vietnã (Fig. 2). A beleza excepcional do carste do sul da China e sudeste asiático tem sido aproveitada extensivamente na mídia, em diversos filmes.

É comum encontrar-se, no fundo das depressões ou mesmo em acessos a céu aberto para cavernas, corpos d'água límpida que, quando volumosos, adquirem uma bela cor azulada. A combinação de elementos que resulta nessa paisagem heterogênea tem um efeito de extrema beleza cênica, proporcionando grande prazer derivado de sua contemplação. Exemplos de feições que caracterizam esta dimensão estética da paisagem são os paredões, torres, vales encaixados, superfícies rochosas com sulcos profundos formando desenhos, cobertas por uma vegetação diversificada, com verdadeiros jardins de cactos nos platôs e manchas de vegetação luxuriante e verde nas partes mais baixas (nas zonas intertropicais), e ainda dando acesso a feições subterrâneas com lagos e verdadeiros "jardins de pedras", representados pelos espeleotemas. Conseqüentemente, localidades cársticas, e em particular cavernas, são exploradas turisticamente em todo o mundo, resultando em um aporte de recursos importante para a economia local, regional, ou até nacional. Isto significa que, por suas características únicas, o carste presta serviços ecossistêmicos culturais e recreativos de grande valor para a humanidade.

3.4. ATIVIDADES DE MINERAÇÃO E SEUS IMPACTOS

A Figura 3 mostra, de forma esquemática, as principais atividades de mineração de calcário e os impactos nas áreas sob sua influência.

Os sistemas cársticos podem ser considerados como uma rede de condutos de alta permeabilidade cercados por um enorme volume de rochas impermeáveis. Através do processo de infiltração difusa ou concentrada nos pontos de recarga, a água nessas regiões pode ser armazenada no subterrâneo em grandes quantidades (Travassos, 2007), o que lhe atribui um alto potencial de fontes hídricas para o consumo humano. Por outro lado, o sistema cárstico possui uma alta sensibilidade do seu aquífero ser adversamente afetado por uma carga poluente antrópica imposta - alta vulnerabilidade natural para impactos (Hirata, 2001) devido à dinâmica das drenagens subterrâneas. Isto acontece porque águas subterrâneas no sistema cárstico podem percorrer distâncias consideráveis em um tempo relativamente curto, dependendo da estrutura do endocarste e, o que é mais importante, nem sempre a drenagem subterrânea coincide com a superficial.

De acordo com Ford & Williams (2007), em extensas áreas do globo, especialmente em regiões cársticas, os aquíferos são a única fonte de água potável. O Quadro 2 mostra o exemplo de uma região urbana altamente dependente de aquíferos cársticos. Cerca de ¼ da população mundial e 50% das regiões alpinas são supridas por esse tipo de manancial. Para Forti (2002) é possível que, no ano 2025, cerca de 80% da população mundial utilize água do carste. Embora este cenário pareça superestimado e exagerado, o entendimento e preservação dessas áreas são significativamente importantes para a sobrevivência das comunidades associadas.

QUADRO 2. ÁGUA DO CARSTE PARA ABASTECER A REGIÃO DE CURITIBA

"Atualmente as principais captações de água da Região Metropolitana de Curitiba (RMC) já se encontram no seu limite máximo de aproveitamento devido à degradação da qualidade de suas águas. Frente a este cenário, o Aquífero Cárstico de Curitiba é a alternativa mais viável para minimizar o déficit de água da cidade. Atualmente este aquífero abastece os municípios de Almirante Tamandaré, Bocaiúva do Sul, Campo Largo, Campo Magro, Colombo, Itaperuçu e Rio Branco do Sul. A vazão média de 27 poços perfurados nesta região é de 40 Ls-1, não estando computadas as fontes naturais cujas descargas somadas são superiores a 300 Ls-1. O bombeamento dos poços tubulares existentes, por outro lado, já causou impactos ambientais na região, a exemplo de solapamentos do terreno com conseqüentes rachaduras em uma dezena de edificações e reduções das descargas em drenagens cujas nascentes são oriundas do aquífero cárstico. O aproveitamento racional deste aquífero sem estes tipos de impactos ambientais pode ser conseguido através da captação de fontes naturais, sem o comprometimento da redução das descargas na rede de drenagem da região".

Fonte: Hindi et al, 2013.

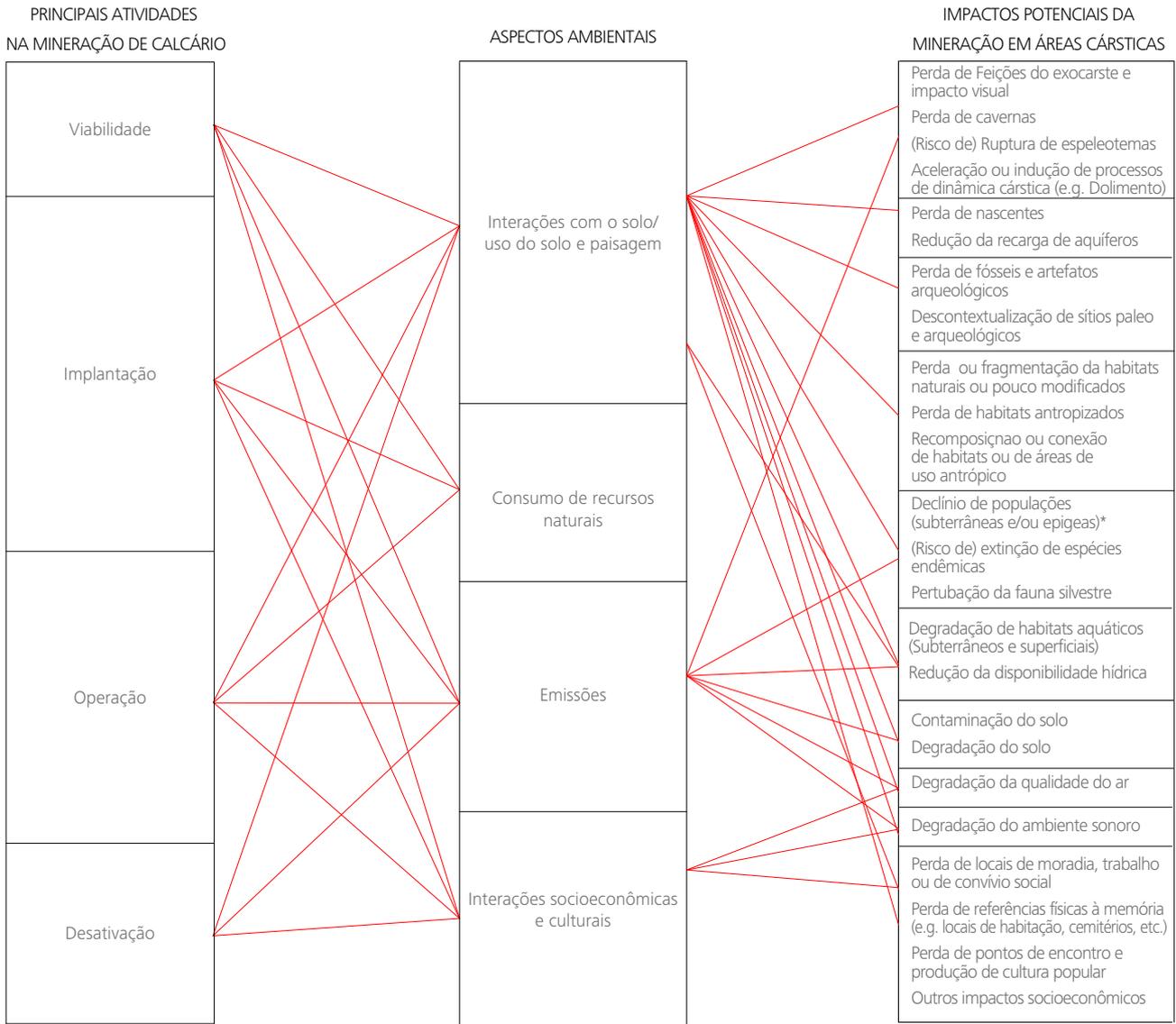


Figura 3. Principais atividades da mineração e seus impactos. Montagem: Ana Neri

A remoção da vegetação para a implantação de cavas de mineração e demais estruturas de uma mina implica a diminuição do aporte de nutrientes para o meio subterrâneo, afetando negativamente suas teias alimentares à medida que a disponibilidade de alimento, tanto no meio epigeo (para troglóxenos, sobretudo morcegos) como no hipógeo (para troglófilos e troglóbios), diminui, algumas vezes drasticamente.

Também o aumento da erosão superficial e a consequente diminuição da capacidade de retenção de água pelo solo causam um decréscimo nos fluxos de água que atingem as cavernas por percolação, provocando uma diminuição na umidade do ar subterrâneo, que pode ser fatal para troglóbios especializados, que perderam a capacidade de tolerar dessecação. Além disso, o ar mais seco é desfavorável ao crescimento de fungos, importante fonte alimentar para muitos detritívoros, sobretudo pequenos organismos na base da pirâmide alimentar, tais como colêmbolos, ácaros e isópodes.

Além disso, a supressão de vegetação, mesmo que não realizada diretamente sobre maciços rochosos carstificados, também implica a perda de abrigos para morcegos, pois várias espécies utilizam também, ou preferencialmente, ocos de árvores e folhagem como abrigo diurno ou simplesmente pouso noturno, para descanso e digestão entre fases de alimentação em uma mesma noite.

A intensificação de processos erosivos em bacias hidrográficas a montante de áreas cársticas precisa ser bem compreendida, pois sedimentos carregados pelos cursos d'água para os condutos subterrâneos tendem a assoreá-los, alterando o regime de fluxo da água e mudando o tipo de ambiente aquático, de lótico (águas correntes e bem oxigenadas) para lêntico (águas paradas ou de baixa velocidade), podendo, ainda, preencher esses condutos.

Ora, a fauna de riachos, típico habitat lótico, inclui muitas espécies especializadas para a vida nesse ambiente, com requerimentos ecológicos e fisiológicos bem distintos dos das espécies de águas de fluxo lento ou paradas (habitats lênticos, como lagos, lagoas e mesmo grandes rios de planície, e o meio freático no domínio subterrâneo). Em suma, a remoção da cobertura vegetal frequentemente leva à perda e/ou alteração de habitat. Este impacto pode atingir proporções alarmantes, como observado atualmente na área cárstica da Serra da Bodoquena, onde várias cavernas, algumas habitat único de espécies troglóbias, vêm sofrendo rápido assoreamento devido ao desmatamento nas nascentes dos rios da região, que estão fora dos limites da área protegida por unidade de conservação (Parque Nacional Serra da Bodoquena), a despeito da legislação que proíbe a retirada da vegetação de nascentes e margens de corpos d'água. Infelizmente, este não é o único exemplo, apenas um dos mais bem documentados. Dada a natureza da dinâmica hídrica no carste, os impactos do desmatamento e da intensificação da erosão podem ser sentidos a distâncias consideráveis das áreas fonte.

Concluindo, a remoção da vegetação afeta negativamente serviços prestados por morcegos, assim como aqueles de natureza cultural, à medida que ameaça a preservação da biodiversidade.

As escavações para abertura e operação de minas também podem provocar alterações na direção e fluxo das águas subterrâneas, seja pela simples exposição de maciço rochoso, pela retirada do solo superficial e/ou pela alteração do relevo. A princípio, uma maior recarga do aquífero pode implicar impactos positivos, como aumento de volume das fontes hídricas para a captação e consumo das comunidades locais. Por outro lado, em um sistema cárstico, a elevação do nível d'água e sua vazão em um conduto podem implicar a intensificação de processos erosivos em depósitos sedimentares acumulados em cavernas formados em tempos pretéritos e, conseqüentemente, acarretar impactos ambientais negativos como perda de feições cársticas. Ademais, a remoção de rocha durante a abertura das cavas representa o mais grave risco aos ecossistemas subterrâneos, como a todos ao redor do globo, que é a destruição do habitat. Para morcegos, especialmente os litófilos, i.e., aqueles com forte preferência por, ou mesmo dependência de abrigos rochosos, a diminuição na disponibilidade de abrigos causa o abandono da região, mesmo que ainda existam fontes de alimento suficientes, e conseqüente prejuízo aos serviços ecossistêmicos prestados por esses animais.

O uso de explosivos também gera movimentações no maciço rochoso e, conseqüentemente, acarreta trocas nos trajetos do fluxo das águas subterrâneas. Assim, a quantidade de água disponível em determinado conduto do sistema cárstico pode ser alterada, podendo ocasionar na redução de vazão dos condutos a jusante da mina e prejudicar um possível suprimento da população local (Hess & Slaterry, 1999). Em casos extremos é possível que rios subterrâneos em cavernas ativas sejam extintos.

Durante a operação de mina, caso a água subterrânea tenha sido interceptada, é importante que o lençol seja rebaixado para criar condições de trabalho em ambiente seco, a fim de evitar enchentes na mina que podem danificar os equipamentos e, conseqüentemente, causar acidentes.

Por outro lado, operações de bombeamento da água subterrânea alteram seu fluxo e podem implicar impactos ambientais negativos, como a redução de vazão em corpos d'água superficiais, nascentes e a indução de subsidências e desenvolvimento de dolinas.

A Figura 4 apresenta os efeitos potenciais do rebaixamento do nível freático devido ao bombeamento de água para abertura da cava.

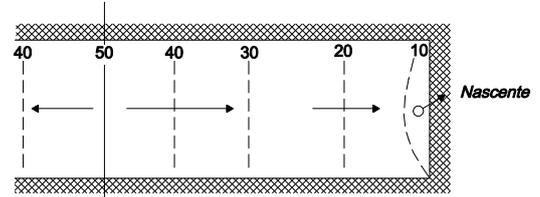
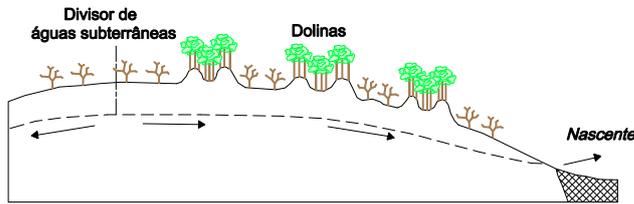
Vários autores relataram que, nas montanhas do Transdanúbio, na Hungria, operações de bombeamento para rebaixar o aquífero em grandes áreas de calcário para extração de carvão e bauxita têm ocorrido há mais de 80 anos. Isto resulta num rebaixamento do aquífero entre 15 e 150 metros de profundidade, produzindo um grande cone de rebaixamento que tem desencadeado secagens de nascentes, além de comprometer a vazão das famosas fontes termais de Budapeste (Hess & Slaterry 1999).

O bombeamento excessivo de água também diminui o volume de habitat disponível para a fauna aquática, que passa a ser cada vez mais inacessível. Um caso brasileiro típico é o do peixe tetragonoptérico (grande grupo que inclui lambaris), *Stygichthys typhlops*, da região de Jaíba, MG (Figura 5). Único representante sul-americano troglóbico da Ordem Characiformes (que inclui lambaris, piabas, traíras, dourados, corimbatás, pacus, piranhas), *S. typhlops* é altamente especializada, apresentando um conjunto único de características associadas à vida no meio freático, motivando o interesse em nível internacional. No entanto, esta importante espécie encontra-se ameaçada devido ao acelerado rebaixamento do lençol freático pela retirada de água subterrânea para irrigação de extensas plantações de bananas, entre outros. Esse impacto também tem graves conseqüências sociais, à medida que os poços, que suprem população rural de água potável, vem secando, levando-a à dependência do fornecimento externo, uma vez que essas pessoas não tem condições de arcar com os custos da perfuração de poços artesianos.

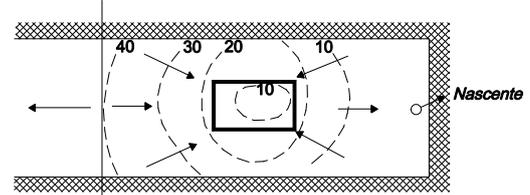
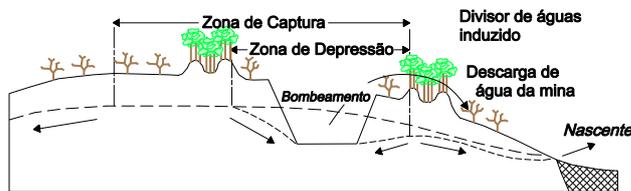
Seção

Planta

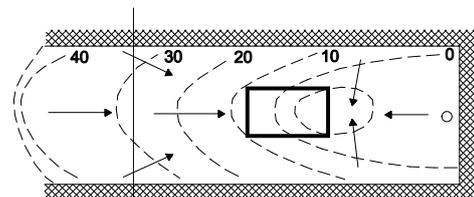
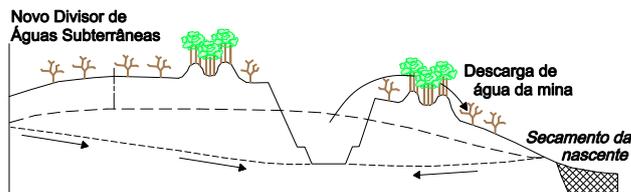
a) Antes da mina



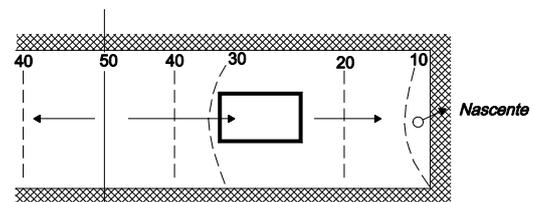
b) Superfície potenciométrica no início do bombeamento



c) Superfície potenciométrica durante o bombeamento



d) Após a mina



- Superfície potenciométrica original
- - - - - Superfície potenciométrica durante o bombeamento
- Superfície potenciométrica alterada após o bombeamento
- Direção do fluxo de água subterrânea

- Rocha de baixa permeabilidade
- "Sump" da mina
- 30 - - - - Curva isopotenciométrica

Figura 4. Diagrama ilustrativo dos potenciais efeitos no nível d'água subterrâneo por abertura de cava associada a rebaixamento de aquífero. Montagem: Ana Neri. Ilustração: Mirna Mangini. Modificado de Hess & Slaterry (1999), a partir de Harrison (1992)



Figura 5. *Stygichthys typhlops*, a piaba branca de Jaíba, MG (comprimento máximo ca. 5 cm), troglóbio altamente especializado à vida no meio freático, ameaçado pelo bombeamento excessivo de água para irrigação de plantações Foto: Dante Fenolio.

Além de redução de vazão dos cursos d'água localizados próximos à cava, o rebaixamento de nível d'água por bombeamento pode, em alguns casos, resultar em subsidências e intensificação do processo de dolinamento. Quando o aquífero é rebaixado, um novo nível de erosão subsuperficial é iniciado e, conseqüentemente, os materiais situados acima podem mover-se para baixo nas cavidades, resultando na intensificação do processo de dolinamento e subsidências da cobertura. Esse processo pode resultar em danos a edificações e infraestrutura.

As dolinas de subsidência da cobertura são oriundas de processos de subsidência gradual, decorrentes de adensamento de solos moles originários de antigas dolinas ou de processos de remoção de material solúvel do solo pela percolação subvertical. O adensamento pode ocorrer por rebaixamento do lençol freático, carregamentos externos, ocasionados por aterros (bota-foras e pilhas de estéreis) ou por migração de solos arenosos para o interior das cavidades.

A Figura 6 mostra a situação de equilíbrio antes do rebaixamento do nível d'água (A) e depois do rebaixamento (B, C e D). A paleodolina não é aparente na superfície, mas é indicada pela cavidade da linha de seixos e pelos pedregulhos próximos ao topo rochoso.

A Figura 6B-D mostra a situação após o rebaixamento. A reativação do desenvolvimento da dolina torna-se aparente quando o adensamento do solo mole leva à subsidência superficial. A periferia da dolina é caracterizada por uma zona de cisalhamento e fraturas de distensão (alívio). As Figuras C e D indicam a compressão do solo mole e os seus reflexos em superfície, levando ao aprofundamento da dolina.

A Figura 7 mostra o mesmo mecanismo da Figura 6 com adensamento de solos moles produzidos por lixiviação. O adensamento e, conseqüentemente, o recalque em superfície, podem ocorrer tanto por rebaixamento do lençol freático quanto por peso de aterros novos.

Alterações em processos cársticos em decorrência de alterações nas propriedades físico-químicas das águas subterrâneas podem ocorrer principalmente por aceleração do processo de dissolução por aumento da acidez da água em decorrência de drenagem ácida da mina mal executada; ou por infiltração de águas provenientes de montante da mina e que, eventualmente, estejam contaminadas. Drenagens ácidas de minas (usualmente metálicas) em aquíferos podem afetar seriamente a qualidade de água por alteração química (principalmente de pH). Há relatos na literatura que águas cársticas afetadas por drenagem ácida apresentam baixo pH, alta concentração de sulfatos e baixa alcalinidade (Sasowsky & White 1993 apud Hess & Slaterry 1999). Nesse ambiente, o processo de dissolução de rochas calcárias pode ser intensificado. Como consequência, podem ocorrer: a) redução de vazões em corpos d'água superficiais (incluindo secagem de nascentes) ocasionando prejuízos no suprimento de água para a população local, redução de volume de habitat disponível para a fauna aquática e supressão de paisagens de valores estáticos inestimáveis. Salienta-se também que a alteração na qualidade das águas subterrâneas tem implicação direta na problemática do suprimento de água para as populações vizinhas à mina.

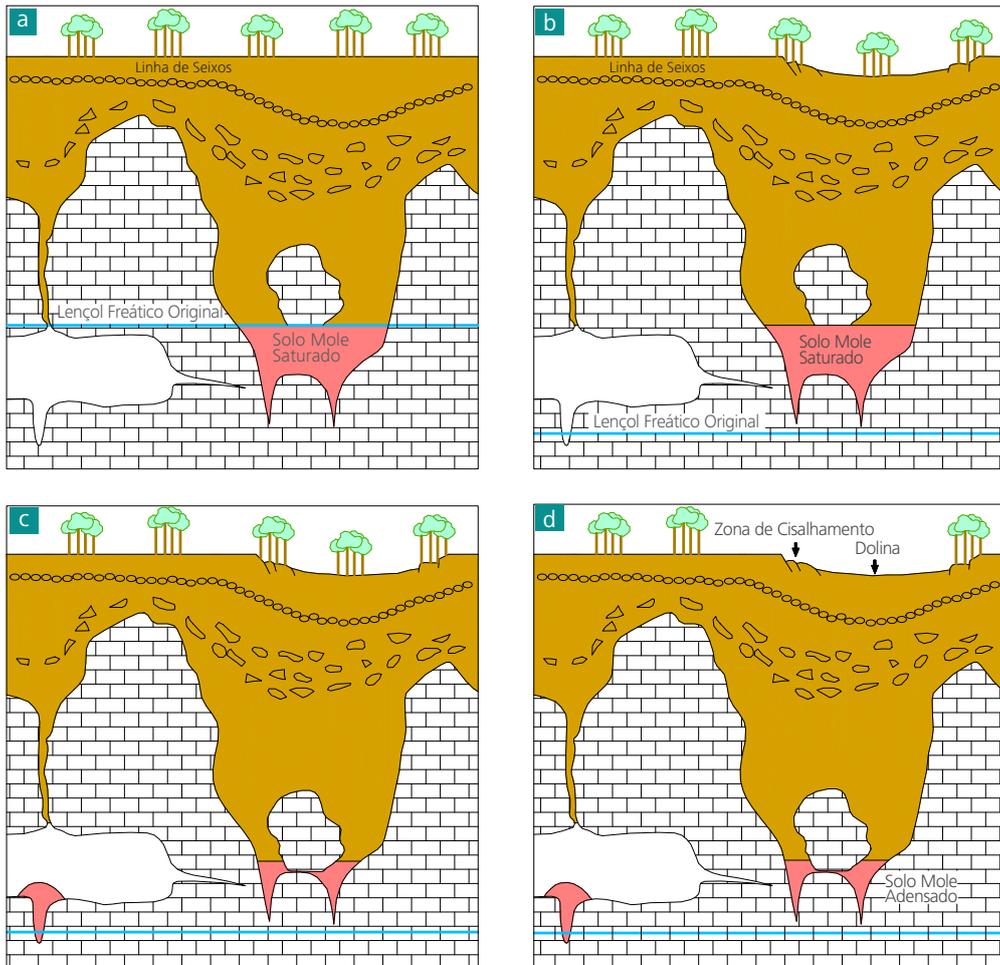


Figura 6. Mecanismos de formação de dolinas de subsidência da cobertura devido a solos moles originados de antigas dolinas. Montagem: Ana Neri. Ilustração: Mirna Mangini.

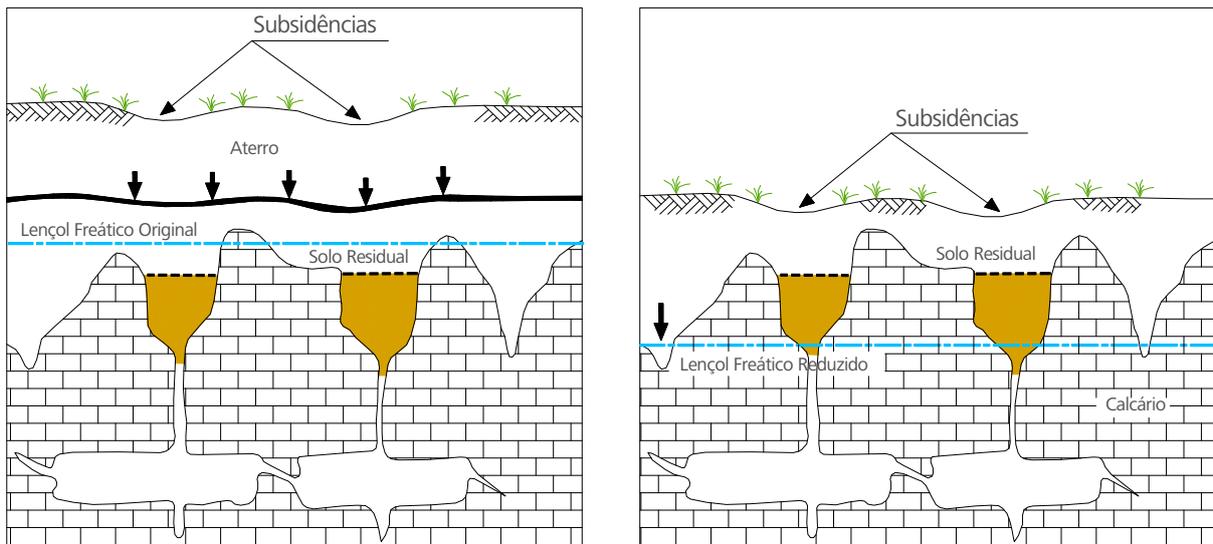


Figura 7. Mecanismo de formação de dolinas de subsidência da cobertura devido a solos moles decorrentes de lixiviação. Montagem: Ana Neri. Ilustração: Mirna Mangini.

Os impactos oriundos da atividade de mineração mais notáveis à primeira vista dizem respeito a alterações da paisagem e das formas do endocarste e do exocarste. Ademais, a extração de calcário pode também resultar na destruição de cavernas e em seus depósitos, muitos dos quais são considerados cientificamente valiosos. Exemplos incluem cavernas da Mt. Etna localizado no centro de Queensland, Mina Cave em Weardale, Inglaterra onde foram destruídos 400 metros de cavernas (passagens) e Mina Eldon Hill em Peak District onde passagem de caverna e importantes sedimentos têm sido destruídos. No Brasil há diversos casos de destruição total ou parcial de cavernas por atividades minerárias, podendo-se citar gruta do Trevo (Sete Lagoas), gruta da Agonia (Itacarambi), gruta da Igrejinha (Ouro Preto) e gruta do Éden (Pains), todas em Minas Gerais (PILÓ, 1999), e a destruição total da Lapa Vermelha de Lagoa Santa, importante sítio arqueológico e paleontológico, estudado desde meados do século passado por Lund.

3.5. ESTUDO DA BIODIVERSIDADE

Seja o objetivo do projeto a preservação da área ou sua recuperação, é fundamental conhecer seu estado inicial. E mesmo que se tenha por objetivo a restauração para outro uso, constitui boa prática estabelecer o quanto este se distanciou do sistema removido. Tal conhecimento passa necessariamente por estudos obedecendo a critérios científicos robustos, dentro de um planejamento prévio incluído no projeto.

O primeiro passo no estudo da biodiversidade regional é a identificação e descrição da fitofisionomia, o que pode ser feito através de mapas atualizados, mas o mais adequado é o sensoriamento remoto, utilizando-se o cruzamento do maior número possível de bases de dados disponíveis, tanto analógicas como digitais, em diversas escalas. Tais bases devem ser checadas com dados de campo obtidos para o projeto, com objetivo de se obter um quadro preciso, detalhado e realista. A partir daí, é feito o levantamento taxonômico florístico e faunístico.

Os critérios relacionados a coleta, identificação e suficiência amostral são aqueles discutidos em detalhe no Capítulo 4 (Biologia Subterrânea) deste Guia, tópico 4.5 (Estudo da biota subterrânea). Como enfatizado naquele capítulo, destaca-se a necessidade de testes de suficiência amostral e a importância de uma periodicidade amostral adequada (3-4 ocasiões coleta regularmente espaçadas no ciclo anual, de modo a cobrir todas as estações) ao longo de pelo menos três ciclos anuais, visando ao conhecimento dos padrões sazonais de funcionamento dos ecossistemas.

Estudos ambientais em geral dão grande ênfase e a grande maioria restringe-se ao levantamento da fauna de vertebrados, sobretudo mamíferos e aves, o que constitui uma grande limitação. Um bom estudo deve abranger o maior número possível de táxons, incluindo os indicadores da integridade de todos os habitats. Entre estes indicadores estão os aracnídeos (a maioria das ordens inclui predadores de topo de cadeia, enquanto opiliões, altamente higrófilos, são indicadores de matas preservadas) e insetos aquáticos como formas juvenis de efemerópteros e tricópteros, indicadores de águas pristinas. A fauna de anfíbios anuros também é sabidamente sensível a perturbações em geral e reage prontamente às mesmas com rápido declínio em diversidade.

Os métodos de levantamento faunístico em áreas cársticas são os mesmos utilizados em qualquer localidade ser de domínio do biólogo responsável pelo estudo. Como enfatizado por Silveira et al. (2010), o uso de múltiplos métodos complementares, em estudos de longo prazo e com amostragens em diferentes épocas do ano, é fundamental. Esses autores demonstram, com estudos de caso, os perigos de se tirar conclusões a partir de dados insuficientes, baseados em estudos apressados e parciais.

Todas as recomendações acima aplicam-se aos estudos da vegetação, que devem contar com especialistas próprios. Os métodos de estudo também são basicamente os mesmos usados para outros biomas, e as técnicas de coleta e preservação dos espécimes vegetais (exsicatas) são as usuais para os táxons.

REFERÊNCIAS

- BATORI, Z.; CSIKY, J.; FARKAS, T.; VOJTKÓ, A.E.; ERDOS, L.; KOVÁCS, D.; WIRTH, T.; KÖRMÖCZIL, L.; VOJTKO, A. 2014. The conservation value of karst dolines for vascular plants in woodland habitats of Hungary: refugia and climate change. *International Journal of Speleology*, v.43, n.1, p. 15-26.
- FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. 2007. *Karst geomorphology and hidrology*. United Kingdom: Wiley.
- FORTI, P. 2002. Speleology in the Third Millennium: achievements and challenges. *Theoretical and Applied Kartology*, n. 15, p.7-26.
- HESS, J.W.; SLATERRY, L.D. 1999. Extractive industries impact. In: *Karst Hydrogeology and Human Activities: Impacts, Consequences and Implications*, Rotterdam, Netherlands, p. 187-1992.
- HINDI et al., 2013. Proposição de atributos para o aproveitamento de fontes naturais do aquífero cárstico de Curitiba-PR, Brasil. *Comunicações Geológicas* v. 100n. 1, p. 67-71.
- HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. 1998. Contaminação das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F.A.C. ; MANUEL FILHO, J. (org.). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. CPRM.
- KUNZ, T.H.; BRAUN DE TORRES, E.; BAUER, D.; LOBOVA, T.; FLEMING, T.H. 2011. Ecology and Conservation Biology Ecosystem services provided by bats. *Annals Of The New York Academy Of Sciences*, v.1223, p.1-38.
- PILÓ, L. B. 1999. Ambientes cársticos de Minas Gerais. *O Carste*, v. 11, n.3, p. 50-58.
- RODRIGUES, B.D.; TRAVASSOS, L.E.P. 2013. Identificação e mapeamento das matas secas associadas ao carste carbonático de Santo Hipólito e Monjolos. *Mercator*, v.12, n.29, p.233-256.
- SILVEIRA, L.F.; BEISIEGEL, B.M.; CURCIO, F.F.; VALDUJO, P.H.; DIXO, M.; VERDADE, V.K.; MATTOX, G.M.T.; CUNNINGHAM, P.T.M. 2010. Para que servem os inventários de fauna? *Estudos Avançados*, v. 24, p.173-207.
- TRAVASSOS, L.E.P. 2007. Caracterização do carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais. Belo Horizonte, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais - PUC/MG. *Dissertação de Mestrado*, 98 p.

CAPÍTULO 4:

BIOLOGIA SUBTERRÂNEA

Eleonora Trajano

4.1. MEIO SUBTERRÂNEO

Biologia Subterrânea, ou Espeleobiologia, é o ramo da Biologia dedicado ao estudo dos ecossistemas que se estabelecem no meio subterrâneo e seus componentes, do nível molecular ao sistêmico.

O meio subterrâneo, ou hipógeo (são sinônimos; do grego “hypos” – sob, embaixo; “geos” - terra), compreende os conjuntos de espaços interconectados do subsolo, de tamanhos variáveis (desde fissuras diminutas até grandes galerias e salões), formando grandes redes de espaços heterogêneos, que podem ser preenchidos por água ou ar. Estas redes de espaços contínuos podem se formar tanto em rocha maciça, especialmente aquelas solúveis, como os calcários, quanto em depósitos relativamente profundos de sedimentos, como aqueles encontrados nas margens e sob rios e lagos (meio hiporreico e intersticial). Os espaços em rochas podem ser extremamente variáveis em tamanho, sobretudo nos calcários, pois algumas poucas fissuras tendem a ser muito mais alargadas que as demais pela ação da água. Aquelas que foram ampliadas a ponto de permitir que os humanos as adentrem, possibilitando o acesso direto ao meio subterrâneo, são as chamadas cavernas. As cavernas são “janelas” para esse intrigante mundo. No entanto, é importante compreender que elas constituem apenas uma pequena parte no meio subterrâneo, o qual se prolonga através de fendas menores que podem ser penetradas por organismos de porte menor que o dos humanos (ou seja, todos os invertebrados e a maioria dos vertebrados, incluindo os peixes). Estes organismos transitam livremente entre as “cavernas” acessíveis ao ser humano (ou macrocavernas, sob a ótica da biologia subterrânea) e os espaços menores (meso e microcavernas). As cavernas não estão, assim, isoladas, mas conectadas com outros habitats subterrâneos, constituindo um sistema funcional único.

Portanto, a unidade espacial “caverna” é um componente de habitat definido de forma arbitrária e antropocêntrica, baseado no porte de uma única espécie, a humana, sem significado biológico por si – afinal, para cada espécie, dependendo de seu tamanho, “caverna”, ou seja, o habitat acessível corresponde a um conjunto diferente de espaços. Note-se, ainda, que a presença humana dentro de cavernas é, do ponto de vista do tempo evolutivo, muito recente, esporádica e irregular, sem possibilidade de coevolução com outros componentes dos ecossistemas subterrâneos. Assim, essa presença sempre constitui um impacto, que no contexto da conservação, deve ser ponderado caso a caso em termos de custos e benefícios para o sistema.

Nesse sentido, a unidade subterrânea biogeográfica corresponde à unidade de habitat contínuo, seja um sistema para a fauna aquática, seja o maciço rochoso para a terrestre, independentemente da presença ou não de cavernas. De fato, é bem conhecida a existência de importantes comunidades subterrâneas altamente especializadas vivendo em locais onde não existem cavernas, tanto em áreas cársticas como não cársticas; geralmente, tais comunidades tornam-se acessíveis ao homem quando da abertura de poços.

Se os humanos não têm qualquer importância para a sobrevivência dos ecossistemas de cavernas, estas são altamente relevantes em vários aspectos, entre os quais será enfatizada inicialmente a relevância científica. Exatamente por serem, pela própria definição, os espaços subterrâneos penetráveis por humanos, cavernas permitem acesso, ainda que limitado, ao meio subterrâneo, possibilitando obter dados sobre a composição, estrutura e funcionamento destes ecossistemas.

4.2. ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DOS ECOSISTEMAS SUBTERRÂNEOS

Em contraste com o meio superficial, o ambiente subterrâneo é caracterizado pela ausência permanente de luz (exceto próximo aos contatos com o exterior, nas zonas de entrada e crepuscular) e tendência à estabilidade ambiental, devida ao efeito-tampão da rocha circundante.

No meio subterrâneo, a produção primária está restrita a bactérias quimiossintetizantes, cuja sobrevivência depende da utilização a energia química de ligação de moléculas simples de ferro, enxofre, nitrogênio etc., existentes na maioria das cavernas (conhecidas, respectivamente, como ferrobactérias, tiobactérias, nitrobactérias). O ferro é um elemento comum no solo e o nitrogênio é proveniente em grande parte das excretas de animais troglóxenos (ver abaixo) como os morcegos. Já o enxofre geralmente vem de fontes externas ao maciço carbonático, sendo carreado pelas águas circulantes. Tais bactérias demandam condições especiais para proliferação, sendo extremamente raros os casos em que formam grandes biomassas sustentando, por si só, rica e diversificada comunidade subterrânea, como na Cueva de las Sardinias (ou Villa Luz), no México, e Movile Cave, na Romênia. No Brasil, não há nenhum exemplo conhecido.

Assim, a imensa maioria dos ecossistemas subterrâneos é dependente de energia e matéria provenientes da fotossíntese – portanto, do meio externo –, sendo os nutrientes importados da superfície de vários modos. A água circulante é um dos mais comuns e importantes para cavernas com corpos d'água permanentes ou temporários. Enxurradas arrastam troncos, partes de plantas vivas, grandes quantidades de detritos vegetais, além de animais. A água de percolação carrega matéria orgânica dissolvida e particulada, assim como animais da superfície. A gravidade também tem papel importante, com animais caindo em janelas cársticas e aberturas de dolinas e acumulando-se sob as mesmas. Troglóxenos (ver abaixo), tanto vertebrados como invertebrados, contribuem não só com suas fezes como também com seus próprios corpos, sendo especialmente relevantes em cavernas secas. Raízes que penetram em cavernas superficiais sustentam comunidades especializadas, e mesmo esporos e pólen em suspensão em correntes de ar que penetram em cavernas podem contribuir para o ingresso de nutrientes.

A Figura 4.1 é um diagrama simplificado da teia alimentar em uma caverna hipotética da área cárstica do Alto Ribeira em São Paulo, contendo toda a diversidade de habitats subterrâneos típica dessa região (por exemplo, ambiente aquático constituído por riachos, presença de bancos de sedimento recebendo matéria orgânica através de cheias sazonais moderadas, presença de colônias itinerantes e pouco numerosas de morcegos), suportando uma alta diversidade taxonômica de cavernícolas, i.e., uma comunidade constituída por representantes dos grandes grupos encontrados no conjunto das cavernas da área. Dentre as cavernas do Alto Ribeira, as que mais se aproximam dessa condição são as do sistema Areias, um “spot” de alta diversidade de troglóbios (24 até o momento, o maior número registrado para o Brasil), formado pelas cavernas Areias de Cima e de Baixo e Ressurgência das Areias da Água Quente, ou simplificada caverna Águas Quentes (para mais informações, ver Trajano, 2007, entre outros).

No entanto, mesmo tomadas em conjunto, essas fontes de alimento disponíveis aos animais que vivem nos habitats subterrâneos são geralmente escassas em comparação com aquelas com que os mesmos contam no meio epígeo. Uma notável exceção são as chamadas “bat caves”, onde existem grandes colônias estáveis de morcegos, os quais permanecem na caverna por tempo prolongado, depositando grandes quantidades de guano (acúmulos de fezes), disponíveis como fonte de energia para outros organismos subterrâneos, basicamente invertebrados, mas que são ocorrências relativamente raras, como se observa no Brasil.

Assim, os ecossistemas subterrâneos em geral caracterizam-se pela grande dependência de nutrientes externos, que podem provir de áreas mais ou menos extensas, por vezes distantes da caverna ou sistema em questão. Os próprios morcegos, produtores do guano que constitui fonte alimentar e substrato importantes para muitos cavernícolas, podem ter áreas de forrageio não somente bastante extensas, como também variáveis sazonalmente. Tais áreas de forrageio podem, evidentemente, se estender para além das áreas cársticas, motivo pelo qual são importantes estudos de ecologia da paisagem. Também as áreas de recarga de aquíferos e a própria dinâmica de funcionamento varia muito de sistema para sistema (conforme capítulo 1). Consequentemente, cada ecossistema hipógeo está sob a influência de uma área cuja extensão depende de uma série de fatores, tais como as conexões de suas teias alimentares com variáveis externas, incluindo hidrologia, clima, ecologia populacional de troglóxenos etc., que ainda podem flutuar anual e infra-anualmente (ciclos com períodos superiores a um ano).

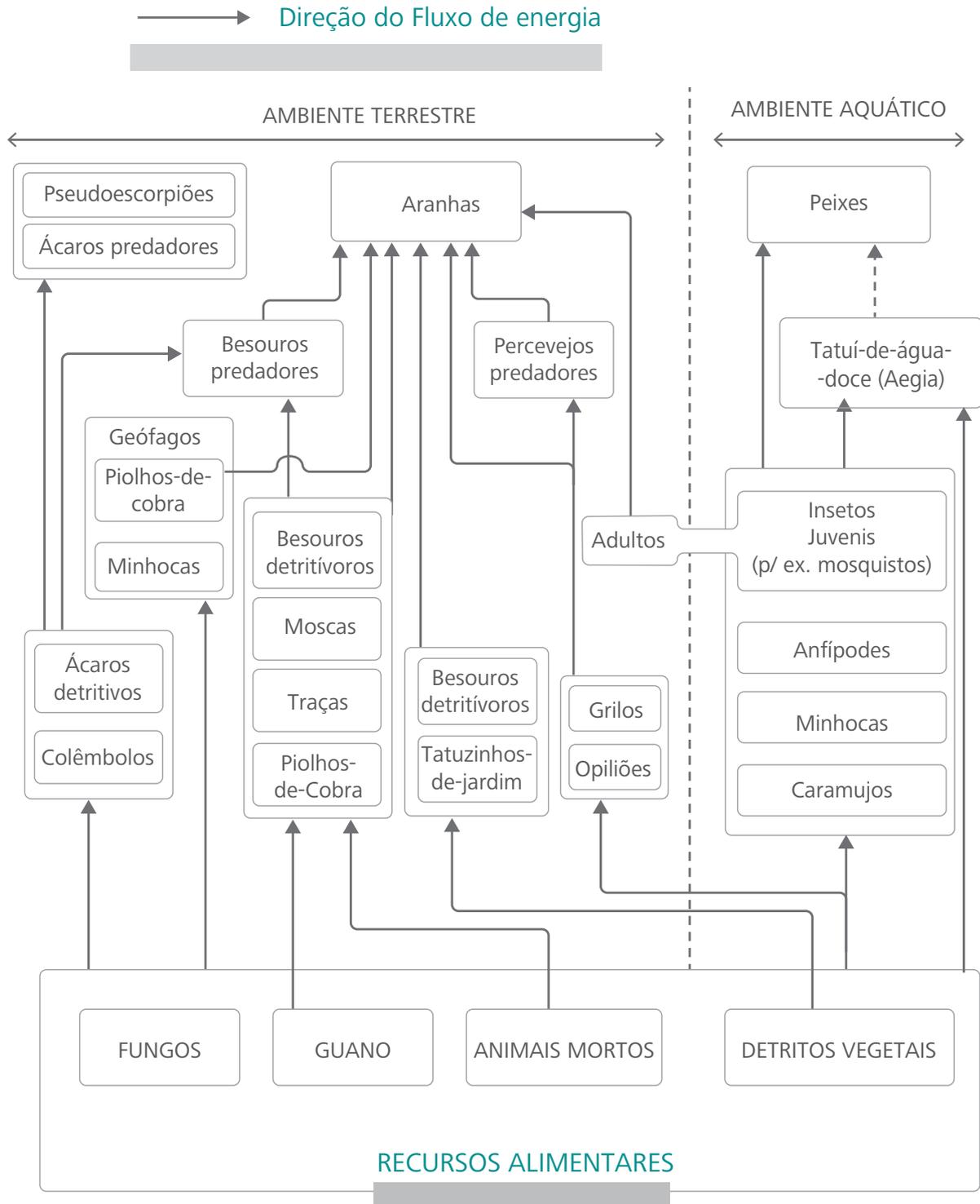


Figura 4.1. Teia alimentar simplificada em uma caverna hipotética da área cárstica do Alto Ribeira, sudeste do Brasil. As setas indicam a direção do fluxo de energia e de carbono.

As características do ambiente subterrâneo conferem condições de vida bem distintas daquelas da superfície, impondo dificuldades consideráveis à sobrevivência de populações epígeas. Assim sendo, nem todas aquelas que vivem em uma determinada região com meio hipógeo desenvolvido são capazes de colonizá-lo efetivamente, ou seja, viver e reproduzir-se por muitas gerações, formando populações bem estabelecidas. Têm maior probabilidade de colonizar com sucesso o meio subterrâneo animais epígeos com atividade noturna ou que vivem em ambientes permanentemente obscuros, como dentro de fendas, sob rochas, em meio ao folhicho ou sob troncos, no solo, ou em águas turvas, conseqüentemente não estritamente dependentes da visão para orientação, tanto topográfica como para encontrar alimento e parceiros para reprodução. Uma dieta generalista, ou seja, incluindo grande variedade de itens alimentares (onivoria, detritivoria ou carnivoria não especializada) também traz vantagens para a colonização do meio subterrâneo. É o caso, por exemplo, dos bagres, entre os peixes, e de muitos aracnídeos e insetos como os grilos, entre os artrópodes terrestres. Características selecionadas em função de um determinado modo de vida (por exemplo, atividade noturna), mas que, por coincidência de condições (ausência de luz), favorecem a adoção de outro modo (vida subterrânea), não relacionado ao primeiro, são chamadas pré-adaptações (ou exaptações).

4.3. CLASSIFICAÇÃO ECOLÓGICO-EVOLUTIVA DOS ORGANISMOS SUBTERRÂNEOS

Os organismos subterrâneos propriamente ditos são aqueles que mantêm uma relação ecológica definida com esse ambiente, o qual constitui parte ou todo o habitat da espécie. Tais organismos são, portanto, capazes de, no mínimo, orientar-se topograficamente na escuridão.

Organismos subterrâneos são usualmente classificados em três categorias de cunho ecológico-evolutivo (independentes da classificação zoológica taxonômica), propostas inicialmente por Schiner em 1854, com algumas modificações de Racovitza, em 1907. A seguir, é apresentada a classificação de Schiner-Racovitza modificada por Trajano (2012), de modo a adequar-se ao modelo fonte-sumidouro (populações fonte, "source populations", são populações auto-suficientes, que continuam a crescer mesmo que isoladas de fontes de migrantes, em contraste com populações sumidouro, que se extinguem uma vez isoladas das mesmas):

1) Troglóxenos – indivíduos de populações fonte epígeas, regularmente encontrados no meio subterrâneo mas que precisam deslocar-se periodicamente a fim de completar seu ciclo de vida. Geralmente, a limitação que obriga os troglóxenos a sair para o meio epígeo é o alimento que, no meio hipógeo, não é suficiente para as necessidades da espécie. Os troglóxenos mais conhecidos são os morcegos, que saem diariamente das cavernas para se alimentar fora, mas existem outros vertebrados (p.ex., outros mamíferos como lontras, guaxicas, ratos d'água), e também invertebrados (algumas espécies de opiliões, aranhas Pholcidae e mariposas Noctuidae no Brasil), que se enquadram nesta categoria. Estão aqui, também, organismos que hibernam (morcegos em regiões temperadas) ou estivam (sapos, mosquitos, alguns opiliões em regiões mais secas e quentes no Brasil) em cavernas, ou ainda os que se reproduzem e/ou passam apenas parte do seu ciclo de vida no meio hipógeo, geralmente as fases juvenis, quando são mais vulneráveis e se beneficiam das condições de maior proteção em cavernas. Alguns troglóxenos também precisam passar parte de seu ciclo de vida no meio subterrâneo, portanto são dependentes da integridade de ambos ambientes – são os chamados troglóxenos obrigatórios, como é o caso do opilião *Acutisoma spelaeum*, da área cárstica do Alto Ribeira, SP. Estes animais, que podem ser encontrados em grandes números na zona de entrada e penumbra de cavernas do Alto Ribeira, protegem seus ovos aderidos nas paredes (Figura 4.2).



Figura 4.2. Opilião *Acutisoma spelaeum*, troglóxeno obrigatório, típico habitante da zona de penumbra e proximidades em cavernas da área cárstica do Alto Ribeira, sudeste do Brasil; fêmea tomando conta dos ovos. Foto: cortesia Renata Brandt.

2) **Troglófilos** – populações fonte tanto no meio epígeo como no subterrâneo, sendo que indivíduos podem transitar entre esses dois ambientes, promovendo o fluxo genético entre essas populações, de modo a manter a conectividade entre elas. Por esse motivo, os indivíduos das populações superficiais e subterrâneas são taxonomicamente indistinguíveis entre si, ou seja, são reconhecidos como pertencendo à mesma espécie. No entanto, as populações troglófilas podem ser ecologicamente bem distintas das epígeas, com parâmetros populacionais (estrutura e densidade populacionais, taxas de crescimento, áreas de vida etc.) próprios, em resposta às condições especiais do meio hipógeo. A maioria dos cavernícolas brasileiros são troglófilos, que incluem representantes de diversos grupos taxonômicos, como várias ordens de insetos (os mais comuns são grilos, besouros, hemípteros, dípteros, tricópteros, baratas nas regiões mais quentes), miriápodes (principalmente diplópodes = piolhos-de-cobra), crustáceos (isópodes = tatuzinhos-de-jardim, anfípodes, eglas = tatuís-de-água-doce), aracnídeos (principalmente aranhas de várias famílias, como as errantes da família Ctenidae – Figura 4.3, opiliões, pseudoscorpíões), oligoquetos (minhocas), planárias etc., tanto aquáticos como terrestres.



Figura 4.3. Aranhas errantes da família Ctenidae, espécies encontradas na área cárstica do Alto Ribeira: acima à esquerda, *Ctenus fasciatus*, troglófilo comum em toda a região, pode formar populações cavernícolas numerosas, mas é raramente encontrada no meio epígeo; no centro, *Enoploctenus cyclothorax*, troglóxeno mais frequente em cavernas do Parque Estadual Intervalles, utiliza a zona de entrada e penumbra para reproduzir-se: fêmea tomando conta do saco de ovos na foto ao lado, à esquerda. Fotos: acima à esquerda, Renata Brandt; acima à direita e ao lado à esquerda, Flavia Pellegatti Franco. [Foram necessários dois anos de estudo com técnica de marcação e recaptura (Tese de Doutorado de F. Pellegatti Franco) para distinguir esses modos de utilização de cavernas em aranhas aparentadas, com estilos de vida semelhantes].

3) **Troglóbios** – populações fonte exclusivamente subterrâneas, endêmicas de sistemas hidrológicos ou áreas contínuas de carste, uma vez que os indivíduos, altamente especializados para a vida hipógea, não sobrevivem por muito tempo no meio epígeo, não conseguindo dispersar-se via superfície. É geralmente aceito que a grande maioria das espécies troglóbias origina-se de populações troglófilas geneticamente isoladas no meio subterrâneo, as quais, uma vez evoluindo sob um regime seletivo altamente distinto daquele da superfície e sem o influxo de genes das populações epígeas, vão paulatinamente divergindo e acumulando especializações, que acabam por impossibilitar a vida fora dos habitats hipógeos.

Figura 4.4. *Litoblatta camargoi*, da área cárstica da Chapada Diamantina, BA, primeira barata troglóbia registrada no Brasil. Esses animais não têm pigmentação melânica e a coloração marrom clara, típica de insetos troglóbios, é dada pela quitina que constitui o exoesqueleto. Fotos: Alexandre Camargo.



Entre essas especializações dos troglóbios, as mais comuns e facilmente reconhecidas são a redução (que pode ser extrema, chegando à ausência) das estruturas oculares e da pigmentação escura do tegumento. Fala-se em redução em comparação com os aparentados epígeos, ou seja, um estado de caráter que teria sofrido um processo evolutivo de regressão em relação à população ancestral epígea, após seu isolamento no meio subterrâneo (como não se conhece a população ancestral, que ficou no passado, o método prevê que se compare com o epígeo atual mais proximamente aparentado). Tais características dos troglóbios são denominadas troglomorfismos. Como no caso dos troglófilos, há representantes troglóbios em praticamente todos os grandes grupos animais, incluindo planárias, moluscos, todos os grupos de artrópodes, peixes etc. Existem troglóbios em diversos tipos de habitats subterrâneos (incluindo cavernas), em ambientes cársticos e até mesmo não cársticos (caso dos bagres do gênero *Phreatobius*, encontrados em áreas sedimentares da bacia amazônica).



Figura 4.5. *Phreatobius cisternarum*, espécie freática distribuída ao redor do delta do Rio Amazonas, acessível através de poços e cisternas. A coloração avermelhada é dada pela hemoglobina, visível por transparência, indicando adaptação à vida em águas com concentração muito baixa de oxigênio. Foto: Janice Muriel Cunha.

É importante ressaltar que existem, em habitats não subterrâneos que compartilham com o meio hipógea características biologicamente fundamentais como a ausência de luz (caso do solo, fundo de grandes rios e dos oceanos, mesmo o meio onde vivem endoparasitas), espécies com os estados de caráter que, nos subterrâneos, são chamados de troglomorfismos, como a redução dos olhos e da pigmentação melânica. Isto é comum em grupos típicos de solo, como dipluros (pequenas "traças"), certos quilópodes (miriápodes predadores), algumas pequenas aranhas etc.

Portanto, a simples observação da presença de troglomorfismos não é suficiente para se deduzir a condição de troglóbios para um organismo subterrâneo: é necessário compará-lo com seus parentes epígeos próximos, a fim de verificar que não se trata de um caso como os acima expostos. Isto exige não apenas uma identificação com base em morfo-tipagem, mas um posicionamento na classificação e certo conhecimento da filogenia, para fins de comparação.

Isto não significa que um representante de um grupo epígeo troglomórfico encontrado no meio subterrâneo não seja um troglóbios, apenas que o troglomorfismo em si não é critério para se definir seu status, sendo necessário utilizar o critério conceitualmente adequado, que é o da não ocorrência no meio epígeo (de impossível comprovação do ponto de vista lógico, mas que pode ser aplicado estatisticamente). Do mesmo modo, e de acordo com este critério, nem todo troglóbios, i.e., espécie com populações-fonte exclusivamente subterrâneas, é troglomórfico. Isto tem importantes implicações para os levantamentos de fauna, que, portanto, não podem se restringir ao estudo de populações hipógeas.

A transição troglófilo-troglóbios, como resultado de um processo evolutivo, é irreversível. O que pode ocorrer é que, durante a divergência em isolamento, o processo de diferenciação não chegue a afetar caracteres reprodutivos, não sendo atingido o isolamento reprodutivo completo. Neste caso, se houver posteriormente, um contato secundário com populações epígeas descendentes pouco modificadas daquelas que originaram ao troglóbios, pode ocorrer cruzamento, com a produção de uma população híbrida, com caracteres intermediários. Existem exemplos conhecidos, como o dos lambaris cegos mexicanos da Cueva La Chica, mas não se trata de caso de reversão, pois esta população resultante é diferente dos ancestrais.

Se a transição troglófilo-troglóbios é irreversível, o mesmo não ocorre em relação à condição de troglófilos e troglógenos. De modo geral, o fator limitante que determina que troglógenos devam sair periodicamente ao meio epígeo para completar seu ciclo de vida é a insuficiência de nutrientes. Ora, no caso de cavernas com uma disponibilidade de alimento acima da média, animais que são normalmente troglógenos podem colonizá-la e formar populações troglófilas – um caso conhecido é o de certas aranhas do gênero *Mesabolivar* (Pholcidae), troglógenos comuns nas paredes da zona de penumbra e proximidades de cavernas de várias regiões do Brasil, mas que, nas ricas “bat caves” areníticas de Altamira e Itaituba, Pará, formam numerosas populações troglófilas. Ou seja, a distinção entre troglófilos e troglógenos não é de natureza evolutiva e sim, ecológica. De fato, pode ser bem difícil enquadrar inquestionavelmente populações subterrâneas em uma destas duas categorias, que se distinguem basicamente por uma característica: troglófilos podem sair do meio subterrâneo, troglógenos devem sair. Além disso, como acima exposto, a mesma espécie pode formar populações troglófilas sob determinadas circunstâncias, e troglógenas, sob outras. Ou seja, na prática, são necessários estudos caso a caso, e muita experiência e conhecimento prévio, tanto taxonômico como sobre a biologia e ecologia das populações, para se classificar organismos subterrâneos de acordo com a classificação modificada de Schiner-Racovitza, que tem uma natureza ecológico-evolutiva.

Em uma visita a qualquer caverna, podem ainda ser encontrados organismos que estão nela por acidente, tenham sido arrastados por água, caído por aberturas superiores, ou mesmo que tenham entrado em busca de um ambiente ameno, mas que não conseguem se orientar para retornar ao habitat à que estão adaptados, não sobrevivendo por muito tempo.

Do ponto de vista evolutivo, organismos subterrâneos (cavernícolas *sensu lato*) podem ser definidos como unidades evolutivas que respondem ao regime seletivo subterrâneo típico do meio hipógeo. Para estes, os habitats subterrâneos proveriam recursos, como por exemplo: alimento, abrigo, substrato, clima, que afetam as taxas de sobrevivência/reprodução. Tais unidades apresentam uma conectividade histórica, ao longo do tempo, portanto podem ser classificadas como entidades taxonômicas biologicamente significantes. Em contraste, acidentais são “becos sem saída” evolutivos. Do ponto de vista ecológico, tratam-se de recursos potenciais (alimento, substrato etc.) para populações estabelecidas no meio subterrâneo. Recursos não têm uma conectividade histórica por si (que é o que caracteriza unidades evolutivas reconhecidas como táxons). Quando um organismo torna-se recurso, não faz mais sentido classificá-lo taxonomicamente em nível de espécie ou categorias superiores – uma classificação biologicamente significativa seria de acordo com a disponibilidade do recurso, seu valor nutritivo etc. Ou seja, o conceito de “acidental” tem uma natureza distinta de troglóbios, troglófilos e troglógenos, portanto não se enquadra na classificação de Schiner-Racovitza (Trajano et al., 2012).

É importante ressaltar que troglógenos, troglóbios e troglófilos interagem entre si, sendo interdependentes e igualmente importantes do ponto de vista ecológico, contribuindo para a biodiversidade, não apenas taxonômica (incluindo diversidade filogenética e funcional), como também genética, morfológica, ecológica etc. Portanto, devem ser igualmente objeto de atenção e cuidados para fins de conservação, já que representam o resultado de processos e padrões ecológicos especiais – ou seja, mesmo na ausência de troglóbios, comunidades subterrâneas devem ser objeto de cuidados para preservação.

4.4. IMPORTÂNCIA E SINGULARIDADES DOS ECOSISTEMAS SUBTERRÂNEOS

Todo ecossistema é resultado da interação entre fatores históricos e ecológicos atuais, incluindo evolução geológica e geomorfológica da região, clima regional e sua história, oportunidades de colonização, dispersão e isolamento, hidrologia e conectividade, topografia (não existem duas cavernas iguais), heterogeneidade de habitat e sua proporção, disponibilidade de recursos alimentares adequados às diferentes espécies, conjunto de espécies interagindo e sua abundância relativa etc., estando sujeito, ainda, a variáveis aleatórias, imprevisíveis.

Em função da pluralidade de variáveis interagindo, cada ecossistema cavernícola é único, tal como um indivíduo que compartilha, com seus coespecíficos, os padrões gerais da espécie, mas que pode ser distinguido de todos os demais por suas particularidades. O caso evidente de singularidade é o de cavernas com espécies troglóbias exclusivas. Menos evidente, porém igualmente relevante, é o de cavernas com espécies troglóbias cuja distribuição ultrapassa seus limites topográficos. Mesmo nestes casos, as populações encontradas em cada uma das cavernas de ocorrência da espécie podem ser fundamentais para a manutenção de sua variabilidade genética (diretamente relacionada à capacidade de adaptação a novas situações) e mesmo integridade, dependendo do tamanho efetivo mínimo para manutenção da espécie. Mesmo cavernas sem registro de troglóbios são singulares à medida que abrigam conjuntos distintos de espécies, interagindo de forma particular e diferenciada. De fato, diferenças nas abundâncias relativas das populações, ao lado da riqueza de espécies, podem resultar em ecossistemas funcionalmente distintos. Isto ficou evidenciado nos estudos espeleobiológicos específicos realizados em 2009 nas 32 cavernas incluídas nos Planos de Manejo Espeleológico dos Parques Estaduais Intervalles, Turístico do Alto Ribeira, da Caverna do Diabo e do Rio Turvo: em nenhum caso a composição da fauna de duas cavernas foi coincidente, mesmo quando excluídos os troglóbios e outras espécies raras (Fundação Florestal & Ekos Brasil, 2010). Ou seja, em termos faunísticos e funcionais, cada ecossistema cavernícola tem suas particularidades.

Como já mencionado, é geralmente aceito que a grande maioria dos troglóbios originam-se de populações troglófilas isoladas em habitats subterrâneos, seja pela extinção das populações epígeas (p. ex., como consequência de flutuações climáticas acentuadas), seja pelo aparecimento de barreiras geográficas, como as geológicas, topográficas e/ou hidrológicas. Devido à fragmentação dos habitats subterrâneos, com restrição geográfica a dispersão (daí o alto grau de endemismo), associada à baixa disponibilidade de nutrientes, as populações subterrâneas são em geral pequenas. Ora, populações pequenas evoluindo em isolamento, sobretudo sob um regime seletivo muito discordante daquele da população de origem, tendem a diferenciar-se muito e rapidamente – o que é chamado, em Biologia, de efeito-gargalo. A consequência são animais que acumulam muitas especializações (estados autapomórficos de caracteres), como é o caso dos troglóbios.

Como já mencionado, entre as especializações mais conspícuas e conhecidas dos troglóbios estão a redução, até perda total, dos olhos e pigmentação escura do tegumento, geralmente melanina (embora não seja exclusiva destes, aparecendo também em animais de outros habitats afóticos, como solo profundo, fundo de grandes rios turvos etc.). Como a evolução é um processo contínuo e o tempo desde o início do isolamento, assim como as taxas de divergência, variam de acordo com a população, encontram-se na natureza espécies troglóbias em diferentes estágios evolutivos de regressão ocular e pigmentar. Desde aquele sem qualquer traço de estruturas fotorreceptoras (aqui incluídos olhos, ocelos e, nos vertebrados, a parte fotorreceptora da pineal) e de pigmento escuro e células pigmentares, até espécies com pequena redução, ainda que significativa, de olhos e pigmentação, passando por populações com grande variabilidade nesses caracteres, incluindo desde indivíduos com olhos pouco reduzidos àqueles totalmente despigmentados e sem olhos. Mesmo não tão espetaculares quanto os troglóbios mais especializados, espécies em estágios intermediários são fundamentais para estudos comparativos e têm igual valor científico, portanto também devem ser objeto de ações conservacionistas. Por outro lado, em resposta a regimes seletivos semelhantes, pelo menos no que diz respeito à ausência permanente de luz, organismos distantemente aparentados, como planárias, crustáceos e peixes de diferentes famílias, podem convergir no que diz respeito aos troglomorfismos, que se originam independentemente em cada grupo, levando a aparências semelhantes. Todas essas espécies são de alto interesse como modelos para estudos evolutivos com foco nos processos de adaptação e convergência.

Há décadas, estudos genéticos buscam explicações para a regressão de caracteres (diminuição de tamanho acompanhada de desorganização estrutural e perda da função), que não está restrita a organismos subterrâneos; um dos exemplos mais conhecidos é a redução das asas em aves terrestres, como o kiwi e o grupo das aves corredoras (avestruz, ema etc.). Atualmente há duas teorias principais. A primeira, Teoria das Mutações Neutras, que se mantém desde a década de 1950, defende que, na ausência de luz, mutações que afetam negativamente essas estruturas e que seriam eliminadas por seleção natural no meio epígeo, não o são nos habitats subterrâneos, afóticos, onde não faz diferença ter ou não olhos e pigmentação melânica (que protege contra a luz).

Esta teoria explicaria a redução de qualquer característica em qualquer organismo, a qual perde sua função em um novo ambiente ou pela adoção de um novo modo de vida, como o da perda das patas nas cobras e a extrema redução de asas e perda da capacidade de voar em certas aves de ilhas, como o cormorão de Galápagos e o kiwi e o kakapo (papagaio gigante) da Nova Zelândia. Por outro lado, baseados em estudos sofisticados, porém com poucas espécies troglóbias, alguns autores propõem que tal perda compensaria outro caráter que poderia, assim, se desenvolver (por exemplo, a perda dos olhos em lambaris mexicanos favoreceria o aumento de botões gustativos). Seu problema é tratar-se de uma teoria que carece da necessária generalidade para explicar qualquer tipo de regressão. O fundamental é a apreciação da importância dos troglóbios em estudos que visam processos evolutivos gerais, os quais afetam, inclusive, a compreensão da própria evolução humana – p. ex., o que significa a redução drástica da melanina da pele, que caracteriza os paleoeuropeus nórdicos? É um caráter neutro, ou foi selecionado, e para quê? E mais, esta característica confere algum tipo de superioridade para essas populações, ou é simplesmente parte de um mosaico de especializações para um novo ambiente?

Outros caracteres regressivos dos troglóbios enquadrar-se-iam igualmente no modelo neutralista, à medida que podem ser explicados pela ausência de seleção de adaptações à luz e a fotoperíodos, aliadas ao afrouxamento da pressão de predação. São exemplos, a perda da capacidade de tolerar flutuações ambientais, principalmente a intolerância à dessecação em muitos artrópodes troglóbios; a perda da fotofobia (a grande maioria dos troglóbios tem ancestrais noturnos, fotonegativos), das reações fóbicas em geral e do hábito de se esconder – o que os torna particularmente vulneráveis a perturbações como a coleta –, muito comuns em peixes troglóbios, e a regressão dos mecanismos de controle temporal interno (conhecido como “relógio interno”). Troglóbios são, assim, modelos privilegiados para estudos sobre ritmicidade, aspecto com sérias repercussões na fisiologia e comportamento humanos, cujo conhecimento é importante para a qualidade de vida pelos seus desdobramentos na Medicina, Psicologia etc. Além disso, as adaptações fisiológicas à escassez de nutrientes, que incluem a grande resistência à fome e taxas metabólicas mais baixas que as de seus parentes epígeos, fazem dos troglóbios excelentes modelos para estudos na área de fisiologia do metabolismo.

Ao mesmo tempo, troglóbios podem apresentar características claramente adaptativas, com destaque para aquelas que aparecem em consequência à denominada “compensação sensorial”: na impossibilidade da orientação visual, outros sistemas sensoriais tendem a desenvolver mais, como o tato, a percepção de movimentos no ambiente e a quimiorrecepção (percepção de moléculas). Assim, estruturas sensoriais não visuais que portam receptores químicos e mecânicos, tais como antenas e pernas em artrópodes, região do focinho e sistema da linha lateral em peixes, podem aumentar muito em tamanho (área e/ou comprimento). Muitos artrópodes troglóbios especializados têm apêndices alongados, além de corpo esbelto e delicado em comparação com os epígeos aparentados (interpretado como estratégia de economia de energia). São frequentes, ainda, casos de miniaturização, provavelmente como adaptação para a vida em espaços restritos no meio subterrâneo. Em conjunto ou separadamente, estas características conferem aos troglóbios uma aparência única, singular.

A relativa estabilidade ambiental característica dos habitats subterrâneos confere-lhes a condição de refúgio, onde populações podem manter-se por longos períodos, chegando a muitos milhões de anos, enquanto grupos epígeos inteiros podem desaparecer por completo, deixando como únicos sobreviventes seus derivados troglóbios. Estes são os chamados “relictos”, de alta relevância científica por serem testemunhas (por vezes as únicas) de partes importantes da história evolutiva passada dos organismos. Ainda, a distribuição de troglóbios pode funcionar como traçador biológico, por vezes mais eficiente que os químicos, na delimitação de sistemas subterrâneos.

Como é de se esperar, tendo em vista as particularidades do meio subterrâneo, populações troglóbias apresentam uma ecologia toda especial. Em primeiro lugar, como já mencionado, devido à fragmentação dos habitats subterrâneos, com restrição geográfica à dispersão e baixa disponibilidade de nutrientes, as populações são geralmente pequenas, e com baixas densidades (embora deva ficar claro que estes dois parâmetros são independentes – populações pequenas podem ter altas densidades e vice-versa). Além disso, os ciclos de vida são muito mais lentos que os dos parentes epígeos, tendendo ao que é denominado de estratégia K: a reprodução é infrequente (em geral os indivíduos não se reproduzem todos os anos), a fecundidade (número de descendentes produzidos) é muito baixa, o crescimento individual é muito lento e a expectativa de vida é muito alta, conseqüentemente o “turnover” (reposição) populacional é muito lento. Por exemplo, enquanto bagres epígeos de porte médio, como os mandis, vivem por volta de 5-7 anos, derivados troglóbios tem longevidade média estimada em 15 ou mais anos, chegando, em alguns casos, a mais de 30 anos, que é uma longevidade excepcional quando se trata de animais pequenos.

Além disso, uma vez evoluindo em isolamento em ambiente muito mais estável que o epígeo, troglóbios tendem a perder, em um processo de regressão análogo ao que afeta olhos, pigmentação e outros caracteres, a tolerância a flutuações ambientais. Esta redução é mais evidente nos artrópodes terrestres, que também têm diminuída a capacidade de resistir à dessecação devido à diminuição da espessura do exoesqueleto, especialmente da cutícula, hidrófuga – em ambientes muito úmidos, sem riscos de dessecação, economizar energia pela redução de tecido do exoesqueleto passa a ser viável.

Por outro lado, essa especialização confere fragilidade diante de alterações ambientais que modifiquem bruscamente o estado de equilíbrio dinâmico do ambiente, em escalas temporais incompatíveis com a da evolução biológica.

Em decorrência das especializações acima expostas, a reposição de populações de troglóbios em caso de declínio, como os causados por perturbações humanas, é muito lenta e, se o fator de perturbação persistir, pode levar à rápida extinção. Por essa e outras razões, troglóbios são intrinsecamente organismos muito frágeis, enquadrando-se nos critérios usados para a elaboração de listas de espécies ameaçadas, entrando todos, pelo menos, na categoria Vulnerável.

A fragmentação, o alto grau de endemismo das espécies, as taxas evolutivas inicialmente altas, levando à rápida divergência em relação aos parentes epígeos, aliadas à evolução convergente recorrente em relação a caracteres sujeitos a troglomorfo, observados na fauna troglóbia tem poucos paralelos na natureza – o mais próximo que se tem são os arquipélagos, que, há vários séculos, chamam a atenção pela singularidade de sua fauna e necessidade de proteção especial. Devido aos processos de efeito do fundador e deriva genética que sucedem isolamento, diferentes populações subterrâneas derivadas de uma mesma espécie epígea acabam por divergir, não só com relação ao ancestral epígeo, mas também entre si, de modo que os resultados são sempre populações distintas, únicas, irreproduzíveis.

Porém, nem só os troglóbios são fonte de diversidade. Também as populações troglófilas podem diferir ecologicamente das epígeas da mesma espécie, apresentando parâmetros populacionais, tais como densidades populacionais e estratégias de ciclo de vida, substancialmente diferentes. Essas populações podem ser importante fonte de recolonizadores do meio epígeo e, portanto, também devem ser objeto de ações para conservação.

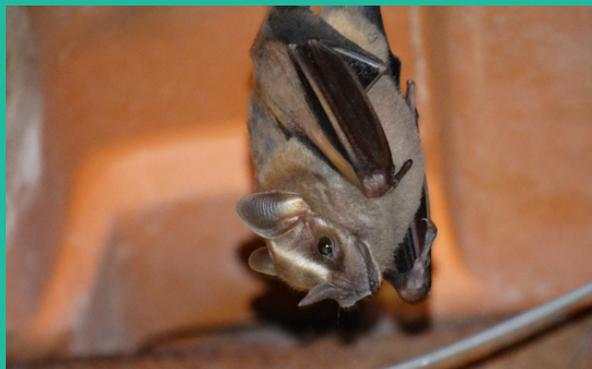
Concluindo, a diversidade biológica contida mesmo em pequenos fragmentos de habitat subterrâneo pode ser muito alta em termos dos processos e padrões que produzem esses elementos, devendo ser priorizada nas ações nacionais de valorização e proteção dos ambientes naturais.

QUADRO 1. MORCEGOS E CAVERNAS

Quando comparadas com as de zonas temperadas, cavernas tropicais frequentemente apresentam maior diversidade total, i.e., de troglóbios + troglófilos + troglógenos. Isto pode ser diretamente relacionado à alta diversidade epígea como fonte de colonizadores potenciais. Além disso, sobretudo para cavernas onde o guano de morcegos representa uma fonte de nutrientes importante, a variedade de dietas das espécies tropicais também contribui significativamente para essa riqueza, uma vez que diferentes tipos de guano sustentam comunidades diversas. Na Região Neotropical (América do Sul, Central e do Norte até centro do México, além do Caribe), onde essa variedade é a maior, existem morcegos insetívoros aéreos, carnívoros que capturam insetos e outros artrópodes pousados, predadores de outros vertebrados, incluindo morcegos de menor porte, espécies piscívoras, morcegos especializados para alimentarem-se de néctar, frugívoros especializados (p. ex., a maioria dos filostomídeos *Stenoderminae*) e outros nem tanto, os quais podem complementar sua dieta com insetos, se necessário (p. ex., *Carollia perspicillata*), morcegos onívoros, i.e., que habitualmente comem tanto itens animais como vegetais, e os hematófagos (três espécies), que são exclusivos da Neotrópica.



À esquerda, insetívoro aéreo da família Emballonuridae, em caverna Foto: Eleonora Trajano; à direita, *Chrotopterus auritus*, grande morcego predador comum em cavernas, onde forma pequenos grupos característicos de 2-6 indivíduos pendurados no teto. Foto: William Sallun Filho.



À esquerda, morcego frugívoro da subfamília Stenoderminae, em forro de casa Foto: Eleonora Trajano; à direita, *Dyphilla ecaudata*, morcego hematófago pouco comum, que se alimenta preferencialmente do sangue de aves. Foto: Wilson Uieda.

De modo geral, em cavernas brasileiras são encontrados três tipos principais de guano de morcegos: guano de insetívoros, relativamente seco e composto por restos de insetos e seu exoesqueleto quitinoso (que a imensa maioria dos animais não digere); guano de frugívoros, com restos de polpa e sementes de frutos, úmido quando recém-depositado e com alto teor de açúcares; e guano de hematófagos, pastoso e com alto teor de amônia quando recém-depositado, que se modifica bastante à medida que seca. Além disso, podem ser encontrados acúmulos relativamente pequenos de guano de morcegos carnívoros. Diferenças na estrutura, composição química e micro-clima resultam na presença de elementos específicos, adaptados às condições próprias a cada tipo de guano, ao lado de espécies mais generalistas, encontradas em qualquer tipo de guano. Organismos encontrados basicamente em depósitos de guano são chamados guanóbios, e aqueles que vivem tanto no guano como em outros substratos são guanófilos (note que tanto um quanto outro podem ser troglóbios ou troglófilos; troglófilos guanóbios seriam encontrados exclusivamente em guano também no meio epígeo).



Acherontides eleonora, colêmbolo guanóbio exclusivo de guano de morcegos hematófagos, atinge densidades populacionais excepcionalmente altas a medida que o guano seca Foto: João Allievi

Morcegos também diferem no uso dos abrigos, tanto diurno, que é onde passam boa parte de sua vida, quanto noturno, que são abrigos onde podem parar por um breve intervalo de tempo durante a atividade noturna de forrageio, para ingerir o alimento (no caso de itens grandes como certos frutos) ou simplesmente descansar. Há espécies muito exigentes acerca do tipo de abrigo preferido (há casos de grande especificidade, como algumas espécies que só utilizam as largas folhas de certas plantas), enquanto outras têm um tipo de abrigo preferencial, como muitos Stenoderminae, que preferem a folhagem na copa de árvores, e morcegos carnívoros da família Phyllostomidae, com forte preferência por abrigos em rocha, incluindo cavernas, e outras, ainda, são bastante flexíveis ecologicamente, utilizando os abrigos que estiverem presentes. De qualquer modo, na ausência da pressão de seleção do comportamento gregário para manutenção da temperatura (observada em espécies cavernícolas de regiões temperadas), a alta demanda energética do vôo favoreceria um uso oportunista dos abrigos por morcegos tropicais, de modo a garantir o retorno ao abrigo o mais próximo possível da fonte de alimento utilizada em cada noite.

Estudo baseado em técnica de marcação e recaptura mostrou que indivíduos das espécies mais abundantes em cavernas da área cárstica do Alto Ribeira, entre os Estados de São Paulo e Paraná, deslocam-se frequentemente entre cavernas próximas, de forma aparentemente irregular e sem seguir padrões sazonais, formando assim “colônias itinerantes” (Trajano, 1996). Existem evidências de que esse padrão é geral para áreas com alta disponibilidade de abrigos, i.e., áreas com alta concentração de cavernas. Há casos, atestados por observação direta dos morcegos e/ou das variações na posição e estado dos depósitos de guano, de colônias que abandonaram cavernas por longos intervalos de tempo, às vezes anos, retornando sem motivo ou padrão aparente.

Isso significa que a área domiciliar de um indivíduo, i.e., a área utilizada para abrigo e forrageio durante uma estação ou fase da vida (diferindo, portanto, da área de vida, que é a área total utilizada por um morcego ao longo de sua vida, ou seja, a soma das áreas domiciliares e as rotas de migração, se ocorrer) pode abranger um conjunto de abrigos relativamente próximos.



Conseqüentemente, a unidade de estudo para a investigação da distribuição e ecologia de quirópteros, sobretudo em áreas com carste bem desenvolvido, deve compreender, ao menos inicialmente, conjuntos de cavernas em raios de pelo menos 6 km (uma estimativa da área média de forrageio para espécies com mobilidade média a alta) ao redor daquelas localizadas nos pontos de interesse. Além disso, diferenças infra-anuais (com períodos superiores a um ciclo anual), sem padrões detectados (se existem, os estudos realizados até o momento não foram suficientes para descrevê-los), implicam na necessidade de estudos de longo prazo, cobrindo vários anos, para se compreender a dinâmica espaço-temporal de ecossistemas cavernícolas associada à presença de morcegos nos mesmos.

Anilha metálica codificada, aplicada no antebraço de morcego, permitindo seu reconhecimento individual e monitoramento ao longo da vida.
Foto: Hertz Figueiredo.

4.5. O ESTUDO DA BIOTA SUBTERRÂNEA

Ao contrário da prática corrente, que se mostra desastrosa quando o objetivo é compreender o funcionamento, a importância e as singularidades dos ecossistemas subterrâneos, a elaboração de listas faunísticas é apenas o primeiro passo dos estudos sobre a biota subterrânea. Um passo fundamental, que fornece a base para todo o resto, e de cuja confiabilidade depende a robustez do estudo, mas ainda o primeiro de vários passos.

Para o sucesso desta primeira etapa, é importante ter em mente alguns princípios gerais. Em primeiro lugar, obviamente os métodos são estabelecidos em função dos objetivos do estudo em questão. Portanto, no caso da existência de dados prévios sobre o tema em estudo para a área de estudo, ditos dados secundários, a avaliação da necessidade de novos dados, ditos primários, passa necessariamente por análise comparativa criteriosa, com foco no desenho amostral e técnicas de coleta e análise dos dados, assim como disponibilidade de exemplares para checagem de identificação, empregados nos estudos de onde provêm os dados secundários. Não havendo uma total correspondência com os métodos previstos para o novo estudo, de acordo com seus objetivos, os dados secundários poderão ser utilizados como dados complementares, porém estes não dispensam a necessidade de estudo específico para os objetivos em foco.

Para que um estudo seja conclusivo, uma série de condições deve ser satisfeita: a amostragem deve ser suficiente para os objetivos da investigação, ou seja, representativa da comunidade em estudo, os dados devem ser confiáveis e tratados de modo adequado, e a pesquisa deve atender aos princípios básicos do trabalho científico, sendo passível de verificação e repetição por quaisquer outros pesquisadores qualificados. Naturalmente, princípios éticos de transparência, capacitação da equipe técnica e competência específica dos profissionais para o tema em estudo devem ser observados.

4.5.1 Coleta

Métodos de amostragem em grandes espaços subterrâneos são, no geral, os mesmos utilizados em habitats e substratos epígeos comparáveis, incluindo corpos d'água lóticos e lênticos, solo, substratos rochosos etc. Existe ampla literatura sobre esses métodos, que devem ser de domínio de qualquer biólogo de campo experiente. Adicionalmente, para habitats exclusivamente subterrâneos, tais como o epicarste (Figuras 4.6.1 e 4.6.2), o MSS – meio subterrâneo superficial (Figura 4.6.2), o meio hiporreico (Figuras 4.6.5 e 4.6.6) e mesmo a rede de pequenas fissuras em rochas, que se tornam acessíveis através de furos de prospecção mineralária, existem técnicas específicas de coleta, tais como filtragem de água de percolação e gotejamento, poços de Karaman-Chappuis, Bou-Rouche, outros tipos de bombas a pistão, diversos tipos de armadilha etc¹¹.

¹¹ Para uma descrição desses métodos, ver, por exemplo, http://www.epa.wa.gov.au/EPADocLib/2543_GS54a30708.pdf, http://www.snh.org.uk/pdfs/publications/commissioned_reports/397.pdf.

A fragilidade dos habitats subterrâneos, associada ao alto grau de endemismo e lento “turnover” populacional, resultando em baixa capacidade de reposição de perdas populacionais, impõe cautela especial na coleta de exemplares. A coleta excessiva no meio subterrâneo tem consequências muito mais graves do que no meio superficial, requerendo cuidado especial, não só para evitar excessos como também, perda de material e/ou informações – p. ex., por extravio ou preservação inadequada dos exemplares, ou perda ou troca de etiquetas e dados incompletos –, tornando as coletas inúteis, injustificadas. Isto aplica-se, obviamente, a toda e qualquer coleta biológica, mas os riscos são maiores para a fauna subterrânea. Por este motivo, coletas em cavernas devem ser efetuadas por biólogos competentes e com experiência comprovada nas técnicas de amostragem previstas no protocolo do estudo.

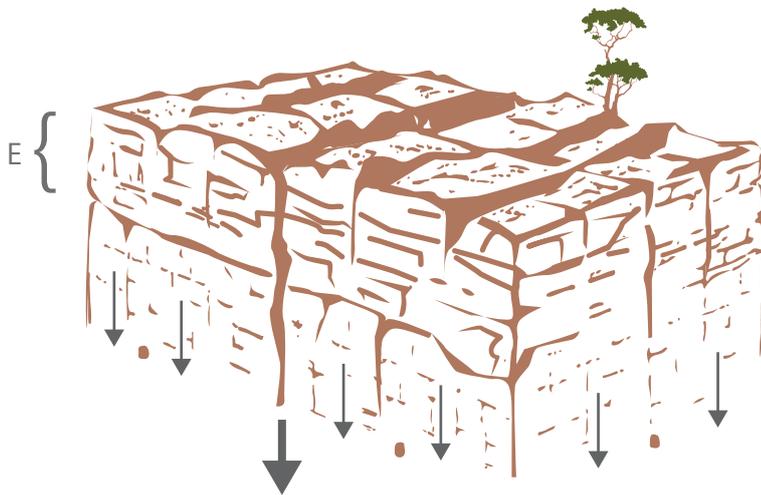


Figura 4.6.1 . Bloco diagrama mostrando epicarste (E).
Ilustração: Daniel Borges.
Modificada de Bakalowicz (2004), a partir de Mangin (1974).

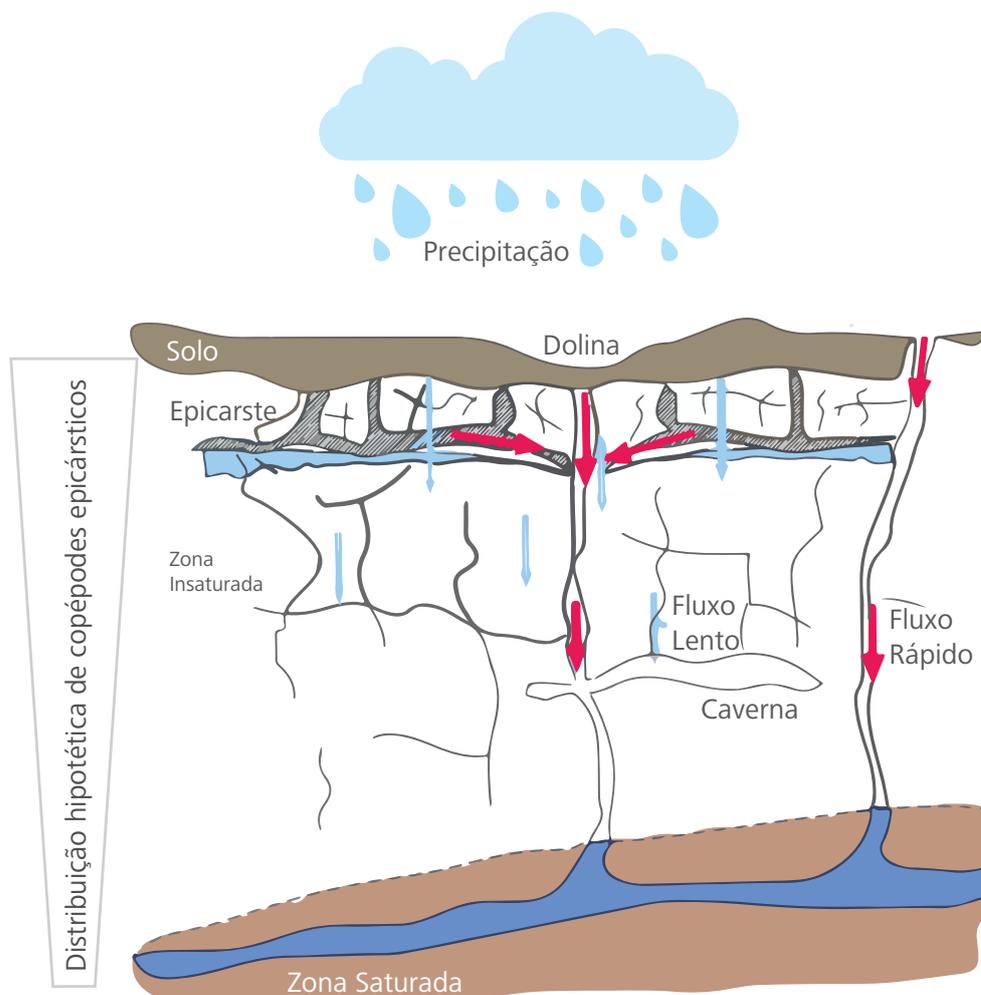


Figura 4.6.2. Diagrama de meio subterrâneo superficial (MSS) em uma zona calcária cascalhosa na base de uma escarpa calcária, conectado a um sistema de cavernas.
Ilustração: Daniel Borges.

Diagrama do substrato mesovoide raso (Meio Superficial Subterrâneo) em uma zona calcária cascalhos da na base de uma escarpa calcária, conectado a um sistema de cavernas

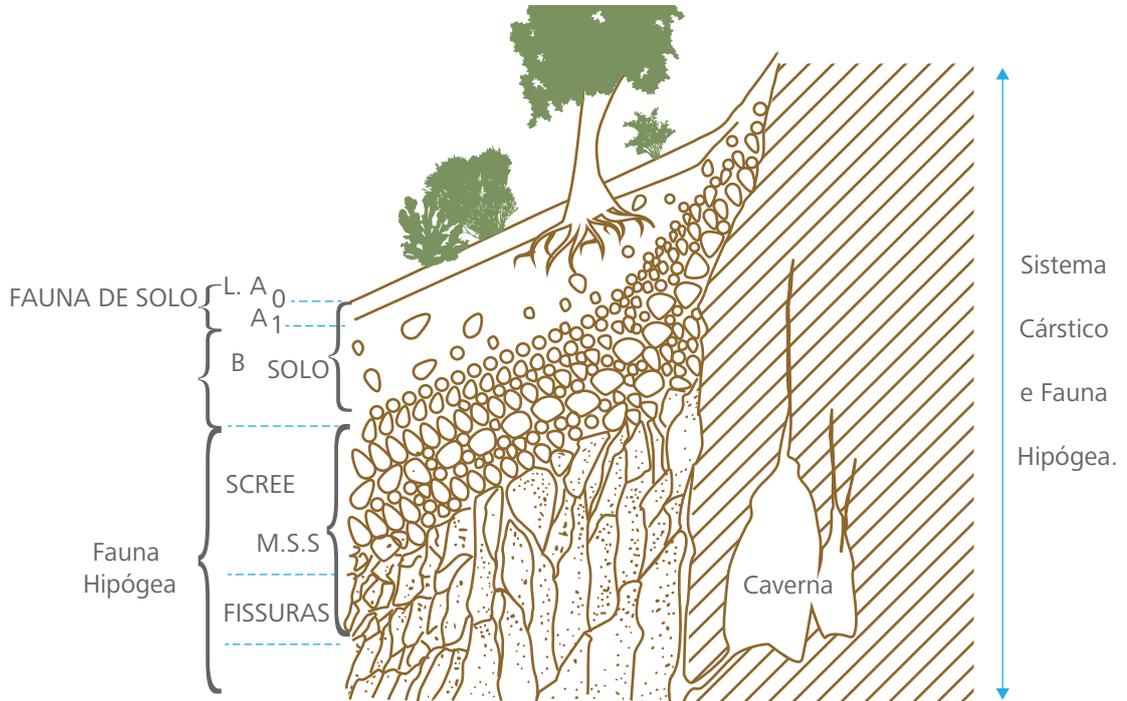


Figura 4.6.3 Diagrama de meio subterrâneo superficial (MSS) em uma zona calcária cascalhosa na base de uma escarpa calcária, conectada a um sistema de cavernas. Ilustração: Daniel Borges. Modificado de Juberthie (2000).

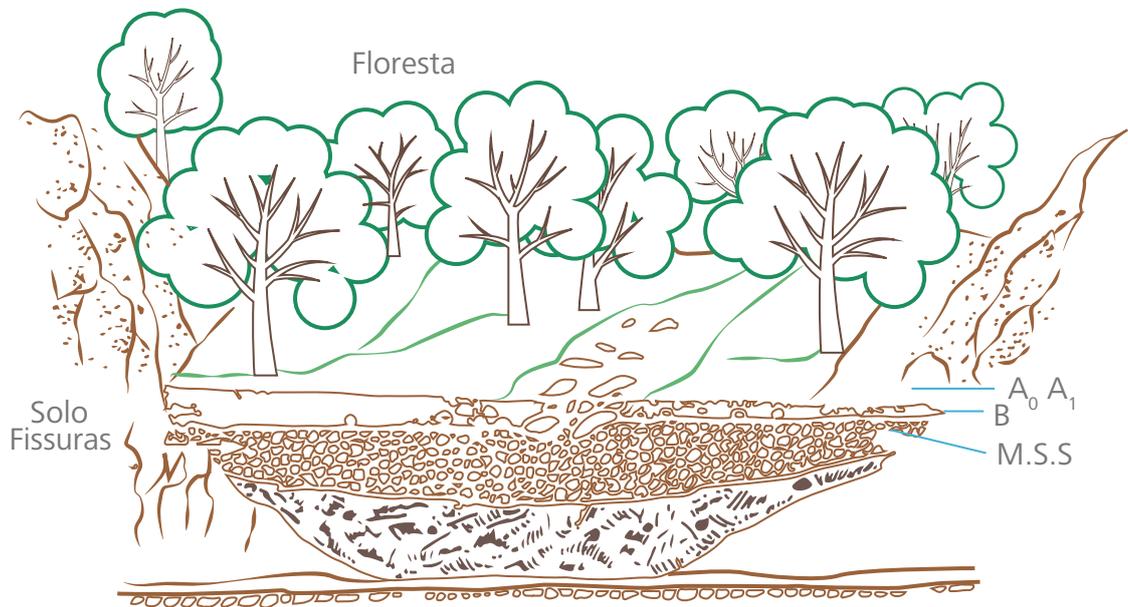


Figura 4.6.4. Diagrama de meio subterrâneo superficial (MSS) nos Pirineus centrais e nos Cárpatos da Romênia. Ilustração: Daniel Borges. Modificado de Juberthie (2000).

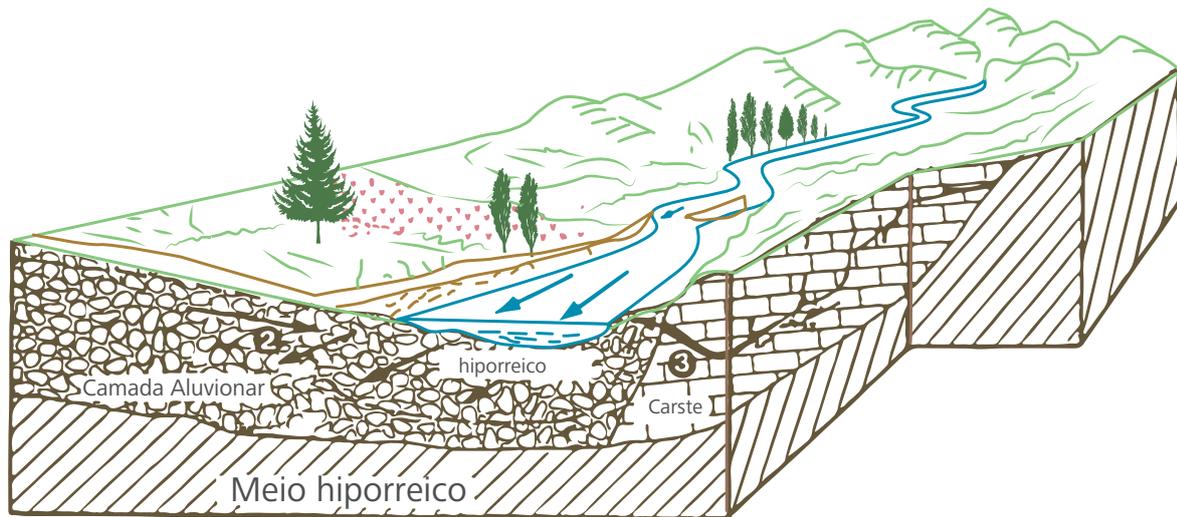


Figura 4.6.5. Diagrama da estrutura vertical de um sistema rio-aquífero subterrâneo mostrando as zonas hiporreica e freática. Ilustração: Daniel Borges.

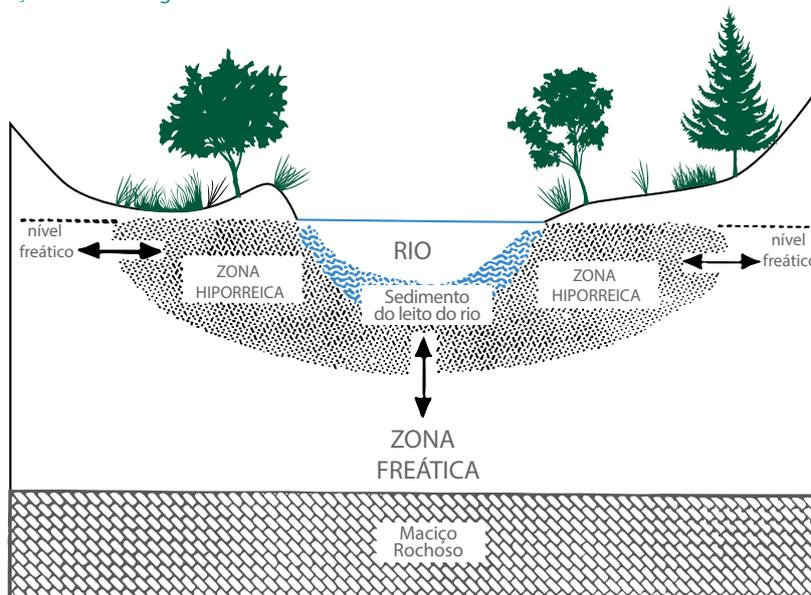


Figura 4.6.6. Diagrama de estrutura vertical de um sistema rio-aquífero subterrâneo, mostrando as zonas hiporreica e freática. Montagem: Daniel Borges. Modificado de Ward et al. (2000).

No caso de métodos que permitem uma seleção prévia dos exemplares a serem capturados, preferível para ambientes frágeis, pois permitem um controle do número de indivíduos a ser subtraído das populações, o coletor deve conhecer a variação em cada grupo e os tipos (sexos, classes etárias etc) que se prestam à identificação, de modo a selecionar amostras adequadas. Para tal, a inspeção visual (Figura 4.7), seja de todo o habitat acessível (no caso de cavernas pequenas), seja de amostras do mesmo, por meio do uso de quadrados, transectos etc, mostra-se plenamente satisfatória. Por exemplo, nos artrópodes, a grande maioria das espécies é distinguível com base nos adultos, geralmente nos machos, sendo inútil capturar muitos juvenis (alguns, e desde que acompanhados dos adultos, já seriam suficientes para descrever a variação na espécie, e mesmo assim apenas se não houver espécies próximas no mesmo ambiente). Isto não é trivial. Mesmo amostras pequenas podem ser excessivas.

É fácil reconhecer excessos em números absolutos de exemplares coletados, como nos casos dos cerca de 5.880 invertebrados coletados em cinco cavernas relativamente pequenas (dezenas a algumas centenas de metros) de Goiás, Minas Gerais e Bahia (uma única ocasião de coleta em cada), dos cerca de 4.500 invertebrados aquáticos coletados em uma única ocasião em uma pequena caverna (120 m de riacho) de Minas Gerais ou, ainda, dos 3.325 exemplares de uma única espécie troglóbica, o gastrópode *Potamolithus troglobius*, endêmico do Sistema Areias, por esta razão incluída em lista de espécies ameaçadas. Estes exemplos de más práticas ilustram a importância de ajustar métodos de coleta a cada caso particular, pois não é cientificamente válido copiar desenhos experimentais de forma automática, indiscriminada, sem análise prévia de sua pertinência. Por exemplo, se esforços amostrais adequados a estudos em cavernas com baixa riqueza forem empreendidos de forma acrítica em cavernas mais ricas, os resultados serão excessos como os acima mencionados. Daí a necessidade de profissionais experientes na condução desses estudos, capazes de realizar as adequações necessárias.

Este tipo de excesso frequentemente está associado ao uso de métodos inespecíficos, como armadilhas de queda ("pit falls"), muito nocivas se deixadas por tempo excessivo (não é raro encontrar armadilhas desse tipo "esquecidas" em cavernas por pesquisadores), e redes do tipo "Surber", para coleta de organismos bentônicos, muito eficientes e que, por este motivo, devem ser utilizadas com muita parcimônia. A determinação de um tempo ideal de amostragem também depende da experiência e conhecimento prévio do pesquisador, variando de acordo com os objetivos específicos do trabalho, as condições da caverna e os táxons alvo do estudo.

É importante enfatizar que, por se tratar de ambiente frágil, a coleta deve ser muito bem justificada e as populações, monitoradas, não só em virtude de interferências externas (poluição por meio da água, presença de inseticidas e metais pesados carregados pela chuva e rios subterrâneos e pelo solo), como também para acompanhamento dos impactos das coletas. Mesmo amostras pequenas podem vir a serem excessivas, como no caso de populações pequenas, endêmicas de um sistema ou área cárstica reduzida, sobretudo quando se trata de populações-fonte. Novamente, é a experiência do pesquisador que permite estabelecer o tamanho da amostra que representa uma solução de compromisso entre o mínimo necessário, o estudo e o número de exemplares que podem ser subtraídos de populações com um impacto aceitável. Note, ainda, que mesmo um número reduzido de exemplares coletados é injustificável se o projeto for cientificamente questionável, e/ou se esses exemplares vierem a ser perdidos, ou não estiverem disponíveis para a comunidade científica em geral (ver abaixo).

Cuidados especiais devem ser tomados com a limpeza de materiais e equipamentos, pois muitas doenças, em especial aquelas cujos agentes são fungos, bactérias e vírus podem ser trazidos para o ambiente por meio de materiais de estudo, como armadilhas, redes, puçás, equipamentos de espeleologia e mesmo calçados e roupas de equipes de pesquisadores. A rápida dispersão da WNS (Síndrome do nariz branco), gravíssima doença que vem dizimando populações cavernícolas de morcegos nos EUA, é um dos mais ilustrativos exemplos das graves consequências de ações antrópicas: além de propiciar a eclosão da doença ao despertar os indivíduos no meio da hibernação, o trânsito de humanos com equipamentos contaminados entre cavernas vem propiciando a expansão da doença.



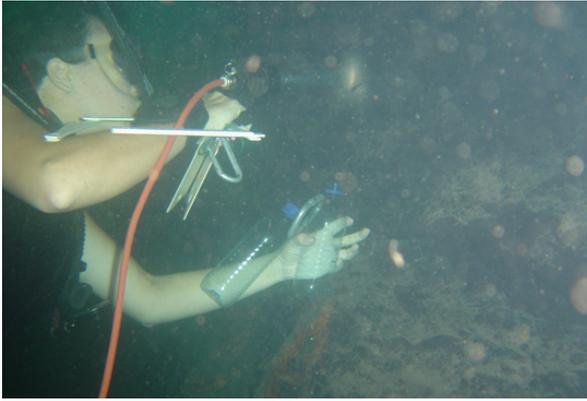
Figura 4.7. Aplicação de alguns métodos de captura de exemplares em cavernas, localizados por inspeção visual do habitat: a) Coleta manual de invertebrados em parede (acima e à esquerda) e guano (à direita). Fotos: Abel Perez Gonzalez.



a) Coleta manual em quadrados dispostos no solo. Fotos: Abel Perez Gonzalez.



c) Coleta de peixes e macroinvertebrados aquáticos com redes de mão, em bacia de travertino (à esquerda), em poças marginais (abaixo à esquerda) e em riacho (à direita). Fotos: Abel Perez Gonzalez.



d) Coleta subaquática de pequenos invertebrados em cavernas inundadas, por sucção em garrafa de plástico (à esquerda); uso de quadrado para censo visual de crustáceos (à direita). Fotos: Marcos Philadelphi.

Note que a solução para o problema de minimizar impactos não está em se coletar “um casal de cada espécie”, como consta em licenças de coleta emitidas por autoridades governamentais no Brasil, uma vez que esse tipo de exigência não é aderente à compreensão daquela que é a “matéria prima” da evolução, a variabilidade intrínseca a cada espécie. Tal variabilidade expressa-se, de forma visível, em diferenças, maiores ou menores, dependendo do grupo, entre sexos, faixas etárias e entre indivíduos da mesma faixa e sexo. Portanto, o que se busca é um equilíbrio entre um número de exemplares que possa ser subtraído da população, causando o mínimo possível de impacto, mas suficiente para uma identificação robusta, o mais conclusiva possível, feita por especialista na taxonomia do grupo em questão. Por isso, o coletor deve estar em contato permanente com os especialistas, a fim de conhecer as especificidades dos grupos.

O fato é que, com poucas exceções, a serem avaliadas por biólogos com ampla experiência e conhecimento prévio sobre biodiversidade, coletas são imprescindíveis, uma vez que, na grande maioria dos casos, a identificação precisa dos exemplares depende do exame de caracteres em um nível de precisão que exige que o mesmo esteja preservado, frequentemente dissecado e preparado com técnicas especiais e observado sob microscópio. Coletas podem ser dispensadas apenas no caso de áreas previamente estudadas, onde foram efetuadas pesquisas anteriores e o material já foi devidamente estudado, encontrando-se o mesmo em coleções oficiais, disponível a toda a comunidade científica (uma condição que deveria ser sine qua non para a concessão de licenças de coleta). Mesmo assim, a identificação em campo sem captura deve ser feita apenas por biólogos muito bem treinados no reconhecimento desses táxons já registrados e somente para aqueles cuja identificação macroscópica é possível. Isto porque há muitos casos em que, mesmo com estudos prévios, não é possível assegurar que não se encontre espécies semelhantes, porém distintas das já registradas, cuja distinção dependeria de estudos em laboratório. Em muitos casos, sequer a identificação em níveis taxonômicos mais elevados pode ser feita em campo. Por exemplo, nenhum especialista em Collembola arriscaria-se a identificar em campo, com 100% de certeza, famílias desses minúsculos “insetos” ápteros de solo. Tampouco existem especialistas brasileiros capazes de distinguir visualmente, com 100% de certeza, diplópodes das ordens Spirobolida e Spirostreptida, miriápodes que incluem os maiores “piolhos-de-cobra” do mundo. Infelizmente, esse tipo de má prática consistindo em identificações espúrias, sem possibilidade de verificação posterior, é frequente em estudos ambientais, estimulada pelo tempo insuficiente disponível para realizá-los ou pela pressa em concluí-los.

4.5.2 Identificação

Identificações taxonômicas confiáveis são fundamentais, pois não é possível conservar organismos que não identificados, e tentativas de entender as consequências das mudanças ambientais e da degradação estarão fatalmente comprometidas, se não for possível reconhecer e descrever as espécies que constituem as comunidades nos ambientes subterrâneos. A identificação consiste em atribuir um nome científico à entidade de interesse, normalmente um nome específico, o que não é tarefa trivial, pois esse nome contém informação biológica, filogenética. O reconhecimento de qualquer unidade taxonômica, como uma espécie bem delimitada, requer alto nível de conhecimento especializado, pois processos evolutivos como a convergência obscurecem as relações filogenéticas, levando a identificações errôneas. Um sistemata possui conhecimento suficiente em determinado grupo taxonômico, permitindo-lhe reconhecer unidades taxonômicas, com um grau de equívoco substancialmente menor que o do não especialista. É importante ressaltar que a necessidade de especialistas independe de haver um nome disponível para a espécie, pois só eles podem distinguir espécies reconhecidamente ainda não descritas – frequentemente citadas como “Nome-do-gênero’ sp. nov.” ou, mais corretamente, “sp. não descrita” – daquelas que não podem ser identificadas no momento, por estarem, por exemplo, inclusas em grupos sem resolução taxonômica apropriada (“Nome-do-gênero” sp.).

O treinamento de um taxonomista capacitado para identificações, nos níveis requeridos por listas faunísticas em estudos ambientais, leva de 5 a 10 anos, ou mesmo mais para grupos particularmente complicados e mal conhecidos. Por definição, e sobretudo em países de megadiversidade biológica, como o Brasil, não existem especialistas trabalhando simultaneamente em vários grupos distintos (Trajano et al., 2012).

Assim sendo, não é de se estranhar que haja escassez de taxonomistas, o que vem causando vieses nas listas de espécies compiladas para fins de monitoramento e manejo, especialmente em ambientes pouco estudados, como as cavernas. Os levantamentos, em sua maioria, são incompletos, quando não errados, no que diz respeito tanto à completude quanto à acurácia taxonômica, em função do chamado “impedimento taxonômico” (falta de identificações confiáveis devida à falta de taxonomistas). Esse impedimento taxonômico explica o aparecimento, principalmente em estudos ecológicos, das chamadas unidades taxonômicas reconhecíveis (RTUs, do inglês recognizable taxonomic units) ou unidades parataxonômicas, tais como morfoespécies e morfotipos, referidas por “Nome-do-gênero’ sp”. e associadas a números (sp. 1, sp. 2, ..., sp. n), quando se distingue mais de uma no mesmo gênero. Contudo, o reconhecimento e a distinção de morfoespécies só são confiáveis quando corroborados por um especialista, já que cada grupo tem suas peculiaridades taxonômicas (Trajano et al., 2012).

A parataxonomia, i.e., a separação de espécies com base em morfotipos, quando realizada por não especialistas só é aceitável na fase de triagem do material biológico, visando à separação de grupos para o encaminhamento aos respectivos especialistas e elaboração de relatórios iniciais, com o único objetivo de orientar o encaminhamento do estudo. Mesmo assim, como no caso das coletas, deve ser aplicada por biólogos com conhecimento sobre a variação nos grupos, capazes de reconhecer formas juvenis e distinguir sexos, de modo a não considerá-los como morfo-espécies distintas, produzindo listas faunísticas infladas. Exemplos desta má prática incluem a contabilização de indivíduos imaturos como pertencendo a espécies distintas das formas adultas, quando o procedimento correto seria desconsiderá-los, a menos que fosse possível, a partir de uma identificação inequívoca, confirmada por especialista, garantir que pertençam a grupo não registrado para adultos. Na realidade, tal procedimento carece totalmente de lógica, pois é altamente improvável que todas as formas juvenis pertençam a espécies distintas das dos adultos, sendo o oposto o esperado.

O uso da parataxonomia pode levar a superestimativas de riqueza de espécies, com erros que chegam a 100%, que dependem não apenas do grupo, como também da amostra e de quem faz a separação e o reconhecimento do material, de modo que sua amplitude é imprevisível, e, portanto, sem possibilidade de aplicação de índices de correção. A parataxonomia não satisfaz alguns critérios do método científico, criando unidades tipológicas, sem critérios definidos de separação, o que impossibilita qualquer falsificação da hipótese e qualquer repetição do experimento. Portanto, os resultados da parataxonomia devem ser encarados como primeiro passo nos estudos sobre biodiversidade subterrânea, podendo ser, com restrições, usados em comparações grosseiras das riquezas de espécies ou para descrições não-comparativas da riqueza em determinadas localidades. Tais dados, porém, não têm utilidade para estudos biogeográficos e autoecológicos, tampouco para inventários visando à seleção de áreas para fins de conservação. Isto inclui estudos ambientais para licenciamento de empreendimentos em áreas cársticas, que podem resultar na destruição de cavernas, uma vez que, nesses casos, os estudos devem ser absolutamente conclusivos quanto à improbabilidade estatisticamente significativa de inexistência de singularidades nessas localidades (Trajano et al., 2012).

Outra prática comum, que não deve ocorrer, é o uso de chaves de identificação regionais, sobretudo para a biota subterrânea. Em vista da natureza de refúgio do meio subterrâneo (cf. seção 4.4), é sempre possível, e mesmo provável, a ocorrência de táxons relictuais, geográficos ou mesmo filogenéticos, que conferem singularidade à caverna, mas que, por definição, não aparecerão nessas chaves. De fato, mesmo o uso de chaves em geral é apenas o primeiro passo, já que qualquer espécie pode ser nova ou, simplesmente, não ter sido incluída na chave publicada. Como regra, sobretudo em estudos em áreas que poderão sofrer impactos, todas as identificações devem ser confirmadas por especialistas.

Finalmente, para fins de conferência, é fundamental a disponibilização dos exemplares em coleções amplamente acessíveis, de instituições com serviço de curadoria independente dos especialistas do momento. As instituições garantem a continuidade do serviço, mesmo após a saída do pesquisador, assim como a fidedignidade e verificação das identificações, sua ampla divulgação para a comunidade científica e a disponibilização irrestrita para pesquisadores idôneos. Normalmente, essas condições são encontradas em museus oficiais.

4.5.3 Suficiência amostral

A. Número de réplicas:

Um problema central em qualquer estudo é o número mínimo de repetições necessárias a uma amostragem representativa do fenômeno investigado, as quais devem ser independentes. Por exemplo, em um experimento sobre a biologia, comportamento ou fisiologia de uma dada espécie, ou que vise a investigar um determinado processo, o número de réplicas, ou tamanho da amostra, é o número de indivíduos observados ou testados (manipulados experimentalmente). Em um estudo cujo objetivo é descrever a biodiversidade em uma área ou habitat, é o número de ocasiões independentes de amostragem. Neste ponto, é fundamental distinguir entre réplicas e pseudo-réplicas, uma vez que muitos estudos ambientais sobre cavernas vêm utilizando, de modo totalmente equivocado, pseudo-réplicas no cálculo da suficiência amostral, o que compromete totalmente suas conclusões. Conforme mencionado, réplicas são eventos independentes, enquanto pseudoréplicas referem-se a amostras retiradas do mesmo sujeito ou organizadas hierarquicamente, ou ainda a medidas correlacionadas espacial e/ou temporalmente (Lazic, 2010), portanto a eventos que não são estatisticamente independentes. Um exemplo é no caso de amostragens na mesma caverna, na mesma visita.

Comumente, usa-se a chamada “curva do coletor” para se definir a suficiência amostral e estimar o número de espécies. No entanto, seu formato está relacionado à ordem de entrada das unidades amostrais em sua construção, possibilitando a geração de curvas diferentes a cada ordenação. Ademais, a relação entre o eixo das abscissas e o das ordenadas influencia a percepção de uma eventual assíntota, a estabilização da tendência de variação. Uma solução é usar as chamadas “curvas de acumulação de espécies” (Ugland et al., 2003; Colwell et al., 2004), em que a ordem de entrada das unidades amostrais na sua construção é aleatorizada, o que produz alisamento da curva, permitindo calcular, para cada passo, uma média e um desvio-padrão do número de espécies na comunidade. Tais curvas estão bastante relacionadas às curvas de rarefação, em que se deduz o número de espécies que esperaríamos encontrar caso reduzíssemos o número de unidades amostrais. A construção dessas curvas de rarefação pode ser vista como um processo de interpolação da riqueza de espécies do conjunto total de amostras para a riqueza esperada para um subconjunto dessas amostras. No afã de estimar o número de espécies em uma determinada comunidade, muitos pesquisadores erroneamente buscam, visualmente, uma eventual assíntota na curva, o que não produz estimativas acuradas (Trajano et al., 2012). Cabe ao pesquisador buscar o mais adequado entre os métodos descritos na literatura, se houver, pois nem sempre os dados obtidos prestam-se às análises disponíveis – mais importante que aplicar métodos de análise é conhecer seus requisitos e limitações, só aplicando aqueles que sejam compatíveis com os dados. A aplicação de métodos inadequados, o que é extremamente frequente, compromete a robustez do estudo e a confiabilidade das conclusões. Por este motivo, os dados brutos, referentes à coleta (no mínimo, localidade com coordenadas e outros pontos de referência, data da coleta e nome dos coletores) e ao destino do material biológico, que deve ser depositado em coleções oficiais, cadastradas como fiéis depositários junto aos órgãos competentes, devem estar sempre disponíveis à comunidade científica, para verificação e reanálise.

Alta proporção de espécies raras em dado habitat pode resultar em subestimativa considerável de sua riqueza de espécies, pois tais espécies têm menor propensão de serem amostradas (justamente devido à sua raridade). São exatamente essas espécies raras que têm maior chance de serem extintas e cuja presença é critério de singularidade. Assim, levantamentos deveriam incorporar estratégias de busca adicionais para garantir que espécies “difíceis de serem capturadas” sejam amostradas. Uma vez que as espécies raras são importantes, cabe ao pesquisador aplicar esforço amostral intenso o suficiente para prever com acurácia razoável o número total de espécies em uma dada área (Trajano et al., 2012).

Não é possível fornecer uma indicação geral do esforço necessário para prever a riqueza de espécies de um sítio, uma vez que as curvas de acumulação de espécies são fortemente influenciadas pelas características do dado local. Não obstante, sabe-se que a riqueza de espécies não pode ser extrapolada acuradamente, qualquer que seja o método usado, a partir de um número pequeno de unidades amostrais (Trajano et al., 2012). Note aqui a impossibilidade matemática de dois pontos amostrais definirem uma curva. Dados de literatura, assim, como experiência profissional da autora deste capítulo, indicam que mais de 10 pontos (= ocasiões amostrais), distribuídos por vários ciclos anuais, são necessários para uma curva de acumulação atingir sua assíntota, que representa estabilização da amostragem, permitindo inferir sua suficiência em termos de número de coletas.

Se o conhecimento da diversidade é importante, então levantamentos rápidos e expeditos não são adequados para se estimar acuradamente a riqueza de espécies. É necessário adaptar os protocolos de coleta aos objetivos, às características da caverna e aos grupos a serem amostrados. De todo modo, o esforço amostral deverá ser intenso e as unidades amostrais deverão estar bem distribuídas no tempo e no espaço, cabendo ao pesquisador demonstrar que a amostragem foi suficiente.

B. Abrangência espacial:

Uma vez que a heterogeneidade de habitats influencia a estimativa do número de espécies, o esforço amostral deve levá-la em conta. Se em uma dada caverna há vários ambientes diferentes, a amostragem pode ser estratificada, lançando-se sistematicamente ou, de preferência, aleatoriamente, as unidades amostrais em cada estrato. Nesse caso, medidas de heterogeneidade e complexidade de habitats podem ser relacionadas ao esforço amostral exigido em cada estrato, fornecendo uma estimativa confiável do número de espécies (Trajano et al., 2012).

Um importante aspecto específico do estudo da biota subterrânea, sobretudo quando um dos objetivos é destacar suas singularidades e fragilidades, é a classificação das populações nas categorias de Schiner-Racovitza (segundo definição de Trajano, 2012). Para tal, é fundamental estudar também a fauna epígea na região, com foco nos grupos com representantes de possível ocorrência nas cavernas, para que possa aplicar corretamente os critérios que embasam o sistema de Schiner-Racovitza, que são de distribuição por habitat (hipógeo versus epígeo).

Logicamente, é impossível comprovar a ausência de ocorrência, de modo que a abordagem deve ser estatística, baseada também em suficiência amostral, por meio de testes separados daqueles realizados para as comunidades subterrâneas. Note que as coletas epígeas devem ser realizadas fora da área de influência da caverna sobre o meio epígeo, a fim de se evitar que a amostragem de populações sumidouro de espécies troglóbias na superfície resulte em uma classificação equivocada destas (que seriam erroneamente consideradas troglófilas). Por exemplo, no caso de ressurgências, deve-se coletar várias centenas de metros a jusante da ressurgência.

Também é importante ressaltar que, em muitos casos, conforme esperado em virtude da maior competição interespecífica, a densidade populacional de espécies com populações troglófilas é muito inferior no meio epígeo. Isto foi observado, por exemplo, para aranhas *Ctenus fasciatus*, aranhas troglófilas muito comuns no Alto Ribeira, SP, mas raras fora de cavernas (Pellegatti-Franco, 2004), o mesmo ocorrendo com o grilo troglófilo *Strinatia brevipennis*, a ponto deste ter sido erroneamente considerado como restrito a cavernas (Hoenen & Marques, 1998). Ou seja, para fins de classificação dos organismos subterrâneos nas categorias de Schiner-Racovitza, é esperado que o esforço amostral no meio epígeo seja superior ao empreendido no hipógeo. Por outro lado, como o meio epígeo é espacialmente mais acessível em termos de seus diversos componentes, esse esforço pode ser mais concentrado no tempo.

C. Abrangência temporal e periodicidade da amostragem:

Todo sistema biológico é dinâmico, ou seja, existe uma dimensão temporal igualmente determinante de suas propriedades e funcionamento. Portanto, um importante aspecto temporal da amostragem a ser considerado é a sua periodicidade. Um dos componentes temporais mais importantes dos ecossistemas naturais é a sazonalidade, que equivale a padrões com período de cerca de um ano ("circa-anuais"). Se a descrição e compreensão do funcionamento de um determinado ecossistema é o objetivo do estudo, este deve, necessariamente, incorporar a dimensão temporal em sua metodologia, sendo a sazonalidade um ritmo amplamente reconhecido como de grande importância. Ora, a cronobiologia (estudo dos ritmos biológicos) mostra que, para determinar um ritmo com um determinado período, por exemplo, o sazonal, que tem o período de um ano, é necessário estudar pelo menos três vezes esse período. Ou seja, para fins de compreensão da sazonalidade, três anos é a duração mínima recomendada para estudos ambientais. É indiscutível que estudos ambientais para empreendimentos em áreas cársticas enquadram-se aqui (Trajano & Bichuete, 2010).

Além disso, para uma efetiva compreensão desse dinamismo, é necessário efetuar amostras em diferentes épocas do ciclo anual, espaçadas temporalmente de forma regular – não adianta concentrar as ocasiões de amostragem em um curto intervalo de tempo, como é frequentemente feito em estudos ambientais em uma tentativa metodologicamente equivocada de abreviar o tempo de estudo, já que uma eventual assíntota refletiria apenas uma situação pontual. Considerando que o total de réplicas será utilizado em testes de suficiência amostral, como aqueles que envolvem a construção de curvas de acumulação de espécies, pode-se pensar em 4 - 6 ocasiões de coleta por ciclo anual, ocorrendo a cada três ou dois meses. Um bom desenho amostral incluiria coletas no início, meio e fim das estações chuvosa e seca, repetidas ao longo de, no mínimo, três anos. A Figura 4.8 ilustra um estudo de caso em que cinco ou mais ocasiões de coleta não constituíram amostra suficiente, demonstrando a importância de uma abrangência temporal adequada.

Deve-se ressaltar que três anos é o mínimo: se houver discordância nos resultados obtidos entre esses três anos iniciais de estudo, significa que pelo menos dois deles foram atípicos, sendo necessários ciclos anuais subsequentes para a detecção de padrões de funcionamento dos ecossistemas investigados. Esta medida é de especial importância quando entre os objetivos do estudo está a classificação de cavernas para fins de avaliação da importância de impactos.

Há mais: flutuações sazonais, circa-aneais, são apenas um tipo de variação temporal de médio a longo prazos a que estão sujeitos os ecossistemas subterrâneos. Flutuações com períodos maiores, de mais de um ano, ditas infra-aneais, têm sido registradas em várias cavernas estudadas no Brasil (Trajano, 2013). Tais flutuações parecem ser mais frequentes em cavernas com corpos d'água permanentes ou temporários, em regiões com diferenças acentuadas entre as estações do ano. Porém, também vem sendo observadas em cavernas ou condutos secos com presença importante de morcegos, ao menos em alguns períodos. Assim sendo, claro exemplo da necessidade de estudos espeleobiológicos de médio a longo prazos são as tentativas de se caracterizar ecossistemas subterrâneos com base em aspectos pontuais, como manchas de guano e outros substratos instáveis. Há fortes evidências da ocorrência de variações temporais na distribuição, localização específica e permanência dessas manchas, como decorrência da frequente itinerância das colônias de morcegos cavernícolas, sobretudo em áreas com alta diversidade de abrigos em rocha (Quadro 4.1). Do mesmo modo, é comum observar acentuadas alterações na distribuição de substratos ripários (à beira d'água) e mesmo de bancos de sedimento não tão próximos assim de rios, sobretudo após anos muito chuvosos (Trajano & Bichuette, 2010).

Concluindo: é imprescindível que sejam discriminados e exigidos métodos de teste de suficiência amostral (ver, p. ex., Lehmann & Romano, 2006; Pillar, 2006), que demonstrem estatisticamente que o estudo realizado é conclusivo para os objetivos do mesmo. O desenho experimental deve contemplar os seguintes critérios:

- 1) Coleta e identificação por profissionais qualificados. O material deve ser identificado por especialistas nos respectivos grupos e depositado em coleções oficiais, com serviço de curadoria.
- 2) Representatividade da amostra (números de ocasiões de amostragem) deve ser testada no que diz respeito a, pelo menos, riqueza de espécies, o que atualmente é feito por meio de curvas de rarefação de espécies, utilizando-se réplicas (não pseudo-réplicas). Não há como estabelecer este número previamente, pois cavernas são singulares e cada sistema demanda uma frequência de amostragem própria.
- 3) Representatividade espacial: o estudo deve abranger todo o sistema e todos os habitats, assim como o meio epígeo, para fins de comparação.
- 4) Representatividade temporal: o estudo da sazonalidade passa necessariamente por, pelo menos, três ciclos anuais, i.e., três anos de amostragem em todas as estações, com amostragens regularmente espaçadas em cada ano.

Finalmente, é fundamental ter em mente que empreendimentos individuais têm efeito acumulativo, que deve ser sempre levado em consideração, cada vez que um empreendimento é licenciado. Se ocorrer qualquer tipo de impacto, reversível ou não, muda-se as condições de análise para os demais. Assim sendo, análises de projetos simultâneos, do mesmo ou de distintos empreendedores, devem ser feitas de modo integrado, complementar. Por exemplo: uma espécie ou um sistema pode não ser ameaçado por cada empreendimento individual, mas, na somatória, os impactos podem ser altamente relevantes. Portanto, deve ser sempre aplicado o conceito de **complementaridade**.

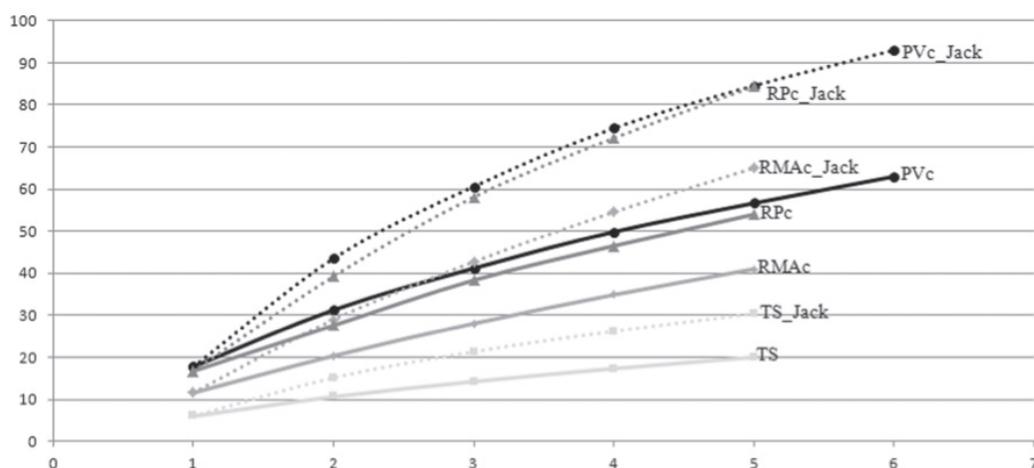


Figura 4.8. Dados de Gallão & Bichuette (2015) que mostram o resultado de levantamentos faunísticos em cavernas areníticas de Igatu, BA. Apesar da tendência à estabilização, cinco ou mais ocasiões de coleta não foram suficientes para que as curvas de rarefação do número de espécies registradas em cada caverna atingissem a assíntota.

4.6. ÁREA DE INFLUÊNCIA SOBRE CAVERNAS

Como toda caverna, ou sistema de cavernas, é único, torna-se lógico pensar que sua área de influência também será única, dependendo das características e do funcionamento desse sistema, podendo inclusive variar temporalmente, cerca e infra-anualmente. Portanto, qualquer área pré-determinada imposta pela legislação é arbitrária, e apenas por mero acaso poderia corresponder à área real de influência sobre uma cavidade. Ou seja, a determinação de áreas de influência sobre cavernas depende sempre de estudos caso a caso, realizados dentro dos critérios expostos na seção 4.5.

Em primeiro lugar, é importante que sejam estudos temáticos, integrados aos demais estudos sobre o impacto ambiental do empreendimento, incluindo, entre outros:

- A identificação da zona de recarga hídrica (fluxo concentrado e ou difuso) e descarga da cavidade.
- Mapeamento dos demais sistemas subterrâneos localizados na região, os quais podem interagir com a caverna em foco.
- Estudos sobre possível conectividade com outras cavernas e sistemas, que podem ser baseados em traçadores químicos ou biológicos (ocorrência das mesmas espécies – estudos taxonômicos morfológicos e moleculares).

A extensão da área de influência é função direta do tipo e dinâmica de aporte de recursos. No caso da água como agente desse aporte, as características e delimitação do sistema cárstico (ou sistema subterrâneo) são um dos aspectos mais relevantes, uma vez que interferências a montante são as de maior impacto sobre a caverna, como a poluição das águas e o assoreamento causado por desmatamento. Portanto, a área de influência sobre uma cavidade abrange toda a área de recarga do sistema, i.e., toda a drenagem a montante da mesma.

Trogloxenos, como o caso clássico dos morcegos e outros acidentais, representam fontes de nutrientes que, em muitos casos, atingem elevado grau de importância - há comunidades subterrâneas, sobretudo entre aquelas de cavernas permanentemente secas, que dependem quase que totalmente do aporte de alimento proporcionado por troglóxenos, como o guano de morcegos. Portanto, a determinação da área de influência passa necessariamente pelo estudo da **distribuição e ecologia da quiropterofauna** (ver Quadro 4.1) e de outros troglóxenos que venham a ser reconhecidos como componentes importantes da fauna hipógea.

No caso de cavernas superficiais, onde raízes de plantas epígeas aparecem, podendo constituir elementos importantes no aporte de recursos tróficos (o levantamento faunístico na caverna indicará se este é o caso), esses **sistemas radiculares** também deverão ser levados em consideração nos estudos, com vistas ao reconhecimento das espécies vegetais dessas raízes, visando à sua proteção no meio epígeo.

Um problema importante a ser considerado, o qual interfere no aporte de nutrientes, mas não apenas neste, são os **impactos causados pelo uso do solo** e que devem ser equacionados quando da determinação da área de influência. Assim, é área de influência sobre uma caverna, ou sistema subterrâneo, aquela cujo desmatamento provocar:

- carreamento de sedimentos para o interior da cavidade, causando assoreamento ou outros tipos de alterações não naturais no habitat;
- **diminuição no aporte de nutrientes** (p. ex., detritos vegetais, animais e matéria orgânica em geral, carregada durante enxurradas);
- **modificações no espeleoclima** etc.

A estimativa dessa área depende não apenas de observações espeleobiológicas, como também de estudos da flora, do relevo e do clima local e regional.

4.7. CONSERVAÇÃO

Conservação visa preservar amostras representativas da biodiversidade, seus processos e padrões. Esta definição traz um conceito fundamental: a biodiversidade é resultado de processos e padrões evolutivos e, portanto, estes devem ser o foco da conservação. Não simplesmente a dita diversidade alfa, ou seja, a diversidade de espécies, expressa na forma de listas de espécies, como vem sendo feito, o que é superficial e simplista, incompatível com a complexidade e beleza dos fenômenos naturais.

O isolamento genético, seguido de diferenciação sob um regime seletivo muito contrastante em relação àquele em que a grande maioria das espécies vem evoluindo, associado à fragmentação do meio subterrâneo levando a altas taxas de endemismo, resulta em uma alta diversidade biológica nesse ambiente, do nível interindividual, em termos de diversidade genética expressa em diversidade morfológica, fisiológica, comportamental, bionômica e autoecológica (os dois últimos referem-se ao ciclo de vida e história natural) ao ecossistêmico. Este último inclui a contribuição da diversidade alfa (= riqueza de espécies em uma dada localidade/caverna) para a diversidade gama (= regional total), mais importante que a diversidade alfa em si, assim como a diversidade filogenética e a funcional. A diversidade filogenética diz respeito ao número de grandes grupos (Ordens, Famílias etc.) pelos quais as espécies se distribuem, sendo que, quanto maior a proporção de grandes grupos em relação às espécies em si, maior a diversidade filogenética. A diversidade funcional diz respeito à diversidade de funções ecológicas dentro de cada grupo.

Embora a diversidade alfa das comunidades subterrâneas em si seja geralmente baixa quando comparada com comunidades epígeas ocupando áreas similares, sua contribuição relativa para a diversidade gama é bem maior devido à presença das espécies troglóbias, em geral com áreas de distribuição muito pequenas (= altamente endêmicas). Do mesmo modo, a diversidade filogenética tende a ser bem mais alta que a das comunidades epígeas pela exclusão de espécies proximamente aparentadas. Enquanto no meio epígeo é comum encontrar gêneros com muitas espécies e famílias com muitos gêneros, isto é raro no meio subterrâneo, o que "dispersa" as poucas espécies por muitos grandes grupos. Além disso, devido à escassez alimentar no meio subterrâneo, muitas vezes animais do mesmo grande grupo (p. ex., isópodes Oniscidae da mesma família), com nichos ecológicos superpostos no meio epígeo, tendem a separar seus nichos, o que leva a modificações, ainda que sutis, na morfologia. Com isso, a diversidade funcional nas comunidades subterrâneas aumenta.

Concluindo, todos os aspectos acima apontados conferem importância aos ecossistemas subterrâneos e devem ser considerados e analisados para fins de conservação.

Do ponto de vista da espécie ou população, os troglóbios são particularmente vulneráveis a perturbações antrópicas, que ocorrem em escalas temporais muito curtas, incompatíveis com a capacidade de adaptação evolutiva dessas populações às novas condições ambientais. Entre os fatores de vulnerabilidade estão o ciclo de vida tendendo ao tipo K (adaptação à disponibilidade de nutrientes baixa e flutuante), levando a uma reposição populacional lenta em caso de declínios, por causas naturais ou não, à perda de tolerância a flutuações ambientais e, pelo menos no caso de muitos peixes, à perda das reações de evitação de estímulos potencialmente lesivos, como a presença de predadores, incluindo os humanos (que não existem naturalmente para esses animais no seu habitat). Ou seja, troglóbios são intrinsecamente organismos muito frágeis, potencialmente ameaçados, embora o nível de ameaça varie dependendo do contexto. Quase todos os troglóbios enquadram-se nos critérios usados para a elaboração de listas de espécies ameaçadas, entrando, pelo menos, na categoria Vulnerável.

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

QUADRO 4.2. NEM TODOS OS TROGLÓBIOS SÃO CAVERNÍCOLAS: o caso de *Stygichthys typhlops*, peixe altamente especializado e ameaçado.

Stygichthys typhlops, conhecido localmente como piaba-branca, é um pequeno peixe subterrâneo de águas freáticas, atualmente acessível apenas por meio de cacimbas e poços artificiais em área cárstica do norte de Minas Gerais. Além de se destacar por ser altamente especializado, um dos mais troglomórficos do Brasil, esse é o único peixe troglóbico sulamericano da Ordem Characiformes, de distribuição neotropical (nesta ordem estão peixes como lambaris, piabas, piranhas, corimbatás, piaus, dourados, piraputangas, traíras etc); os únicos outros caraciformes troglóbicos conhecidos são os intensivamente estudados lambaris cegos mexicanos do gênero *Astyanax*. *S. typhlops* é tão modificado morfológicamente que sua posição taxonômica na família dos lambaris ainda não está bem estabelecida. Além da extrema redução dos olhos e pigmentação mecânica, esses peixes apresentam uma série de troglomorfismos morfológicos e comportamentais associados ao longo tempo de isolamento no meio subterrâneo e à adaptação à vida no habitat freático, incluindo adaptação para respiração em meio pobre em oxigênio (coloração rosa quando no ambiente natural), redução da linha lateral no corpo (relacionado à vida em espaço estreitos), regressão avançada da ritmicidade circadiana locomotora, canibalismo, provavelmente como modo de regulação da população, entre outros, o que justifica seu altíssimo interesse científico e, conseqüentemente, para conservação.



Acima *Stygichthys typhlops*. Foto: Dante Fenolio; à esquerda, poço artificial dando acesso ao habitat de *S. typhlops*, mostrando ictiólogo em coleta de exemplares com rede de mão. Foto: Maria Elina Bichuette.

No entanto, este troglóbico freático de relevância internacional encontra-se altamente ameaçado pelo bombeamento indiscriminado de água para uso em agricultura extensiva, o qual vem provocando o rápido rebaixamento do lençol freático na região (Moreira et al., 2009), que também prejudica as famílias da zona rural e periurbana sem recursos para a abertura dos custosos poços artesianos. Este é um exemplo ilustrativo das consequências negativas do uso não sustentável de águas subterrâneas.

Ainda, como a espécie só é acessível atualmente através de poços artificiais (há notícias de que, há algumas décadas, existiam piabas brancas em uma pequena gruta, a qual foi entulhada para expulsão dos morcegos hematófagos que aí viviam), sua proteção não é garantida pela legislação brasileira, restrita a cavernas. Um claro exemplo da inadequação da legislação ambiental, que só leva em consideração cavernas, as quais, como já discutido, são componentes do meio subterrâneo definidos com base em um conceito antropocêntrico operacional, sem qualquer significado biológico. Com isto, permanecem sem proteção legal de fato não só espécies que, como *S. typhlops*, não têm ocorrência registrada em cavernas, como também aquelas que, embora aparecendo em cavernas, necessitam de uma área muito mais abrangente de habitats não cavernícolas para a manutenção de populações efetivas mínimas necessárias para sua sobrevivência. É necessário, portanto, uma mudança de foco na legislação que visa à conservação dos sistemas subterrâneos, da caverna para o habitat subterrâneo como um todo.

REFERÊNCIAS

- Colwell, R.K., Mao, C.X. & Chang, J. 2004. Interpolating, extrapolating, and comparing incidence-based species accumulation curves. *Ecology* 85(10): 2717-2727.
- Fundação Florestal & Ekos Brasil, 2010 – *Plano de manejo espeleológico das cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira*. Secretaria do Meio Ambiente, São Paulo, 460 p.
- Hoenen, S.M. & Marques, M., 1998. Circadian patterns and migration of *Strinatia brevipennis* (Orthoptera: Phalangopsidae) inside a cave. *Biological Rhythm Research*, 29: 480-487.
- Juberthie C. The diversity of the karstic and pseudokarstic hypogea habitats in the world. In: Wilkens, H, Culver DC, Humphreys WF, editors. Subterranean ecosystems. Ecosystems of the world. 2000; 30: 17-39.
- Lazic, S.E., 2010. The problem of pseureplication in neuroscientific studies: is it affecting your analysis? *BMC Neuroscience* 11:5.
- Lehmann, E.L. & Romano, J.P., 2006 (3rd ed.). *Testing Statistical Hypotheses*. Springer Texts in Statistics, Springer.
- Makalowicz, M. (2004). The epikarst, the skin of karst. In: Jones, W.K. et al. (eds.). *Epikarst*. Karst Waterw. Inst. Spec. Publ. 9, Charles Town.
- Pellegatti-Franco, F. 2004 Biologia e ecologia populacional de *Ctenus fasciatus* Mello-Leitão e *Enoploctenus cyclothorax* (Bertkau) em cavernas do Alto Ribeira, Iporanga, SP (Araneae: Ctenidae). Instituto de Biociências, São Paulo. Tese de Doutorado, 136 p.
- Pillar, V.P., 2006. Suficiência amostral. In: Bicudo, C.E.M. & Bicudo, D.C. (eds.). *Amostragem em Limnologia*. RiMa Ed., São Carlos.
- Trajano, E. 1996. Movements of Cave Bats in Southeastern Brazil, with Emphasis on population Ecology of Common Vampire Bat, *Desmodus rotundus* (Chiroptera). *Biotropica*, 28 (1): 121-129.
- Trajano, E. 2012. Ecological classification of subterranean organisms. In: White, W. B. & Culver, D.C. (eds.). *Encyclopedia of Caves*. Academic Press, Waltham, p. 275-277.
- Trajano, E. 2013. Variações anuais e infra-anuais em ecossistemas subterrâneos: implicações para estudos ambientais e preservação de cavernas. *Revista da Biologia*, 10(2): 1-7.
- Trajano, E. & Bichuete, M.E. 2010. Relevância de cavernas: porque estudos espeleobiológicos não funcionam. *Espeleo-Tema*, 21(1): 105-112. Disponível em http://www.cavernas.org.br/espeleo-tema/espeleo-tema_v21_n1_105-112.pdf.
- Trajano, E., Bichuete, E.; Batalha, M.A. 2012. Estudos ambientais em cavernas: os problemas da coleta, da identificação, da inclusão e dos índices. *Espeleo-Tema*, 23(1): 15-24. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/espeleo-tema/espeleo-tema_v23_n1_013-022.pdf.
- Ugland, K.I., Gray, J.S. & Ellingsen, K.E. 2003. The species-accumulation curve and estimation of species richness. *Journal of Animal Ecology*, 72: 888-897.
- Ward JV, Malard F, Stanford JA & Gonser T., 2000. Interstitial aquatic fauna of shallow unconsolidated sediments, particularly hyporheic biotopes. In: Wilkens, H, Culver DC, Humphreys WF, editors. Subterranean ecosystems. Ecosystems of the world. 2000; 30: 41-58.

CAPÍTULO 5:

PALEONTOLOGIA

Francisco Macedo Neto
Luiz Carlos Borges Ribeiro

5.1. NOÇÕES E CONCEITOS DA PALEONTOLOGIA

A Paleontologia é também conhecida como a ciência dos fósseis. A origem do nome vem da junção de palavras gregas: palaios (antigo), ontos (ser) e logos (estudo). Assim, é a área do conhecimento que estuda os seres antigos, ou seja, os fósseis. Originada da palavra fossilis, em Latim (extraído da terra), são restos ou evidências indiretas de organismos vivos que ficaram preservados ao longo do tempo. Englobam todos os seres que habitaram a Terra, desde bactérias unicelulares até os grandes mamíferos extintos durante a última glaciação (também conhecida como “Idade do Gelo”, interface Pleistoceno/Holoceno, há aproximadamente 11.000 anos). Ossos, dentes, troncos, conchas, pólenes, pegadas, ovos, excrementos, resinas vegetais, colônias de bactérias, algas e impressões são alguns dos materiais encontrados preservados. Convencionou-se chamar de fóssil àqueles com idade mínima de 11.000 anos ou que já tenham sido extintos. Os exemplares com idades inferiores a esta são conhecidos como sub-fósseis.

Mesmo antes de Cristo, os fósseis já eram conhecidos. Acreditava tratar-se de esculturas e brinquedos deixados por criação divina. Somente a partir dos estudos de Charles Darwin (1809 – 1882) e de sua famosa teoria da evolução das espécies, é que os fósseis se tornaram peças fundamentais para a compreensão das diversas modificações pelas quais os organismos têm passado até os dias atuais (*Figura 1*).

A Paleontologia pode ser considerada como uma ciência recente, principalmente por ter sido consolidada apenas no início do século XIX, por meio da organização das primeiras sociedades científicas paleontológicas. Porém, o primeiro registro de publicação científica sobre um fóssil brasileiro data de 1797, por Domingos Vandelli, naturalista italiano atuante em Portugal. Já a primeira publicação em revista brasileira é datada de 1856, por Frederico Burlamaqui, naturalista considerado o primeiro paleontólogo brasileiro e que foi por vinte anos diretor do Museu Nacional do Rio de Janeiro (*Figura 1*). A Paleontographical Society of London, uma das primeiras sociedades da área, atuante até hoje, publicou sua primeira monografia em 1847.

Conhecido como o pai da paleontologia brasileira, o dinamarquês Peter Wilhelm Lund, por meio de seus estudos da fauna pleistocênica das cavidades calcárias da bacia do rio das Velhas, em Minas Gerais, realizados entre 1835 e 1846 (Lopes, 2010), trouxe grande conhecimento acerca dos fósseis desta região, em especial os relacionados aos ambientes cársticos, descrevendo inúmeras novas espécies. Grande parte desses achados está depositada no Museu de História Natural de Copenhague, em sua terra natal. No entanto, uma pequena porção e exemplares de homínidos sem grande relevância foi cedida, em uma cooperação entre Copenhague e Minas Gerais, para exposição temporária no Parque Estadual do Sumidouro, sem data prevista para retorno à Dinamarca.

A Terra tem uma idade de 4,6 bilhões de anos e, pelo que se sabe, a vida iniciou-se há cerca de 3,8 bilhões de anos. Já os primeiros homínidos apareceram somente há cerca de 8 milhões de anos. Compreender a evolução biológica ao longo desse longo período não tem sido uma tarefa fácil, haja vista ser o registro fóssil fragmentado e incompleto. Assim, a principal importância dos estudos da paleontologia é entender este passado distante, como evoluíram, extinguíram-se ou perduraram populações de diferentes organismos, as alterações climáticas, geográficas e também químicas do planeta, para que um dia, quem sabe, seja possível tentar antever como será o futuro.

É importante a guarda e preservação deste patrimônio paleontológico, além da incansável busca por novas informações, sem deixar de lado a divulgação desta área das ciências. Um papel fundamental tem sido executado por diversos museus e centros de pesquisa na difusão e popularização deste conhecimento, que encanta e incentiva pessoas de todo o mundo a refletir sobre o passado do planeta e sua contribuição para o futuro.

Um dos maiores questionamentos da ciência dos fósseis é a de como estes registros de vida ficaram preservados por milhares e até bilhões de anos. No ciclo natural, a morte é seguida pela decomposição, auxiliada pelas atividades de organismos necrófagos (decompositores) e da ação oxidante do ar, levando a uma completa destruição das partes moles. Continuado o processo, as partes duras também são destruídas.

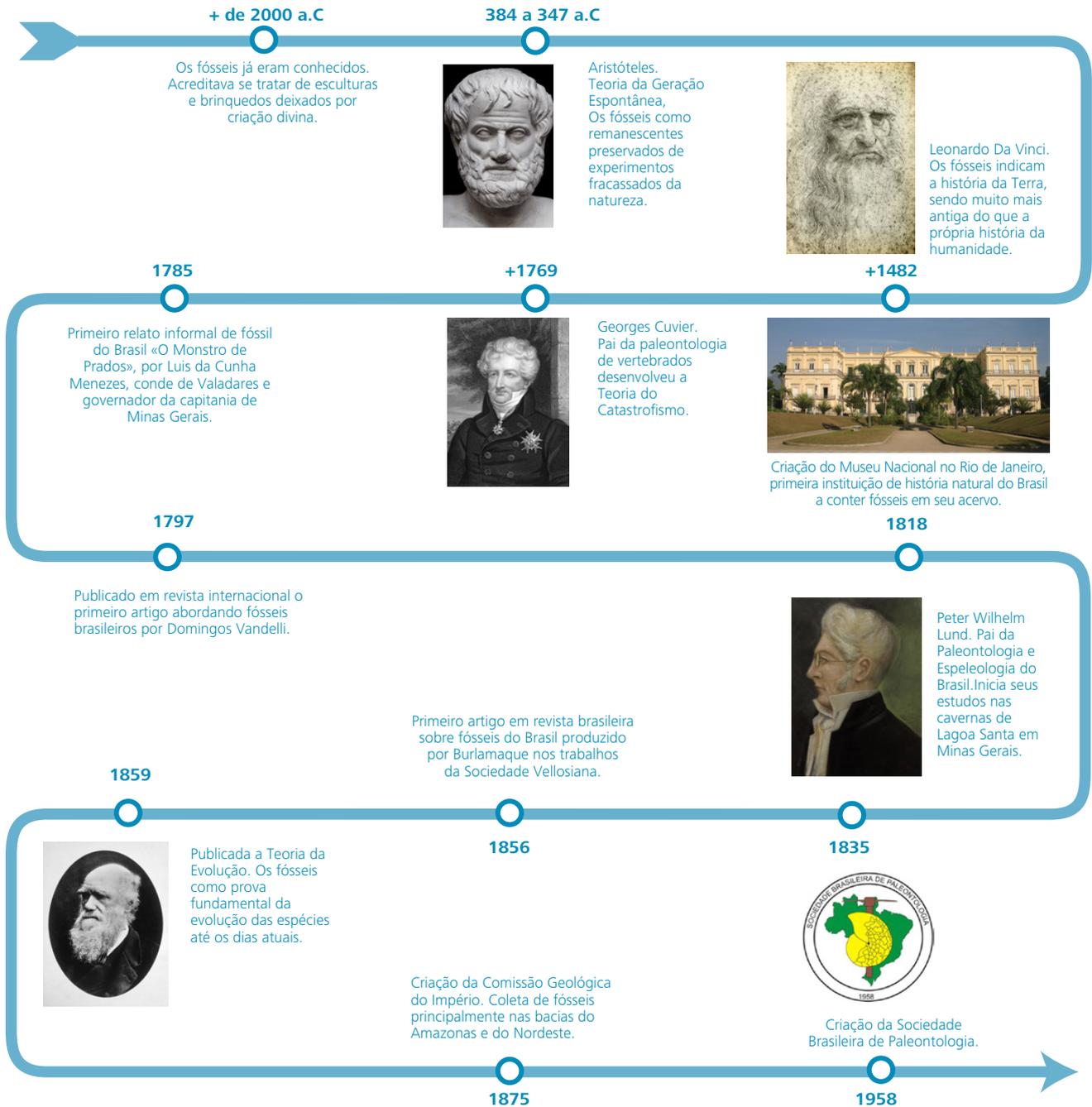


Figura 1. Linha do tempo da evolução do conhecimento paleontológico. Aristóteles, Foto: Mohamed Osama; Leonardo da Vinci, Foto: Jakub Krechowicz; Georges Cuvier, Foto: Georgios Kollidas; Museu Nacional, Foto: Antonio Carlos Sequeira Fernandes; Retrato de Peter W. Lund, pastel sobre papel de Honório Esteves (1903), Acervo do Museu Mineiro, Foto: Luciano Faria; Charles Darwin, Foto: Samuel Lock & George Whitfield, Acervo Everett Historical.

A fossilização consiste na quebra deste ciclo. É, portanto, um fenômeno raro, uma excepcionalidade. Às vezes apenas um indivíduo ou fragmento dele, entre centenas e milhares, é preservado até os dias atuais.

A maior parte dos fósseis está associada às rochas sedimentares, ou seja, àquelas formadas pela litificação (endurecimento) dos sedimentos (areia, argila, cascalhos, evaporação de líquidos ricos em sais dissolvidos) por processos de compressão e cimentação. As rochas metassedimentares, resultantes de processos geológicos (aquecimento e pressão em grandes profundidades) atuantes sobre rochas sedimentares, também podem ser portadoras de importantes jazimentos fossilíferos, a exemplo dos metacalcários e mármore. As rochas ígneas raramente podem preservar fósseis, com exceção daquelas resultantes da deposição de cinzas vulcânicas (tufo vulcânico).

Para que um registro de vida se fossilize, é necessário, então, que um conjunto de processos físicos, químicos e biológicos atuem. Dentre os principais fatores que possibilitam a fossilização estão: o soterramento rápido, a ausência de oxigênio e de eventos mecânicos destrutivos após a morte, a composição química dos líquidos envolvidos no sepultamento, as condições climáticas existentes naquele momento e, por final, o ambiente de vida e morte do organismo (*Figura 2*).

Neste processo, as partes duras, que podem ser substituídas por minerais, como ossos, dentes, conchas e quitina, são mais facilmente preservadas. Raros são os fósseis com preservação de tecidos moles como pele, vasos sanguíneos e músculos.

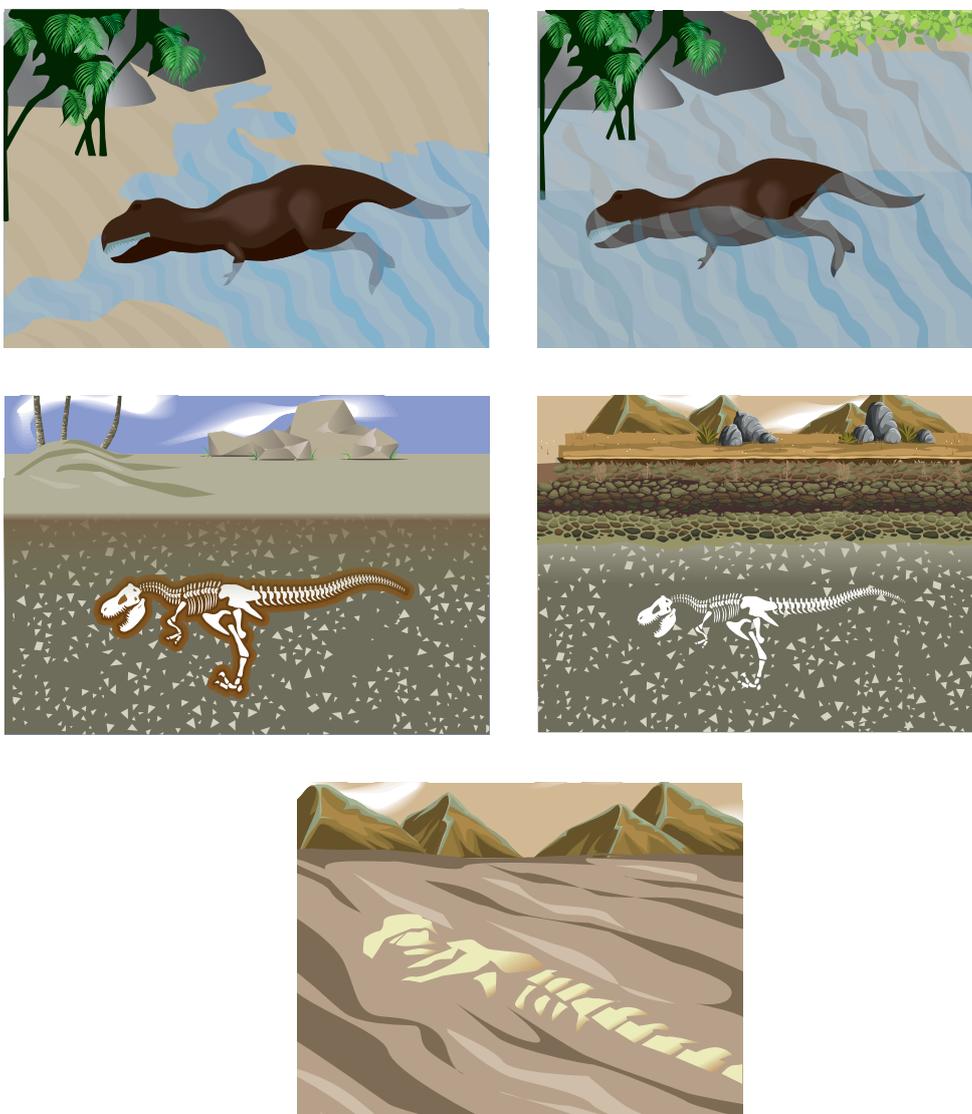


Figura 2: Etapas envolvidas no processo de fossilização. Ilustração: Daniel Borges. Modificado de Reis (2008).

Dentre as melhores formas de preservação estão a Mumificação e o Aprisionamento, onde os indivíduos mantêm-se praticamente inalterados. Na **Mumificação**, o organismo sofre rápida desidratação em ambientes muito áridos (Figura 3 esquerda). O **Aprisionamento** ocorre quando há preservação em substâncias como resinas vegetais (âmbar) (Figura 3 direita), lagos asfálticos naturais e gelo.



Figura 3. Pele de *Mylodon* mumificada (esquerda) e âmbar com pequenas inclusões (direita). Fotos: Thiago da Silva Marinho

A **Mineralização**, ou **Substituição**, é um processo de transformação química do organismo original no qual a matéria orgânica é substituída por minerais como a calcita, sílica e outros.

A **Permineralização** é semelhante à Mineralização, porém os minerais solubilizados como a calcita e a sílica preenchem o interior das células e cavidades do organismo original, preservando-o. A grande maioria dos fósseis encontrados é resultante deste processo. Compõem bons exemplos os pterossauros do Nordeste do Brasil, na região do Araripe, os dinossauros e crocodilos do Triângulo Mineiro e os troncos fósseis do Tocantins (Figura 4).

A Incrustação é um processo em que soluções salinas, normalmente carbonáticas, em contato com os restos de um organismo, precipitam e cristalizam-se em sua superfície, revestindo-a por completo, preservando assim a parte dura (Figura 5). Esse é o principal processo de fossilização nos ambientes cavernícolas.

A Recristalização ocorre quando os minerais de um organismo sofrem alteração na forma cristalina para estruturas mais estáveis, permitindo sua preservação. Neste processo ocorre a transformação mineralógica, como no caso da calcita – aragonita sem, contudo, haver a modificação da composição química do organismo.

Carbonificação, também conhecida como Incarbonização, ocorre geralmente em vegetais (folhas) ou animais com esqueletos quitinosos, como os insetos. Forma-se a partir do enriquecimento progressivo do carbono em relação aos demais elementos da matéria orgânica. Geralmente são encontrados na forma de películas finas, por sofrerem compressão devido ao depósito de sedimentos durante a fossilização (Figura 6).

A **Moldagem** não preserva o organismo em si, mas sim sua forma. Neste processo, tanto a parte interna quanto a parte externa podem ser moldadas. Ocorre geralmente em conchas. (Figura 7).

Um tipo diferente de modelagem é conhecido como Impressão, em que estruturas finas deixam marcas em sedimentos moles, como a argila, e estes sofrem processos geológicos conhecidos como diagênese, nos quais os sedimentos se transformam em rocha, deixando então preservadas as marcas. Ocorrem na forma de impressões: folhas, penas, asas de insetos e outras partes delicadas.

Por último, os registros indiretos das atividades biológicas tais como Marcas e Vestígios. Estão inseridos nestes processos: marcas, pegadas, rastros, perfurações, tubos, ovos, excrementos como urina e fezes de animais, ninhos, tocas e outros (Figura 8).



Figura 4. Fragmento de tronco de *Tietea singularis*, de idade Permiana (280 ma), fossilizado por permineralização de sílica, encontrado em arenitos da Formação Pedra de Fogo no estado do Maranhão. Foto: Luiz Carlos Borges Ribeiro – Acervo GeoPac Consultoria Ambiental.



Figura 5. Crânio de *Eira barbara* com incrustação de carbonato de cálcio. Foto: Castor Cartelle.



Figura 6. *Krauselcladus brasiliensis* preservadas em arenitos da Formação Teresina (Permiano da Bacia do Paraná – 260 milhões de anos) Foto: Luiz Carlos Borges Ribeiro - Acervo GeoPac Consultoria Ambiental.



Figura 7. Impressão de Orbiculoidea com 2cm de diâmetro, encontrada na Formação Ponta Grossa (Devoniano da Bacia do Paraná, 380 ma). Foto: Francisco Macedo Neto – Acervo GeoPac Consultoria Ambiental.

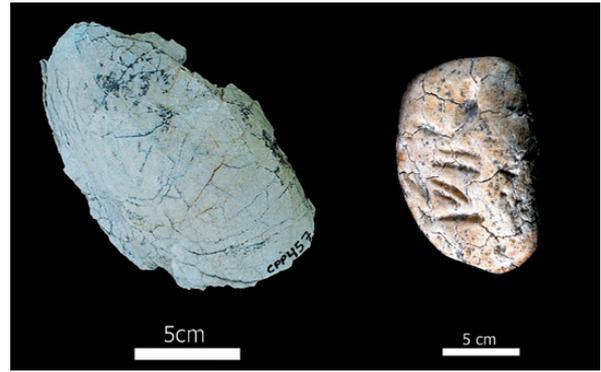


Figura 8. Ovo (esquerda) relacionado à Titanosauria e Ichno-marcas (*Asthenopodichnium fallax*) produzidas por bivalves e presentes em rochas carbonáticas (direita), atribuídos à Formação Marília – (Cretáceo superior) encontrados no município de Uberaba, MG (Ribeiro et al., 2012). Foto: Francisco Macedo Neto – Acervo Centro de Pesquisas Paleontológicas Llewellyn Ivor Price.

5.2. O ESTUDO DA PALEONTOLOGIA E A IMPORTÂNCIA DOS FÓSSEIS

Os fósseis são as provas incontestáveis da presença de diversas formas de vida que habitaram o planeta em eras geológicas passadas. Seu estudo permitiu ao homem a descoberta da própria origem, bem como de muitas outras espécies agora extintas.

Por meio do estudo dos fósseis é possível: reconstituir ambientes e paisagens do planeta no passado, conhecer a idade dos estratos rochosos, pesquisar combustíveis fósseis, como o carvão e o petróleo, além de inúmeras aplicações no desenvolvimento cultural, social e econômico de populações.

Os fundamentos da paleontologia e seus princípios inserem-se tanto na Biologia quanto na Geologia. A Biologia é imprescindível para o estudo dos fósseis, já que eles são restos ou vestígios de antigos organismos. Já a Geologia possibilita o entendimento dos ambientes e cenários de vida no passado, pois a grande maioria dos fósseis é encontrada nas rochas.

5.3. A PALEONTOLOGIA E SUAS PRINCIPAIS SUBÁREAS

A paleontologia, tal como outras ciências, subdivide-se em várias áreas, dentre as quais estão: a Paleobotânica, Paleontologia de Invertebrados, Paleontologia de Vertebrados, Micropaleontologia, Paleocnologia, Tafonomia, Paleoclimatologia e Paleoecologia.

A **Paleobotânica** estuda as plantas fósseis, porém estas raramente são encontradas completas. Assim, os paleobotânicos dividem-se no estudo do lenho (partes como raiz e caules), das folhas e dos frutos. Os estudos dos vegetais fósseis são de fundamental importância para a reconstrução dos ecossistemas do passado remoto da Terra. Dentro da paleobotânica está o estudo dos pólenes e esporos fósseis (**Palinologia**), que possuem grande relevância por ser base para datações de estratos rochosos, estudos **paleoclimáticos e paleoecológicos**.

A **Paleontologia de Invertebrados**, que estuda fósseis como moluscos, braquiópodes, equinóides e conchostáceos, possibilita correlações estratigráficas entre bacias sedimentares distantes, fornecendo informações sobre os antigos ambientes de sedimentação.

A **Paleontologia de Vertebrados** é a área de maior apego popular. Concentra estudos de animais como peixes, anfíbios, répteis e mamíferos. Destes, os dinossauros têm destacada relevância, pois são os responsáveis maiores pela divulgação e popularização da Paleontologia para o público leigo, tornando-os, assim, fortes aliados no desenvolvimento social, cultural e econômico por meio do turismo.

Como ferramenta primordial para a prospecção de combustíveis fósseis, a **Micropaleontologia** tornou-se uma área de grande interesse econômico, podendo ser utilizada nas datações e correlações estratigráficas. Os objetos de estudo são os microfósseis, como foraminíferos, radiolários, diatomáceas, pólenes e esporos.

A **Paleocnologia** estuda os vestígios da atividade biológica preservados nas rochas. É uma área fundamental para a compreensão dos hábitos alimentares, comportamento, mobilidade e reprodução, ajudando, assim, a compor e reconstituir os organismos e seus ecossistemas.

Cada fóssil possui uma história, ou seja, representa um organismo que viveu, deixou vestígios, morreu e foi preservado. O estudo da história do fóssil, a partir da morte do organismo, sepultamento, ausência de decomposição ou decomposição parcial, transporte ou não de seus restos, processos de fossilização e também das atividades geológicas a que estiveram submetidos, é conhecido como **Tafonomia**.

5.4. A PALEONTOLOGIA EM ÁREAS DE CARSTE

O carste é um sistema bastante complexo e de grande potencial paleontológico. Esta complexidade deve-se aos três ambientes favoráveis à preservação de registros fossilíferos: o endocarste, o exocarste e o epicarste (podendo ser formado por litologia distinta daquela formadora do carste em si).

O endocarste é a parte de maior importância paleontológica, haja vista seu potencial para a preservação de fósseis. Isso deve-se à proteção que as cavidades oferecem em relação aos processos atuantes na superfície. Quando os restos de organismos ficam dentro das cavidades, as ações de decomposição são drasticamente reduzidas, tornando-se mais provável a sua preservação.

A grande maioria dos fósseis está associada às cavidades em rochas carbonáticas, ainda que, excepcionalmente, possam ocorrer em arenitos, granitos, gnaisses e até mesmo em formações ferríferas. A fossilização é atribuída ao processo químico de dissolução da própria rocha ou soluções circulantes carreadas por fluxos aquosos ricos em sais minerais. No interior da caverna, os restos orgânicos em contato com soluções carbonáticas, silicosas ou mesmo óxidos, ficam rapidamente protegidos das ações decompositoras de microorganismos, devido ao processo de incrustação. Em cavidades onde existe um maior fluxo aquoso, estes processos são mais acelerados pela ação circulante das soluções mineralizadas.

A conservação dos organismos é muito melhor em rochas carbonáticas, por serem constituídas de minerais muito solúveis em água em temperatura ambiente, como a calcita, aragonita e dolomita. Outro quesito primordial é a sua alcalinidade, fator decisivo para a preservação de fósseis de tecidos moles como peles, músculos e vasos sanguíneos.

Dentre os processos recorrentes de fossilização comuns em cavernas está a incrustação, responsável pela preservação da maior quantidade das espécies de grandes mamíferos que viveram no período compreendido entre um milhão e 11.000 anos, fossilizando, às vezes, esqueletos completos (Figura 9).

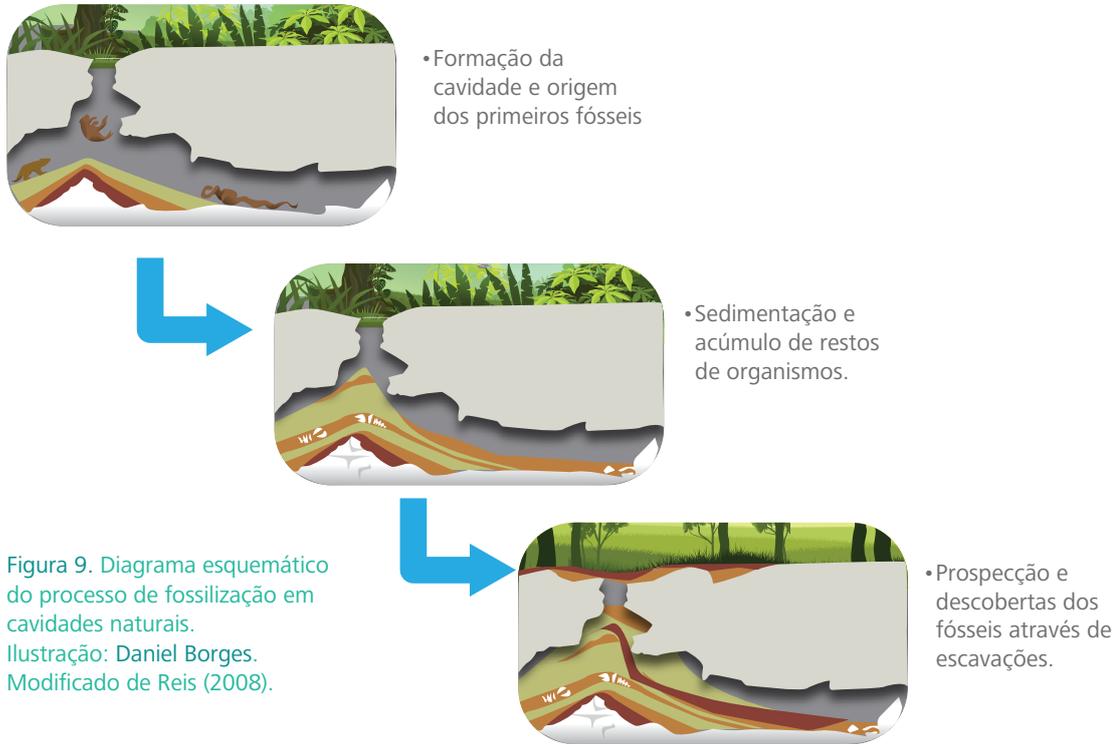


Figura 10. Diagrama mostrando a interação das possíveis situações que levam o registro de vida à fossilização. Montagem: Francisco Macedo Neto.

Dentro desta perspectiva, os ambientes cavernícolas despertam grande interesse para prospecção paleontológica. Por servirem de abrigo, podem formar armadilhas que acabam por aprisionar grande número de animais (Figura 10). Os fósseis encontrados no endocarste possuem um papel especial para diagnósticos paleoambientais e também de datações do próprio carste.

As cavernas constituem áreas chave para compreensão do processo de transição da biodiversidade, onde passado e presente convivem por meio da ocorrência de fósseis, subfósseis e formas viventes da fauna e flora cavernícola e epígea, sendo assim, um complexo sistema em que as diversas áreas das ciências encontram subsídios para o avanço do conhecimento da pré-história, história e do ambiente atual.

O segundo ambiente potencialmente fossilífero é o exocarste. Nele, os registros paleontológicos estão inseridos na rocha, ou seja, entre os estratos que compõem o maciço rochoso. Sendo assim, estes fósseis foram preservados durante o processo de formação da própria rocha. Logo, suas idades são muito mais antigas do que a dos fósseis encontrados nas cavernas. Geralmente nos calcários e mármore, podem ser encontradas as primeiras formas de vida do planeta. A grande maioria das rochas, nas quais se desenvolvem os relevos cársticos brasileiros, possui idade proterozoica. A elas são atribuídos os mais antigos e comuns registros paleontológicos, os estromatólitos (estruturas compostas por sedimentos intercalados a restos orgânicos, formados por algas e bactérias, seres unicelulares pioneiros no planeta e que existem até os dias de hoje). Em litologias do Grupo Bambuí, no estado da Bahia, estão os primeiros fósseis atribuídos a organismos multicelulares complexos, muito antigos relacionados ao período geológico Ediacarano, cerca de 600 milhões de anos (Figura 11). Todos estes fósseis podem ser encontrados no maciço rochoso que compõe as paredes, tetos e pisos das cavidades, assim como fora delas, e propiciam informações sobre o momento da história da Terra em que se formaram estas rochas, seu ambiente, clima e os tipos de organismos que habitavam o planeta. É interessante notar que as cavernas propiciam uma visão tridimensional do maciço rochoso por meio do acesso ao seu interior, facilitando, sobremaneira, a identificação dos principais níveis estratigráficos fossilíferos.

O terceiro ambiente é o epicarste, que passa despercebido pela grande maioria dos paleontólogos que investiga as paisagens cársticas. Geralmente, é composto por rochas sedimentares, depósitos inconsolidados e até solos que se posicionam logo acima do maciço gerador do carste. Pode parecer pouco atrativo no âmbito da Paleontologia, todavia, existe a possibilidade de conter litologias diferenciadas, sobrepostas às rochas mais antigas do exocarste, na maioria das vezes atribuída ao Fanerozoico (542 milhões de anos ao atual), compartimento do tempo geológico no qual se inserem a quase totalidade dos registros paleontológicos, neste sentido, oferecendo um horizonte bastante interessante e potencial para futuras descobertas.

Dentro desta perspectiva, não só as cavidades naturais constituem ambientes importantes para os estudos paleontológicos. O exocarste com seus estratos do maciço rochoso e o epicarste, a cobertura superficial da paisagem cárstica, também compõem ambientes bastante promissores.

Pode-se observar, portanto, que atividades de mineração em áreas cársticas podem afetar os fósseis mesmo que não haja interferência direta ou supressão de cavernas.



Figura 11. Fósseis atribuídos à biota de Ediacara, com estruturas circulares concêntricas e bordas ornamentadas de organismos complexos de 600 milhões de anos encontrados na Bahia. Fotos: Carolina Reis – Acervo CPRM.

5.5. O REGISTRO FÓSSIL DO CARSTE BRASILEIRO

5.5.1. A Contribuição de Peter W. Lund para a Paleontologia do Carste Brasileiro

As primeiras investigações com caráter científico, voltado, em especial, à descoberta de fósseis em ambientes cavernícolas, tiveram seu ponto de partida no estado de Minas Gerais por meio dos criteriosos estudos desenvolvidos pelo dinamarquês Peter Wilhelm Lund, que se instalou no pequeno povoado de Lagoa Santa em 1835. Sua primeira escavação ocorreu na Gruta de Maquiné, em Cordisburgo. Dentre os materiais fósseis encontrados, reveste-se de grande importância, histórica e científica, a identificação e descrição da menor espécie de preguiça extinta, denominada de *Notrotherium maquinense*, publicada no ano de 1839.

Seus dois primeiros artigos referentes ao ambiente cárstico, relatando as cavernas de Maquiné e Cerca Grande (Lagoa Santa), constituem os primeiros relatos científicos deste gênero nas Américas, em 1837. No que tange à paleontologia, sua primeira publicação data de 1838. Contempla o primata *Protopithecus brasiliensis*, identificado em uma gruta da Fazenda Escrivânia no município de Matozinhos, MG (informação verbal de Castor Cartelle), que foi o marco inaugural da paleontologia no carste brasileiro e a primeira ocorrência de primata no mundo. Por serem conhecidos apenas um fêmur, um úmero incompleto e alguns ossos da mão, depositados no Museu de Zoologia de Copenhague, estudos posteriores, a partir de achados mais completos, mostraram que a espécie é, na verdade, o primata *Cartelles coimbrafilhoi* (Figura 12).



Figura 12. Fóssil de *Cartelles coimbrafilhoi* Foto: Castor Cartelle – Acervo Museu de Ciências Naturais da PUC Minas.

Até o ano de 1846, Lund dedicou-se ao árduo trabalho de exploração das cavernas na região, contemplando mais de 800 localidades como grutas, fendas, sumidouros e abrigos distribuídos ao longo do vale do rio das Velhas. Nos dez anos em que se dedicou aos estudos, Lund publicou além dos grupos supracitados os Xenarctos: *Pampatherium humboldti* (Figura 13), *Hoplophoruseuphractus*, *Catonyx cuvieri*, *Ocnotherium giganteum*, *Propraopus punctatus*, *Propraopus sulcatus* e *Eremotherium laurillardi* (Figura 14); os Carnívoros: *Procyon troglodytes*, *Speothos pacivorus*, *Arctotherium brasiliense* (Figura 15) e *Smilodon populator*; os Perissodactylas *Equus (Amerhippus) neogeus* e *Hippidion principale*; o *Artiodactyla Brasiliochoerus stenocephalus* e os *Rodentias Nechoerus sulcidens*, *Agouti major* e *Coendou magnus*.

Lund foi, até quase o final de sua vida como cientista, um seguidor incondicional do anatomista francês Georges Cuvier, em especial no que se referia à teoria do Catastrofismo (acreditava que a vida evoluía em ciclos, após eventos catastróficos naturais em escala global, tais como terremotos, dilúvios, frios repentinos, que levavam à extinção de todas as formas de vida. Então, novos organismos surgiam, por criação divina, diferentes dos presentes anteriormente). Ao longo de suas investigações, acabaria por fazer várias descobertas contraditórias à teoria catastrofista, dentre elas a presença de seres atuais idênticos às formas fósseis encontradas nas cavernas. Um dos achados fundamentais que levaram Lund a desacreditar na teoria de Cuvier foi a presença de fósseis de animais extintos coexistindo com fósseis humanos, o “Homem de Lagoa Santa”. Apesar de outros fatores alegados por Lund, acredita-se que suas descobertas contrárias ao catastrofismo tenham tido grande peso para o afastamento definitivo da vida científica.

Segue a descrição de algumas importantes áreas de interesse da paleontologia relacionadas ao ambiente cárstico dentro do território brasileiro.

5.5.1.1. O Carste de Lagoa Santa, MG

Devido aos trabalhos de Lund, o carste de Lagoa Santa é de importância mundial para a paleontologia. Compreende uma das mais importantes paisagens cársticas carbonáticas desenvolvidas em litologias Neoproterozoicas, da Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí, o que resultou em sua inserção como um dos sítios de referência no país publicado na Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP). No seu endocarste, predominam cavernas que, em sua maioria, não ultrapassam 500 m de desenvolvimento, ainda que haja ocorrências, como a Gruta da Escada e Lapa Vermelha I, com 1822 e 1870 m respectivamente. Distribui-se ao longo de uma região com cerca de 360 km², ao norte de Belo Horizonte. São inúmeras as cavidades naturais de relevância paleontológica de onde provêm achados singulares, em especial da mastofauna pleistocênica/holocênica, das quais estão: Gruta do Baú, Lapa do Sumidouro, Cerca Grande, Rei do Mato e Lapa Vermelha. Boa parte do conhecimento da fauna cavernícola da região de Lagoa Santa é resultado dos trabalhos e descrições de Peter Lund.

Dentro do mesmo contexto geológico e geomorfológico do Carste de Lagoa Santa encontram-se ainda outras cavidades de expressão no estado de Minas Gerais, com importância paleontológica, como a já citada Gruta de Maquiné, a Lapa do Mosquito em Curvelo, o Conjunto Lapa Grande, a sudeste da cidade de Montes Claros, e, muito próximos da divisa com a Bahia, o conjunto Montalvânia, no município homônimo.

5.5.1.2. Carste e Cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP

O PETAR compreende uma das mais relevantes províncias cársticas do território brasileiro, incluído entre uma das 17 propostas em avaliação para a implantação de um Geoparque (CPRM – Serviço Geológico do Brasil). São conhecidas mais de 350 cavidades, associadas às sequências carbonáticas proterozoicas, no Parque e arredores. A de maior desenvolvimento planimétrico é a Caverna Santana, com 8.540 m, sendo que o maior desnível ocorre na Caverna Água Suja, com 297 m.

Os abismos do Fóssil, Juvenal e Ponta de Flecha, na bacia do rio Betari, estão entre os mais relevantes sítios paleontológicos de transição Pleistocênica Holocênica. Entre as espécies fósseis encontradas ocorrem: *Toxodon platensis*, *Eremotherium laurillardi*, *Megatherium* sp., *Nothrotherium maquinense*, *Catonyx cuvieri* (Preguiça terrícola) e *Gliptodon clavipes*.

Fato interessante associado a essas descobertas é a contemporaneidade com o homem pré-colonial do Alto Ribeira, identificado por incisões de desmembramento e descarnamento em ossos e dentes descritas no material do Abismo Ponta de Flecha.



Figura 13. Reconstrução de *Pampatherium* exposta no Museu da PUC em Belo Horizonte, MG. Foto: Castor Cartelle – Acervo Museu de Ciências Naturais da PUC Minas.

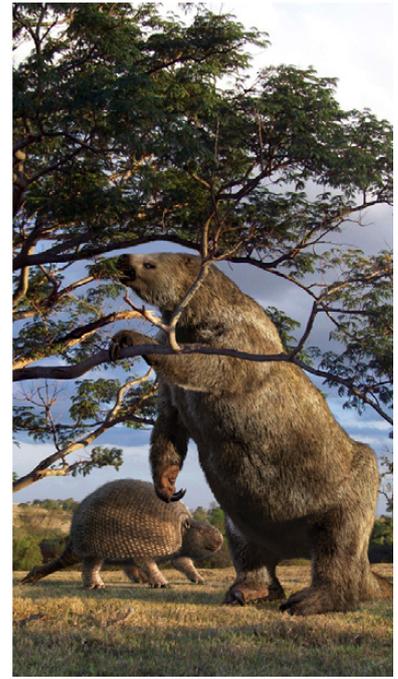


Figura 14. Reconstrução de *Eremotherium laurillard* (primeiro plano) e *Glyptodon* (ao fundo). Foto: Rodolfo Nogueira.

5.5.1.3. Toca da Boa Vista (Campo Formoso), BA

A Toca da Boa Vista é a maior caverna, em extensão, do hemisfério sul, possuindo 105 km de desenvolvimento em dolomitos da Formação Salitre do Grupo Una. Está inserida como um dos sítios de referência no país publicado na SIGEP.

É considerada como um dos sítios com maior volume de dados geocronológicos, graças às inúmeras datações em vários de seus fósseis, tanto de animais já extintos quanto viventes. O estudo dos diversos níveis estratigráficos fossilíferos possibilitou maior entendimento acerca do paleoclima e paleoambiente reinantes na região e suas transformações durante o Quaternário.

A sua riqueza científica deve-se aos diversos esqueletos praticamente completos, como Cartelles coimbrasilhoi e Caipora bambuiorum (primatas Pleistocênicos), um pequeno feto de *Nothrotherium maquinense*, o canídeo *Protocyon troglodytis* e o urso *Arctotherium brasiliense*, que lhe conferem um destaque especial.

5.5.1.4. Toca da Janela da Barra do Antonião, São Raimundo Nonato, PI

Localizada no município de São Raimundo Nonato, PI, na área do Parque Nacional da Serra da Capivara, a Toca da Barra do Antonião é uma das localidades mais notáveis do país, em razão do número de estudos científicos e pluralidade de espécies fósseis. O contexto geológico é caracterizado por uma conjugação de rochas siliciclásticas e químicas notadamente dolomíticas, atribuídas à Formação Barra Bonita do Grupo Casa Nova, de idade Neoproterozoica.

A importância e diversidade paleobiológica têm expressividade em face aos diversos grupos identificados, dos quais constam pássaros, mamíferos marsupiais, preguiças terrestres (*Catonyx cuvieri*, *Eremotherium laurilliardi* e *Megaloniquídeo* indeterminado), tatus (*Pampatherium humboldti*) e gliptodontes (*Hoplophorus euphractus*, *Panochthus greslebini*, *Glyptodon clavipes*), morcegos, roedores, canídeos (*Protocyon troglodytes*), felídeos (*Smilodon populator*), litopterno (*Xenorhynotherium bahiense*), notoungulados (*Toxodon* sp.), proboscídeos (*Haplomastodon waringi*), equídeos (*Hippidion principale* e *Equus neogaeus*), porcos, camelídeo (*Palaeolama niedae*) e cervídeos. Associado à paleobiota pleistocênica, foram encontradas ferramentas líticas e ossos humanos, incluindo o esqueleto de uma mulher datado em 9.700 anos.

5.5.1.5. Lapa dos Brejões, BA

Inserida na porção norte da Chapada Diamantina, no município de Morro do Chapéu, BA, destaca-se no cenário do estudo da espeleologia em razão da amplitude de suas galerias, dimensão dos espeleotemas, volume de suas dolinas e graças ao seu excepcional portal de 106 m de altura, o que lhe garante grande apelo turístico. Constitui um dos sítios descritos na SIGEP e sua relevância ambiental resultou na criação da Área de Proteção Ambiental Gruta de Brejões/Vereda Romão Gramacho. Seu contexto geológico insere-se na Formação Salitre (Neoproterozóico) do Grupo Una, representado por calcissiltitos laminados cinzentos com intercalações de laminitos algais (rochas biosedimentares).

A assembleia fossilífera é constituída por 1.500 exemplares coletados pela equipe do Museu de Ciências Naturais da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, coordenada pelo professor Castor Cartelle, tendo sido identificados *Paleolama* sp. (lhama), *Nothrotherium maquinense* (preguiça), *Eremotherium laurillardii* (preguiça-gigante), *Glossotherium giganteum* (preguiça), *Pampatherium humboldti* (tatu-gigante), *Myrmecophaga tridactyla* (tamanduá-bandeira), *Coendou* sp. (ouriço-cacheiro), *Lutra* sp. (lontra), além de aves, roedores, veados, mastodontes, porcos-do-mato, cavalos, antas e morcegos.

5.5.1.6. Gruta do Urso Fóssil, Ubajara, CE

A Gruta do Urso Fóssil é a caverna de maior expressividade paleontológica entre as 14 situadas no Parque Nacional de Ubajara no Ceará. É uma cavidade com pouco desenvolvimento, instalada em calcários Proterozóicos do Grupo Ubajara. Seu acervo paleontológico está representado por invertebrados (Mollusca) e vertebrados (Squamata e Mammalia) dos quais o urso *Arctotherium brasiliensis* (Figura 15) e o táxon *Tapirus* terrestres são os mais representativos, sendo que este urso foi a primeira descoberta da localidade, em 1978. Na ocasião, este importante achado na região foi responsável por dar o nome à gruta. Estão ainda presentes Squamata: *Colubridae* e *Viperidae*, *Crotalus* e Mammalia: *Marsupialia*, *Didelphis*, *Monodelphis*; *Xenarthra*, *Dasypodinae*, *Dasypus*, *Euphractus*, *Cabassous*; *Rodentia*, *Caviidae*, *Kerodon*, *Echimyidae*, *Thrichomys*, *Erethizontidae*, *Coendou*; *Artiodactyla*, *Tayassuidae*, *Tayassu* e *Cervidae*, *Mazama*; *Perissodactyla*, *Tapiridae*, *Tapirus*.



Figura 15. Momento da descoberta do *Arctotherium Brasiliense*, realizada por Roberto Falzoni e o geólogo Coriolano Dias Neto. Foto: Roberto Falzoni.

5.5.1.7. Lajedo Soledade, Apodi, RN (SIGEP)

Compreende uma feição cárstica diferenciada, muito pouco recorrente do que é normalmente observado em ambientes de rochas solúveis. Este contexto abre precedente para a identificação deste tipo de estrutura em novas localidades. São ravinamentos desenvolvidos em pavimentos rochosos horizontalizados, onde a dissolução dos calcários da Formação Jandaíra (Cretáceo Superior marinho da Bacia Potiguar), posteriormente preenchidos por sedimentos clásticos associados a fluxos detríticos de idade pleistocênica/holocênica, formam ambientes excepcionais para a conservação de uma diversificada fauna deste momento do tempo geológico. Constitui mais uma localidade de relevância nacional descrita na SIGEP. Embora composta de materiais fragmentários, seus estudos possibilitaram a identificação de vários grupos dentre os quais estão: Megatheriidae (*Eremotherium laurillardí*), Glyptodontidae (*Panochthus greslebini*, *Glyptodon* sp.), Dasypodidae (*Tolypeutes tricinctus*, *Holmesina paulacoutoi*), Canidae (*Cerdocyon thous*, *Procyon troglodytes*), Felidae (*Smilodon populator*, *Leopardus* cf., *L. tigrinus*), Ursidae (*Arctotherium* sp.), Equidae (*Hippidion* sp., *Equus (Amerhippus)* cf. *E. (A.) neogaeus*), Camelidae (*Palaeolama major*) Macraucheniiidae (*Xenorhinotherium bahiense*), Toxodontidae indet., Cervidae, Gomphotheriidae. Foram ainda observados osteodermos de crocodiliformes e vértebras de ofídio indeterminado. Fato importante a ser lembrado é a presença de registros da rica fauna marinha associados aos calcários da Formação Jandaíra, representados por restos de gastrópodes, equinodermos e dentes de peixes, além do icnogênero Thalassinoides.

5.5.1.8. Gruta do Lago Azul, Bonito, MS

Localizada no município de Bonito, MS, a Gruta do Lago Azul é um dos geossítios do futuro Geoparque Bodoquena – Pantanal (CPRM). Tombada pelo IPHAN, devido ao seu excepcional valor paisagístico, constitui um dos principais destinos turísticos do estado. Desenvolve-se em dolomitos da Formação Bocaina (Grupo Corumbá - Neoproterozóico), apresentando dois contextos paleontológicos. Um bastante antigo, relativo ao maciço rochoso, no qual estão presentes fósseis de *Cloudina* e *Corumbella*. Outro com registros quaternários no interior da cavidade, ainda pouco estudados, representados por 3 gêneros: *Eremotherium*, *Smilodon* e *Glyptodon*. Estes fósseis foram revelados por mergulhadores e sua identificação foi realizada a partir de fotos, sem que houvesse a retirada do material do interior do lago.

5.5.1.9. Grutas do Estado do Tocantins

A região Norte do Brasil revela-se como uma das potenciais fronteiras para novas descobertas em cavidades subterrâneas, aportando assim informações valiosas sobre a paleofauna e consequente melhor compreensão dos ecossistemas terrestres da região durante o Quaternário.

Estudos recentes em diversas cavernas no estado do Tocantins têm trazido à luz do conhecimento novas descobertas para a Paleontologia. Neste contexto, o município de Aurora do Tocantins tem posição destacada graças às descobertas associadas às cavidades Gruta dos Moura, Buraco do Junior e uma caverna ainda não cadastrada.

Os táxons identificados são: um *Llaminae* indet., *Mazama* cf. *americana*, *Ozotocerus bezoarticus*, *Tapirus terrestres*, *Xenorhinotherium bahiense*, *Tayassu pecari*, *Tayassu tajacu*, *Catagonus stenocephalus*, *Dasypus novemcinctus*, *Euphractus sexcinctus*, *Glyptodon* ou *Glyptotherium*, cf. *Pachyarmatherium brasiliense*, *Pampatherium* cf. *typum*, *Propraopus sulcatus*, cf. *Propraopus grandis*, *Gracilinanus agilis*, *Marmosa murina*, *Monodelphis* cf. *brevicaudata*, *Philander opossum*, *Sairadelphys tocantinenses*, *Arctotherium brasiliense*, *Panthera onca*, *Procyon cancrivorus*, *Puma concolor*, *Lyncodon* e um canídeo não identificado.

5.6. OCORRÊNCIAS FÓSSEIS EM CAVIDADES EM OUTROS PAÍSES

Assim como no Brasil, os ambientes cársticos com ocorrências paleontológicas estão presentes em quase todos os continentes. Seus fósseis são de inestimado valor, já que proporcionam melhor compreensão da diversidade e evolução dos seres vivos, possibilitando a reconstituição dos ecossistemas nos últimos milhões de anos. Nesta seção são dados alguns exemplos importantes da América e Europa, especialmente por representar a mastofauna do Pleistoceno, que muitas vezes conviveu com hominídeos antigos e recentes.

Dentre as cavidades que apresentam registro paleontológico no Peru, encontram-se as cavernas Pikimachay e Três Ventanas. A Cueva Pikimachay, situada no distrito de Pacaycasa, província de Huamanga, é uma importante localidade cárstica que vem sendo estudada desde 1960. Em seu interior já foram resgatados fósseis pleistocênicos de cavalos e preguiças gigantes, com idade de 20.000 anos. Associado a essas ocorrências fósseis, encontram-se ferramentas líticas e restos de humanos, nominado "Homem de Pacaicasa".

Na Cueva Três Ventanas, localizada a 65 km ao sudeste de Lima, na província de Huarochirí, foram encontradas, em 1961, garras, ossos das patas e coprólitos (excrementos fossilizados) associados a *Megatherium*, descobertos em 1961. Os estudos apontaram que o animal deveria ter idade bem superior a 35.000 anos, em razão da impossibilidade de sua datação isotópica utilizando C14/C12. Outras cavidades com registro paleontológico no Peru são Cajamarca, Ancash e Arequipa, com destaques para preguiças gigantes.

Em Cuba, existem mais de 200 registros de cavidades com ocorrências fósseis, datadas do Terciário ao Pleistoceno, no qual foram encontrados os seguintes grupos: carnívoros, chiropteros, primatas, roedores, cervídeos, preguiças e soricomorphos (toupeiras). Localizada na serra de Quemado, em Viñales, Pinar del Río, a Gran Caverna de Santo Tomás é a maior e mais importante cavidade do país, com 46,2 km de desenvolvimento. Possui importantes registros fósseis pleistocênicos entre preguiças, roedores, chiropteros e toupeiras.

Localizado na cidade de Burgos, no norte da Espanha, o sítio Atapuerca, tombado como Patrimônio da Humanidade pela UNESCO em 2000, tem destacada importância em razão da descoberta, em 1994, dos mais antigos fósseis de hominídeos da Europa, datados de mais de 300.000 anos. Sua principal cavidade é a Cueva Gran Dolina, de onde foi descrita uma nova espécie humana batizada como *Homo antecessor*, que significa "O Pioneiro" e que teria sido o antepassado do Homem de Neandertal. A segunda cavidade mais importante é o abismo dos Ossos, de onde foram retirados restos de 32 indivíduos de homens e mulheres de diferentes idades, descritos como *Homo heidelbergensis*, uma espécie intermediária entre o homem Antecessor e Neandertal, com cerca de 300.000 anos.

5.7. A PALEONTOLOGIA E A MINERAÇÃO EM ÁREAS DE CARSTE

Haja vista sua relação direta com as litologias que integram uma paisagem cárstica, a Paleontologia está intimamente associada aos processos da mineração. Seja no decapeamento para a remoção do estéril, na lavra do minério, seja nas cavidades naturais que possam vir a ser seccionadas durante o avanço na fase de operação, é constante a possibilidade de interferência junto ao patrimônio paleontológico.

Dentre as localidades associadas à mineração de calcário, com ocorrência de sítios paleontológicos de relevância internacional, destacam-se os sítios de Peirópolis e Ponte Alta no município de Uberaba, MG, e a Chapada do Araripe, em especial no estado do Ceará. No caso de Uberaba, a diversificada fauna de vertebrados do Cretáceo Superior Continental ocorre em sedimentos siliciclásticos sobrepostos às camadas de calcário da Formação Marília (Bacia Bauru), utilizado em Ponte Alta para a fabricação de cimento e em Peirópolis como corretivo de solo na agricultura. Na Chapada do Araripe, notadamente no município de Crato, os fósseis ocorrem em grande quantidade e excelente grau de preservação associados aos calcários laminados da Formação Santana (Bacia do Araripe), retirados artesanalmente para uso como pedras de revestimento.

Durante as etapas da exploração mineral em regiões cársticas existem vários momentos, maneiras e lugares possíveis de encontrar fósseis. A primeira passível de intervenção em depósitos fossilíferos ocorre já durante a fase de pesquisa mineral, na qual os procedimentos normalmente adotados para delimitação, cubagem e ensaios de qualidade da jazida, notadamente por meio de sondagens, podem revelar fósseis tanto no exocarste como no epicarste.

Um segundo contexto importante para descobertas paleontológicas ocorre durante a implantação da mina e construção da planta de beneficiamento, onde terraplenagem, escavações para fundações e aberturas de acessos podem seccionar jazigos fossilíferos.

Embora considerada “estéril” sob o ponto de vista econômico, a camada de material existente acima do minério nem sempre pode ser descartada, já que pode conter importantes materiais para a pesquisa paleontológica. Em algumas situações são imensos os depósitos sedimentares que recobrem o minério com alto potencial paleontológico. Em razão do contexto geológico propício representado na forma de litologias, idades e ambiências favoráveis à preservação do registro paleobiótico pode ser, por vezes, mais rico e importante do que o próprio minério e suas cavidades naturais (Figura 16).

Na exploração do minério, dependendo de suas características e idade, em especial quando em seqüências sedimentares fanerozoicas, torna-se bastante provável o seccionamento de jazimentos fossilíferos. Os calcários e mármore, mesmo muito antigos, podem abrigar fósseis importantes como os estromatólitos e, até mesmo, formas avançadas de vida como as encontradas recentemente no Grupo Bambuí de Santa Maria, no estado da Bahia. Este grupo conhecido como biota de Ediacara, com distribuição geográfica mundial, foi o marco biológico temporal que permitiu a descrição de um novo período geológico, o Ediacarano, contemplando o intervalo entre 630 e 542 milhões de anos atrás.

Em grau superior de relevância está a possibilidade de as escavações seccionarem cavidades naturais durante o avanço da lavra. As cavernas em especial têm-se mostrado extremamente importantes para o desenvolvimento dos estudos de paleontologia graças ao seu bem conservado e diversificado conteúdo fossilífero (Figura 17). Estes ambientes cársticos, com farto registro paleontológico, podem ser encontrados em quase todas regiões do Brasil.

Figura 16. Fósseis do dinossauro *Uberabatitan ribeiroi*, o maior animal já registrado no país, foram provenientes de arenitos calcíferos posicionados acima dos calcários da Formação Marília, em Uberaba, na região do Triângulo Mineiro. Foto: Luiz Carlos Borges Ribeiro – Acervo GeoPac Consultoria Ambiental.



Figura 17. Reconstrução de fósseis Pleistocênicos encontrados na região de Lagoa Santa. Foto: Castor Cartelle – Acervo Museu de Ciências Naturais da PUC Minas.

5.8. A EXPLORAÇÃO PALEONTOLÓGICAMENTE CORRETA

A exploração mineral no Brasil, independentemente da substância ou bem a ser lavrado, pode ser subdividida em um conjunto de processos e ações envolvidas em 5 etapas: Estudo de Viabilidade, Implantação, Operação, Desativação e Período Pós-Fechamento. Uma das atividades mais relevantes diz respeito à questão ambiental, no qual normalmente são implementados programas focando os meios biótico, socioeconômico e físico. Em especial nos últimos 10 anos, a análise de potencialidade paleontológica nos empreendimentos mineiros vem sendo incorporada nos termos de referência para os estudos ambientais (licenciamento), mostrando ser um eficiente mecanismo de preservação do Patrimônio Paleontológico brasileiro. Para áreas cársticas, estes estudos tornam-se bastante complexos, haja vista os cuidados a serem tomados em face à fragilidade do sistema, o que deve contemplar uma tomada de decisões e ações de maneira bastante criteriosa. Das 5 etapas envolvidas neste processo de exploração mineral, as investigações paleontológicas podem estar presentes durante as fases de Estudo de Viabilidade, Implantação e Operação. São nesses 3 momentos em que se faz necessário os cuidados especiais e imprescindíveis para minimizar os impactos, bem como a implantação de medidas mitigatórias quando da possibilidade de interferência junto aos jazimentos fossilíferos. A etapa de Desativação de lavra não apresenta interesse ou risco ao patrimônio paleontológico e, por conseguinte, não será abordada.

Fase de Estudos de Viabilidade

Esta primeira etapa inclui a pesquisa geológica para a verificação da existência, extensão e características do depósito mineral, realizados por meio de mapeamento geológico, sondagens, trincheiras, cubagens e prospecções diversas como a geofísica. Envolve ainda, de forma ampla, os estudos de viabilidade técnico-econômica e ambiental. Nesta fase é que será definida a área de estudos por meio do levantamento da área diretamente impactada, englobando também todos os sistemas cársticos presentes definidos pelos estudos hidrogeológicos. Como explicitado anteriormente, os fósseis podem ocorrer em diferentes contextos da mineração e, por este motivo, a área de estudo deve abranger não somente o sistema cárstico, mas também a área de influência direta do projeto.

Neste sentido, os principais estudos de diagnóstico das potencialidades paleontológicas do empreendimento deverão ser definidos nesta primeira etapa, haja vista serem eles os determinantes da necessidade ou não de implantação de um programa de paleontologia para a mineração.

Diante do aval da viabilidade técnico-econômica da jazida mineral e do levantamento inicial da hidrogeologia e sistema cárstico, deverão ter início os estudos por meio do inventário dos dados secundários anotados nas bases oficiais de cadastros paleontológicos, assim como na literatura científica disponível para a região a ser seccionada pelo empreendimento. No Brasil, normalmente utilizam-se os dados da Base PALEO da CPRM. Entretanto, por vezes apresentam poucos dados paleontológicos, sendo insuficientes para um bom diagnóstico do real potencial da área. Como medida complementar, deverão ser consultados registros paleontológicos e espeleológicos sobre o município, litologias e unidades litoestratigráficas nas áreas direta e indiretamente afetadas pela mineração em artigos científicos, periódicos, trabalhos de conclusão de curso, dissertações e teses.

O levantamento de dados primários é a fase mais importante da etapa de Estudo de Viabilidade e imprescindível para compreender a geologia, o relevo, solo e outras questões do meio físico da área por meio de caminhamento e observação de pontos de interesse da paleontologia como afloramentos, presença de rocha potencialmente paleontológica no epicarste, contatos litológicos, dados de sondagens e diversas outras ferramentas, que possibilitem conhecer em detalhe o contexto paleontológico global da área em questão. Para o carste, o levantamento de dados permitirá subsidiar a avaliação da relevância das cavidades, analisando o seu potencial para abrigar fósseis, avaliando ainda possíveis sítios paleontológicos que poderão ser seccionados com alguma alteração da dinâmica do sistema cárstico. Para tal, deverão ser prospectadas as cavidades com presença de sedimentos e que apresentem características que possibilitem a preservação de fósseis.

Como última ação desta etapa, deverá ser produzido um relatório de diagnóstico do potencial paleontológico que consubstanciará a confecção do Estudo de Impacto Ambiental – EIA ou outro documento necessário à solicitação do licenciamento.

Caso os estudos apontem para a possibilidade de ocorrência de registros paleontológicos, é fundamental a elaboração de um projeto executivo para o detalhamento do programa de paleontologia a ser implantado nas demais etapas da mina, contendo todas as ações para evitar a destruição do patrimônio paleontológico. Este documento é imprescindível à solicitação da Licença de Instalação, podendo-se, então, ter início às atividades construtivas da implantação da lavra.

Todos os estudos deverão ser realizados por especialistas em paleontologia, notadamente com ampla experiência em programas de investigação, monitoramento e salvamento paleontológico de empreendimentos de grande impacto ambiental, como minerações, gasodutos, linhas de transmissão, usinas hidrelétricas, pequenas centrais hidrelétricas, parques eólicos, canais de transposição de água, rodovias, ferrovias, assim como qualquer obra de construção de grande porte.

Fase de Implantação

Entende-se por Implantação as atividades de construção e preparação da mina e da infraestrutura necessária à estruturação do canteiro de obras. Ou seja, no que tange aos estudos paleontológicos, atenção deve ser dada para a movimentação de rochas e materiais de superfície em que possam ser seccionados jazimentos fossilíferos.

Durante a fase de Implantação, mas de forma mais contundente na fase subsequente, de Produção, faz-se necessário a tomada de uma série de medidas e ações preventivas, cujo objetivo é identificar, antecipadamente, os problemas que possam surgir e os procedimentos a serem adotados para a integral proteção dos sítios paleontológicos existentes. No caso de os estudos preliminares apontarem para um real potencial paleontológico da área impactada pela mineração, uma ou mais das etapas a seguir poderão ser postas em prática de maneira parcial ou completa.

Programa de Treinamento, Monitoramento e Salvamento Paleontológico

1ª Etapa: Educação Patrimonial - Cursos e Palestras

1. Cursos de Capacitação Técnica em Paleontologia:

Como primeira ação do Programa Paleontológico, são ministrados minicursos de capacitação em paleontologia, destinados, prioritariamente, aos funcionários que trabalham na implantação da planta de mineração com todas suas estruturas físicas, desde início da abertura de acessos, raspagens de solos, até a conclusão do canteiro de obras. Participam destes cursos, as equipes envolvidas nas escavações para fundações ou outras atividades em que podem ser movimentados materiais rochosos potencialmente fossilíferos e que apresentem possibilidade de interferência junto a cavidades naturais. Os cursos são teóricos e práticos e possibilitam, na ausência da equipe de paleontologia, aos capacitados o reconhecimento prévio de possíveis fósseis. Se necessários, deverão ser realizados a cada trimestre, buscando atender a todos os novos funcionários ingressantes.

2. Palestras Educativas com Tema de Educação Patrimonial em Paleontologia:

Devem integrar à educação patrimonial de arqueologia, educação ambiental ou comunicação social palestras nas escolas das localidades próximas à mina, assim como para a população de entorno do empreendimento, com objetivo de expor os dados acerca da paleontologia e da necessidade de preservação do patrimônio cultural-paleontológico regional.

2ª Etapa: Intervenções de Coleta Paleontológica “in loco”

É a etapa mais importante, em que são realizadas intervenções de coleta paleontológica “in loco” assim que sejam identificados vestígios fossilíferos durante as escavações.

Estas intervenções devem ser realizadas por meio do monitoramento coordenado por paleontólogo ou técnicos devidamente capacitados. É necessário o acompanhamento até que sejam finalizadas as escavações ou essas alcancem litologias comprovadamente afossilíferas.

O acompanhamento tem a possibilidade de utilizar o material retirado nas raspagens, escavações de fundações, áreas de empréstimo ou mobilizações que seccionem litologias de comprovado potencial paleontológico, durante a implementação da planta de beneficiamento e áreas contíguas. Assim deve ser executada a triagem, buscando-se a coleta de quaisquer vestígios paleontológicos. Na ocorrência de fósseis, devem ser adotados os seguintes procedimentos:

- Anotação das coordenadas;
- Profundidade a partir da superfície;
- Nível estratigráfico
- Fotos da localidade;
- Fotos do registro paleontológico;
- Fotos de detalhe da litologia;
- Descrição litológica da frente de lavra, ou localidade;
- Retirada do espécime fóssil;
- Acondicionamento do material resgatado;

A identificação de cavidades, durante esta etapa, levará à necessidade de prospecção paleontológica e classificação do potencial paleontológico, assim como outros estudos para classificar sua relevância e propor ações de proteção ou salvamento caso necessários.

3ª Etapa: Transporte, Curadoria e Guarda do material fossilífero

Caso sejam resgatados fósseis, devem ser embalados e trasladados para um repositório em instituição de referência, a ser escolhida durante os estudos de viabilidade. Este procedimento é de responsabilidade do minerador e deverá ser realizado assim que seja concluída a Fase de Implantação.

Fase de Operação

É a etapa que envolve a extração e processamento do minério. Sem dúvida a mais importante da exploração mineral no âmbito do programa de paleontologia face à excepcional quantidade de material rochoso movimentado. Durante este processo, será realizado o decapeamento do estéril (epicarste) e o avanço dos desmontes para a retirada do minério. Neste momento, os cuidados devem ser redobrados, já que a possibilidade de interferência junto a jazimentos fossilíferos é muito grande. Todo pessoal envolvido na fase de extração deve estar preparado para os achados fortuitos, acionando a equipe técnica especializada para o resgate. Nos níveis comprovadamente fossilíferos, seja no estéril ou no minério, os desmontes e remoções dos materiais devem ser monitorados sistematicamente, para que se realize o salvamento dos registros fósseis. Cuidados especiais deverão ser tomados em seccionamentos de cavidades naturais, haja vista serem ambientes únicos que podem fazer parte de um grande sistema, afetando áreas muito distantes da mineração. Segue descrição das atividades obrigatórias para a fase de Produção:

1ª Etapa: Educação Patrimonial - Cursos e Palestras

3. Cursos de Capacitação Técnica em Paleontologia:

Assim como na Fase de Implantação, dependendo dos resultados da Fase de Estudos de Viabilidade da Área, será necessária a criação de uma rotina com cursos trimestrais para capacitação dos funcionários que irão trabalhar nas escavações do maciço calcário.

Como forma de reduzir custos, poder-se-á treinar uma equipe de funcionários para o monitoramento paleontológico, devendo esta equipe reportar-se a um paleontólogo coordenador, que acumulará a responsabilidade de diversas minas.

4. Palestras Educativas com Tema de Educação Patrimonial em Paleontologia:

Deverá ocorrer após a fase de implantação e se integrar aos programas de educação patrimonial, da arqueologia, ou educação ambiental, a serem realizadas nas escolas da região próxima à mineração, assim como para a população de entorno do empreendimento, com o objetivo de expor dados acerca da paleontologia e da necessidade de preservação do patrimônio cultural-paleontológico regional passível de ser encontrado na região.

2ª Etapa: Intervenções de Coleta Paleontológica in loco

Como será uma etapa contínua, ou seja, enquanto perdurar a extração do minério, o monitoramento e os possíveis salvamentos serão realizados por técnico capacitado por meio de cursos de treinamento em paleontologia, evitando-se assim gastos adicionais com a presença de especialistas em tempo integral. Contudo é bastante recomendável a necessidade de manter-se pelo menos um paleontólogo, para um conjunto de minas, a fim de dar suporte e controlar todo o processo de investigação paleontológica.

A metodologia básica de acompanhamento é a da triagem de parte do material escavado, de forma a evitar ao máximo atrasos ao processo de lavra. Cada pacote de rochas a ser investigado deverá ter um registro de localidade e cota. Se for afossilífero deverá ser liberado para continuidade da lavra e moagem. Caso sejam identificados fósseis, serão fotografados e enviados a um laboratório a ser mantido pelo empreendedor para acondicionamento e primeiros estudos de classificação. É prudente que, no desmonte de rochas, em especial resultante de detonações ou outro mecanismo que leve a fragmentação das rochas, seja feita triagem rápida destes materiais rochosos, visando a coleta de eventuais registros fósseis.

No caso da lavra atingir uma cavidade natural, a mineração deverá ser paralisada para as prospecções e estudos necessários, entre eles, os paleontológicos. A presença de fóssil nesta situação implica necessidade de salvamento por meio de escavações sistemáticas. O resgate destes fósseis pode indicar novas formas de registros fossilíferos portando importantes dados sobre as formas de vida e do ecossistema local, durante o final do período Quaternário. Ainda, durante a prospecção endocárstica, caso sejam identificadas interferências em outros sistemas hidrogeológicos que possam colocar em risco sítios paleontológicos, estes, quando identificados, também deverão ser resgatados.

REFERÊNCIAS

- Barbosa FHS, Porpino KDO, Fragoso ABL, Oliveira EV (2014) Arthritis in a Glyptodont (Mammalia, Xenarthra, Cingulata). *PLoS ONE* 9(2): e88646: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0088646>
- Cartelle C. 2002. Peter W. Lund, a naturalist of several sciences. 2002 *Instituto de Ciências Biológicas – UFMG*. Lundiana 3(2):83-85, 2002 - ISSN 1676-6180
- Fernandes ACS, Ewbank CO, Jardim e Silva M & Henriques DDR. 2010. Uma lembrança de infância: os “fósseis colossais” e o papel de Frederico Leopoldo César Burlamaque como paleontólogo brasileiro. *Filosofia e História da Biologia*, v. 5, n. 2, p. 239-259, 2010.
- Fernandes ACS, Antunes MT, Brandão JM & Ramos RRC. 2012. O Monstro de Prados e Simão Pires Sardinha: considerações sobre o primeiro relatório de registro de um fóssil brasileiro. *Filosofia e História da Biologia*, v. 7, n. 1, p. 01-22, 2012.
- Ghilardi AM 2011. Megafauna do Quaternário Tardio dos depósitos cársticos do Alto Vale do Ribeira, sudeste do Estado de São Paulo, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos. 106 p.
- Hardt R. 2003. Carste em Arenito: Considerações Gerais. IN: *ANAIS XXVII Congresso Brasileiro de Espeleologia*. Januária MG. p. 163-167, Julho de 2003. Disponível em www.cavernas.org.br/anais27cbe/27cbe_163-167.pdf. Acesso em 23/09/2015.
- Naracoorte-Caves. s/d. Animals and Fossils. Apostila de estudos. Disponível em: http://www.environment.sa.gov.au/files/sharedassets/naracoorte/fact_sheets/naracoorte-caves-animals-and-fossils-fact.pdf
- Oliveira PV, Lessa G, Viana MSS, Ximenes CL, Ribeiro AM, Oliveira EV, Santos AST, Hsiou A, Holanda ECH & Kerber L. 2011. Gruta do Urso Fóssil (Nordeste do Brasil) e Sua Fauna Quaternária: Dados Preliminares. IN: XXII Congresso Brasileiro de Paleontologia, ATAS. p.651-653.
- Pitana VG, Ribeiro AM. 2007. Novos materiais de *Propaopus Ameghino*, 1881 (Mammalia, Xenarthra, Cingulata) do Pleistoceno final, Rio Grande do Sul, Brasil. *GAEA*, v. 3(2):60-67, jul/dez 2007.
- Porpino KO, Fernicola JC e Bergqvist LP. 2009. A New Cingulate (Mammalia: Xenarthra), *Pachyarmatherium* Brasiliense Sp. Nov., From The Late Pleistocene Of Northeastern Brazil. *Journal of Vertebrate Paleontology* 29(3):881–893, September 2009.
- Reis, C. 2008. Fósseis e processos de fossilização II. Apresentação de slide. Disponível em: <https://biogeo2.wordpress.com/2008/04/15/fosseis-e-processos-de-fossilizacao-ii/>
- Ribeiro, L.C.B.; Trevisol, A.; Carvalho, I.S.; Neto, F.M.; Martins, L.A.; Teixeira, V.P.A. Geoparque Uberaba – Terra dos Dinossauros do Brasil (MG). In: Shobbenhaus, C. Geoparques do Brasil – Propostas, v. 1, CPRM, Rio de Janeiro, pp 583-616, 2012.
- Santos WFS; Carvalho IS & Fernandes ACS. 2010. Mineração versus Paleontologia: Uso e Ocupação da Serra do Veadinho em Peirópolis - Uberaba, Estado de Minas Gerais (Brasil). *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 33 - 2 / 2010 p.74-86
- Schobbenhaus C, et al. 2002. *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil* – Brasília: DNPM, 2002. 554 p.: il
- Winge M. 2009. *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil* / Manfredo Winge (Ed.) ... [et al.]. – 2. ed. – Brasília: CPRM, 2009. v. 2, 516 p. : il.
- Winge M. 2013. *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil* / Editores Manfredo Winge ...[et al.]... -- Brasília: CPRM, 2013. 332 p. , v. 3 : il.

CAPÍTULO 6:

ARQUEOLOGIA

Elvis Pereira Barbosa

6.1. ARQUEOLOGIA, O QUE É?

A melhor resposta para decifrar o significado da arqueologia aproxima-se do seguinte: arqueologia é a ciência que estuda a cultura material dos povos do passado, a forma como ela foi produzida, a maneira como ela foi descartada e a interação destes vestígios materiais nos diversos grupos humanos em que foram produzidos. Trata-se de uma resposta completa, porém complexa para o entendimento da maioria das pessoas que desconhece a ciência Arqueologia.

Paul Bahn, renomado arqueólogo inglês, em uma das suas obras em que buscava divulgar a importância da arqueologia de maneira divertida para a população em geral, afirmou que o arqueólogo é o lixeiro especializado, pois o que mais interessa a ele em um sítio arqueológico é encontrar a lixeira, já que ali será possível encontrar todas as evidências de como os povos do passado agiam e interagiam entre si, por meio da produção de objetos para uso cotidiano.

É claro que muitos arqueólogos não se sentem “lixeiros especializados”, mas, quando estão em campo realizando escavações, uma das primeiras providências tomadas é tentar encontrar o local onde o grupo humano que habitava o espaço da escavação descartava os seus objetos. Afinal de contas, a forma como o descarte é realizado traz muitas informações sobre a forma como aquelas pessoas viviam.

Voltando à Arqueologia, o que interessa ao arqueólogo é, justamente, tentar entender a maneira como os povos do passado viviam a partir do entendimento da produção da cultura material, ou, em outras palavras, a partir da produção dos vestígios materiais. Neste sentido, o termo “material” é estendido a qualquer objeto produzido por populações do passado, como, por exemplo, material lítico (pedra lascada, pedra polida), material cerâmico, materiais produzidos a partir de ossos, conchas, madeira e, principalmente, pinturas realizadas nas paredes das cavernas e abrigos que serviram de habitação para grupos humanos no passado.

Diferentemente de outras ciências sociais, os primeiros estudos arqueológicos no Brasil foram realizados ainda no século XVIII pelo naturalista luso-brasileiro Simão Pires Sardinha, filho da famosa Chica da Silva e de Manuel Sardinha. Formado pela Universidade de Coimbra, Simão foi chamado por Dom Luís da Cunha Menezes, Governador da Capitania de Minas Gerais, para realizar alguns estudos sobre uma “ossada” encontrada na região de Prados, próximo a São João del-Rei, quando era escavada uma mina de ouro. Uma vez em Prados, Sardinha recolhe o pouco do material que ficou incólume – os fósseis foram seriamente danificados durante a escavação da mina – e escreve um relatório, comumente denominado à época como Memória, denominada Descrição de uns ossos não conhecidos que apareceram em maio de 1785 na Capitania de Minas Gerais do Estado do Brasil, analisando não apenas os poucos fragmentos de fósseis que foram salvos da destruição, mas também a estratigrafia da região. Os fragmentos e a memória foram enviados à Vila Rica para posterior reenvio a Lisboa e em sua memória Sardinha concluiu que a “monstruosa ossatura de estranha grandeza deve ter pertencido a algum animal que, pelas revoluções do tempo, tenha-se perdido a espécie”¹⁴.

Ao longo do século seguinte, o Brasil foi objeto de estudos de diversos naturalistas estrangeiros, como os botânicos Carl Philipp von Martius e Auguste de Saint-Hilaire, entre outros. De certa maneira, o pensamento científico da época e as obras desses naturalistas motivaram Lund a visitar o Brasil.

A Arqueologia é, portanto, uma ciência que dispõe de método e teoria próprias, mesmo necessitando do auxílio de diversas outras ciências, como a História, a Antropologia, a Geografia e também a Biologia, a Química, a Física e, em alguns casos, a Medicina. Ela pode ser considerada uma das mais interativas e das que mais “conversam” com outras ciências, procurando assim aperfeiçoar a sua metodologia de trabalho de campo e também melhorar a construção dos seus aspectos teóricos. Assim, mais do que simples “lixeiros especializados”, às vezes confundidos com “caçadores de dinossauros”, os arqueólogos e a Arqueologia procuram entender o passado por meio das evidências materiais encontradas no presente, buscando fazer uma análise lógica e muito próxima das situações vivenciadas pelos diversos seres humanos que construíram estas evidências.

14 ARQUIVO HISTÓRICO ULTRAMARINO. CU 011, Cx. 123, D. 9762, 26 de agosto de 1785.

6.2. ARQUEOLOGIA É HISTÓRIA OU HISTÓRIA É ARQUEOLOGIA TAMBÉM?

Quando Heródoto escreveu a História da guerra entre gregos e persas, jamais imaginou que, a partir daquele momento, criaria para as gerações futuras algo que seria interpretado como ciência. Afinal de contas, o termo História criado por ele era uma mera abstração, pois é possível registrar os fatos ocorridos em determinado local, dando-se a ênfase que for mais conveniente ao observador. Portanto, além de abstrato, uma vez que não é uma disciplina experimental, é mais uma invenção da mente humana.

Ao iniciar o estudo da História, uma pergunta passa a ser constante no tratamento desta como ciência: o que seria História? Ao formular a ideia de História, muitos historiadores passam a encará-la como sendo apenas a análise dos registros documentais produzidos pelo Homem ao longo dos tempos. Sendo assim, a grande maioria destes registros estaria compreendida apenas como documentos escritos, o que conduziria as fontes não escritas a serem tratadas como não históricas, ou seja, fazendo parte da Pré-História e, portanto – seguindo a lógica acima –, não seriam objetos de estudo dos historiadores, mas sim dos arqueólogos (Trigger, 1973).

Se o sentido de História pode ser classificado como sendo uma invenção humana do período da Grécia Clássica, o conceito de Pré-História – formulado no século XIX primeiramente por Paul Tournal e depois por Daniel Wilson – e os meios para estudá-la, além de outra invenção humana, podem ser compreendidos como mais abstratos que o sentido da ciência criada por Heródoto, haja vista que os marcos de diferenciação entre uma e outra são bastante variáveis. A grande questão levantada pelos pesquisadores da área põe-se da seguinte forma: até onde iria a Pré-História (ou a Arqueologia) e o que a diferenciaria da chamada História?

A questão pode ser remetida, primeiramente, ao século XVIII e aos antiquaristas nórdicos por meio do estabelecimento do sistema das três idades¹:

- A Idade da Pedra como o período em que armas e utensílios eram feitos de pedra, madeira, osso e outros materiais semelhantes;
- A Idade do Bronze como o período em que armas e utensílios cortantes eram feitos de cobre ou bronze e ainda não havia o domínio do ferro;
- A Idade do Ferro como o período em que se usava o ferro para a fabricação de objetos em substituição ao bronze, como machados e armas.

Posteriormente, o modelo foi modificado, recebendo a seguinte denominação:

- Era da Pedra (Primitiva);
- Era do Bronze (Arcaica);
- Era do Ferro;
- Era Cristã (esta última marcaria o aparecimento da História).

Uma das falhas apresentadas por este modelo é o fato de não poder ser aplicado ao estudo das populações antigas da América. O Homem americano nunca dominou plenamente o processo de produção de metais, principalmente o ferro, e a última colonização em massa no continente americano teve início ao final do século XV, quando os colonizadores europeus, especialmente os espanhóis e os portugueses, interromperam o processo social que estava em curso nas terras americanas.

Vere Gordon Childe (1977, p. 09) *considerava que (...)os dados arqueológicos são documentos históricos por direito e não meras abonações de textos escritos (...). Ainda no primeiro capítulo do livro Introdução à Arqueologia, Childe expõe que a arqueologia é uma forma de História e não uma simples disciplina auxiliar (...). Exatamente como qualquer outro historiador, um arqueólogo estuda e procura reconstruir o processo pelo qual se criou o mundo em que vivemos (...)*, (Childe, 1977 p. 10).

15 - Em 1776, Peter Frederik Suhm, na obra *History of Denmark, Norway and Holstein*, fez uma referência a esta ideia, quando estabeleceu a divisão dos utensílios e armas com base em três materiais: pedra, cobre e ferro. Posteriormente, *Skuli Thorlacius em Concerning Thor and his Hammer, and the earliest Weapons that are related to it, and also the so-called Battle-Hammers Sacrificing Knives and Thunder-Wedges, which are found in Burial Mounds* (1802) também trabalha a ideia das três idades – pedra, cobre e ferro (DANIEL, 1992, p. 90-91). A primeira referência contundente a este sistema é apresentado por Lauritz Schebye Vedel Simonsen na obra *Udsigt over Nationalhistoriens aeldste og maerkeligste Perioder* de 1813-1816. A consolidação deste modelo vem por meio de Christian Jurgensen Thomsen com a publicação em 1836 do Guia do Museu Nacional de Copenhagen intitulada *Ledetraad til Nordisk Oldkyndighed* e traduzida para o inglês em 1848 como *A Guide to Nothern Antiquities*. Thomsen era o curador do Museu Nacional.

Neste sentido, a diferenciação anterior entre o pré-historiador que estuda os ossos do Neanderthal – visto como um naturalista – e o que estuda os objetos produzidos pelo Neanderthal – visto como um historiador – seria mais uma medida referencial fictícia, sem sustentáculo teórico diante dos recentes avanços na pesquisa das duas ciências, a Arqueologia e a História. Os enfoques atuais procuram colocar a Pré-História como a fase mais remota do estudo da História, portanto, dentro do leque de opções de estudo do historiador, mas com um método próprio de investigação, haja vista que o testemunho da sociedade em estudo resume-se aos vestígios materiais encontrados no campo pelo arqueólogo e não aos documentos escritos, que podem ser folheados e interpretados pelos historiadores contemporâneos.

Assim, os arqueólogos, ao analisarem diversas áreas com predominância de terrenos cársticos, conseguiram estabelecer toda uma cadeia de termos e eventos que foram inicialmente identificados na Europa, principalmente nas grutas de Lascaux e Chauvet na França, nas cavernas de Altamira, na Espanha, em algumas localidades da Península da Itália, e no vale do rio Neander, na Alemanha (de onde vem a denominação de *Homo neanderthalensis* para os fósseis encontrados nesta região). Posteriormente, estes conceitos gerais foram estendidos, guardadas as devidas características, para outras regiões do planeta.

6.3. ORIGENS DA ARQUEOLOGIA NO BRASIL

Diferentemente de outras ciências sociais, os estudos de Arqueologia no Brasil tiveram início com os trabalhos de prospecção de cavernas, realizados na região de Lagoa Santa, em Minas Gerais, na primeira metade do século XIX, pelo dinamarquês Peter Lund. Ao longo daquele século, o Brasil foi objeto de estudos de diversos naturalistas, como os botânicos Carl Philipp von Martius e Auguste de Saint-Hilaire, entre tantos outros. De certa maneira, o pensamento científico da época motivou Lund a visitar o Brasil.

Os trabalhos desenvolvidos por Lund tiveram como ponto de partida as cavernas desta região de Minas Gerais e, além da descoberta de inúmeros fósseis, o material arqueológico, identificado por ele, ainda hoje é objeto de estudos de diversos cientistas brasileiros e estrangeiros. A característica marcante dos estudos desenvolvidos por Lund no Brasil é que eles se concentraram numa região cárstica.

Lund pesquisou mais de 800 cavernas na região entre Lagoa Santa e Cordisburgo, fazendo o registro do material encontrado, entre eles os restos de esqueletos humanos fossilizados ao lado de animais pleistocênicos. Como não havia relatos de esqueletos humanos fossilizados em outras partes do mundo, a ideia de contemporaneidade do “Homem de Lagoa Santa”, em conjunto com a fauna extinta desenvolvida por Lund, não foi aceita por seus pares. Segundo Barreto (1999-2000, p. 37), *a questão do “homem de Lagoa Santa”, e subseqüentes pesquisas na região, atravessou a história da arqueologia brasileira pelo restante do século XIX e todo o século XX.*

Após o período dominado pelas viagens dos naturalistas, ocorreu uma sensível redução dos estudos de Arqueologia no Brasil com uma retomada mais forte por meio das Missões Francesas e de alguns pesquisadores norte-americanos. Estas Missões tiveram por finalidade desenvolver os estudos arqueológicos no Brasil e concentraram-se nos estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais. O legado dos pesquisadores norte-americanos serviu de base para formulação do Programa Nacional de Pesquisas Arqueológicas (PRONAPA), responsável pelo desenvolvimento de projetos de pesquisas em todo o país, entre as décadas de 1960 e 1970.

Com o fim do PRONAPA em meados da década de 1970, houve uma expansão das pesquisas arqueológicas no Brasil, entre elas os trabalhos no sul do Piauí. Sob a liderança da Professora Niède Guidon e com apoio do governo francês, por meio do Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), em 1978, foi realizada uma importante missão interdisciplinar na região da Serra da Capivara e Serra das Confusões. Esta primeira missão serviu de base para identificar e catalogar um número significativo de sítios arqueológicos na região de São Raimundo Nonato no Piauí, entre eles o do Boqueirão da Pedra Furada, considerado como um dos sítios arqueológicos mais antigos da América. A região tem como característica geológica o terreno calcário.

No atual contexto brasileiro, além da pesquisa científica realizada por Instituições de Ensino e Pesquisa, a Arqueologia de Contrato vem despontando como uma área promissora para o desenvolvimento da Ciência. Devido à pressão feita pelos arqueólogos para que a legislação fosse cumprida, o número de solicitações de Permissões Arqueológicas feitas ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) tem crescido nas últimas três décadas, ampliando o horizonte da abordagem arqueológica no Brasil. Com a exigência da realização de pesquisas prévias em arqueologia durante a etapa de caracterização ambiental em pequenas, médias e grandes obras de engenharia, hoje a atividade do arqueólogo tornou-se respeitada e também fundamental no processo de licenciamento ambiental. Hoje é possível encontrar um número considerável de empresas privadas que trabalham exclusivamente com pesquisas arqueológicas, fato impensável nas décadas de 1960 e 1970. Graças à arqueologia de contrato, o cenário arqueológico brasileiro vem crescendo significativamente, principalmente com o aparecimento de diversos cursos de graduação em Arqueologia nas universidades públicas.

6.4. TIPOS DE SÍTIOS ARQUEOLÓGICOS

Os estudos arqueológicos envolvem uma significativa gama de materiais e áreas distintas. Em cada uma destas áreas são empregadas técnicas diferenciadas, cada uma voltada para o tipo de material encontrado no local do sítio arqueológico. Em relação ao tipo de material, os sítios arqueológicos podem ser classificados da seguinte maneira: sambaquis, sítios líticos, sítios cerâmicos, sítios rupestres e sítios históricos, sendo que este último tópico é válido apenas para a América. Como a América foi o último continente a ser ocupado pelo Homem, quando se iniciou a colonização europeia, no final do século XV, aconteceu a interrupção do processo de desenvolvimento social, político e tecnológico das sociedades nativas da América, por isso o conceito de sítios históricos é aplicado exclusivamente a este continente.

Os sambaquis são sítios arqueológicos caracterizados por sucessivas camadas de conchas, mariscos, escamas e espinhas de peixes, restos de fogueiras, ossada de animais, sepulturas humanas depositadas por populações pré-históricas que tinham estes materiais como recurso principal (Figura 01). Normalmente, estão situados em locais próximos ao mar, braços de rios e florestas que ofereciam abundância de recursos para as populações que habitavam estas áreas.

Sítios líticos são típicos de populações de caçadores/coletores e encontrados em abundância no interior do país, principalmente em locais onde o solo pedregoso é predominante, como topo de serras, leitos de rios e vertentes de escoamento de águas pluviais. Estes sítios são caracterizados por pequenas áreas, normalmente próximas às fontes de matérias-primas – como pedreiras e rochedos –, abundância de fragmentos líticos (Figuras 02 e 03) e quase inexistência de material cerâmico.

Martin (1997) destaca a relação entre a produção de artefatos líticos e a situação topográfica de regiões afastadas de fontes perenes de água, como os sítios arqueológicos que estão distantes de fontes de fornecimento permanente de água e alimentos, alertando que regiões com estas características não ofereciam condições para a existência de sítios acampamentos, mas sim exclusivamente oficinas de lascamento (Martin, 1997).



Figura 01. Sambaqui da Ilha do Paty, Baía de Todos os Santos, Bahia. Foto: Elvis Barbosa.



Figura 02. Machados de pedra encontrados na Fazenda Cascata, Teixeira de Freitas, Bahia. Foto: Elvis Barbosa.



Figura 03. Núcleo de lascamento encontrado na região de Ituaçu, Bahia. Foto: Elvis Barbosa.

Exemplo destas características são os sítios de lascamento encontrados no topo das serras situadas próximas ao vale do Médio São Francisco. Embora não tenham ainda sido identificados muitos vestígios de artefatos líticos – apesar da significativa quantidade de material rochoso –, tende-se a considerar a distância entre o leito original do rio São Francisco e a sua expressiva condição de fornecedor de matérias-primas, além de alimentos e materiais para a constituição de sítios acampamentos na região. Conseqüentemente, a ausência das mesmas condições encontradas nos sítios próximos ao rio, como a água e a maior facilidade de obtenção de alimentos, que garantiam a sobrevivência das populações de caçadores/coletores, podem ter indiretamente influenciado a constituição de sítios de lascamento no alto das serras, onde as condições mínimas para a permanência de grupos humanos por longos períodos era substancialmente prejudicada pela escassez de água e alimentos.

Sítios cerâmicos são típicos de populações de horticultores/agricultores e podem ser encontrados no litoral e também no interior do país. Os sítios são caracterizados pela existência de grandes áreas e próximos às fontes de água e alimentos. Por serem produtores de cerâmica, geralmente estas populações também eram agricultoras/horticultoras, mas isto não significa uma regra. A produção de material utilitário é identificado pela produção de pequenas e médias vasilhas, além de grande vasos para armazenamento de alimentos. Normalmente, estas grandes vasilhas são chamadas de urnas funerárias (Figura 04), pois serviam também para a realização de rituais funerários.

Além das urnas funerárias, outras vasilhas utilitárias podem ser encontradas nos sítios cerâmicos, inclusive dentro de abrigos localizados em cavernas (Figura 05).

Os sítios cerâmicos, devido às suas dimensões, pressupunham um domínio territorial considerável por parte dos seus ocupantes, principalmente em decorrência da existência de zonas de plantio de tubérculos como a mandioca (*Manihot esculenta*), além de abóboras, feijões e milho (*Zea mays*). A outra característica marcante dos sítios cerâmicos é que, ao contrário dos caçadores/coletores natos – mesmo sendo horticultores, os grupos que produziam cerâmica continuavam caçando e coletando alimentos para complementar a dieta – as atividades de cultivo necessitavam de uma longa duração na área do sítio. Em outras palavras, horticultores/agricultores eram essencialmente sedentários, mudando o seu local de assentamento após gerações ou após a total exaustão dos recursos naturais existentes nas proximidades do assentamento.

Outro tipo de sítio arqueológico encontrado no Brasil é o histórico. Por vezes confundidos com apenas ruínas de casas antigas, ou de antigas vilas de mineiros, pescadores ou de agricultores, a Arqueologia Histórica ganhou corpo primeiramente na América, onde as zonas de ocupação da colonização europeia proporcionaram a existência de estruturas e vestígios materiais deixados por antigos moradores e que representam um retrato da vida das populações, que participaram do processo de colonização recente do país.

Em algumas regiões, como a Chapada Diamantina na Bahia, as cidades históricas mineiras ou as inúmeras vilas abandonadas no interior do Brasil formam um retrato arqueológico do sistema colonial implementado pelos portugueses, a partir do início do século XVI, no país ou o modo de vida de populações inteiras que se estabeleceram distantes dos grandes centros coloniais (Figura 06).



Figura 04. Urna funerária Aratu localizada em Almadina, Bahia. Foto: Elvis Barbosa.



Figura 05. Urna cerâmica encontrada no interior da gruta da Cerâmica, Bodoquena, Mato Grosso do Sul. Foto: Heros Lobo.

Figura 06 – Casas de mineiros na Cidade de Pedra, Xique-Xique de Igatu, Mucugê, Bahia. Foto: Elvis Barbosa.



6.5. A ARTE RUPESTRE

A arte rupestre forma um caso à parte na análise da arqueologia, principalmente devido à complexidade da sua compreensão. Os sítios rupestres podem tanto estar associados a grupos de caçadores/coletores como a grupos de horticultores/agricultores. Normalmente, eles são encontrados em painéis pintados nas paredes de lajedos, entradas de grutas e paredões rochosos de sítios de caça. A pintura rupestre é emblemática e muitos pesquisadores não a consideram como arte, mas sim um grafismo. Polêmicas à parte, o termo arte rupestre já é consagrado entre os pesquisadores mundo afora e, geralmente, representa o cotidiano das populações que habitaram aquele ambiente.

Para compreender o significado da arte rupestre, primeiro faz-se necessário entender o que representa a arte nas chamadas sociedades simples. Madu Gaspar considera a divisão que os cientistas sociais idealizaram para classificar as sociedades em simples e em complexas. Nas sociedades simples, *todos participam do processo de produção, distribuição e consumo de bens, com a divisão social do trabalho apoiando-se em classes de idade e sexo* (2003, p.10). Já nas sociedades ditas complexas há uma *forte hierarquia social que assegura privilégios e deveres para diferentes segmentos* (2003, p.10).

Nas sociedades complexas, a arte está dissociada, entre o produtor e o consumidor, dos chamados bens artísticos. Esta dissociação não ocorre nas sociedades simples, pois não existe o chamado “mercado de arte” e o domínio e controle do que é artístico está ligado ao dia a dia da comunidade, fortalecendo tradições que têm por trás de si o sobrenatural, os ritos e os mitos.

É do interior das sociedades simples que vemos o aparecimento da arte rupestre, das pinturas nos tetos e entradas de cavernas. Dentro da caverna, os primeiros indivíduos do gênero Homo buscaram abrigo contra o calor escaldante das pradarias, contra os predadores naturais, contra a chuva. Ela serviu como abrigo, local de habitação, como local de veneração aos mortos e também às divindades. Este espaço é um locus natural relevante para o processo de construção do ser humano como sujeito que realiza intervenções no espaço e transforma-o segundo as suas necessidades imediatas ou de longo prazo, seja para saciar a sua sede de conhecimento ou simplesmente para repousar e manter-se aquecido, durante as noites de inverno.

A caverna pode ser vista, dependendo da região do planeta e principalmente em zonas cársticas, como um fenômeno geológico comum. É nela ou nos elementos que a caracterizam, que as populações do passado realizaram os seus primeiros registros sob a forma da arte rupestre. Assim, sob o ponto de vista da arqueologia, não há diferenciação entre, por exemplo, as esculturas em rocha na caverna Thousand Buda, na China (Figura 7), ou nas pinturas das grutas de Lascaux ou Chauvet, na França, ou mesmo da região da Chapada Diamantina, na Bahia, ou do Vale do Peruaçu, em Minas Gerais (Figura 8). A mensagem que deveria ser transmitida pelo grupo às demais pessoas ainda está lá, à espera de um entendimento lógico, pois no fundo é uma forma de comunicação.

Dentro da ideia de sociedades simples, o universo rupestre brasileiro é repleto de representações que indicam diversos momentos do dia a dia dessas populações, os seus processos ritualísticos, muitas vezes complementando as pinturas corporais, e acima de tudo era parte integrante do sistema de comunicação do qual se preservaram apenas as expressões gráficas, como afirma Madu Gaspar (2003, p. 12). Nelas, estão expressas não apenas uma mensagem, mas um complexo sistema de ideias que era decifrável dentro do grupo (Figura 09).

O registro rupestre é importante para as nossas sociedades contemporâneas, para a compreensão da História da humanidade. Não importa se o símbolo é muito simples e não passa de um traço feito em vermelho, ou se é o detalhe de um animal extinto. O que interessa é o teor da mensagem não decifrada e o papel que ela teve para o grupo que a produziu.



Figura 07. Esculturas na rocha na caverna Thousand Bhuda, carste de Guillin, China. Foto: Luis Eduardo Panisset Travassos.



Figura 08 – Pinturas no paredão adjacente à lapa dos Desenhos, Parque Nacional das Cavernas do Peruaçu, Brasil. Foto: Heros Lobo.



Figura 09 – Pintura rupestre, Serra da Babilônia, Morro do Chapéu, Bahia. Foto: Luis Eduardo Panisset Travassos.

6.6. ARQUEOLOGIA EM ÁREAS CÁRSTICAS

Na Arqueologia, de um modo geral, os artefatos integrantes da cultura material encontram-se dispostos no solo e no subsolo do sítio arqueológico. No entanto, quando se refere a uma área cárstica, o entendimento do que é um sítio arqueológico sofre variações, a começar pelo tipo de material normalmente identificado. Em muitas áreas cársticas, há pouca disponibilidade de solo e de pouco material argiloso. Em grande parte dos locais com estas características, predominam os vestígios de grupos caçadores-coletores, ou seja, populações que viviam exclusivamente da caça e/ou coleta de alimentos. Por se utilizarem deste modo de aquisição de recursos junto à natureza, o grupo não podia apresentar uma grande quantidade de indivíduos. Afinal, caçar e coletar alimentos todos os dias é extenuante e exige o domínio de um grande território.

Outra característica observada nas áreas de carste é a predominância de locais com pinturas ou sinalações rupestres, onde o homem pré-histórico deixou o seu testemunho mais intrigante, de difícil interpretação e que representava a visão que tinha da natureza ao seu redor, suas ações e o seu cotidiano. Normalmente, os sítios arqueológicos com pinturas rupestres apresentam características singulares em função da predominância do registro gráfico e, em alguns casos, da raridade do material lítico e/ou cerâmico nestas áreas.

Mesmo com o registro na rocha, a possibilidade da existência de outras evidências, além das pinturas, deve sempre ser considerada, pois, nos antigos abrigos, os vestígios materiais como fogueiras, restos de alimentos, artefatos líticos e/ou cerâmicos podem estar depositados nas diversas camadas de sedimentos depositados ao longo de milhares de anos. Assim, um sítio arqueológico situado em uma área cárstica pode ser representado por uma caverna ou um simples abrigo de rocha. Normalmente, as ocupações em cavernas estão restritas à zona de penumbra, mas isto não exclui o uso de partes mais profundas da caverna, como as já citadas grutas de Lascaux e de Chauvet na França, a de Altamira na Espanha ou ainda a Gruta das Mãos, em Rurópolis, no Pará.

Pode-se afirmar, em última análise, que uma parte da Pré-História da humanidade se passou no interior ou nas proximidades de uma caverna. Mais que um espaço coletivo para ambientar suas tradições ou o seu imaginário, a caverna foi o ambiente que melhor ofereceu proteção ao ser humano. Foi um local natural de abrigo contra chuva, sol, frio e calor. Foi uma das primeiras moradas do ser humano, um dos primeiros pontos de encontro. Esta ligação permanece nos dias atuais, mesmo com o temor da escuridão e do ambiente fechado. Neste sentido, a interação entre o homem e as cavernas cria um misto de fascínio e de respeito. Na História da humanidade, em praticamente quase todos os povos, teremos uma referência para esta relação, principalmente na Pré-História, palco das primeiras ocupações humanas nas cavernas, uma vez que o Homem ainda era a presa e não o predador dominante da natureza.

Independentemente da ocorrência de outras evidências arqueológicas, nas zonas cársticas há uma predominância das pinturas rupestres. Os diversos painéis encontrados nestas zonas representam, na sua grande maioria, o cotidiano destas populações, as suas caçadas, os animais encontrados nestas áreas e também parte da vegetação, que, em muitos casos, já não existe mais (figuras 10 e 11). Um claro exemplo desta situação é apresentado na Serra da Capivara, no Piauí, onde, há cerca de 20 mil anos (20.000 bp), fauna e flora apontavam para uma densa floresta tropical com animais da megafauna pleistocênica.



Figura 10. Zoomorfos pintados no teto de um abrigo, sítio do Pequeno, Itaguaçu da Bahia. Foto: Elvis Barbosa.



Figura 11 – Zoomorfos pintados em abrigo na Serra da Babilônia, Morro do Chapéu, Bahia. Foto: Elvis Barbosa.

6.7. ETAPAS DA PESQUISA EM ARQUEOLOGIA

Diferentemente do que é apresentado por alguns filmes de apelo popular, a pesquisa em Arqueologia tem uma metodologia própria e é muito exigente no trato com os materiais e áreas a serem pesquisadas. Normalmente, as etapas da pesquisa podem ser divididas da seguinte maneira: prospecção não interventiva; prospecção interventiva; resgate e monitoramento; seguido de divulgação junto às comunidades, onde os sítios arqueológicos estão situados, e também para a comunidade acadêmica e de pesquisadores de áreas correlatas.

A prospecção não interventiva é uma etapa preliminar aos trabalhos a serem desenvolvidos pela arqueologia e também compreende o levantamento dos dados preliminares e de pesquisas já feitas na área a ser impactada, como a identificação de sítios arqueológicos já cadastrados nos bancos de dados das Instituições de Pesquisa, informações históricas sobre a região, dados geográficos e estatísticos também. Após este levantamento prévio, passa-se ao trabalho de campo propriamente dito, que consiste em realizar uma série de caminhamentos pelo terreno objeto de interesse de pesquisa, onde o grupo de arqueólogos procura evidências da cultura material, por meio da varredura intensiva. Normalmente, nesta etapa não há intervenção em solo, subsolo ou retirada de material identificado pela pesquisa. Complementando a metodologia, emprega-se a coleta de informações orais junto às comunidades vizinhas, com o intuito de obter o maior número possível de dados preliminares sobre o material arqueológico do local. A validade desta etapa reside no fato de fazer um levantamento preliminar dos dados arqueológicos ou de possíveis evidências que podem balizar trabalhos futuros.

A prospecção interventiva pode ser considerada como a etapa mais relevante da pesquisa arqueológica. É nela que o sítio arqueológico é delimitado, demarcado e identificado de acordo com a relevância e a sua relação com outros sítios situados na região da pesquisa. Diversas metodologias podem ser empregadas nesta etapa, entre elas a cobertura total, full-coverage survey (Fish & Kowalewski, 1990), utilizada principalmente em áreas amostrais ou de locais que não permitem a visualização da superfície do terreno em função da cobertura vegetal ou outros fatores. Há uma profusão de métodos para evidenciar o material arqueológico, como a realização de alinhamento de poços-teste e escavação por níveis estratigráficos artificiais, que podem variar de 5 a 10 cm, de acordo com o entendimento do arqueólogo, com os sedimentos sendo retirados e peneirados até atingir o nível de esterilidade do solo. Além dos poços-teste, também podem ser abertas sondagens com 1 m de lado e escavadas em níveis estratigráficos artificiais. Com o emprego desta metodologia, é possível delimitar com mais precisão o tamanho e amplitude do sítio arqueológico.

A etapa de resgate é a mais demorada e a que tem o maior peso no processo de estudo do sítio arqueológico. Das metodologias empregadas, a que tem a maior aceitação entre os arqueólogos é a decapagem de grandes áreas. Este método possibilita o conhecimento detalhado do sítio arqueológico e das diversas fases de ocupação das populações pretéritas, pois a área é demarcada em quadras e quadriculas de 1 m de lado. A escavação pode ser processada em níveis estratigráficos artificiais de 10 cm ou respeitando a deposição natural dos sedimentos dentro do sítio. Ao final da etapa do resgate, é possível elaborar um mapa completo com os diversos momentos de ocupação da área, considerando-se o material encontrado e os vestígios das estruturas dispostas no terreno.

As metodologias empregadas pela arqueologia no processo de escavação e resgate têm por finalidade propiciar o melhor entendimento possível para o processo de ocupação de uma determinada área, comparando-a com outras áreas de interesse arqueológico. Isto tudo possibilita entender a distribuição e ocupação de outros sítios arqueológicos presentes nas áreas de ocupação de grupos humanos pretéritos, facilitando o estabelecimento da significância em termos quantitativos e qualitativos de integridade, caracterizando assentamentos para uma estada mais intensa e/ou menos duradoura nos locais de acampamento ou de atividades temporárias (Schiffer, 1972; Clarke, 1977; Redman, 1987; Hodder & Orton 1990; Renfrew & Bahn, 1996).

Ainda para esta etapa, é sempre recomendado realizar o monitoramento arqueológico, principalmente em projetos de arqueologia de contrato. Como o trabalho de resgate nem sempre consegue retirar todo o material depositado no sítio, o monitoramento serve como uma última chance de identificar novas evidências de cultura material que não foram encontradas durante a escavação propriamente dita.

A última etapa do trabalho arqueológico é a divulgação junto às comunidades situadas no entorno do sítio e também para a comunidade científica em geral. Assim, há a garantia de preservação das áreas e conscientização das populações sobre a importância dos vestígios arqueológicos.

Os sítios arqueológicos fazem parte do Patrimônio Material da humanidade, reconhecidos internacionalmente pela UNESCO por meio da Carta de Lausanne – carta para a proteção e a gestão do patrimônio arqueológico ICOMOS/ICAHM (World Heritage Committee/International Scientific Committee on Archaeological Heritage Management). No âmbito brasileiro, a proteção aos sítios arqueológicos é garantida pela Constituição Federal e por legislação específica.

Os estudos de Arqueologia, necessários para a caracterização desses sítios arqueológicos, aumentam a cada dia no país, principalmente pelo fato de as empresas estarem, gradativamente, assumindo um papel de responsabilidade social cada vez maior e respeitando a legislação em vigor. Assim, o uso de boas práticas em arqueologia, como a identificação prévia de sítios arqueológicos, o seu posterior resgate e a divulgação das pesquisas arqueológicas junto a escolas e nas pequenas comunidades onde estão localizados os vestígios, é observado como uma excelente oportunidade das empresas agregarem valor social ao seu portfólio, por meio da preservação do patrimônio histórico e cultural de um povo.

A participação dos diversos grupos sociais que estejam envolvidos, direta ou indiretamente, na elaboração dos estudos arqueológicos, como arqueólogos, empreendedores, sociedade civil, escolas e comunidades das áreas diretamente afetadas pelos estudos arqueológicos, tem ampliado as pesquisas e criado novas possibilidades de avanços. Ao mesmo tempo, tem contribuído com o conhecimento cada vez mais amplo do patrimônio arqueológico brasileiro.

REFERÊNCIAS

- BARRETO, C. A construção de um passado pré-colonial: uma breve história da Arqueologia no Brasil. *Revista USP*, São Paulo, nº 44, p. 32-51, dezembro/fevereiro, 1999-2000.
- CHILDE, V. G. *Introdução à Arqueologia. Mem Martins: Europa América*, 1977.
- CLARKE, D. L. *Spatial archaeology*. London: Academic Press, 1977.
- DANIEL, G. *El concepto de prehistoria. Barcelona: Editorial Labor*, 1968.
- _____. *História de la arqueología: de los anticuarios a V. Gordon Childe*. Madrid: 1992, Alianza Editorial.
- FISH, S. K; KOWALEWSKI, S. A. *The archaeology of regions: a case for full-coverage survey*. Washington: Smithsonian Institution Press, 1990.
- GASPAR, M. *A arte rupestre no Brasil. Rio de Janeiro: Zahar*, 2003. (Coleção Descobrimdo o Brasil).
- HODDER, I.; ORTON, C. *Análisis espacial en arqueología*. Barcelona: Editorial Crítica, 1990.
- MARTIN, G. *Pré-História do Nordeste do Brasil*. 2. ed. Recife: UFPE, 1997.
- REDMAN, C. L. Surface collection, sampling and research design: a retrospective. *American Antiquity*, 52 (2): 249-265, 1987.
- RENFREW, C; BAHN, P. *Archaeology: theories, methods, and practice*. London and New York: Thames & Hudson, 1996
- SCHIFFER, M. B. Archaeological context and systemic context. *American Antiquity*, 37 (2): 156-165, 1972.
- TRIGGER, B. G. *Além da História: os métodos da Pré-História*. São Paulo: Edusp, 1973.
- _____. *Historia del pensamiento arqueológico. Barcelona: Crítica*, 1992.

CAPÍTULO 7:**DESENVOLVIMENTO COMUNITÁRIO
SUSTENTÁVEL E MINERAÇÃO
EM ÁREAS CÁRSTICAS***Solange Silva-Sánchez*

As populações estabelecidas em regiões cársticas e os usos que fazem desse território são múltiplos e variados. De modo geral, a apropriação dos recursos do carste compreende desde o uso do solo para agricultura, a urbanização, o uso das águas superficiais e subterrâneas como manancial de abastecimento, seja em comunidades rurais ou no meio urbano, bem como a exploração de seus recursos minerais. Ademais, em certos locais em que ocorrem cavernas, estas podem adquirir um caráter místico ou sagrado, muitas vezes sendo transformadas em oráculos e santuários. Aos usos mais tradicionais, integram-se atividades turísticas, esportivas e o desenvolvimento de pesquisas com interesse científico.

Nesse contexto, não é raro que se estabeleçam conflitos socioambientais que envolvam a apropriação dos recursos naturais com interesses divergentes. As mesmas características geológicas responsáveis pela beleza cênica da paisagem cárstica, aliada aos testemunhos históricos, que sugerem como uma primeira abordagem, à necessidade de ações preservacionistas, são também responsáveis por uma grande riqueza mineral, de valor econômico inquestionável. Por outro lado, regiões cársticas, que historicamente não registraram grande dinamismo econômico ou populacional, já sofrem a pressão da expansão urbana, o que pode configurar novos conflitos de uso. A própria atividade turística pode concorrer com planos e programas de conservação ambiental.

Com efeito, há uma conflituosidade subjacente aos múltiplos usos e formas de apropriação de recursos naturais e culturais do carste. O campo de conflitos que se abre, quer se refira aos diferentes usos, quer às ações de conservação do patrimônio ambiental, envolve uma multiplicidade de agentes, entre os quais os setores governamentais, comunidade locais, agentes econômicos, organizações da sociedade civil e a comunidade científica. Se por um lado, os conflitos que se estabelecem são reveladores de diferentes projetos da relação sociedade-natureza, representados por interesses muitas vezes antagônicos, expressos no curto e no longo prazo, também abrem caminho para a proposição de novas formas de convivência, pautadas em ações e estratégias que visem o desenvolvimento de diferentes atividades em bases sustentáveis.

Entre os múltiplos usos e formas de apropriação dos recursos que ocorrem em regiões cársticas e os conflitos socioambientais associados, talvez a mineração ainda seja o tema mais controverso. O debate envolve ampla gama de pontos de vista nem sempre congruentes, seja em relação à mineração como atividade geradora de impactos socioambientais negativos, seja como atividade capaz de atuar como elemento propulsor e dinamizador da economia local e regional.

As questões de natureza social e econômica associadas à mineração que se desenvolve em regiões cársticas não são fundamentalmente diferentes daquelas que podem ser observadas na mineração em geral. No entanto, existem certas peculiaridades que precisam ser cuidadosamente consideradas no planejamento e na implantação de projetos, assim como na implementação dos planos e programas socioambientais que visem o desenvolvimento comunitário. Em especial, o uso que fazem as comunidades humanas dos recursos dos ambientes cársticos deve estar sempre em perspectiva no momento de analisar os impactos de um novo projeto e de definir estratégias para estabelecer vínculos com a comunidade local. Os conflitos em torno da apropriação dos recursos naturais e culturais do carste precisam ser reconhecidos, identificados e gerenciados, em um processo em que comunidades locais, poder público, grupos da sociedade civil organizada e agentes econômicos possam dialogar de forma transparente e com independência.

7.1. IMPACTOS SOCIAIS DA MINERAÇÃO EM REGIÕES CÁRSTICAS

Os impactos sociais e econômicos gerados pela atividade de mineração dependem de inúmeros fatores, como o porte do empreendimento e o nível de investimentos realizados, da dinâmica econômica local e regional e do contexto social no qual está inserido, assim como do capital social e da capacidade de governança das comunidades. Além disso, os impactos variam de acordo com as diferentes etapas de vida útil de uma mina, desde os estudos de viabilidade até o momento do fechamento.

A literatura especializada e a experiência têm demonstrado que alguns impactos na economia são normalmente esperados: criação de empregos de diferentes graus de qualificação; a economia local pode ser dinamizada e os preços de bens e serviços no mercado local tendem a subir; há um aumento da arrecadação tributária, assim como da demanda por serviços públicos de saúde, educação, saneamento, transporte e segurança; pode haver afluxo de pessoas em busca de oportunidades de trabalho ou de negócios, além de alterações nas relações sociais previamente existentes.

A mineração pode contribuir, assim, para a formação de um ciclo de crescimento econômico nos municípios em que se localiza, criando um ambiente de desenvolvimento. Este ciclo depende não apenas das características da mineração, como também das condições do mercado. Nas situações em que tem grande peso econômico, a mineração pode estimular uma diversificação da base produtiva local e regional, mas também pode levar a uma especialização econômica e declínio de outros setores. No entanto, o aspecto mais importante refere-se à capacidade de aproveitar as oportunidades que se abrem em relação à geração de renda e emprego e à capacidade de tornar perene o crescimento, por meio de políticas de desenvolvimento sustentável. A possibilidade de a mineração tornar-se uma atividade sustentável, como instrumento efetivo de desenvolvimento, apresenta-se em contraposição à imagem de uma atividade que gera impactos sociais e ambientais negativos e irreversíveis (Costa et al., 2011).

Em regiões cársticas, encontram-se empreendimentos minerários de características bastante diversificadas - desde pequenas minas com um número reduzido de funcionários, pedreiras semiartesanais até grandes empreendimentos associados a fábricas de cimento ou de cal, empregando centenas de trabalhadores e demandando mão de obra qualificada.

De modo geral, em diversos países, a mineração em regiões cársticas ocorre predominantemente em áreas rurais, muitas vezes caracterizadas por uma economia baseada na agricultura familiar ou de subsistência. Há, naturalmente, disparidades regionais, seja em relação aos aspectos econômicos, seja em relação às dinâmicas demográficas. Alguns municípios são fortemente dependentes de políticas públicas de caráter assistencialista ou mantêm profunda dependência da atividade mineradora. Isso ocorre, por exemplo, onde se verifica uma predominância dos investimentos na extração mineral na formação do Produto Interno Bruto (PIB) municipal. Outros municípios são capazes de gerar renda em função de dinâmica econômica e inserção no mercado e da importância de outros setores da economia.

Em certos casos, quando um empreendimento mineiro de grande porte é implantado em regiões cársticas rurais, pode ocorrer declínio da agricultura local, pois a maioria dos produtos necessários ao abastecimento da empresa acaba sendo adquirida fora da comunidade. A empresa mineradora, conhecendo a dinâmica local e estando disposta a estabelecer um vínculo com a comunidade, poderá implementar programas que fortaleçam e integrem a produção agrícola na cadeia de fornecedores da mineração.

Não se pode esquecer que o desenvolvimento socioeconômico, impulsionado pela implantação de um novo empreendimento de mineração em região cárstica, pode ocasionar impactos indiretos sobre o próprio carste. O crescimento populacional, induzido pelo empreendimento, pode resultar na expansão de áreas urbanas, no aumento do volume de resíduos sólidos gerados, demandando a implantação de novos aterros de resíduos ou, ainda, na expansão de áreas dedicadas à agropecuária ou mesmo no incremento de atividades turísticas devido ao acesso facilitado à região. Certas regiões cársticas já estão submetidas à forte pressão da expansão demográfica e da indústria mineral. Nesse contexto, a possibilidade de comprometimento da qualidade de seus recursos hídricos, vegetação e relevo foi fator decisivo para a criação de unidades de conservação (Berbert-Born, 2002).

Os impactos sociais e econômicos são diferentes, segundo as etapas do ciclo de vida de uma mina. Evidentemente, deve-se levar em consideração as características específicas de cada projeto mineiro. Contudo, as etapas básicas do ciclo de vida de uma mina incluem estudos de viabilidade, implantação, operação, desativação, pós-fechamento e uso futuro da área (Sánchez et al., 2013). A cada etapa, correspondem determinados impactos com graus diferenciados de importância.

Assim, na fase de planejamento de uma mina, os impactos mais comumente identificados referem-se a possíveis tensões e expectativas em relação à implantação/operação do empreendimento, especulação imobiliária, rupturas de relações comunitárias em decorrência de aquisição de terras ou reassentamento involuntário.

Já na etapa de implantação da mina, que envolve contratação de mão de obra, pode ocorrer grande afluxo de trabalhadores (especialmente quando os investimentos são de monta e, no caso da mineração de calcário, quando há uma unidade industrial associada, como uma fábrica de cimento); aumento da demanda por serviços públicos; desconforto ambiental (devido à geração de poeira, ruído, vibração); pressão sobre a infraestrutura urbana; aumento da circulação de pessoas estranhas à comunidade; elevação de preços e do custo de vida; incidência de novas doenças e aumento de ocorrências de segurança pública. Em casos onde há reassentamento involuntário, é o momento de desocupação e demolição de imóveis e remanejamento de redes de serviços públicos. A implantação da mina pode gerar, ainda, perda de terras potencialmente agricultáveis e interferência com populações indígenas ou tradicionais. Frequentemente, há aumento do tráfego de caminhões, o que pode representar uma fonte de impactos significativos para as comunidades lindeiras, ainda que distantes da área de mina. Outros impactos frequentes são a alteração ou destruição de sítios de interesse cultural, além de aumento da renda e arrecadação tributária. Neste quesito, destaca-se o aumento da arrecadação de impostos, que podem incidir sobre serviços contratados localmente como construção civil, serviços de limpeza e vários outros.

Na fase de operação da mina, novos impactos podem ocorrer, como dinamização das atividades econômicas e geração de royalties; alteração das relações socioculturais; crescimento demográfico; conflitos relacionados ao uso dos recursos hídricos; risco de interferência com o patrimônio cultural.

Por outro lado, os impactos socioeconômicos associados à etapa de desativação de uma mina vinculam-se em grande parte à maior ou à menor dependência que a comunidade ou município estabeleceram com a atividade mineira. Isto também tem implicações na abrangência territorial dos impactos (local, regional) e na identificação dos grupos mais afetados (grupos mais vulneráveis, comerciantes e fornecedores locais). De toda forma, alguns impactos já são esperados como, por exemplo, perda da arrecadação tributária, principalmente municipal, perda de postos de trabalho e renda, diminuição da atividade econômica local, redução de qualidade e alcance dos serviços públicos.

Avaliar cada um dos impactos sociais e econômicos associados à atividade mineira não é tarefa simples. A importância ou vulnerabilidade de um determinado recurso ambiental ou cultural afetado é critério decisivo para atribuir maior ou menor significância a um impacto identificado. Tal perspectiva deve ser cuidadosamente considerada quando se trata de regiões cársticas, cujas características particulares conferem à paisagem um "caráter de exceção" (Sánchez, 2003).

Os impactos sociais e econômicos da mineração de um modo geral, e em particular daquela desenvolvida em regiões de carste, devem ser adequadamente identificados e avaliados, de modo que possam ser implementadas ações que maximizem a contribuição da mineração nas localidades onde a extração de recursos não renováveis representa uma atividade econômica significativa. Respeitadas as especificidades de cada contexto em que a mineração opera, o objetivo chave deve ser a promoção do desenvolvimento local e regional em bases sustentáveis.

Isto implica a adoção de um conjunto de iniciativas por parte da empresa mineradora que vão desde a identificação precisa de oportunidades à construção de relações transparentes e duradouras com a comunidade. De outra parte, o poder público precisa atuar como facilitador, mobilizando suas estruturas de governança, de modo a articular recursos e forças da sociedade civil e dos agentes econômicos. Nisso reside a possibilidade de que o ciclo de crescimento econômico propiciado pela mineração possa gerar empreendimentos locais conexos, desencadeando processo de diversificação produtiva, resultando em efetivo desenvolvimento da comunidade anfitriã.

7.2. DESENVOLVIMENTO COMUNITÁRIO E MINERAÇÃO

Durante muito tempo, grande parte das empresas de mineração considerava que, por meio do provimento de postos de trabalho e do pagamento de tributos, sua contribuição para o desenvolvimento local e regional estaria garantida. Na atualidade, tal relação é bem mais complexa e as empresas - principalmente as grandes - são cobradas em termos de responsabilidade social, comprometimento com o desenvolvimento das comunidades anfitriãs e, no longo prazo, em garantir um legado positivo e duradouro.

O desenvolvimento comunitário pressupõe um processo de fortalecimento das capacidades e habilidades da comunidade, do estímulo à autoconfiança de seus membros, na perspectiva de criar condições para que eles possam influenciar, agir e tomar decisões sobre questões que afetam suas vidas, de forma autônoma e responsável, sendo protagonistas desse processo. As ações que levam a um desenvolvimento comunitário sustentável são aquelas que contribuem para a consolidação e viabilidade da comunidade de forma duradoura.

A relação entre desenvolvimento comunitário sustentável e mineração é tema que suscita intenso debate no meio acadêmico, nas instituições governamentais e entre grupos organizados da sociedade civil. O debate envolve diferentes pontos de vista. De um lado, governos locais e regionais responsáveis em promover políticas de desenvolvimento econômico, além das próprias empresas mineradoras, enfatizam a capacidade da mineração em promover o desenvolvimento. De outro lado, grupos da sociedade civil organizada, ambientalistas e movimentos sociais demonstram preocupação com os impactos negativos gerados pela mineração. As comunidades locais tendem a posicionar-se de acordo com a relação que estabelecem com a empresa, se funcionários, fornecedores ou apenas vizinhos da mina (Silva-Sánchez e Sánchez, 2011).

Não é incomum observar que quando uma mineração pretende se instalar em uma comunidade carente de infraestrutura e equipamentos sociais básicos, a primeira medida a ser tomada é fornecer justamente esses serviços, muitas vezes assumindo uma tarefa que é de responsabilidade do poder público. Construção de escolas, postos de saúde, abertura de vias estão entre investimentos frequentes promovidos por grandes projetos mineiros. Se, por um lado, esse tipo de iniciativa é recebido com simpatia pela comunidade na qual a mina irá operar, resolvendo alguns problemas muitas vezes de caráter emergencial, por outro, não promove um efetivo fortalecimento da comunidade, de suas capacidades e habilidades para que ela possa desenvolver-se com independência, mesmo após o término da atividade mineira. A experiência tem demonstrado que algumas situações concorrem para que determinados projetos não sejam sustentáveis, por exemplo, quando são desenhados pela empresa sem a participação da comunidade local, quando são acessíveis apenas a alguns membros da comunidade, ou, ainda, porque a capacidade das pessoas beneficiadas não foi incrementada para gerenciar os programas em um nível desejado (ICMM, 2012).

A possibilidade de a mineração contribuir para a formação de um ciclo de crescimento econômico nos municípios e localidades em que opera está relacionada à capacidade ou não de aproveitar o campo de oportunidades que se abre em relação à geração de renda e emprego e à capacidade de tornar o crescimento econômico perene, por meio de políticas de desenvolvimento sustentável em benefício das populações futuras. Nesse sentido, a mineração pode desempenhar papel central no desenvolvimento comunitário, com iniciativas que promovam a conversão de um ativo local – o recurso natural não renovável – em outro ativo local de natureza diversa, ou seja, o capital humano e social (ICMM, 2012). Para que esse processo seja bem sucedido, a empresa mineradora precisa formular seus objetivos estratégicos de longo prazo considerando, entre outros aspectos, os planos atuais e futuros de desenvolvimento local e regional.

As ações, planos e programas implementados por uma empresa de mineração, visando o desenvolvimento comunitário sustentável, perpassam todas as etapas do ciclo de vida de uma mina, cada qual com suas especificidades, devendo começar ainda nas etapas iniciais do projeto. As estratégias e os esforços que deverão ser empregados nesse processo variam de acordo com a natureza, a localização e o porte da atividade mineira. De qualquer modo, alguns princípios básicos devem orientar a atuação da empresa: (i) vinculação entre os objetivos estratégicos de longo prazo da empresa aos planos de desenvolvimento locais e regionais; (ii) garantia de consulta e participação das comunidades; (iii) envolvimento de todas as partes interessadas, poder público, organizações da sociedade civil e empresa; (iv) fortalecimento das capacidades da comunidade, das organizações da sociedade civil e do governo local (ICMM, 2012).

O grande desafio, portanto, é criar condições à instalação de um ambiente propício para que outras atividades, paralelas à mineração, possam prosperar. Nesse processo, o envolvimento e responsabilidade da empresa devem ser compartilhados com os governos locais e as organizações da sociedade civil atuantes na comunidade e região (ICMM, 2012). Ademais, a empresa deve criar vínculos de confiança com a comunidade, implementando canais efetivos e permanentes de comunicação.

Cada um dos agentes sociais envolvidos tem papel distinto e complementar que concorre para o sucesso das iniciativas, programas e planos que visem o desenvolvimento comunitário sustentável. A empresa desempenha um papel ativo, implantando planos e programas socioambientais que fomentem as capacidades e habilidades da comunidade. Os governos locais devem posicionar-se como lideranças estratégicas, coordenando ações, articulando recursos e políticas de diferentes esferas de governos e oferecendo os serviços básicos necessários. A sociedade civil organizada, sejam ONGs atuantes em nível regional ou nacional, sejam organizações comunitárias de base estritamente local, podem auxiliar na identificação e priorização de necessidades e demandas, na mobilização dos ativos locais, colaborando com a organização da população ou mesmo com a identificação e resolução de eventuais conflitos.

7.3. ESTUDOS E LEVANTAMENTOS

As possibilidades de promover o desenvolvimento local perpassam todas as etapas do ciclo de um empreendimento mineiro, que começa muito antes de sua operação propriamente dita. Contudo, cada etapa tem seus desafios e oportunidades específicas, desde os estudos de viabilidade, que podem ser considerados o “marco” inicial da vida de uma mina, até a etapa de sua desativação, que envolve as ações de fechamento e monitoramento pós-fechamento (Sánchez et al., 2013).

Avaliar adequadamente os impactos e formular ações que tenham por objetivo o desenvolvimento local e a potencialização do capital humano e social existentes deveriam ser preocupações presentes em todas as etapas do ciclo de vida de um empreendimento mineiro. Nessa perspectiva, a empresa deve adotar diferentes iniciativas, voltadas às preocupações e aos interesses de cada grupo social. No âmbito da comunidade local, são exemplos: compartilhar conhecimentos e habilidades nas áreas de comércio, administração, finanças, logística, abastecimento, por meio da promoção da capacitação e qualificação de agentes locais, como pequenos comerciantes e empreendedores. Na mesma direção, estão os programas de alfabetização de adultos ou de capacitação de jovens adultos, iniciativas que podem gerar valor para a comunidade. Tais programas e projetos precisam ser perenes e, principalmente, não podem ter caráter assistencialista e imediatista, devendo sempre buscar o empoderamento (*empowerment*) das comunidades e o fortalecimento da governança institucional (Enríquez et al., 2011).

Tendo como premissa a importância de considerar as particularidades do contexto em que opera, a mineração que se desenvolve em regiões cársticas tem a oportunidade de maximizar o aproveitamento do turismo, implementando planos e programas adequados às características e demandas identificadas, promovendo, por exemplo, o espeleoturismo e suas múltiplas possibilidades. Os programas socioambientais e de responsabilidade social, formulados pela empresa, devem levar em conta que a própria preservação do patrimônio espeleológico é condição para o desenvolvimento de uma atividade econômica baseada no turismo, capaz de gerar renda e contribuir para o fortalecimento e diversificação da economia local (Lobo et al., 2010).

Nessas situações, a mineração poderá estimular e apoiar a criação de redes sociais locais que congreguem diferentes agentes públicos e atores sociais, de agências ou de conselhos de desenvolvimento local ou regional, já nas etapas iniciais do projeto. Um conselho ou agência de desenvolvimento deverá respeitar os princípios da participação pública e da transparência, visando garantir que experiências e informações possam ser compartilhadas. Assim, os laços sociais e a confiança da sociedade nas suas possibilidades de desenvolvimento podem ser fortalecidos. Entre outros aspectos, essa instância terá como missão descobrir potenciais de desenvolvimento local e regional para além da atividade mineira. Atingir esse objetivo depende de um comprometimento efetivo da empresa com projetos e programas desenhados com essa finalidade, bem como das características das comunidades, ou seja, sua maior ou menor capacidade organizativa e participativa, o capital social disponível e a capacidade de mobilizá-lo.

Tem sido cada vez mais recorrente a criação de fundos de desenvolvimento regional ou fundações comunitárias voltadas à gestão de recursos financeiros, contribuições sociais e outros benefícios gerados pela mineração, com vistas a fomentar o desenvolvimento sustentável das comunidades afetadas. Tais fundações são constituídas com base em contribuições e investimentos que nada tem a ver com as obrigações legais das empresas para mitigar ou compensar impactos sociais negativos. São instituições que têm por objetivo implementar planos e programas sociais de longo prazo, visando justamente o desenvolvimento local.

De acordo com a legislação de cada país, royalties da mineração podem ser distribuídos também para as localidades. Por exemplo, no Brasil, a legislação federal instituiu uma contribuição financeira (Compensação Financeira pela Exploração Mineral CFEM), calculada sobre o valor do faturamento líquido da empresa, obtido por ocasião da venda do produto mineral, visando criar um vínculo entre a mineração e o desenvolvimento local. Estados e municípios mineradores têm, assim, a possibilidade de aplicar esses recursos em melhorias da infraestrutura

local, nos serviços de saúde e educação ou outras áreas que promovam o desenvolvimento sustentável da economia local, considerando o cenário pós-fechamento da mina. Contudo, é importante que o município, que se beneficia dessa renda mineral, disponha de um plano específico ou mesmo de uma legislação que vincule esses recursos a alguma estratégia de diversificação produtiva ou a algum fundo de desenvolvimento local.

A base para um desenvolvimento comunitário sustentável é o adequado conhecimento da realidade local, de suas carências e potencialidades. Isso inclui a identificação das possibilidades econômicas da comunidade e da região para geração de emprego e renda, a identificação dos grupos de interesse e lideranças locais e o conhecimento dos aspectos sociais e culturais da comunidade. Em locais com alto grau de dependência da mineração, ações mais pragmáticas, com base na mobilização das potencialidades econômicas previamente identificadas e hierarquizadas, são de grande valia. Em locais com uma base econômica mais desenvolvida, poderá haver maior capacidade do município ou região para atrair recursos (financeiros, tecnológicos, institucionais etc) nacionais e internacionais, públicos e privados, por meio de diferentes modalidades. Quanto maior a dependência, maior será o papel da empresa de mineração em fomentar parcerias e promover ações visando à diversificação da economia local. O envolvimento do governo local, de associações da sociedade civil organizada e da comunidade é uma condição importante para o sucesso de programas de desenvolvimento.

O conhecimento consistente da realidade em que atua, fundamentado por levantamentos sistemáticos de dados, cuidadosamente analisados, do histórico de conflitos que porventura existam e das reivindicações da população, pode orientar a empresa a selecionar os aspectos que merecem ser trabalhados, a avaliar as possibilidades, as vantagens e desvantagens de se associar a organizações que já atuem localmente ou na região, evitando a duplicação de ações ou fortalecendo aquelas que se mostram promissoras.

Conhecendo a realidade local e os grupos sociais atuantes, as demandas e os conflitos preexistentes, a empresa poderá apoiar e promover ações e projetos que já venham sendo implementados com sucesso nas comunidades, otimizando os recursos investidos. Demandas históricas de populações tradicionais, ou conflitos estabelecidos acerca da sobreposição entre áreas naturais protegidas e áreas com grande potencial mineral, que já venham sendo objeto de discussão na comunidade, devem ser cuidadosamente considerados. No mesmo sentido, experiências bem sucedidas de articulação de governos locais, como a formação de consórcios intermunicipais, também merecem apoio por parte da empresa mineradora.

De modo geral, estudos e diagnósticos socioeconômicos são elaborados nas fases iniciais do projeto, como parte dos estudos de avaliação de impacto ambiental. Os estudos de base são formulados recorrendo-se a dados secundários, fornecidos pelos censos demográficos, órgãos e institutos de pesquisa governamentais, além de dados primários obtidos nos levantamentos de campo. Alguns aspectos que integram um estudo de base são: (i) dinâmica demográfica, (ii) organização e dinâmica econômica, características e condições da estrutura produtiva local e regional (iii) infraestrutura e serviços básicos, (iv) finanças públicas, (v) organização social e contexto sociopolítico, (vi) grupos sociais vulneráveis, (vii) uso local de recursos naturais, e (viii) cultura popular, incluindo a identificação de lugares de produção e consumo. Informações precisas sobre o mercado de trabalho local e regional, sua dinâmica atual e tendências futuras, também são valiosos.

Levantamentos e análises de dados secundários são necessários, porém insuficientes. Tais estudos devem ser complementados por meio de levantamentos de campo, entrevistas e questionários especialmente elaborados para esse fim, que tenham por objetivos norteadores identificar e compreender a forma como esses atores chave (i) apreendem e hierarquizam os problemas e as qualidades do local, identificando suas prioridades, expectativas e receptividade em relação ao empreendimento, além de eventuais conflitos socioambientais existentes na área do projeto e seu entorno; (ii) relacionam-se com o território e fazem uso de seus recursos.

Nesse processo, é fundamental identificar os indivíduos ou grupos que, direta ou indiretamente, possam ser afetados (positiva ou negativamente) pela mineração, assim como aqueles que tenham um interesse específico ou possam influenciar o projeto. O mapeamento das partes interessadas (stakeholders), além de ser detalhado e exaustivo, deve ser periodicamente atualizado. As partes interessadas compreendem todos os indivíduos ou grupos que possam ser afetados, direta ou indiretamente, pela atividade mineira, ou tenham interesse ou influência sobre seus resultados.

Para uma empresa de mineração, esse conjunto valioso de informações será fundamental para a implantação e desenvolvimento de um sistema de indicadores socioeconômicos, que deverão ser continuamente monitorados. Tais indicadores irão proporcionar o conhecimento das transformações e do desenvolvimento local, facilitar processos de tomada decisão, além de adiantar e revelar tendências e identificar previamente a ocorrência de situações indesejáveis, como a possibilidade de se estabelecerem novos conflitos em torno do uso dos recursos naturais e mesmo eventuais falhas na abrangência de programas ou planos de caráter social conduzidos pela empresa, ou resultados que estejam aquém das metas previamente definidas.

Os indicadores de desenvolvimento serão referenciais para a avaliação da melhoria do nível de qualidade de vida dos municípios e suas comunidades, com base em parâmetros pré-determinados. Isto vale, por exemplo, para índices de analfabetismo, acesso a serviços de saúde preventiva, nível de bem-estar econômico individual e familiar, renda mensal bruta por domicílio, frequência e utilização de espaços de lazer e cultura, satisfação da comunidade com a empresa, entre outros.

A literatura especializada recomenda que a construção de indicadores seja baseada em uma abordagem participativa, ou seja, que envolva a comunidade e lideranças locais, atores públicos regionais e sociedade civil organizada, reunidos em consultas públicas ampliadas, oficinas de trabalhos, configurando amplo processo de mobilização social. A construção participativa de indicadores de desenvolvimento constitui uma ferramenta eficaz para medir as transformações no município e na região ao longo do tempo, subsidiando a proposição de políticas públicas, investimentos privados na região, permitindo um planejamento fundamentado em dados para a formulação de cenários futuros.

7.4. ABORDAGEM PARTICIPATIVA: CONSULTA E ENVOLVIMENTO PÚBLICO

Em diversos países, há exigências legais de consulta pública, como requisito para a obtenção de autorizações e licenças governamentais. Uma deficiência, frequentemente apontada nesses processos formais de consulta, é que ocorrem muito tarde no ciclo de elaboração do projeto, quando muitas decisões já foram tomadas, restando à consulta pública um papel secundário de comunicação ou de negociação de compensações. Ademais, muitas vezes, empresas encaram tais obrigações legais como formalidades e não como oportunidade de iniciar um processo de comunicação significativa e permanente com a comunidade e outras partes interessadas.

A consulta e o envolvimento das partes interessadas (stakeholder engagement) inscrevem-se em um processo mais amplo, inclusivo e contínuo entre a empresa de mineração e a população potencialmente afetada e interessada, que se estende por todas as etapas da vida de uma mina, iniciando-se ainda na fase dos estudos de viabilidade (IFC, 2007, Instituto Votorantim, 2012, Instituto Votorantim, 2013). Tendo em vista que cada etapa apresenta questões e oportunidades distintas, diferentes estratégias de envolvimento e participação devem ser empregadas, levando-se em conta, ainda, a natureza, localização e porte da atividade mineira.

A experiência tem demonstrado que comunidades vizinhas à mineração vinculada à indústria de cimento respondem positivamente a um processo participativo consultivo. Além disso, comunidades que estabeleceram um canal de diálogo com a empresa, alcançando certo empoderamento, apresentam índices mais baixos de poluição e melhor nível de qualidade de vida, o que também resulta em maior rentabilidade para a empresa, que deve tomar a iniciativa para estabelecer um diálogo positivo e contínuo com a comunidade anfitriã (Battelle & ERM, s/d).

Como exemplos de partes interessadas que devem participar desse processo podem ser mencionados, além das comunidades locais, representantes do poder público local e regional, organizações da sociedade civil, lideranças políticas, religiosas, representações de classe, grupos sociais vulneráveis, fornecedores, clientes, funcionários próprios e terceirizados, empresas de turismo (receptivo e emissivo), entre outros. Destaca-se, neste aspecto, a participação de grupos com interesse específico em ambientes cársticos, tais como espeleólogos e pesquisadores. No caso de ocorrência de patrimônio espeleológico, a empresa deve manter canais de comunicação permanentes com esses grupos.

Em linhas gerais, o processo de envolvimento das partes interessadas compreende um conjunto de ações que incluem: (i) identificação e análise das partes interessadas; (ii) divulgação de informações relativas ao projeto; (iii) consulta às partes interessadas; (iv) negociação e estabelecimento de parcerias; (v) gestão de conflitos; (vi) envolvimento no monitoramento; (vii) relatórios e prestação de contas. Há disponível na literatura ampla diversidade de ferramentas e metodologias que podem ser usadas para promover o envolvimento e participação das partes interessadas. A escolha do método e ferramentas deve considerar não apenas o contexto no qual a mineração está inserida como a etapa de ciclo de vida em que se encontra. Não existe uma abordagem única para todas as situações, mas todo o processo deve constar de um plano cuidadosamente desenhado e continuamente revisado (Instituto Votorantim, 2012).

Ainda na etapa dos estudos de viabilidade de um projeto de mineração, é importante que a empresa estabeleça um plano e estratégias para identificar e mapear indivíduos ou grupos sociais que possam ter algum interesse no projeto ou influência sobre seus resultados, nesse sentido algumas perguntas-chave podem orientar o mapeamento das partes interessadas (Quadro 1). Essa prática pode, inclusive, auxiliar no processo de tomada de decisão, por exemplo, quanto ao acesso e rota dos caminhões que irão transportar o minério, ou ainda, sobre quais formas de comunicação serão mais adequadas considerando-se as características do público alvo (grau de organização, nível de alfabetização etc). Há uma tendência em priorizar indivíduos ou grupos estabelecidos na área do projeto ou no seu entorno imediato.

Contudo, deve-se ter o cuidado de não restringir demais os levantamentos ou subestimar certos grupos que possam ser afetados por impactos indiretos, ou mesmo grupos que estejam fora da área afetada. O envolvimento das partes interessadas pode resultar em decisões efetivamente sustentáveis porque são amplamente aceitas e compreendidas pelo público que, assim, adquire confiança nos agentes tomadores de decisão (Battelle & ERM, s/d).

QUADRO 1 – Mapeamento de partes interessadas

Identificando as partes interessadas: perguntas que podem contribuir para a identificação das partes interessadas

- Quais são as exigências da legislação para o processo de participação pública?
- Quais indivíduos ou grupos serão negativamente afetados pelos potenciais impactos ambientais e sociais na área de influência do projeto?
- Quem são os indivíduos ou grupos mais vulneráveis entre aqueles potencialmente afetados?
- Em quais etapas do desenvolvimento da mina determinados indivíduos ou grupos serão mais afetados (implantação/aquisição de terras; construção/menor fluxo de pessoas, operação/aumento na demanda por infraestrutura; fechamento/queda na arrecadação tributária/demissões)?
- Quais indivíduos ou grupos são favoráveis ao projeto?
- Quais indivíduos ou grupos se opõem ao projeto e quais são as principais questões levantadas?
- Quem são os representantes do poder público local?
- Quais são as lideranças ou formadores de opinião com atuação local ou regional?

Fonte: adaptado de IFC, International Finance Corporation. 2007. Stakeholder Engagement: A Good Practice Handbook for Companies Doing Business in Emerging Markets. IFC, Washington. [versão em português, Participação dos Interessados: Manual de Melhores Práticas para Fazer Negócios em Mercados Emergentes.]

Em áreas de carste com potencial turístico ou com uma atividade turística já consolidada, o mapeamento das partes interessadas deve levar em conta um grupo não uniforme, que pode ser chamado de público itinerante, representado pelos turistas. São pessoas ou grupos que circulam e desfrutam da área de influência em situações eventuais, mas que podem ser afetados por alguma atividade da mina. Isto se aplica também a operadores e guias de turismo, atores da instância de governança pública do turismo que atue no local, pessoas em visita aos parentes, espeleólogos, esportistas e a pesquisadores e estudiosos do carste, das mais variadas especialidades.

O porte do projeto e, sobretudo, a importância dos impactos ambientais gerados são questões a serem consideradas na formulação das estratégias da empresa. Projetos com elevado grau de complexidade demandam uma abordagem mais sofisticada, que atinja com eficácia uma diversidade maior de grupos ou indivíduos com algum interesse no projeto. Em todos os casos, a definição de responsabilidades internamente à empresa e o envolvimento da alta direção são essenciais para o sucesso dessa tarefa.

A identificação das partes interessadas deve ser detalhada e periodicamente atualizada, pois as preocupações, interesses e os grupos afetados pela mineração podem variar ao longo do tempo e das diferentes etapas da vida útil da mina. Sempre que houver alguma alteração importante no projeto, nos planos e programas sociais de responsabilidade da empresa ou nas condições sociais, econômicas e políticas locais, recomenda-se que o mapeamento das partes interessadas seja revisto (Instituto Votorantim, 2012).

Na literatura e nos manuais especializados há uma variedade de técnicas e ferramentas que podem ser empregadas para proceder à identificação das partes interessadas (IFC, 2007). Esses levantamentos devem adotar uma abordagem sistemática e ser orientados por uma estratégia bem definida, com objetivos claros e mensuráveis.

A divulgação de informações relativas ao projeto deve levar em conta a diversidade das partes interessadas identificadas e mapeadas. A linguagem utilizada deve ser clara, objetiva e acessível ao público ao qual se destina. De modo geral, a informação deve ser compreensível a todo tipo de público, inclusive àqueles indivíduos e grupos que não detenham conhecimento técnico sobre o projeto. A transparência no processo de comunicação da informação é condição para evitar a perda de credibilidade no projeto e nos seus representantes.

Evidentemente, cada informação ou mensagem transmitida pela empresa será interpretada e percebida de maneiras diversas, de acordo com o público-alvo, em razão das experiências individuais, valores culturais, expectativas, diversidade de interesses em relação ao projeto, grau de escolaridade, composição étnica e de gênero, estrutura de lideranças locais etc. A empresa deve ter o cuidado de desenvolver seu plano de comunicação e de relações públicas levando em conta esses aspectos, que deverão orientar a escolha das técnicas e do material a ser utilizado por equipe de profissionais qualificados para essa finalidade.

O processo de comunicação deve ser uma prática adotada ainda durante os estudos de viabilidade do projeto e estender-se por toda a vida útil da mina. Alguns momentos são particularmente estratégicos, como o início das operações, alterações significativas no projeto e o momento de fechamento da mina.

O acesso à informação relevante, atualizada e de qualidade sobre o projeto e seus impactos é crucial para promover um processo de consulta efetivo às partes interessadas. Participar de maneira informada é pressuposto para que se estabeleça um diálogo qualificado entre comunidade e empresa.

O ideal é que o processo de consulta comece nas etapas iniciais de uma mina, prática que está estritamente vinculada ao plano de comunicação formulado pela empresa. A consulta às partes interessadas permite aprofundar o conhecimento e compreensão sobre o projeto e contribui para o estabelecimento de um contexto cooperativo e colaborativo, indispensável ao sucesso de planos e programas que visem ao desenvolvimento sustentável de uma comunidade. Ademais, a consulta realizada em uma etapa de desenvolvimento inicial do projeto pode informar planejadores e projetistas sobre componentes do projeto considerados problemáticos, sob o ponto de vista de certas partes interessadas, e que deveriam ser revistos ou para os quais deveriam ser desenvolvidas alternativas. Por exemplo, uma via de acesso pode ser objeto de contestação devido ao fato de cruzar um povoado ou passar ao lado de uma escola, ou, ainda, por colocar em risco uma nascente ou, ainda, por se situar a montante de um local onde as águas são captadas pela comunidade.

Nesse processo interativo, deve-se garantir a manifestação de diferentes pontos de vista, preocupações, expectativas da comunidade e demais grupos e indivíduos com interesse no projeto. É necessário garantir que tais pontos de vista, preocupações e expectativas sejam devidamente considerados e, quando pertinentes, incorporados aos projetos. Quando não puderem ser incorporados, é boa prática registrar os motivos e dar retorno àqueles que participaram do processo.

A fase de consulta precisa ser conduzida de maneira organizada, com ações planejadas e estruturadas para diferentes públicos. A consulta pode envolver entrevistas individuais ou em grupos, oficinas de trabalho, grupos focais, reuniões setoriais, audiências públicas, enquetes e surveys. Diferentes metodologias de participação podem ser adotadas, desde que estejam adequadas ao público-alvo, o que exige o envolvimento de profissionais qualificados para planejar, implementar e avaliar o processo. Também quanto a esse aspecto, há uma vasta literatura a respeito, com sugestão de diferentes ferramentas, metodologias e técnicas que podem ser aplicadas aos mais diversos contextos (IFC, 2007; CDA, 2005). A boa prática recomenda, ao menos, cinco etapas básicas para o desenvolvimento de um processo de consulta às partes interessadas que seja interativo e com resultados efetivos (IFC, 2007):

- 1 – planejar antecipadamente, considerando quem precisa ser consultado, quais questões são relevantes e quais os objetivos da consulta;
- 2 – utilizar os princípios das melhores práticas; o processo de consulta é sempre específico a cada contexto e aos vários tipos de interessados e, por essa razão, pode utilizar diferentes abordagens. Contudo, alguns princípios devem ser garantidos. Isto é, o processo deve ser direcionado às partes afetadas, deve iniciar-se o quanto antes, deve ser significativo, interativo e inclusivo e livre de manipulação. A documentação de todo o processo também é prática recomendada.
- 3 – comunicar os resultados; a empresa que deve mostrar às partes interessadas como e se incorporou eventuais modificações em seus planos, em razão das demandas ou propostas formuladas durante o processo de consulta.
- 4 – documentar o processo de consulta, registrando como e onde ocorreram os encontros, qual o público participante, quais tópicos foram abordados e quais resultados foram alcançados.
- 5 – informar quais foram os resultados do processo de consulta e quais serão os próximos passos.

A equipe responsável pela condução de um processo de consulta pública deve partilhar de um mesmo conjunto de informações, para que a mensagem a ser transmitida seja clara e coerente (Instituto Votorantim, 2012). É sempre recomendado que a direção da empresa acompanhe esse processo e considere seus resultados na tomada de decisão.

A prática de estabelecer canais de comunicação com a comunidade, reunindo lideranças, poder público, organizações da sociedade civil pode resultar na criação de conselhos comunitários, que, de forma colaborativa, realizam um “mapeamento da realidade local” para, então, traçar metas mais precisas e definir programas que visem fortalecer o capital social e melhorar os indicadores socioeconômicos (Instituto Votorantim, 2012 b).

Ainda que o envolvimento das partes interessadas e o fornecimento regular de informação relevante sobre o projeto contribuam para instaurar um canal de diálogo entre a comunidade e a empresa mineradora, recomenda-se que a empresa também adote um canal formal de recebimento e registro de queixas e reclamações. Essa conduta favorece a resolução de eventuais conflitos que possam surgir ao longo da vida útil da mina.

O formato a ser adotado pode variar desde a criação de um canal de comunicação direto, uma linha telefônica sem custos, uma ouvidoria, um site mantido pela empresa até a implantação de um escritório com a presença de um funcionário designado, especialmente, para estabelecer uma interlocução com a comunidade. O que efetivamente importa nesse caso é que o mecanismo de recebimento e registro de queixas seja acessível, adequado à complexidade do projeto, transparente e efetivo quanto às respostas dadas pela empresa. O registro das queixas e reclamações é essencial e deve ser encaminhado aos setores responsáveis pela adoção das ações corretivas, quando forem necessárias, que devem ser comunicadas aos interessados.

Também o monitoramento das medidas de mitigação dos impactos gerados pelo projeto ou das medidas de compensação deve ser participativo. Ao adotar essa prática, a empresa incentiva a comunidade a partilhar responsabilidades, favorecendo o processo de empoderamento da comunidade, no sentido de que ela tenha influência e capacidade de ação e decisão sobre questões que a afetam diretamente (IFC, 2007, Sánchez et al., 2013). Nem sempre a comunidade dispõe da habilidade ou capacidade para exercer essa atividade. Nesses casos, a empresa pode implementar programas de treinamento para desenvolver certas habilidades técnicas na comunidade, por exemplo, para acompanhar análises de qualidade da água ou avaliar certos indicadores socioeconômicos. Alternativamente, a empresa pode contratar monitores externos, como uma ONG ou acadêmicos locais para, juntamente com a comunidade, realizarem um monitoramento participativo e informativo.

Todo o processo de participação e consulta, bem como o desempenho ambiental e social da empresa e os resultados das medidas de monitoramento e dos programas socioambientais precisam ser devidamente registrados e comunicados às partes interessadas. Há padrões internacionais a serem considerados quando da elaboração desses relatórios (IFC, 2007), contudo, alguns aspectos devem ser rigorosamente considerados: fornecer informações relevantes, responder às expectativas dos interessados, contextualizar as informações e garantir a integralidade das informações, de tal modo que os interessados possam tirar suas próprias conclusões (IFC, 2007).

O relacionamento com as populações humanas residentes ou interessadas nas áreas de carste é da maior importância para as empresas de mineração que desenvolvem novos projetos e que operam empreendimentos nessas regiões. Além dos cuidados a serem observados na avaliação de impactos e na gestão socioambiental de qualquer empreendimento de mineração, no caso do carste, particular atenção deve ser dada às comunidades locais e aos usos diretos e indiretos que fazem dos recursos naturais e culturais.

REFERÊNCIAS

- Battelle & ERM. s/d. *Communication and Stakeholder Involvement Guidebook for Cement Facilities*. 73 p
- Berbert-Born, M. 2002. Carste de Lagoa Santa, MG – Berço da paleontologia e da espeleologia brasileira. In: Schobbenhaus, C. et al. (orgs.). *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*. 1 ed. Brasília: DNPM/CPRM-Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), v 01, pp. 415-430.
- Costa, E. J. M. da et al. 2011. O projeto Juruti Sustentável: uma proposta alternativa de desenvolvimento territorial? In: Fernandes, F.R.C.; Enríquez, M.A.R.S.; Alamino, R.C.J. (org.), *Recursos Minerais e Sustentabilidade Territorial*, vol 1: Grandes Minas. Cetem, Rio de Janeiro, pp. 69-96, 2011.
- CDA Collaborative for Development Action, 2005. Corporate Engagement Project. *Conflict Sensitive Business Practice: Guidance for Extractive Industries*. Flashpoint Issue 1: Stakeholder Engagement. Section 4. Cambridge, USA, pp. 1-7.
- Enríquez, M. A. et al. A mineração das grandes minas e as dimensões da sustentabilidade. In: Fernandes, F.R.C.; Enríquez, M.A.R.S.; Alamino, R.C.J. (org.), *Recursos Minerais e Sustentabilidade Territorial*, vol 1: Grandes Minas. Cetem, Rio de Janeiro, p. 01-18, 2011.
- ICMM, International Council on Mining & Metals. 2012. *Desarrollo Comunitario. Kit de Herramientas*. ICMM, Londres.
- IFC, International Finance Corporation. 2007. *Stakeholder Engagement: A Good Practice Handbook for Companies Doing Business in Emerging Markets*. IFC, Washington. [versão em português Participação dos Interessados: Manual de Melhores Práticas para Fazer Negócios em Mercados Emergentes.]
- Instituto Votorantim. 2012. *Manual de engajamento com partes interessadas*. Instituto Votorantim, sem lugar, 66 p.
- Instituto Votorantim. 2012 b. *Conselhos Comunitários*. Instituto Votorantim, sem lugar, 8 p.
- Instituto Votorantim, 2013. *Guia de participação comunitária*. Vol 1, Redes para o Desenvolvimento Sustentável, BNDES, Instituto Votorantim, sem lugar, 8 p.
- Lobo, H. A. S. et al. 2010. Espeleoturismo: oferta e demanda em crescente expansão e consolidação no Brasil. In: Brasil. Ministério do Turismo. *Segmentação do Turismo: Experiências, Tendências e Inovações - Artigos Acadêmicos* / Ministério do Turismo, Secretaria Nacional de Políticas de Turismo, Departamento de Estruturação, Articulação e Ordenamento Turístico, Coordenação Geral de Segmentação. – Brasília: Ministério do Turismo, 155 p.
- Sánchez, L. E. et al. 2013. *Guia para o planejamento do fechamento de mina*. Brasília, Instituto Brasileiro de Mineração, 224 p.
- Silva-Sánchez, S.S.; Sánchez, L.E. 2011. Mineração de fosfato em Cajati (SP) e o desenvolvimento local. In: Fernandes, F.R.C.; Enríquez, M.A.R.S.; Alamino, R.C.J. (org.), *Recursos Minerais e Sustentabilidade Territorial*, vol 1: Grandes Minas. Cetem, Rio de Janeiro, p. 163-197.



Foto: Allan Calux



PARTE 3

BOAS PRÁTICAS DE MINERAÇÃO EM ÁREAS CÁRSTICAS

Nesta parte são apresentadas as recomendações de boas práticas para prevenir impactos ambientais e sociais adversos decorrentes da mineração de calcário sobre os ambientes cársticos.

As recomendações são ordenadas segundo as principais fases de vida de uma mina: estudos de viabilidade, implantação, operação, desativação e pós-fechamento.

SEÇÃO 1:

IMPACTOS DA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO SOBRE AMBIENTES CÁRSTICOS

Luis Enrique Sánchez e Ana Claudia Neri

A mineração de rochas carbonáticas afeta os processos, os recursos e os demais usos antrópicos dos ambientes cársticos, de diferentes maneiras e graus, causando impactos ambientais e sociais.

O Quadro 1 mostra uma Matriz de Identificação de Impactos, que sintetiza as principais relações de causa e efeito entre as principais atividades desenvolvidas nas sucessivas etapas de vida de uma mina e seus impactos ambientais em ambientes cársticos.

A matriz pode auxiliar na identificação de impactos de novos projetos e de projetos de expansão de minas em atividade. Observe-se que, para uma adequada avaliação de impactos, as atividades relacionadas na matriz poderão ser detalhadas, acrescentando-se novas atividades pertinentes ao projeto estudado ou subdividindo aquelas que são descritas de maneira agregada, ou seja, englobam outras atividades, a exemplo das atividades de construção.

Nesse quadro, o termo “aspecto ambiental” é utilizado segundo sua definição da norma ISO 14001: 2015: “elemento das atividades, produtos ou serviços de uma organização que interage ou pode interagir com o meio ambiente”. Impacto ambiental, por sua vez, segundo a mesma fonte, é “qualquer modificação do meio ambiente, adversa ou benéfica, que resulte, no todo ou em parte, das atividades, produtos ou serviços de uma organização”.

A matriz mostra os impactos potenciais, isto é, aqueles que podem ocorrer quando a mineração é realizada em áreas cársticas. Para identificar os impactos de um projeto determinado, é preciso conhecer: (1) o projeto com suficiente detalhe (por exemplo, determinados impactos são esperados somente quando certas atividades são realizadas, como o bombeamento de água subterrânea, que não é necessário em todas as minas); e (2) o ambiente afetado (por exemplo, somente é possível confirmar se haverá perda de fósseis se tiver sido realizado um estudo específico).

Este guia traz orientações para planejamento e aplicação de práticas eficazes para mitigação de impactos socioambientais em áreas cársticas e para o entendimento da natureza e importância dos ambientes cársticos, assim como dos principais impactos da mineração sobre o carste e suas populações humanas. Impactos da mineração que não são específicos de ambientes cársticos, embora indicados na matriz (por exemplo, “alteração do ambiente sonoro”), não são tratados aqui.

A realização de estudos e levantamentos sobre os sistemas cársticos em escala e profundidade adequadas é uma condição para o satisfatório planejamento e aplicação das práticas aqui descritas.

Ao elaborar novo projeto e ao operar um empreendimento, a empresa tem controle sobre os aspectos ambientais de suas atividades atuais ou planejadas, por exemplo, a área ocupada ou a ser ocupada. Ao atuar sobre os aspectos ambientais, a empresa pode mitigar seus impactos.

Mitigação de impactos, neste Guia, é entendida segundo a noção internacionalmente consolidada de “hierarquia de mitigação” (Figura 1), segundo a qual ao planejar, implantar, operar e desativar um empreendimento, a empresa deveria buscar soluções para evitar, reduzir, corrigir ou compensar os impactos adversos, nessa ordem de preferência. A essa escala, acrescenta-se aproveitar as oportunidades de melhorar as condições ambientais e sociais da área de influência de uma mina, por exemplo, mediante ações de restauração ecológica com objetivo de conectar fragmentos remanescentes de vegetação nativa. Ações de recomposição de vegetação ciliar enquadram-se também nesta categoria.



Figura 1. Hierarquia de mitigação de impactos.

Mitigação, portanto, envolve:

- (1) Evitar impactos, como, por exemplo, ao modificar o plano de lavra para proteger uma caverna, um sítio arqueológico, uma nascente, uma feição do exocarste ou qualquer outro elemento relevante do ambiente, ou modificar a localização de uma pilha de estéreis para proteger uma dolina importante para a recarga do aquífero cárstico.
- (2) Reduzir impactos, como, por exemplo, desviar o trajeto de um transportador de correia de longa distância para contornar um fragmento de vegetação nativa e reduzir a necessidade de supressão de vegetação nativa.
- (3) Corrigir impactos adversos após sua ocorrência, como no caso do restabelecimento de vegetação nativa em uma área lavrada, ou na reparação de danos causados por operações, como em caso de vazamento de óleos.
- (4) Compensar impactos que não puderam ser evitados e cuja mitigação é insuficiente ou mesmo impossível, estratégia que se aplica quando há supressão de um elemento relevante do carste, como cavernas, vegetação ou locais de moradia de comunidades humanas.

Decisões aderentes à noção de hierarquia de mitigação, tomadas para cada etapa de vida da mina, contribuem para compatibilizar um empreendimento de mineração com as necessidades de proteção dos recursos ambientais e culturais e dos direitos das comunidades afetadas.

Os diversos levantamentos recomendados neste Guia têm a finalidade de contribuir para fundamentar decisões das empresas e dos órgãos governamentais, em matéria de proteção do carste e das comunidades que nele vivem, mediante produção de informação e conhecimento relevante sobre o carste.

A Figura 1 mostra os impactos potenciais de uma mina, tomada individualmente. Quando várias empresas atuam na mesma região, seus impactos acumulam-se, no tempo e no espaço, e as medidas de gestão adotadas por uma empresa podem ser insuficientes para assegurar satisfatória proteção do carste e das comunidades que nele vivem.

Impactos cumulativos são tratados de maneira implícita neste Guia. Algumas boas práticas recomendadas aplicam-se também à prevenção de impactos cumulativos. Entretanto, a adequada avaliação e gestão de impactos cumulativos requer ações coordenadas de vários agentes, incluindo outras empresas atuantes na mesma região. Este Guia não inclui tais recomendações, que podem ser encontradas em fontes específicas sobre avaliação de impactos cumulativos.

Impactos Potenciais da Mineração em Áreas Cársticas

Perda de feições do exocarste e impacto visual	Perda de cavernas
(Risco de) ruptura de espeleotemas	
Aceleração ou indução de processos de dinâmica cárstica (e.g. Dolinamento)	
Perda de nascentes	
Perda de fósseis	
Perda de artefatos arqueológicos	
Descontextualização de sítios arqueológicos	
Redução da recarga de aquíferos cársticos	
Perda ou fragmentação de habitats naturais ou pouco modificados	
Perda de habitats antropizados	
Recomposição ou conexão de habitats ou de áreas de uso antrópico	
Redução das populações hipógeas	
Redução das populações de espécies raras	
(Risco de) extinção de espécies endêmicas	
Perda de espécimes de fauna silvestre	
Perturbação da fauna silvestre	
Degradação de habitats aquáticos	
Redução da disponibilidade hídrica	
Contaminação do solo	
Degradação do solo	
Degradação da qualidade do ar	
Degradação da qualidade das águas superficiais (e.g. Eutrofização)	
Degradação do ambiente sonoro	
Perda de locais de moradia, trabalho ou de convívio social	
Perda de referências físicas à memória (e.g. Locais de habitação, cemitérios etc.)	
Perda de pontos de encontro e produção de cultura popular	
Perda ou limitação de acesso a áreas de provisão de recursos e fornecimento de serviços ecossistêmicos	
Incômodo e desconforto ambiental	
Redução do estoque de recursos	
Outros impactos socioeconômicos	

Principais atividades na mineração de calcário*												
Viabilidade	Implantação					Operação					Desativação	
Serviços de topografia e mapeamentos												
Sondagens												
Levantamentos e aquisição de imóveis												
Contratação de serviços e mão de obra												
Implantação de canteiro de obras												
Supressão de vegetação												
Abertura de vias internas												
Terraplenagem e preparação de fundações												
Construção de instalações industriais e de apoio (britagem, oficinas etc)												
Construção de instalações auxiliares (linhas de transmissão, subestação etc)												
Aquisição e recebimento de equipamentos												
Remoção de solo superficial												
Decapeamento												
Perfuração e desmonte de rocha												
Carregamento e transporte de minério e estéril												
Britagem e classificação granulométrica												
Estocagem de minério e de rochas britada												
Disposição de estéréis												
Manutenção mecânica, elétrica e civil												
Apoio às atividades de produção (administração etc)												
Recebimento e estocagem de insumos												
Captação de água superficial												
Bombeamento de água subterrânea												
Recuperação de áreas degradadas (com início na fase de operação)												
Desmontagem industrial, demolição de edifícios e estruturas inservíveis												
Dispensa de mão de obra												
Inspeções, monitoramento, manutenção, vigilância e outras atividades												

Aspectos Ambientais

Emissões													
													Emissão de material particulado
													Emissão de gases de combustão
													Escoamento de águas pluviais (e partículas sólidas)
													Emissão de efluentes hídricos
													Emissão de ruído
													Vibrações do terreno
													Emissões luminosas
													Geração de estéréis
													Geração de resíduos

Interações socioeconômicas e culturais													
													Tráfego externo de caminhões e outros veículos
													Geração de empregos / redução de postos de trabalho
													Geração de oportunidades de negócios / redução de atividades
													Atração de pessoas
													Deslocamento involuntário de pessoas
													Aumento da demanda de bens e serviços
													Aumento da demanda de serviços públicos
													Geração de impostos e contribuições

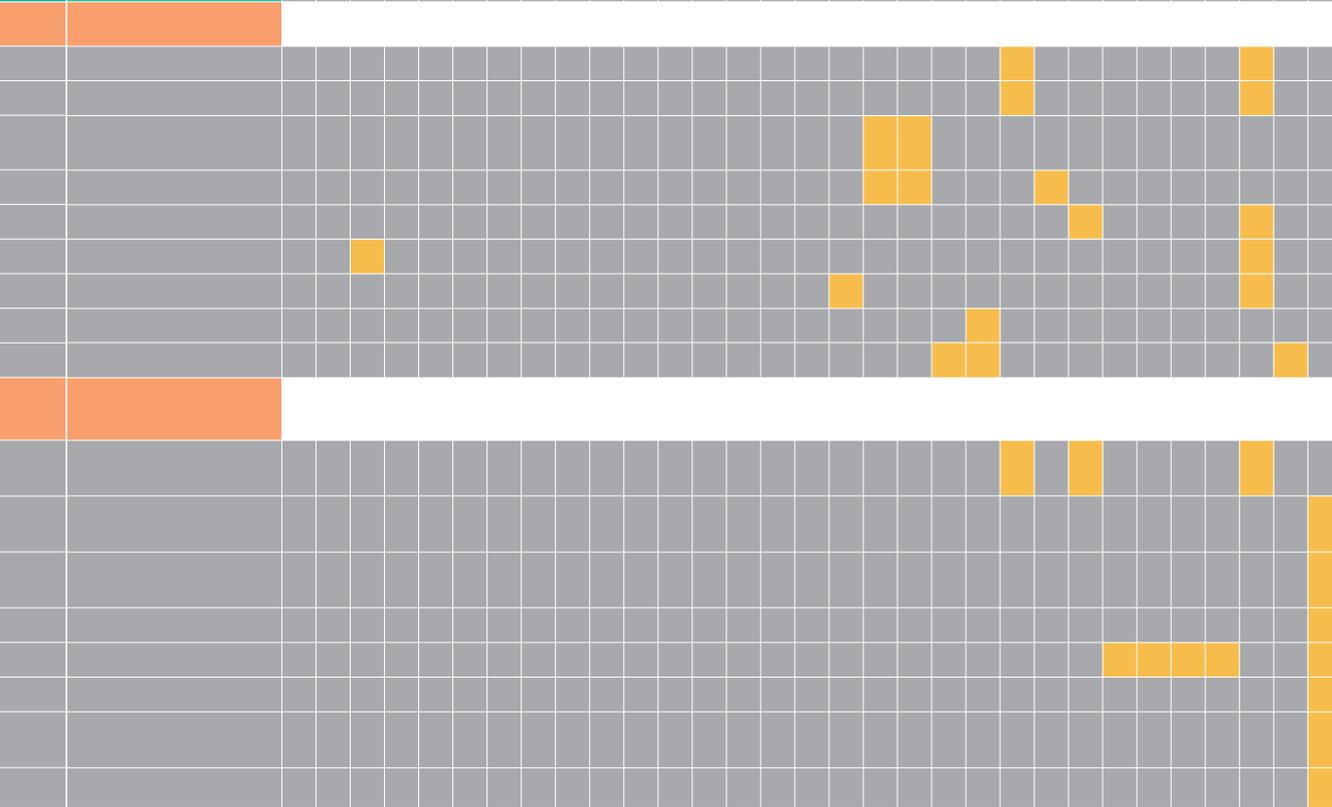
* Relacionam-se apenas as atividades causadoras de impactos ambientais potencialmente significativos. As atividades podem ser detalhadas e subdivididas para melhor descrever cada projeto.

Fonte da matriz: Sánchez, L.E.; Hacking, T. An approach to linking environmental impact assessment and environmental management systems. *Impact Assessment and Project Appraisal* 20(1):25-38, 2002. DOI 10.3152/147154602781766843

Quadro 1. Matriz de aspectos e impactos ambientais da mineração de calcário em áreas cársticas.

Impactos Potenciais da Mineração em Áreas Cársticas

Perda de feições do exocarste e impacto visual
Perda de cavernas
(Risco de) ruptura de espeleotemas
Aceleração ou indução de processos de dinâmica cárstica (e.G. Dolinamento)
Perda de nascentes
Perda de fosséis
Perda de artefatos arqueológicos
Descontextualização de sítos arqueológicos
Redução da recarga de aquíferos cársticos
Perda ou fragmentação de habitats naturais ou pouco modificados
Perda de habitats antropizados
Recomposição ou conexão de habitats ou de áreas de uso antrópico
Redução das populações hipógeas
Redução das populações de espécies raras
(Risco de) extinção de espécies endémicas
Perda de espécimes de fauna silvestre
Perturbação da fauna silvestre
Degradação de habitats aquáticos
Redução da disponibilidade hídrica
Contaminação do solo
Degradação do solo
Degradação da qualidade do ar
Degradação da qualidade das águas superficiais (e.G. Eutrofização)
Degradação do ambiente sonoro
Perda de locais de moradia, trabalho ou de convívio social
Perda de referências físicas à memória (e.G. Locais de habitação, cemitérios etc.)
Perda de pontos de encontro e produção de cultura popular
Perda ou limitação de acesso a áreas de provisão de recursos e fornecimento de serviços ecossistémicos
Incômodo e desconforto ambiental
Redução do estoque de recursos
Outros impactos socioeconómicos



células coloridas: aspecto/impacto ambiental potencial
 células em cinza: aspecto/impacto ambiental inexistente ou insignificante

SEÇÃO 2: ETAPAS DE VIDA DE UMA MINA

Luis Enrique Sánchez e Ana Claudia Neri

Os impactos sobre o carste diferem conforme as etapas de vida de uma mina, conforme indicado no Quadro 1. Por este motivo, as práticas são apresentadas de acordo com as etapas descritas na Figura 2. Embora a terminologia empregada pela indústria mineral para descrever as diferentes etapas de vida de uma mina não seja padronizada, para fins de considerar os impactos sobre os ambientes cársticos, é conveniente utilizar a seguinte sequência de cinco etapas principais:

- estudos de viabilidade
- implantação
- operação
- desativação
- pós-fechamento

Para fins de estudos geológicos e econômicos, a etapa de estudos de viabilidade é usualmente subdividida, mas tal abordagem não é necessária para os fins deste Guia.

A duração de cada etapa é muito variável. A operação de uma mina de calcário pode durar décadas. Já a decisão de abrir nova mina pode demandar sucessivas atualizações e revisões de análises econômicas que se prolongam por anos, mas também pode se dar com rapidez para aproveitar oportunidades de mercado. Durante a fase de operação, algumas minas podem ter suas atividades suspensas temporariamente.



Figura 2. Etapas do ciclo de vida de uma mina. Fonte: Sánchez et al. (2013).

SEÇÃO 3:

RECOMENDAÇÕES DE BOAS PRÁTICAS

Luis Enrique Sánchez, Ana Claudia Neri, Mylène Luiza Cunha Berbert-Born, Allan Silas Calux, Eleonora Trajano, Elvis Pereira Barbosa, Luiz Carlos Borges Ribeiro, Francisco Macedo Neto, Solange Silva Sánchez, Heros Augusto Santos Lobo

Este capítulo apresenta as boas práticas ambientais recomendadas para a mineração de calcário em áreas cársticas. As práticas são apresentadas para cada uma das cinco etapas de vida de uma mina e, dentro destas, em quatro grupos, reunindo os sete temas abordados neste Guia: sistemas cársticos e espeleologia física, biodiversidade e fauna subterrânea, paleontologia e arqueologia e desenvolvimento comunitário sustentável. A fundamentação de cada uma é sintetizada nos quadros a seguir e detalhada em cada um dos capítulos da segunda parte deste Guia.

A apresentação por grupos temáticos resulta do processo de elaboração deste Guia, em que cada especialista preparou sua contribuição temática (Parte 2) e nela fundamentou recomendações de boas práticas. É preciso ressaltar, entretanto, que um satisfatório entendimento da dinâmica das áreas cársticas - para fins de planejamento de projetos - requer a integração de conhecimentos, tanto entre especialidades quanto a integração entre conhecimento técnico-científico e conhecimento local. Um conjunto de práticas sob o título "Análise integrada" é apresentado na seção correspondente à etapa de estudos de viabilidade.

Para todas as áreas temáticas, com exceção de "Desenvolvimento Comunitário Sustentável", a maior parte das práticas é recomendada para a fase de estudos de viabilidade. Isto demonstra a importância de estudos bem fundamentados e suficientemente detalhados antes da abertura de uma mina. No entanto, muitas minas em atividade não dispõem de todos os levantamentos sugeridos ou têm levantamentos realizados segundo procedimentos que diferem do recomendado. Para essas minas, muitas práticas recomendadas para a fase de estudos de viabilidade podem ser adotadas durante a etapa de operação.

Deve-se observar que as empresas podem ter realizado alguns estudos temáticos aqui recomendados, mas com finalidade de planejar ou orientar a etapa de produção ou o planejamento de mina, como, por exemplo, estudos hidrogeológicos realizados com finalidade de conhecer a profundidade e a dinâmica de fluxo das águas subterrâneas para determinar a necessidade de rebaixamento. Neste caso, convém examinar se os estudos disponíveis são atuais e condizentes com as recomendações deste Guia, cuja finalidade é a proteção ambiental e o respeito aos direitos das comunidades.

A prevenção e a minimização de impactos e riscos sobre o carste e seus recursos deve ser fundamentada em uma sólida base de conhecimento.

As práticas são apresentadas na forma de quadros sintéticos para cada etapa de vida de uma mina e para cada uma das sete áreas temáticas cobertas por este Guia. Os quadros são estruturados, segundo três perguntas chave:

1. O que fazer? Apresentando um enunciado sintético da prática proposta.
2. Por que fazer? Expondo as principais razões para adoção da prática proposta.
3. Exemplos de como fazer, apresentando indicações de técnicas, ferramentas e abordagens para implementar a prática proposta.

Os capítulos temáticos da segunda parte deste guia dão fundamentação às razões (por que fazer) e expõem como fazer.

Como todo guia de boas práticas, o conteúdo é oferecido na forma de recomendações de ordem geral. Sua aplicação a situações reais requer avaliação profissional – usualmente por parte de equipe multidisciplinar – e adaptação às condições concretas de cada mina ou área de estudo.

É importante entender a função dos levantamentos indicados nesta parte do Guia. Dados e informações coletados devem servir para informar a tomada de decisões sobre o projeto. Por exemplo, a localização de pilhas de estéril deveria ser decidida de modo a evitar a interrupção de fluxos hídricos no carste e a delimitação da cava final deve evitar a supressão de cavernas de importância. Tais decisões pressupõem a disponibilidade de informação adequada e em tempo hábil.

Para tal, a questão do tempo necessário para realizar os diversos levantamentos é da maior importância. Particularmente em estudos do meio biótico, podem ser necessários períodos relativamente longos para se obter satisfatório diagnóstico. Por isso, planejar os estudos com suficiente antecedência é um cuidado essencial a ser tomado.

Estudos sobre o carste servem não apenas para atender a obrigações legais, mas fornecem informação relevante para o planejamento de mina e para a gestão da operação, reduzindo os riscos para as empresas.

Nesse contexto, os gestores de uma empresa de mineração têm diversas responsabilidades, destacando-se a de garantir a qualidade e a integridade dos estudos ambientais realizados em suporte a decisões internas.

É necessário considerar que a adoção das práticas recomendadas neste Guia tem duas importantes implicações em termos de planejamento e gestão de projetos:

- os resultados dos estudos sobre o carste têm papel determinante na tomada de decisões sobre o projeto, afetando parâmetros fundamentais, como estimativa de reservas lavráveis, configuração final da cava, localização de pilhas de estéril e de estoque, instalações de britagem e instalações auxiliares;
- em locais de maior complexidade, a realização dos estudos necessários, segundo as recomendações deste Guia, pode ter duração significativamente maior que aquela habitualmente associada aos estudos ambientais prévios, assim como podem implicar custos não negligenciáveis, os quais deveriam ser estimados antecipadamente e com a maior acurácia possível.

São apresentadas a seguir, para cada etapa de vida de um empreendimento de mineração, as práticas recomendadas, a saber, 47 práticas para a etapa de estudos de viabilidade, 29 práticas para a etapa de implantação, 27 práticas para a etapa de operação, 8 para a etapa de desativação e 3 para a etapa pós-fechamento, num total de 114 práticas.

Etapa	Tema	No	Boas Práticas
Estudo de viabilidade (E)	Geossistemas Cársticos (CG)	E.GC1	Reconhecimento da área
		E.GC2	Aproveitar dados e informação da pesquisa mineral
		E.GC3	Estruturar base de dados georreferenciados
		E.GC4	Realizar estudo hidrogeológico
		E.GC5	Avaliar potencial espeleológico
		E.GC6	Preparar modelo conceitual do carste
		E.GC7	Definir as “áreas de estudo temáticas” sob perspectiva sistêmica
		E.GC8	Realizar prospecção espeleológica orientada ao registro de feições exocársticas e endocársticas, utilizando métodos de controle do levantamento e de suficiência amostral
		E.GC9	Realizar levantamento espeleotopográfico em grau de precisão e detalhamento suficientes
		E.GC10	Atualizar o modelo conceitual do carste

Etapa	Tema	No	Boas Práticas
Estudo de viabilidade (E)	Paleontologia e Arqueologia (PA)	E.PA1.	Definição da área de estudo
		E.PA2	Levantamento de dados secundários
		E.PA3	Inserção dos dados obtidos em um Sistema de Informação Geográfica
		E.PA4	Análise dos dados
		E.PA5	Definição de pendências ou necessidade de detalhamento das informações
		E.PA6	Atividades de campo para coleta de dados primários e checagem dos dados secundários
		E.PA7	Integração de dados secundários e primários
		E.PA8	Confecção de mapa de potencialidades paleontológicas e arqueológicas da área de estudo
		E.PA9	Confecção do diagnóstico paleontológico/arqueológico
		E.PA10	Preparação do programa de monitoramento e resgate paleontológico
		E.PA11	Preparação do programa de prospecção arqueológica
	Biodiversidade (BI)	E.BI1	Elaborar projeto de acordo com os objetivos do estudo em questão
		E.BI2	Fazer levantamento detalhado da paisagem, incluindo vegetação e fauna
		E.BI3	Elaborar o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (Prad)
		E.BI4	Adotar abordagens sistêmicas, adequadas tanto à fauna aquática como à terrestre
		E.BI5	Incluir as áreas de influência sobre os sistemas subterrâneos
		E.BI6	Empregar métodos que atendam aos objetivos do estudo em questão
		E.BI7	Ter prudência com o material científico coletado
		E.BI8	Garantir a checagem dos dados a qualquer momento, permitindo reprodutibilidade do estudo
		E.BI9	Identificar possíveis fontes de risco decorrentes da atividade de mineração
		E.BI10	Verificar se a amostragem é suficiente ou aproxima-se da suficiência para se caracterizar as comunidades em estudo.
		E.BI11	Prever a necessidade de extensão do estudo para além de três ciclos anuais
		E.BI12	Aproveitar todos os acessos ao meio subterrâneo para amostragens
E.BI13	Estudar o espeleoclima das cavernas localizadas na área do empreendimento		
E.BI14	Realizar estudos sobre conectividade entre sistemas e áreas contínuas		

Etapa	Tema	No	Boas Práticas
Estudo de viabilidade (E)	Comunidades (CS)	E.CS1	Diagnóstico socioeconômico focado nos temas relevantes
		E.CS2	Mapeamento das partes interessadas
		E.CS3	Divulgação de informação relativa ao empreendimento
		E.CS4	Consulta às partes interessadas
		E.CS5	Análise dos impactos e proposição de medidas de mitigação
	Análise Integrada (AI)	E.AI1	Avaliar importância dos componentes do carste que podem ser afetados pelo projeto
		E.AI2	Definir, caso aplicável, restrições a atividades de mineração e de apoio, visando proteger componentes relevantes
		E.AI3	Estabelecer perímetros de proteção aos componentes que devem ser protegidos
		E.AI4	Definir outras medidas específicas de proteção
		E.AI5	Definir medidas de valorização dos impactos positivos
		E.AI6	Estabelecer plano de monitoramento
		E.AI7	Considerar as informações sobre o carste em análises de risco

Etapa	Tema	No	Boas Práticas
Implantação (I)	Geossistemas Cársticos (GC)	I.GC1	Diagnóstico continuado do comportamento hídrico/hidráulico
		I.(GC)	Monitoramento hidrológico, hidrogeológico e hidroquímico
		I.GC3	Monitoramento de processos de dolinamento, subsidência etc
		I.GC4	Georreferenciar as cavidades naturais subterrâneas e demais componentes a serem preservados, localizados no entorno das áreas operacionais com GPS geodésico
		I.GC5	Delimitar fisicamente os perímetros de proteção
		I.GC6	Adequar o planejamento de lavra com vistas à conservação dos componentes relevantes
		I.GC7	Atualizar o modelo conceitual do carste
		I.GC8	Em caso de resgate e salvamento de cavernas, realizar estudos petrográficos, morfológicos, químicos e mineralógicos de rochas e espeleotemas
		I.GC9	Construção de estruturas de retenção de sedimentos e instalação de dispositivos de drenagem, de águas pluviais antes do início do decapeamento e da abertura de vias
		I.GC10	Implantação de sistemas de coleta e tratamento de esgotos sanitários
		I.GC11	Monitorar as vibrações incidentes sobre as cavernas
		I.GC12	Monitorar parâmetros atmosféricos das cavernas e entorno imediato
		I.GC13	Monitorar os sistemas deposicionais
		I.GC14	Suspender qualquer atividade que represente risco de dano a achados fortuitos potencialmente importantes (cavidades naturais, fósseis, materiais arqueológicos, cursos d'água subterrâneos), até que sejam tomadas todas as providências necessárias para sua plena avaliação

Etapa	Tema	No	Boas Práticas
Implantação (I)	Paleontologia e Arqueologia (PA)	I.PA1	Determinar o impacto das intervenções no solo e no subsolo dependendo dos resultados dos diagnósticos arqueológico e paleontológico
		I.PA2	Educação Patrimonial – Cursos e Palestras
		I.PA3	Integração com o programa de educação ambiental
		I.PA4	Intervenções de Coleta "in loco"
		I.PA5	Transporte e curadoria do material fossilífero e arqueológico
	Biodiversidade (BI)	I.BI1	Deixar testemunhos do ambiente, mantendo corredores ecológicos para conexão com habitats contíguos
		I.BI2	Implantação dos programas de Recuperação de Áreas Degradadas (RAD)
		I.BI3	Gestão do processo de RAD
		I.BI4	Monitorar a área revegetada e a fauna
		I.BI5	Manutenção das áreas recuperadas
		I.BI6	Monitorar o espeleoclima e as comunidades epígeas e subterrâneas
	Comunidades (CS)	I.CS1	Divulgar informação relativa à implantação do empreendimento
		I.CS2	Implantar um mecanismo de registro de reclamações e gestão de conflitos
		I.CS3	Implementar os programas de gestão pertinentes e avaliar seus resultados
		I.CS4	Convidar entidades para constituir uma comissão de acompanhamento da implantação

Etapa	Tema	No	Boas Práticas
Operação (O)	Geossistemas Cársticos (GC)	O.GC1	Estabelecer, mediante consulta à comunidade e às autoridades, plano de manejo de cavidades localizadas em propriedades da empresa
	Paleontologia e Arqueologia (PA)	O.PA1	Implantação dos Programas de Monitoramento e Salvamento Paleontológico e Arqueológico
		O.PA2	Cursos de capacitação em Paleontologia e Arqueologia
		O.PA3	Palestras de Educação Patrimonial
		O.PA4	Treinamento de Técnicos para acompanhamento de frente de lavra e acompanhamento do decapeamento do estéril (monitoramento)
		O.PA5	Separação, triagem e resgate de fósseis (monitoramento)
		O.PA6	Salvamento de achados fortuitos
		O.PA7	Vistoria paleontológica sistemática

Etapa	Tema	No	Boas Práticas
Operação (O)	Paleontologia e Arqueologia (PA)	O.PA8	Implantação de laboratório para trabalhos paleontológicos e arqueológicos
		O.PA9	Preparação básica e pré-identificação de achados paleontológicos e/ou arqueológicos
		O.PA10	Acondicionamento e catalogação dos achados fósseis e arqueológicos
		O.PA11	Transporte e inserção dos achados em repositório de referência
		O.PA12	Prospecção de cavidades identificadas no maciço
		O.PA13	Programa de salvamento das cavidades com registros paleontológicos/arqueológicos
		O.PA14	Documentação
		O.PA15	Implantação de Museu de História Natural
	Biodiversidade (BI)	O.BI1	Continuidade da implantação dos programas de recuperação de áreas degradadas
		O.BI2	Continuidade da gestão de RAD
		O.BI3	Atualização periódica do Prad e plano de fechamento
		O.BI4	Permanecer atento a evidências de cavidades e fauna subterrânea de interesse potencial à conservação
		O.BI5	Em caso de novo achado espeleológico, avaliar, através de estudo ambiental Ad Hoc
	Comunidades (CS)	O.CS1	Atualizar diagnóstico socioambiental
		O.CS2	Desenvolver um sistema de indicadores sociais e econômicos
O.CS3		Atualizar mapeamento das partes interessadas	
O.CS4		Implementar os programas de gestão pertinentes e avaliar seus resultados	
O.CS5		Convidar entidades para constituir uma comissão de acompanhamento da operação	
O.CS6		Faciliar e promover o acesso a cavernas e outros componentes do sistema cárstico	

Etapa	No	Boas Práticas
Desativação (D)	D1	Identificar e avaliar os impactos socioambientais do fechamento
	D2	Atualizar o plano de fechamento, promovendo ajustes, se necessários
	D3	Atualizar mapeamento de partes interessadas
	D4	Comunicar as informações sobre o processo de fechamento
	D5	Implantar os programas de desativação descritos no Plano de Fechamento
	D6	Monitorar parâmetros de interesse
	D7	Acompanhar os indicadores de desenvolvimento e qualidade de vida
	D8	Desenvolver programas que fomentem a diversificação da base produtiva local
Pós-fechamento (PF)	PF1	Caso o uso pretendido tenha finalidade de conservação ambiental, acompanhar a regeneração da vegetação e da fauna através de monitoramento
	PF2	Envolver as partes interessadas no monitoramento pós-fechamento
	PF3	Manter "cuidado permanente ou cuidado ativo" na área, quando necessário

3.1. RECOMENDAÇÕES PARA A ETAPA DE ESTUDO DE VIABILIDADE

Esta etapa concentra vários estudos e levantamentos prévios ao desenvolvimento de um novo projeto e apresenta as melhores oportunidades para prevenir impactos adversos aos ambientes cársticos.

Durante os estudos de viabilidade técnica e econômica, são realizados estudos geológicos, sondagens, amostragens, estudos de mercado e análises de viabilidade econômica, análises de alternativas de configuração da cava, de localização de pilhas e instalações auxiliares, de vias de acesso e outros. Os estudos de viabilidade incluem a realização de estudos ambientais com a finalidade de auxiliar a análise de alternativas, de determinar a necessidade de medida de mitigação ou compensação e de obter licenças e autorizações governamentais. Em certos casos, avaliações ambientais e sociais podem também ser necessárias para a obtenção de financiamento.

A proteção do carste e seus recursos requer a construção de sólida base de conhecimento sobre a área de um projeto de mineração e seu entorno. Para tal, uma série de estudos e levantamentos é usualmente necessária. O que deve ser estudado, onde, como e durante quanto tempo são questões-chave a serem respondidas durante a fase de planejamento e estudo de viabilidade de todo novo projeto, assim como em projetos de expansão de minas existentes.

O papel do gestor da empresa é garantir que os estudos atendam às necessidades da empresa, possibilitando evitar e minimizar conflitos com as comunidades e reduzir os riscos ao negócio que podem advir da falta de emprego de boas práticas.

Os estudos e levantamentos descritos neste Guia devem ser feitos com a devida antecedência, observando-se a duração mínima de certos estudos – como os de fauna subterrânea – e um período adequado para informação e consulta pública.

Grande parte das recomendações concentra-se nesta etapa de projeto. Em muitas minas em operação, contudo, os estudos aqui recomendados não foram realizados, ou estudos foram feitos sem que as recomendações do Guia tenham sido seguidas. Nestes casos, é preciso avaliar a necessidade de realizar certos estudos ou de complementar estudos já realizados, estabelecendo um plano de ação.

Plano de ação para as minas em atividade deveria estabelecer uma lista dos estudos necessários e um cronograma de atendimento, considerando a duração necessária para os estudos.

Para minas em atividade, deve-se avaliar, criticamente, os estudos sobre o carste já realizados e, caso necessário, elaborar plano de ação para alinhar a base de conhecimento sobre o carste e seus recursos às recomendações deste Guia.

O ordenamento lógico das principais tarefas recomendadas para a fase de estudos de viabilidade é mostrado na Figura 4. Os quadros a seguir detalham as recomendações. Observe também que, como anunciado na Introdução, este Guia apresenta essencialmente as recomendações específicas para áreas cársticas. Deste modo, algumas importantes recomendações - como o engajamento das partes interessadas - não aparecem com destaque nesta parte do Guia.

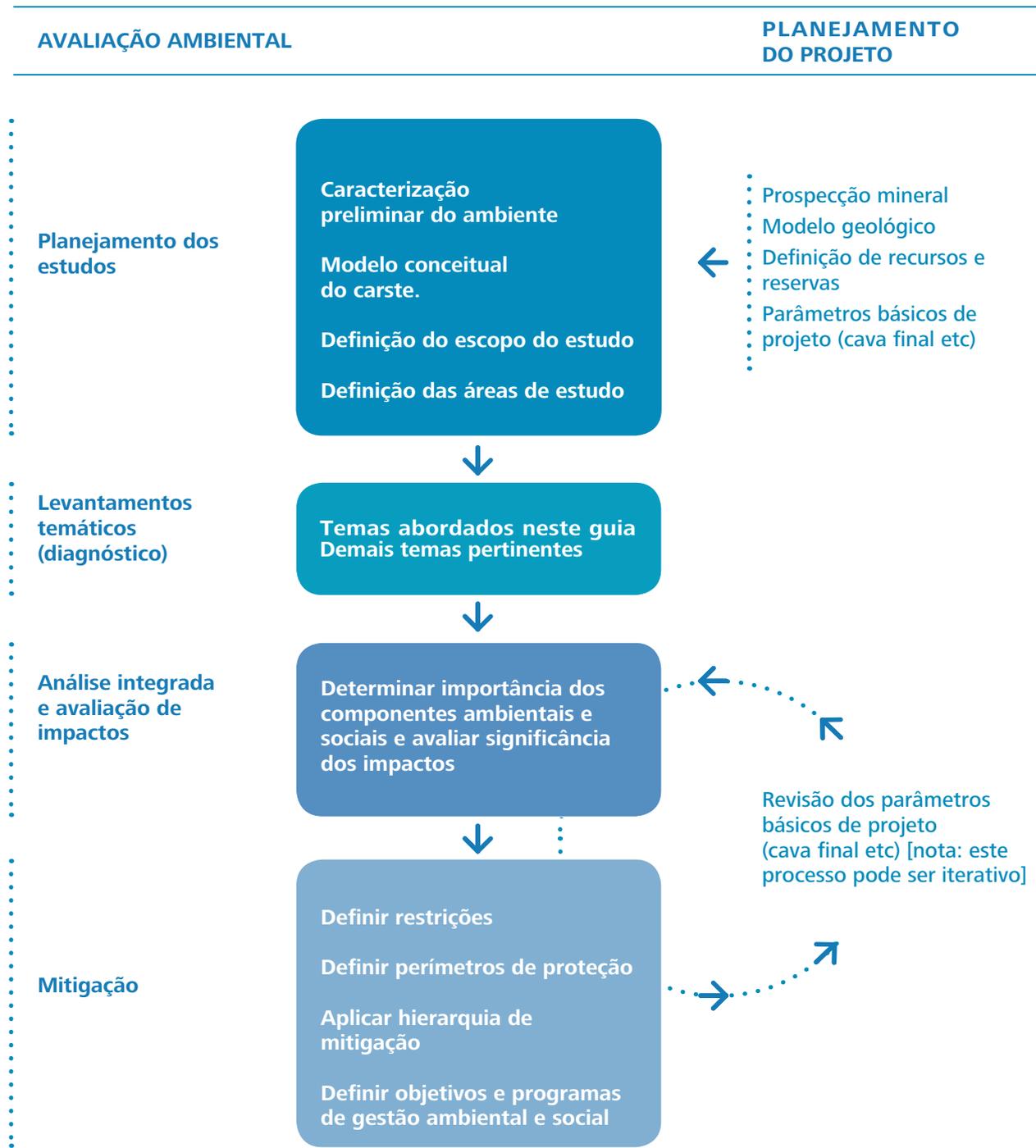


Figura 4. Etapas principais e encadeamento entre as atividades de planejamento de um novo projeto e a avaliação ambiental

Geossistemas cársticos

Estudos de viabilidade - Geossistemas Cársticos (E.GC)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.GC1. Reconhecimento da área	<ol style="list-style-type: none"> 1. Obter visão geral das principais características geológico-geomorfológicas e hidrológicas da região do empreendimento. 2. Conhecer a base de informação já disponível. 3. Definir, em primeira aproximação, as necessidades de informação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Visita de campo. • Análise da cartografia planialtimétrica, geológica, geomorfológica, hidrogeológica e hidrográfica. • Consulta a bases de dados cadastrais (como poços tubulares e registros de cavidades naturais subterrâneas). • Processamentos e análises de imagens aéreas e orbitais (classificações para realce de objetos da superfície, análises morfométricas e modelagens do relevo), todos materiais usualmente manipulados desde a interpretação geológica preliminar da prospecção mineral.
E.GC2. Aproveitar dados e informação da pesquisa mineral	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tirar máximo proveito do esforço prospectivo e dos impactos inerentes à pesquisa mineral (resultantes da abertura de picadas e estradas, caminhamentos geológicos/geofísicos/geoquímicos, trincheiras, sondagens etc), bem como dos estudos preliminares envolvidos na etapa da pesquisa geológica (fotoanálise, sensoriamento remoto, integração de dados), para levantar informações sobre a natureza do carste (fatores geológicos coordenadores da carstificação) e elementos de especial interesse. 2. Antecipar complexidades e fragilidades ambientais relacionadas à carstificação e identificar elementos de especial interesse socioambiental, fatores restritivos derivados e eventuais impedimentos ao empreendimento. 3. Detectar principais fatores geológicos influentes sobre os processos de carstificação. 4. Orientar o planejamento dos estudos conforme: <ul style="list-style-type: none"> √ a ideia preliminar da extensão e organização do carste e dos principais fatores condicionantes da carstificação, que constitui um “Modelo conceitual (morfodinâmico) preliminar do carste” (ver prática MF6); √ os indicativos preliminares de especial interesse: paisagístico e sociocultural e econômico; estruturas geológicas e estratigrafia condicionantes da carstificação; sítios espeleológicos, arqueológicos e paleontológicos; e aspectos da biodiversidade; √ a delimitação preliminar de Áreas de Estudo temáticas, cujos traçados hipotéticos terão fundamento na situação e características do empreendimento frente ao modelo conceitual do carste. 	<ul style="list-style-type: none"> • Organizar um cadastro preliminar de pontos de interesse ambiental, sociocultural e econômico (em especial os de natureza cárstica) agregado ao Sistema de Informações Geográficas (GIS), utilizado para a pesquisa mineral. • Sistematizar a descrição de afloramentos, seções e cortes geológicos, destacando aspectos de dissolução cárstica sobre estruturas geológicas definidas. • Sistematizar a análise de aspectos da dissolução em furos de sondagem, como relações estratigráficas (horizontes de carstificação, unidades selantes) e interpolação entre furos e extrapolações da carstificação subterrânea (modelagens 3D). • Sistematizar a observação de aspectos da dissolução nas análises petrográficas. • Elaborar perfis geológicos destacando a organização do relevo cárstico. • Ampliar o foco da geoquímica exploratória, no sentido de incluir aspectos geoquímicos da carstificação. • Enfocar a configuração do exocarste, epicarste e as inter-relações com a cobertura pedológica nos perfis de solo.

Estudos de viabilidade - Geossistemas Cársticos (E.GC)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.GC3. Estruturar base de dados georreferenciados	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para reunir, armazenar e integrar de modo consistente e preciso dados espaciais, informações gráficas e alfanuméricas gerados por diferentes fontes, além de acolher e partilhar, de maneira homogênea e sobre bases cartográficas padronizadas, os diversos dados primários produzidos pelos estudos ambientais. 2. Facilitar e sistematizar a incorporação, compilação, atualização, recuperação, complementação, manipulação e a integração de grandes volumes de dados espacializados, possibilitando análises coerentes, variadas, completas e precisas que irão proporcionar maior segurança à tomada de decisões. 3. Construir e preservar uma memória técnica espacialmente contextualizada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estruturar uma plataforma, ou sistema unificado de informações digitais e bases de dados georreferenciadas (formato GIS), a ser alimentada de maneira compartilhada e adotando procedimentos padronizados de inserção e análise de dados, subsistindo todos os dados temporais tomados ao longo da existência da mina. <p>Obs.: a estruturação deve ser acompanhada de um plano de gestão desse sistema que garanta sua permanente e sistemática atualização e análises de consistência.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Integrar a base de dados georreferenciados do projeto em estudo com outras bases públicas ou, se possível, privadas, visando facilitar estudos de impactos cumulativos.
E.GC4. Realizar estudo hidrogeológico	<p>Tendo em vista que a paisagem cárstica é consequência e causa da organização e dinâmica do aquífero cárstico:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Compreender melhor a organização do relevo, seu estágio evolutivo e seus aspectos funcionais. 2. Alcançar um diagnóstico sistêmico do carste – base para a avaliação de possíveis impactos decorrentes de distúrbios provocados no meio (como o ambiente, a partir da sua condição de continuidade e conectividade hidráulica, se comportará quando perturbado). 3. Visualizar o grau de vulnerabilidade do(s) aquífero(s) existente(s), assim como suas disponibilidades. <p>Em vista das peculiaridades hidráulicas dos aquíferos cársticos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. Caracterizar satisfatoriamente sua estrutura, desenvolvimento (estágio evolutivo) e dinâmica, adotando métodos e estratégias especiais para com a interpretação dos dados hidrológicos e hidrogeológicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • A depender do contexto ambiental e das características particulares do empreendimento, formular um “Modelo Hidrogeodinâmico” local e/ou regional que caracterize satisfatoriamente os seguintes aspectos hidrológicos e hidrogeológicos: <ol style="list-style-type: none"> a) as relações da “tripla porosidade” (matriz granular x fissural x condutos) nos litótipos/unidades aquíferas potencialmente afetados, averiguando o grau de carstificação e a sua organização no espaço (distribuição, densidade, padrões de arranjo e morfologia; fatores de controle); b) as relações entre as unidades/compartimentos com diferentes propriedades aquíferas (interação funcional); c) os sistemas de drenagem superficiais e subterrâneos; d) as dinâmicas aquíferas de curto e longo prazo (nível, vazão, direção de fluxo, rotas e regimes de fluxo, hidroquímica); e) o traçado sazonal da(s) bacia(s) aquífera(s) potencialmente envolvida(s) e a caracterização das áreas de contribuição (sazonais), da recarga e da descarga (difusa x concentrada), das condições do fluxo e do armazenamento (regime de fluxo x tempo de residência x volumes); f) a vulnerabilidade aquífera intrínseca (natural). • Ensaio traçadores e outros testes hidrogeológicos (testes de bombeamento, monitoramento contínuo de poços, nascentes e drenagens subterrâneas, cuidados com os estudos de potenciometria e direções de fluxo – regional x local).
E.GC5. Avaliar potencial espeleológico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para determinar a propensão à ocorrência de cavidades naturais subterrâneas, quando se tratar de áreas sem estudos (prospecção exocárstica) ou com estudos espeleológicos insuficientes. 2. Melhorar a acurácia dos estudos de viabilidade, reduzir riscos, prazos e custos. 3. Definir as estratégias de abordagem prospectiva, racionalizando os esforços de campo e, ao mesmo tempo, garantindo levantamentos prospectivos eficazes. 4. Não apenas para orientar a prospecção, que muitas vezes tem caráter amostral e/ou “hierárquico”, mas também representando um “desenho analítico” da própria condição de carstificação. O “mapa do potencial espeleológico”, que é refinado pelos estudos de detalhe, quando confrontado à projeção dos impactos ambientais, se reverte num “mapa de risco ao patrimônio espeleológico (mapa de vulnerabilidade espeleológica)”. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consultar bases de dados sobre patrimônio espeleológico • Elaborar mapas de potencial espeleológico: <ol style="list-style-type: none"> a) utilizando técnicas de sensoriamento remoto e fotointerpretação. b) utilizando técnicas de análise multicritério e ferramentas de geoestatística. c) selecionando alvos de prospecção e elaborando planos de abordagem (roteiros/malhas de caminhamento, priorização de alvos, locais e “setores” geográficos). • Uma vez elaborado o(s) mapa(s), realizar controle de campo.

Estudos de viabilidade - Geossistemas Cársticos (E.GC)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.GC6. Preparar modelo conceitual do carste	<ol style="list-style-type: none"> Um modelo conceitual preliminar do carste é fundamento para o planejamento dos estudos ambientais. Identificar preliminarmente sistemas superfície-subterrâneo e mosaicos de sistemas potencialmente contínuos ou integrados do ponto de vista físico, climático e biológico, pelos quais se pode inferir o fluxo de água, sedimentos, nutrientes e fauna. Estimar o nível de complexidade e vulnerabilidade natural do ambiente. Situar o empreendimento no contexto funcional e sistêmico do carste, permitindo assim identificar as principais “questões-chave” a serem esclarecidas pelos estudos ambientais (principais características do ambiente versus características do empreendimento contextualizadas no ambiente). Sintetizar as informações e apresentar as hipóteses que podem explicar a constituição e os processos que ocorrem na área. Identificar as lacunas de informações/conhecimentos que devem ser preenchidas com novas investigações Fundamentar os critérios de delimitação das áreas de estudo, que deverão ter sentido sistêmico. Orientar o escopo dos estudos, em particular os desenhos experimentais para a solução das “questões-chave” identificadas. 	<ul style="list-style-type: none"> Elaborar um conceito inicial da organização morfológica e funcional do carste, levando-se em consideração: <ol style="list-style-type: none"> Os compartimentos morfodinâmicos mais evidentes; Os principais fatores potencialmente coordenadores da carstificação (litoestratigrafia, geoestruturas, clima e hidrografia). Com base no modelo conceitual preliminar do carste, definir hipóteses relacionadas aos mecanismos espeleogenéticos, incluindo fatores de controle (litoestratigráficos, litoestruturais, hidrodinâmicos, entre outros). Sistematizar as estratégias de controle de campo para avaliação dos resultados frente ao modelo conceitual preliminar, facultando o seu posterior aprimoramento.
E.GC7. Definir as “áreas de estudo temáticas” sob perspectiva sistêmica	<ol style="list-style-type: none"> Propiciar maior embasamento (critério), coerência e precisão à indicação da potencial área de influência do empreendimento. Dar maior precisão e objetividade aos “desenhos experimentais” necessários ao diagnóstico ambiental e à avaliação dos impactos, otimizando o planejamento dos estudos. Prevenir investimentos desnecessários ou insuficientes (em tempo, energia e recursos) para o diagnóstico ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> Com fundamento na organização morfológica e funcional do carste (modelo conceitual preliminar), as áreas de estudo podem ser delineadas por sistemas e mosaicos de sistemas contínuos, conectados, influentes do ponto de vista físico e biológico. A situação do empreendimento mineral no âmbito do modelo cárstico, e suas características operacionais, direcionarão os estudos a determinado sistema ou conjunto de sistemas de potencial interesse. As bacias aquíferas ou sistemas de fluxo hídrico são bastante indicados como unidades de análise, em que se busca reconhecer as entradas e saídas d’água e todo o processamento derivado da atividade hídrica no espaço entre elas, que é consequência e causa da sua organização. Em casos de inatividade ou atividade hídrica pouco expressiva, podem ser admitidos compartimentos delimitados por unidades não carbonáticas que representem barreiras ou elementos “selantes” ao fluxo, ou então isolados pela dissecação erosiva. As unidades de análise devem representar sistemas de “fluxo integrado” de água, sedimentos, nutrientes e fauna, entre os meios superficial e subterrâneo. <p><i>Obs. 1: O sistema ou mosaico de sistemas físicos e biologicamente contínuos, esboçado no modelo preliminar, poderá ser considerado a “área de influência potencial” do empreendimento, para efeito dos estudos de diagnóstico e avaliação de impactos. A “área de influência real” só poderá ser conhecida com a conclusão dos estudos ambientais.</i></p> <p><i>Obs. 2: É importante considerar a existência de continuidade física (e biológica) além dos limites litológicos, por exemplo a que se materializa pelo aporte hídrico proveniente de áreas não cársticas (aporte alóctone, de áreas de contribuição em litologias não carbonáticas).</i></p> <p><i>Obs. 3: Embora possam ser indicadas diferentes áreas de estudo para as diferentes abordagens “temáticas”, sobre as quais incidirão “desenhos experimentais” distintos, deve-se procurar estabelecer o recorte das áreas (e os próprios desenhos experimentais) com objetivos em comum, notadamente a solução de “questões-chave” da dinâmica funcional do ambiente e dos serviços ambientais potencialmente afetados pelo empreendimento.</i></p>

Estudos de viabilidade - Geossistemas Cársticos (E.GC)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.GC8. Realizar prospecção espeleológica orientada ao registro de feições exocársticas e endocársticas, utilizando métodos de controle do levantamento e de suficiência amostral	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para identificar e inventariar cavernas e feições exocársticas importantes para a determinação do funcionamento do sistema cárstico, em termos do fluxo de matéria e energia. 2. Para garantir adequado conhecimento acerca do patrimônio espeleológico presente no contexto do empreendimento em licenciamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • A organização de um levantamento prospectivo deve levar em consideração o detalhamento da malha de prospecção e os métodos de controle do caminhamento. As áreas com maior potencial devem receber maior atenção em campo. • Em relação aos métodos de controle, devem ser adotados de acordo com a experiência das equipes em campo. Existem basicamente três: <ol style="list-style-type: none"> a) orientados por malha de pontos; b) definidos por linhas; c) delimitados por polígonos/quadrantes. • A suficiência amostral do esforço de campo deve ser avaliada segundo algum método. Existem dois atualmente utilizados: o percentual de recobrimento e a matriz de caminhamento.
E.GC9. Realizar levantamento espeleotopográfico em grau de precisão e detalhamento suficientes	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para oferecer suporte à realização dos estudos morfológicos e morfométricos, hidrológicos e hidrogeológicos, sedimentares, paleontológicos, arqueológicos e espeleobiológicos. 2. Para conhecer o arranjo geométrico das rotas subterrâneas e a morfologia endocárstica. 3. Para oferecer base para interpretações acerca da gênese e da dinâmica evolutiva e de funcionamento do sistema cárstico em que a(s) caverna(s) está(ão) inserida(s). 4. Para contribuir para a definição de microhabitats favoráveis ao avistamento e coleta/captura de fauna subterrânea. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elaborar mapas espeleotopográficos fidedignos às macro e mesofeições, apontando no produto cartográfico as ocorrências de espeleotemas, espeleogens, cursos e corpos d'água, depósitos fósseis superficiais e quaisquer evidências de vestígios arqueológicos. • Utilizar métodos de classificação da precisão da topografia tais quais os propostos pela British Cave Research Association ou pela Union Internationale de Spéléologie.
E.GC10. Atualizar o modelo conceitual do carste.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sintetizar os resultados das atividades e definir as hipóteses que podem explicar a constituição e os processos que ocorrem na área. 2. Identificar as lacunas de informações/conhecimentos que devem ser preenchidas com novas investigações. 	<ol style="list-style-type: none"> 3. Atualizar plataforma ou sistema unificado de informações digitais e bases de dados georreferenciadas (formato GIS). 4. Atualizar bases de dados nacionais, públicas ou de associações.

Paleontologia e Arqueologia

Estudos de viabilidade - Paleontologia e Arqueologia (E.PA)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.PA1. Definição da área de estudo	A área de estudo é o ponto de partida para a identificação dos dados a serem pesquisados. Trata-se de um limite geográfico previamente estipulado para o qual serão inventariadas informações tais como: litologia, estratigrafia, registros paleontológicos, registros arqueológicos e espeleológicos.	<ul style="list-style-type: none"> Deverá envolver, pelo menos, a mesma área requerida para pesquisa mineral junto ao órgão local responsável (no caso do Brasil, deverá ser requerida junto ao DNPM). Será plotada, inicialmente, em uma base geológica e topográfica, georreferenciada, com a maior escala disponível, a fim de oferecer subsídios e possibilitar o cadastramento dos diversos tipos de dados necessários aos estudos paleontológicos e arqueológicos.
E.PA2. Levantamento de dados secundários	Os dados secundários são de extrema importância para se ter visão sistêmica das ocorrências fósseis regionais, previamente cadastradas em bases oficiais de registro paleontológico e arqueológico. São estes indicativos que determinarão as necessidades futuras para desenvolvimento dos estudos e, quando suficientes, a estruturação de diagnóstico conclusivo.	<ul style="list-style-type: none"> A partir das informações da base geológica, topográfica e político-administrativa (limites geográficos dos municípios/estados circunvizinhos) da área de estudo, será feito o levantamento das informações presentes na bibliografia acerca das unidades litoestratigráficas interferidas, bacias sedimentares, registros paleontológicos, busca na base de dados (como PALEO da CPRM), monografias, dissertações e teses (textos disponíveis em bibliotecas de universidades e centros de pesquisas) e materiais jornalísticos publicados na imprensa (mídias digital e impressa). Para a Arqueologia, deve ser consultada a base de dados do órgão regulador local, teses, dissertações arquivos públicos locais, universidades etc. No Brasil, deverá ser consultado o Sistema de Gerenciamento do Patrimônio Arqueológico – SGPA/IPHAN
E.PA3. Inserção dos dados obtidos em Sistema de Informação Geográfica	É um procedimento que possibilita visão do conjunto dos dados e de suas áreas de ocorrências, permitindo assim melhor compreensão do padrão de distribuição.	<ul style="list-style-type: none"> Georreferenciar todos os dados obtidos por meio do levantamento bibliográfico e plotar em uma base SIG, compondo arquivos organizados em temas (mapa de pontos com ocorrência fósseis, base geológica, afloramentos rochosos, sítios paleontológicos, sítios arqueológicos, cavidades naturais subterrâneas etc), possibilitando o confronto de informações entre as unidades interferidas na área de estudo e as diversas relações com os registros paleontológicos e arqueológicos regionais já cadastrados.
E.PA4. Análise dos dados	Definir as potencialidades fossilíferas e/ou arqueológicas da área de estudo, a partir dos dados inventariados.	<ul style="list-style-type: none"> Realizar uma abordagem geral do potencial paleontológico, arqueológico e espeleológico na área de estudo, verificando a existência dos níveis estratigráficos fossilíferos e áreas de interesse arqueológica pré-históricas e/ou históricas. Para tal, leva-se em conta a idade e as condições gerais do ambiente deposicional das sequências sedimentares, as características litológicas e idade para a identificação das possíveis formas de vida e vestígios de cultura material que podem ser encontradas.
E.PA5. Definição de pendências ou necessidade de detalhamento das informações	De posse de todos os registros, é possível averiguar a necessidade de complementar alguma informação, ou simplesmente se os dados secundários são suficientes para a confecção do diagnóstico paleontológico.	<p>Durante a análise das informações levantadas e já processadas, é possível verificar a necessidade de coleta de dados primários, principalmente se existir potencial para ocorrências paleontológicas nas unidades, dentro da área de estudo, sem registro de fósseis na bibliografia. Caso ocorram cavidades naturais, estas também deverão ser prospectadas para busca de fósseis, pois estes ambientes dispõem de condições bastante favoráveis à fossilização.</p>
E.PA6. Atividades de campo para coleta de dados primários e checagem de dados secundários	Os dados primários geram novas e importantes informações, muitas vezes necessárias para uma interpretação mais fidedigna da potencialidade paleontológica e/ou arqueológica da área de estudo.	<p>A coleta de dados primários deverá ser antecedida pelo planejamento de campo, que consta de elaboração de mapa de acessos, preparo do mapa geológico onde deverá conter pontos chaves para a compreensão da geologia e, por conseguinte, as áreas de interesse para a Paleontologia e Arqueologia.</p> <p>Deverão ser checados os dados secundários inventariados, buscando uma visão mais realística dos contextos geológicos por meio da descrição das rochas, identificação de contatos entre camadas geológicas distintas, assim como uma prospeção paleontológica preliminar. Dados geomorfológicos e pedológicos são elementos importantes na compreensão das reais potencialidades paleontológicas da área de estudo e devem ser incorporados.</p> <p>Deverão ser checados os dados secundários inventariados para a Arqueologia, as referências de trabalhos anteriores para a área e os dados históricos para formar o quadro arqueológico regional.</p>

Estudos de viabilidade - Paleontologia e Arqueologia (E.PA)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.PA7. Integração de dados secundários e primários	É um procedimento que permite visão global dos dados e de suas áreas de ocorrências permitindo assim melhor compreensão do padrão de distribuição.	Trata-se de reunir todas as informações coletadas – dados primários e secundários – afim de se ter uma visão geral da informação, preferencialmente georreferenciadas e em camadas, subsidiando a etapa consecutiva de mapeamento paleontológico e arqueológico.
E.PA8. Confeção de mapa de potencialidades paleontológicas e arqueológicas da área de estudo	Trata-se da informação, plotada em planta, dos resultados obtidos pelos estudos iniciais da Paleontologia e da Arqueologia. É uma forma de representação de rápida identificação e fácil compreensão das áreas críticas da Paleontologia e da Arqueologia, a qual determinará, a partir de uma simples leitura, se existem áreas e qual o grau de relevância para descobertas paleontológicas e/ou arqueológicas.	Por meio de um criterioso estudo da área de interesse, definida sobre base geológica em escala maior ou igual a 1:25.000, somados a dados de sondagens, serão determinadas, com certa precisão, as litologias com potencial fóssilífero. O mapa também deverá abranger as cavidades naturais. A representação será por cores que possibilitarão, em uma rápida leitura, identificar os diversos graus de potencialidades paleontológicas e/ou arqueológicas: vermelho – alto potencial; laranja – médio potencial; amarelo – baixo potencial; verde – potencial inexpressivo.
E.PA9. Confeção do diagnóstico paleontológico/arqueológico	É o texto conclusivo para os estudos paleontológicos e/ou arqueológicos, relatando todos os dados e análises obtidos. Contém as informações necessários para nortear o Programa de Monitoramento e Resgate Paleontológico e o Programa de Prospecção e Resgate Arqueológico durante as fases construtivas, notadamente de produção da mina.	Deverá ser confeccionado um texto abordando a geologia da área de estudo e regional, a síntese dos dados secundários, o levantamento dos dados primários, uma abordagem Paleontológica e/ou Arqueológica da área de estudo, uma síntese conclusiva e recomendações para a implantação do programa de Paleontologia e de Arqueologia.
E.PA10. Preparação do programa de monitoramento e resgate paleontológico	É um conjunto de orientações essenciais para a implantação dos programas de Paleontologia e Arqueologia	Elaborar um termo de referência para a implantação de programa de paleontologia preventiva que deverá conter: justificativas, objetivos, metas, público-alvo, metodologia de trabalho, ações, indicadores de resultados, parcerias com outros programas e base legal.
E.PA11. Preparação do programa de prospecção arqueológica		Elaborar um termo de referência para a implantação de programa de Arqueologia que deverá conter: justificativas, objetivos, metodologia de trabalho, público-alvo, educação patrimonial, indicadores de resultados, parcerias com outros programas e base legal.

Biodiversidade e fauna subterrânea

Estudos de viabilidade - Biodiversidade (E.BI)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.BI1. Elaborar projeto de acordo com os objetivos do estudo em questão	1. Para garantir rigor científico, portando confiabilidade ao estudo.	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer planejamento metodológico adequado aos objetivos específicos do estudo em questão e só usar dados secundários nos resultados e conclusões, quando estes foram obtidos segundo métodos totalmente equivalentes aos do estudo.
E.BI2. Fazer levantamento detalhado da paisagem, incluindo vegetação e fauna	<ol style="list-style-type: none"> 1. Conhecer os ecossistemas – fauna e flora – antes das intervenções da mineração é importante para planejar a recuperação ambiental da área. 2. Identificar espécies raras que possam ser afetadas e orientar medidas para preservá-las, como a remoção de seletiva de propágulos e de epífitas. 3. Estabelecer uma referência para os trabalhos de recuperação. 4. Levantar a fauna permite conhecer sua estrutura e composição, e possibilita que sejam indicadas medidas de manejo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fazer levantamento florístico da área onde será a mina e do entorno que contenham fragmentos de vegetação nativa, principalmente quando a área afetada pela mineração for desprovida de vegetação. • Fazer levantamento faunístico nas áreas vizinhas da mina, visando compreender a composição e estrutura do ecossistema. Nos casos específicos dos grupos faunístico, como mamíferos e aves, levantamentos pontuais ou em áreas muito restritas não são suficientes.

Estudos de viabilidade - Biodiversidade (E.BI)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.BI3. Elaborar um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (Prad)	<ol style="list-style-type: none"> 1. A mineração é uma forma temporária de uso do solo. Ao término das atividades, as áreas afetadas devem estar aptas para alguma forma de uso sustentável. 2. Diversas áreas podem ser recuperadas durante a operação de uma mina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Preparar Prad e Plano de Fechamento quando do início do projeto de uma nova mina. • O Prad e Plano de Fechamento devem contemplar alternativas de uso futuro da área e indicar a alternativa preterida. • Deve-se planejar a implementação das medidas de recuperação ambiental concomitantemente com as atividades extrativas. • O Prad deve conter um programa de monitoramento e conjunto de indicadores apropriados para avaliar os resultados das medidas de recuperação ambiental. • O Prad deve conter os programas de recuperação de áreas degradadas que serão implantadas durante a vida útil da mina, além de ser periodicamente atualizado de acordo com os resultados da avaliação das práticas implantadas.
E.BI4. Adotar abordagens sistêmicas, adequadas tanto à fauna aquática como à terrestre	<ol style="list-style-type: none"> 1. Esta é a abordagem que mais se aproxima da real área de distribuição da maioria das espécies troglóbias. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inicialmente, a unidade de estudo é o sistema subterrâneo como um todo, considerando-se também a sua zona vadosa, que, para fauna terrestre, deveria (idealmente) ser expandida para todo o afloramento rochoso contínuo, que correspondente à máxima área potencial de distribuição dos troglóbios terrestres. Sendo isto inviável por questões operacionais, a escala espacial do levantamento biológico será a maior possível. <p>Obs.: quanto mais extensivo for o estudo, menor tendem a ser os níveis de raridade registrados para organismos subterrâneos.</p>
E.BI5. Levantar em consideração os impactos cumulativos de diferentes empreendimentos na mesma área cárstica	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reduzir riscos à biodiversidade. 2. Evitar impactos cumulativos que isoladamente poderiam não ser significativos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar possíveis empreendimentos com impactos importantes sobre ecossistemas subterrâneos, integrando-os à análise dos impactos considerados no caso em questão.
E.BI6. Empregar métodos que atendam aos objetivos do estudo em questão	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para garantir rigor científico e conferir confiabilidade ao estudo. 	<ul style="list-style-type: none"> • As condições mínimas para os estudos biológicos são: 1) utilizar métodos múltiplos e complementares de levantamento biológico, de acordo com o estado da arte da ciência; 2) amostragem temporal ao longo de três ciclos anuais completos, com pelo menos quatro amostragens anuais, regularmente distribuídas durante o tempo climaticamente viável de estudo; 3) caso os objetivos incluam classificar os organismos subterrâneos conforme Schiner-Racovitza, incluir estudo epígeo comparável (mesma época, mesmas técnicas de coleta e análise de dados). Se as curvas de acumulação/rarefação de espécies hipógeas vs. epígeas estiverem muito díspares, aumentar esforço de coleta no ambiente mais sub-amostrado.
E.BI7. Ter prudência com o material científico coletado	<p>Para evitar a coleta excessiva e perda de material, o que torna injustificável a retirada de exemplares de seu ambiente, assim como a inacessibilidade de material científico, impossibilitando a checagem dos dados por outros pesquisadores, o que fere um dos principais critérios da ciência que é a repetibilidade.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para todo o material biológico: <ul style="list-style-type: none"> • Coletar amostras de tamanho suficiente para a identificação, garantindo a preservação adequada dos exemplares e das informações associadas; • Validar identificações por especialistas na taxonomia dos respectivos grupos; • Depositar todo o material coletado em instituições oficiais, públicas, com serviço de curadoria previsto no organograma e cargo para curador de coleções, abertas ao empréstimo de material à comunidade científica (e com recursos para envio do mesmo em tempo razoável) e com sistema público de informações sobre as coleções.
E.BI8. Garantir a checagem dos dados a qualquer momento, permitindo repetibilidade do estudo	<p>Para garantir acessibilidade ao material científico coletado, permitindo, assim, verificar a confiabilidade das identificações, assim como a correspondência entre espécies amostradas por diferentes coletores, cada qual com um sistema próprio de classificação por símbolos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Para evitar a multiplicação de sistemas paralelos de classificação ad hoc, não se referir a táxons não identificados por números, letras ou outros sistemas sequenciais de símbolos, mas sim associá-los a referenciais geográficos estáveis (preferivelmente, nome da localidade). • Basear decisões potencialmente envolvendo impactos irreversíveis em habitats subterrâneos (cavernícolas ou não) apenas em identificações validadas por especialistas nos respectivos grupos taxonômicos, com experiência e credibilidade na comunidade científica. • Evitar parataxonomia, i.e., separação de espécies baseada em tipos morfológicos, por pessoa não especialista no grupo. • Sempre informar quem identificou o material, incluindo nome, título acadêmico e instituição.

Estudos de viabilidade - Biodiversidade (E.BI)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.BI9. Identificar possíveis fontes de risco decorrentes da atividade de mineração	Para estabelecer o estado inicial, não alterado, norteando o monitoramento.	<ul style="list-style-type: none"> • Descrever minuciosamente o ambiente, incluindo, no desenho experimental, métodos para estimar: • o carregamento de sedimentos para o interior da cavidade, causando assoreamento ou outros tipos de alterações não naturais no habitat; • a diminuição no aporte de nutrientes (p. ex., detritos vegetais, animais e matéria orgânica em geral carregada durante enxurradas).
E.BI10. Verificar se a amostragem é suficiente ou aproxima-se da suficiência para se caracterizar as comunidades em estudo.	Para garantir rigor científico, portanto confiabilidade e repetibilidade ao estudo.	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicar métodos de suficiência amostral cientificamente validados; não usar pseudo-réplicas em cálculos de suficiência amostral.
E.BI11. Prever a necessidade de extensão do estudo para além de três ciclos anuais	Podem ocorrer variações muito acentuadas entre anos sucessivos ou anos muito atípicos, de modo a impedir a detecção de padrões sazonais. Esses são aspectos fundamentais para a caracterização de um ecossistema e, portanto, precisam ser investigados para se garantir a robustez do estudo e a confiabilidade das conclusões (pontos críticos quando há perspectivas de impactos permanentes).	<ul style="list-style-type: none"> • Dar continuidade ao estudo, de acordo com a metodologia previamente estabelecida e utilizada, até a detecção de padrões sazonais que permitam a descrição acurada da estrutura e funcionamento dos sistemas potencialmente impactados, como base para uma avaliação realista de sua relevância, e para o estabelecimento de medidas mitigadoras apropriadas.
E.BI12. Aproveitar todos os acessos ao meio subterrâneo para amostragens	Para expandir as possibilidades de prospecção da fauna subterrânea, incluindo habitats não-cavernícolas.	<ul style="list-style-type: none"> • Otimizar as coletas, aproveitando acessos artificiais ao meio subterrâneo, incluindo furos de sondagem.
E.BI13. Estudar o espeleoclima das cavernas localizadas na área do empreendimento	Para estabelecer o estado inicial, como controle para monitoramento durante as atividades de mineração.	<ul style="list-style-type: none"> • Acompanhar e analisar o espeleoclima, em paralelo ao estudo biológico. Para tanto, fazer coletas sequenciadas e periódicas com intervalo compatível com a necessidade do estudo, de forma a identificar a variabilidade do ciclo dioturno do espeleoclima e ciclos anuais. Utilizar como variáveis mínimas a temperatura (do ar em todos os casos e da água quando pertinente) e a umidade relativa do ar; e como variáveis acessórias, quando pertinente, a intensidade e direção das correntes de ar e as concentrações de Dióxido de Carbono e Radônio.
E.BI14. Realizar estudos sobre conectividade entre sistemas e áreas contínuas	Para determinação dos limites espaciais das populações e comunidades subterrâneas, permitindo estimar o tamanho de populações efetivas mínimas (que devem ser preservadas integralmente) e as áreas realmente ocupadas pelas comunidades.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizar traçadores químicos e/ou biológicos (ocorrência das mesmas espécies – estudos taxonômicos morfológicos e moleculares).
E.BI15. Incluir as áreas de influência sobre os sistemas subterrâneos	Para que os impactos possam ser avaliados de modo realista, fornecendo base robusta para o estabelecimento de medidas mitigadoras eficazes.	<ul style="list-style-type: none"> • Incluir métodos para determinação das áreas de influência sobre os sistemas subterrâneos afetados direta ou indiretamente pelo empreendimento, em todas as fases do estudo, de seu planejamento à fase de monitoramento, com foco principal nos elementos que implicam nas maiores áreas, como drenagens a montante, incluindo áreas de recarga do sistema, e áreas de vida dos morcegos cavernícolas. <p>Obs.: Trata-se da influência dos processos epígeos sobre os ambientes subterrâneos. Não confundir com a área de influência do empreendimento, que é totalmente distinta desta.</p>

Estudos de viabilidade - Biodiversidade (E.BI)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.BI16. Assegurar-se da plena qualificação dos pesquisadores envolvidos nos estudos ambientais, tendo em vista os objetivos específicos do trabalho	Dada a natureza irreversível dos impactos da mineração, é fundamental garantir a confiabilidade dos estudos ambientais, assim como dano mínimo necessário à realização do estudo, medida especialmente relevante para sistemas subterrâneos dada sua fragilidade intrínseca.	<ul style="list-style-type: none"> Garantir a competência da equipe, por meio da verificação criteriosa de antecedentes, só incluindo na equipe profissionais qualificados na área específica, com experiência em espeleobiologia, comprovada por CV
E.BI17. Divulgar os resultados dos estudos e levantamentos	<ol style="list-style-type: none"> Possibilitar revisão por pares. Facilitar o acesso a informação potencialmente útil para estudos de impactos cumulativos. 	<ul style="list-style-type: none"> Publicação em periódicos científicos Depósito de relatórios, estudos e bancos de dados em repositórios de acesso público
E.BI18. Indicar áreas prioritárias para conservação	<ol style="list-style-type: none"> Subsidiar análise integrada. Evitar impactos irreversíveis à biodiversidade. 	<ul style="list-style-type: none"> Indicar áreas que, devido à sua importância, devam representar restrições para o desenvolvimento do projeto

Desenvolvimento comunitário sustentável

Estudos de viabilidade - Comunidades (E.CS)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.CS1. Diagnóstico socioeconômico focado nos temas relevantes	<p>Identificar questões que poderão subsidiar a avaliação dos impactos sociais e a proposição de planos de gestão socioambiental, com destaque para:</p> <ul style="list-style-type: none"> compreender a dinâmica socioeconômica do contexto onde se insere a mina; estabelecer base de dados sólida para fundamentar análises e planos de ação; compreender o uso dos recursos naturais pela comunidade e a provisão de serviços ecossistêmicos; identificar eventuais conflitos atuais e antecipar potenciais conflitos futuros acerca do uso de recursos naturais e sua relação com o empreendimento; identificar grupos em situação de vulnerabilidade; identificar elementos do patrimônio cultural material e imaterial [exceto patrimônio arqueológico: ver seção específica]. 	<ul style="list-style-type: none"> Realizar levantamento e análise de dados secundários (disponíveis em fontes oficiais e literatura), abarcando, entre outros aspectos, dinâmica demográfica e econômica, estrutura produtiva, emprego e renda, infraestrutura de serviços básicos, educação e saúde, saneamento, uso e ocupação do solo, finanças públicas, vulnerabilidade social, índice de desenvolvimento humano; Identificar as comunidades que possam ser afetadas pelo futuro empreendimento, como os residentes na área do empreendimento e no entorno, a jusante e ao longo de vias de acesso, assim como as comunidades situadas em futuras áreas de compensação ambiental. Realizar levantamento de dados primários (coletados em campo) com objetivo de caracterizar as comunidades que possam ser afetadas, identificando o perfil socioeconômico dos moradores, as condições de acesso a serviços e infraestrutura básica, formas de participação e organização social, tradições culturais, uso dos recursos naturais e dependência de serviços providos pelos ecossistemas que poderão ser afetados. Realizar entrevistas nas comunidades, visando identificar o nível de informação e as expectativas dos moradores em relação à implantação do projeto, apreender a percepção dos moradores em relação ao lugar onde moram, suas aspirações e temores em relação ao futuro do lugar.
E.CS2. Mapeamento das partes interessadas	<p>Facilitar a comunicação e o engajamento das partes interessadas, permitindo:</p> <ul style="list-style-type: none"> iniciar o processo de envolvimento da comunidade e demais partes interessadas no projeto; conhecer indivíduos e grupos que, direta ou indiretamente, possam ser afetados positiva ou negativamente pelo projeto; identificar possíveis grupos ou indivíduos que possam exercer alguma influência sobre as decisões relativas ao projeto; 	<ul style="list-style-type: none"> Identificar os atores sociais ou grupos que podem ser direta ou indiretamente afetados pelo projeto e aqueles que podem influenciar as decisões sobre o projeto, por exemplo: comunidades locais, proprietários de terras, associações de moradores, ONGs locais, regionais ou de atuação nacional, populações tradicionais, prefeituras e demais órgãos governamentais de diferentes esferas, sindicatos, conselhos municipais ou regionais, políticos, universidade, entidades religiosas. Delimitar a possível área de influência direta e indireta do projeto, considerando os impactos sociais locais e regionais, os principais componentes da cadeia produtiva, rotas de escoamento da produção. Com base nessas informações, é possível mapear partes interessadas. identificar pessoas ou grupos mais vulneráveis entre os possíveis afetados.

Estudos de viabilidade - Comunidades (E.CS)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.CS3. Divulgação de informação relativa ao empreendimento	Promover a comunicação de informação transparente, acessível e atualizada, fundamento para a construção de um canal de diálogo eficiente e duradouro entre a empresa e a comunidade anfitriã.	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar as formas mais adequadas para estabelecer canal efetivo de comunicação, de acordo com o público alvo. A escolha do método e das ferramentas a serem adotadas deve levar em consideração o contexto no qual está inserido o projeto e as características do público, tais como nível de escolaridade, aspectos culturais, modos de organização social, entre outros; • A informação a ser divulgada sobre o projeto deve ser atual, objetiva, relevante e de fácil compreensão; • A informação sobre o projeto pode ser divulgada por diferentes meios, como boletins informativos, imprensa, páginas da web, reuniões públicas, grupos focais, fóruns de discussão ou conselhos constituídos.
E.CS4. Consulta às partes interessadas	<p>Aprofundar o conhecimento e compreensão sobre os impactos do projeto e estabelecer relações construtivas e duradouras entre empresa e comunidade ao longo da vida útil da mina.</p> <p>Nota: esta consulta é liderada pela própria empresa, sempre que possível com a participação de parceiros locais, e não se confunde nem substitui a consulta pública oficial, promovida por entidades governamentais no âmbito dos procedimentos de aprovação ou licenciamento de projetos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Elaborar previamente um plano de comunicação, levando em conta os atores sociais que deverão ser consultados e sobre quais questões; • O processo de consulta deve ser conduzido de maneira organizada e interativa, garantindo a manifestação dos diferentes pontos de vista; • Contratar equipe de facilitação para organizar a consulta • Informar às partes interessadas se e como incorporou eventuais modificações em seu projeto ou planos em razão de demandas e propostas apresentadas durante o processo de consulta; • Adotar uma ou mais modalidades apropriadas para realizar a consulta, tais como: grupos de discussão, reuniões públicas, oficinas de trabalho; • Documentar a consulta e divulgar seus resultados aos participantes.
E.CS5. Análise dos impactos e proposição de medidas de mitigação	<p>Informar decisões de investimento da empresa e influenciar decisões da equipe de projeto sobre alternativas de projeto de modo a:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Evitar, na medida do possível, impactos adversos sobre as comunidades; • Definir programas de mitigação e de compensação social para os impactos adversos que não possam ser evitados; • Definir programas de valorização e potencialização dos impactos sociais e econômicos benéficos; • Evitar e minimizar conflitos com as comunidades afetadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização sistemática das informações obtidas e análises realizadas nas atividades anteriores (1 a 4); • Analisar alternativas de localização de componentes do empreendimento, como pilhas de estéril e vias externas de transporte; • Envolver representantes das partes interessadas na definição de critérios para determinação de impactos significativos; • Definir programas sociais em cooperação com as partes interessadas.

Análise integrada

Estudo de viabilidade - Análise Integrada (E.AI)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.AI1. Avaliar importância dos componentes do carste que podem ser afetados pelo projeto	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definir a importância ecológica e social dos componentes do carste que podem ser afetados pelo projeto, em especial aqueles que devem ser protegidos. 2. Subsidiar a avaliação da importância dos impactos e riscos ambientais e sociais. 3. Fundamentar a definição de programas de gestão ambiental e social. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os componentes a serem avaliados podem incluir cavernas, feições do exocarste, sítios paleontológicos e arqueológicos, habitats, fragmentos de vegetação nativa, locais de interesse cultural. • Seguir critérios de importância estabelecidos pela legislação, quando houver, ou por recomendações internacionais, quando aplicável (como habitats críticos, geossítios e outros); • Identificar os serviços ecossistêmicos prioritários e seus beneficiários.
E.AI2. Definir, caso aplicável, restrições a atividades de mineração e de apoio visando proteger componentes relevantes	<ol style="list-style-type: none"> 1. Evitar impactos significativos, principalmente os irreversíveis. 2. Reduzir ou minimizar os impactos inevitáveis. 3. Fundamentar decisões sobre escolha de alternativas de projeto. 4. Fornecer informação para análise de viabilidade técnico-econômica do projeto (reservas lavráveis, conformação final de cava, distância média de transporte etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitar a profundidade da cava de modo a evitar interceptação de água subterrânea. • Limitar a distância dos taludes da cava ao perímetro de proteção de cavernas e outros sítios de importância patrimonial que devam ser preservados. • Não utilizar dolinas para disposição de estêreis.
E.AI3. Estabelecer perímetros de proteção aos componentes que devem ser protegidos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Orientar a definição do layout do futuro empreendimento. 2. Avaliar se, para atingir o nível de proteção desejável, poderá ser necessário adquirir áreas externas ou iniciar negociações com outras empresas, governos ou comunidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cada componente relevante poderá ter seu próprio perímetro de proteção, sendo necessário compatibilizá-los, possivelmente adotando a maior envoltória que englobe todos os componentes que deverão ser protegidos • Delimitação do perímetro de proteção dos componentes ambientais com base em critérios relativos à categoria do componente em questão, com apoio de estudos adicionais, quando necessário. Exemplos: <ul style="list-style-type: none"> • Em geossítios, utilizar como critérios os seus principais atributos, podendo focar as litologias e suas unidades estratigráficas, as potencialidades paleontológicas, arqueológicas, pedológicas, hidrográficas e hidrogeológicas; • Em cavidades naturais, utilizar as zonas de recarga do sistema cárstico correspondente (caso esteja ativo), o gradiente microclimático nas proximidades dos acessos à superfície e à área de forrageio de troglóxenos obrigatórios e troglófilos; • Delimitação de áreas em atendimento a requisitos legais, como, no Brasil, reserva legal e área de proteção permanente.
E.AI4. Definir outras medidas específicas de proteção	<ol style="list-style-type: none"> 1. Definir medidas de gestão a serem adotadas nas etapas de implantação, operação e desativação. 2. Estabelecer as medidas compensatórias para impactos sobre biodiversidade e serviços ecossistêmicos e para impactos sociais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Priorizar a criação das áreas protegidas de forma contígua, espacialmente conectadas, de modo a causar menor fragmentação de ecossistemas e aumentar o suporte de serviços ambientais. • Elaborar plano ou programa de gestão das áreas protegidas, de forma participativa e inclusiva quando da existência de comunidades no entorno. • Apoiar a criação, implantação e gestão de áreas naturais protegidas do entorno da área afetada. • Fomentar a criação de espaços culturais para exposição dos aspectos naturais, a exemplo de museus temáticos associados aos fósseis e achados arqueológicos, desenvolvendo projetos de educação patrimonial e possibilitando, na comunidade impactada, a percepção da necessidade de proteção do patrimônio natural.

Estudo de viabilidade - Análise Integrada (E.AI)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
E.AI5. Definir medidas de valorização dos impactos positivos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar os potenciais impactos positivos do projeto no campo socioeconômico e os principais riscos ou obstáculos à sua plena realização. 2. Garantir diálogo permanente com as partes interessadas de modo a obter subsídios para avaliação permanente da realização dos impactos benéficos. 3. Manter diálogo permanente com os beneficiários para, em conjunto, buscar oportunidades que reforcem os resultados positivos. 4. Difundir informação e conhecimento gerados durante os estudos, visando beneficiar públicos distintos 	<ul style="list-style-type: none"> • Desenvolver programas de capacitação de mão de obra, de formação de lideranças locais e fortalecimento de organizações da sociedade e do poder público local; • Prever e destinar recursos no orçamento dos programas sociais específicos para essa finalidade; • Tornar disponíveis os estudos sobre o carste realizados; • Promover a divulgação dos resultados dos estudos sobre o carste (eventos, publicações científicas, palestras em escolas, visitas monitoradas etc).
E.AI6. Estabelecer um plano de monitoramento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para integrar as necessidades de monitoramento (e.g. qualidade da água, hidroquímica, vazões, sedimentação, pressão acústica, vibração, paleontológico, arqueológico, dentre outras). 2. Para garantir o envolvimento e participação das partes interessadas no monitoramento da implementação das medidas mitigadoras, favorecendo o processo de empoderamento da comunidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer pontos de monitoramento adequados; • Estabelecer periodicidade apropriada para os parâmetros a serem monitorados (por exemplo: para vibração e paleontologia, monitorar cada detonação, durante e após); • Criar comitês de monitoramento com representantes das partes interessadas.
E.AI7. Considerar as informações sobre o carste em análises de risco	Quando a empresa realiza análises de risco como parte de seu processo decisório interno, considerar as especificidades dos ambientes cársticos permite a identificação de riscos potencialmente importantes que poderiam ficar ocultos	<ul style="list-style-type: none"> • Levantar em conta a vulnerabilidade dos compartimentos do carste; • Desenvolver medidas de redução de riscos de modo a melhorar o risco residual estimado.

3.2. RECOMENDAÇÕES PARA A ETAPA DE IMPLANTAÇÃO

A implantação de novos empreendimentos, ou a ampliação de empreendimentos existentes, é guiada pelos estudos e levantamentos feitos na etapa anterior e compreende a implementação dos diversos programas de gestão pertinentes a esta etapa, cujos resultados devem ser avaliados.

Entretanto, durante a implantação podem ocorrer mudanças de projeto ou situações imprevistas. Entre os exemplos de situações imprevistas está a descoberta de feição cárstica não mapeada na etapa anterior de estudos de viabilidade (como um sumidouro ou uma caverna) ou de um registro fóssil. Já certas mudanças de projeto são usuais, quando se passa do projeto básico para o executivo, e é preciso avaliar se poderá haver repercussões para os recursos do carste e para a comunidade.

Geossistemas cársticos

Implantação - Geossistemas Cársticos (I.GC)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
I.GC1. Diagnóstico continuado do comportamento hídrico/hidráulico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Obtenção de séries de comportamento de longo tempo. 2. Para obter informações acerca da hidrodinâmica dos sistemas cársticos presentes na área do empreendimento, permitindo, caso sejam identificadas perturbações no comportamento do sistema, a tomada de medidas mitigadoras imediatas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento contínuo de parâmetros hidrológicos como vazão, condutividade, turbidez, dentre outros.

Implantação - Geossistemas Cársticos (I.GC)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
I.GC2. Monitoramento hidrológico, hidrogeológico e hidroquímico	<p>O decaimento altera a dinâmica de infiltração (em volume, orientação e qualidade/hidroquímica) e a dinâmica do transporte de sólidos, com possíveis interferências (assoreamentos) de condutos subterrâneos.</p> <p>O rebaixamento do aquífero gera um cone que possibilita a redução de vazão de nascentes e cursos d'água, além de possibilitar a intensificação de processos de dolinamento (perda de feições exocárstica e endocárstica).</p>	<ul style="list-style-type: none"> Variação do nível de base em pontos de controle estabelecidos em 3 diferentes "escalas de raio" de distanciamento da intervenção, desde o início da intervenção estendendo-se até, pelo menos, um ciclo hidrológico (se não for ano climático anômalo) após estabilizada a intervenção da hidrodinâmica e qualidade hídrica. Pontos de monitoramento: nascentes, drenagens subterrâneas (em cavernas), percolação e escoamento subterrâneo (gotejamentos e escorrimentos no interior de cavernas) e poços. Comparar com o comportamento local das variações do nível de pré-instalação (comparação de hidrogramas); Parâmetros hidroquímicos, inclusive isotópicos, que auxiliem o reconhecimento da origem e tempo de residência dos fluidos.
I.GC3. Monitoramento de processos de dolinamento, subsidência etc.	<ol style="list-style-type: none"> Para monitorar os efeitos do rebaixamento do aquífero, uma vez que o cone de rebaixamento pode resultar na intensificação de processos de dolinamento. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilizar parâmetros de controle morfométricos, operacionalizados por meio de tecnologias de levantamento topográfico de precisão (laserscanner, entre outros).
I.GC4. Georreferenciar as cavidades naturais subterrâneas e demais componentes a serem preservados, localizados no entorno das áreas operacionais com GPS geodésico	<ol style="list-style-type: none"> Para garantir a adequada localização das cavernas e demais componentes a serem preservados. Para garantir a efetiva preservação do perímetro de proteção das cavernas e feições de recarga hídrica (dolinas, uvalas, ponores, dentre outros). 	<ul style="list-style-type: none"> Elaborar banco de dados contendo coordenadas das feições e dados básicos, como nome, litologia, projeção horizontal etc. Fazer mapas localizando as feições, sua projeção horizontal, área de preservação, área de influência. Alimentar bases de dados nacionais com a localização das cavidades.
I.GC5. Delimitar fisicamente os perímetros de proteção	<ol style="list-style-type: none"> Para facilitar o controle, inspeções e auditorias. 	<ul style="list-style-type: none"> Utilizar instrumentos de sinalização (placas, correntes, marcos, dentre outros).
I.GC6. Adequar o planejamento de lavra com vistas à conservação dos componentes relevantes	<ol style="list-style-type: none"> Para não causar impactos negativos irreversíveis em cavidades naturais subterrâneas. Para evitar perturbações no funcionamento do sistema cárstico, evitando impactos em áreas de recarga; Para evitar a supressão de feições exocársticas. 	<ul style="list-style-type: none"> Realizar levantamento geoestrutural, com vistas a elaborar zoneamento da caverna em termos de fragilidade. Adequar o plano de lavra às condições de fragilidade geotécnica das cavidades naturais subterrâneas, localizadas no entorno do empreendimento.
I.GC7. Atualizar o modelo conceitual do carste	<ol style="list-style-type: none"> Melhorar a compreensão do sistema cárstico. Revisar, se necessário, os programas de gestão. 	<ul style="list-style-type: none"> Interpretar os dados obtidos nos vários programas de monitoramento. Manter atualizado o banco de informações georreferenciadas.
I.GC8. Em caso de resgate e salvamento de cavernas, realizar estudos petrográficos, morfológicos, químicos e mineralógicos de rochas e espeleotemas	<ol style="list-style-type: none"> Para caracterizar adequadamente a rocha hospedeira da caverna, permitindo interpretações acerca do controle litoestratigráfico; Para identificar eventuais minerais de ocorrência restrita em ambiente subterrâneo; Para identificar eventuais espeleotemas de composição mineralógica atípica; Para ampliar o conhecimento acerca da mineralogia de espeleotemas carbonáticos; Para permitir a realização de futuros estudos e evitar a necessidade de dano em outras cavidades. 	<ul style="list-style-type: none"> Selecionar amostras representativas e coletá-las, mediante autorização dos órgãos responsáveis. Em cavernas a serem suprimidas, coletar a maior parte possível dos espeleotemas e depositá-los em uma instituição de pesquisa, seguindo protocolos adequados de catalogação e armazenamento. Utilizar técnicas de análise como laminação (polida, delgada, etc) difratometria e fluorescência de raios X.

Implantação - Geossistemas Cársticos (I.GC)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
I.GC9. Construção de estruturas de retenção de sedimentos e instalação de dispositivos de drenagem, de águas pluviais antes do início do decapeamento e da abertura de vias	<ol style="list-style-type: none"> 1. Proteção dos cursos d'água; 2. Prevenção do carreamento de sedimentos para dolinas e cavernas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elaborar projetos de drenagem e retenção de sedimentos considerando a drenagem superficial e subterrânea, além das feições cársticas.
I.GC10. Implantação de sistemas de coleta e tratamento de esgotos sanitários	<ol style="list-style-type: none"> 1. Prevenir poluição das águas superficiais e subterrâneas; 2. Proteger a saúde da população a jusante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Implantar sistemas de tratamento de esgoto considerando a permeabilidade e drenagens subterrâneas.
I.GC11. Monitorar as vibrações incidentes sobre as cavernas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para garantir que a integridade física das cavernas não será comprometida na fase de implantação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Instalação de geofones e/ou outros instrumentos sismográficos; • Instalação nas cavernas de "cracketer" e "convergence meter" com amostradores automáticos; • Monitoramento fotográfico, com vistas a evidenciar as condições iniciais de integridade física da caverna e controlar a evolução destas condições ao longo da implantação.
I.GC12. Monitorar parâmetros atmosféricos das cavernas e entorno imediato	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para verificar se as atividades de mineração desenvolvidas nas proximidades das cavernas não estão interferindo em seu ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorar, em escala de variação horária (mínimo), a temperatura do ar, da água (quando existente), a umidade relativa do ar, a concentração de CO₂ e Rn; • Monitoramento por meio de instrumentos de alta precisão, em função da baixa variabilidade das variáveis monitoradas. Os instrumentos devem possuir amostradores automáticos acoplados, ou sistema de transmissão de dados (cabos físicos ou Bluetooth) para uma estação transmissora fora da caverna, permitindo o envio da informação para um centro de controle incumbido do armazenamento, tratamento e análise dos dados; • Utilizar técnicas de análise de séries temporais para traçar os padrões naturais de variabilidade e indentificar possíveis interferências, com anotação de eventos antrópicos que possam afetar os dados.
I.GC13. Monitorar os sistemas deposicionais	<ol style="list-style-type: none"> 1. Para garantir a manutenção da dinâmica deposicional endocárstica; 2. Para identificar e mitigar eventuais perturbações que possam resultar em assoreamento dos canais fluviais subterrâneos, ou até mesmo dos setores vadosos das cavernas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento sedimentométrico; • Monitoramento de movimentos de massa etc.
I.GC14. Suspender qualquer atividade que represente risco de dano a achados fortuitos potencialmente importantes (cavidades naturais, fósseis, materiais arqueológicos, cursos d'água subterrâneos), até que sejam tomadas todas as providências necessárias para sua plena avaliação	<ol style="list-style-type: none"> 1. Por cautela, até que se avalie a relevância dos achados e se determine a condução mais adequada frente à atividade em curso; 2. Evitar risco de danos ao patrimônio ambiental e cultural e infrações à legislação vigente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistematizar, nas rotinas de trabalhos, de campo a "comunicação de alertas" para novos achados. • Acionar prontamente a assessoria ad hoc mais indicada* ao caso, para a realização de estudos complementares. • Treinar funcionários e colaboradores para identificação de possíveis feições cársticas, fósseis e vestígios arqueológicos. <p>Obs.: Vide Boas Práticas relativas a procedimentos gerais de espeleologia, espelobiologia, arqueologia, paleontologia e hidrogeologia.</p>

Paleontologia e Arqueologia

Implantação - Paleontologia e Arqueologia (I.PA)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
I.PA1. Determinar o impacto das intervenções no solo e no subsolo dependendo dos resultados dos diagnósticos arqueológico e paleontológico	<ol style="list-style-type: none"> Determinar as áreas que necessitarão de maior atenção durante a implantação. 	<ul style="list-style-type: none"> De posse dos projetos de engenharia, verificar junto ao mapa de potencialidades paleontológicas e arqueológicas onde as atividades construtivas, principalmente fundações, poderão interferir no subsolo com interesse para ocorrências de elementos da cultura material e, assim, verificar quais das ações propostas nos estudos de potencialidades deverão ser executadas para garantir a integral proteção da geodiversidade e até mesmo do patrimônio geológico.
I.PA2. Educação Patrimonial – Cursos e Palestras	<ol style="list-style-type: none"> Proporcionar aos funcionários a identificação de quaisquer registros fósseis e/ou arqueológicos que possam sofrer interferência durante as obras de implantação. É uma forma eficiente de proteção adicional ao patrimônio paleontológico e arqueológico. Na ausência de um especialista em paleontologia e/ou arqueologia, que nem sempre pode estar à disposição durante a implantação de todo o empreendimento, a própria equipe de escavação poderá fazer a identificação de um registro fóssil ou de cultura material e informar ao paleontólogo ou arqueólogo responsável, para que tome as providências necessárias. 	<ul style="list-style-type: none"> Desde o princípio das atividades construtivas, será necessário um treinamento básico para os colaboradores variando o grau de detalhe conforme a atividade que irão executar. Devido à alta rotatividade das equipes de trabalho que geralmente acompanham todo o processo construtivo, será necessário que estes cursos e palestras sejam realizados quase de maneira contínua, durante toda esta fase construtiva. Os cursos deverão ser teóricos e práticos envolvendo geologia básica e conceitos de paleontologia e arqueologia, indicando ainda procedimentos a serem tomados quando identificados fósseis ou elementos da cultura material.
I.PA3. Integração com o programa de educação ambiental	<ol style="list-style-type: none"> Tem cunho informativo, abrindo horizontes para a compreensão da importância dos estudos paleontológicos e arqueológicos, os seus benefícios para a ciência e, até mesmo, para os moradores da região, haja vista que os fósseis e os vestígios da cultura material identificados em campo podem compor mostra museológica que, dependendo do caráter e grau de relevância, poderão alimentar o turismo local, propiciando geração de postos de trabalho e renda para as comunidades locais e criando, assim, novo mecanismo de desenvolvimento regional sustentável. 	<ul style="list-style-type: none"> Estabelecer uma interlocução entre os responsáveis pelos programas de educação ambiental, de paleontologia e de arqueologia, a fim de esclarecerem as necessidades de cada programa, buscando uma forma de unificação destes em palestras para as escolas e as comunidades. Estas iniciativas possibilitam o resgate da identidade entre os moradores locais, com a composição de acervo temático acerca dos fósseis descobertos e dos elementos da cultura material de povos pretéritos. Busca-se desta forma valorizar a cultura local, educar sobre a importância dos estudos paleontológicos e arqueológicos e, por conseguinte, mostrar a necessidade de conservação do Patrimônio Geológico, sendo ele focado nos fósseis/achados arqueológicos de valores local e nacional.
I.PA4. Intervenções de Coleta "in loco"	<ol style="list-style-type: none"> É a única forma de garantir a proteção destes registros fósseis e arqueológicos para que não sejam destruídos ou extraviados durante o processo de escavação. 	<ul style="list-style-type: none"> Como primeira ação, as escavações em localidades com ocorrências paleontológicas e arqueológicas deverão ser paralisadas e o local isolado, até que o responsável técnico pelo programa de paleontologia e/ou de arqueologia possa tomar ciência, momento em que determinará as providências necessárias. Na sequência, os registros fósseis deverão ser escavados dentro dos critérios e metodologias exigidos, garantindo a sua total integridade física para que, então, seja transportada até o laboratório de paleontologia para as demais ações. Obs.: a implantação do projeto poderá continuar fora da área isolada para o resgate paleontológico.
I.PA5. Transporte e curadoria do material fossilífero e arqueológico	<ol style="list-style-type: none"> Resguardar o Patrimônio Paleontológico/Arqueológico de forma a manter a integridade dos exemplares fósseis e das ocorrências arqueológicas, por meio de seu adequado acondicionamento, o que garantirá a presença de todas as características necessárias aos estudos científicos e, mesmo, a exposições em museus e mostras públicas. 	<ul style="list-style-type: none"> Depositar os materiais em uma instituição previamente escolhida pelos órgãos responsáveis, normalmente centros de pesquisas e museus reconhecidos nacionalmente; Catálogo e tombo dos materiais encontrados, que passarão a compor o acervo científico para os estudos subsequentes.

Biodiversidade

Implantação – Biodiversidade (I.BI)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
I.BI1. Deixar testemunhos do ambiente, mantendo corredores ecológicos para conexão com habitats contíguos	1. Permitir fluxo de populações e recolonização.	<ul style="list-style-type: none"> A partir do estudo ambiental, definir áreas que contêm amostras consideradas como representativas (justificar) da fauna e flora da região, tanto epígea como hipógea, mantendo corredores ecológicos para preservação das espécies encontradas na área do empreendimento.
I.BI2. Implantação dos programas de Recuperação de Áreas Degradadas (RAD)	<ul style="list-style-type: none"> A implantação dos programas de RAD na fase de implantação da mina permite: (a) reduzir o passivo ambiental; (b) demonstrar à comunidade e aos órgãos reguladores o cumprimento de compromissos de proteção; (c) recuperação ambiental e que a empresa adquira conhecimento e experiência em RAD. Os programas de RAD podem ser classificados em quatro grupos: práticas edáficas, práticas topográficas e geotécnicas, práticas hídricas e práticas ecológicas. 	<p>As práticas edáficas são relativas ao manejo e proteção do solo, como a utilização do solo superficial imediatamente após sua retirada.</p> <ul style="list-style-type: none"> As práticas topográficas e geotécnicas incluem as relativas à estabilidade de bancadas e às pilhas de estéril, como implantação de sistema de drenagem de águas pluviais em taludes de solo. As práticas hídricas são referentes à proteção de recursos hídrico, como revegetação dos entornos dos cursos d'água. As práticas ecológicas são referentes ao manejo de fauna e vegetação, como reestabelecimento de vegetação em áreas em recuperação que deve seguir o plano estabelecido.
I.BI3. Gestão do processo de RAD	1. As ações de controle e gestão de RAD são importantes para garantir que as práticas operacionais atinjam os resultados fixados no planejamento.	<ul style="list-style-type: none"> Deve se conhecer os pontos de vista da comunidade. Orientar tecnicamente os trabalhos a serem executados. Capacitação técnica da equipe envolvida. Desenvolvimento e implementação sistemática de procedimentos operacionais. Provisão de recursos humanos (humanos, físicos e financeiros). Acompanhamento, monitoramento, registro e documentação.
I.BI4. Monitorar a área revegetada e a fauna	<ol style="list-style-type: none"> Acompanhar a evolução do reestabelecimento da vegetação O acompanhamento da fauna nas áreas recuperadas e em área de entorno fornece informações importantes para avaliar a qualidade dos habitats criados pela mineração 	<ul style="list-style-type: none"> Estabelecer programa de monitoramento de grupos faunísticos, indicando métodos de levantamento, locais e frequências de amostragem. Estabelecer programas de monitoramento de vegetação, por meio de indicadores apropriados, durante período suficientemente longo (vários anos).
I.BI5. Manutenção das áreas recuperadas	1. Rotinas de manutenção são importantes para garantir que as práticas de recuperação e prevenção funcionem de forma eficaz e eficiente.	<ul style="list-style-type: none"> As áreas recuperadas devem ser capinadas e limpas de espécies invasoras, para se controlar pragas e enfermidades. Definir plano de emergência para situações como desmatamento ilegal, invasão por gado, queimada etc.
I.BI6. Monitorar o espeleoclima e as comunidades epígeas e subterrâneas	Para avaliar os reais impactos e a eficácia das medidas mitigadoras.	<ul style="list-style-type: none"> A fim de possibilitar comparações, aplicar a mesma metodologia do estudo - amostragens podem ser reduzidas a duas ocasiões por ciclo anual, regularmente espaçadas, sendo uma na estação chuvosa e outra na seca.

Desenvolvimento comunitário sustentável

Implantação – Comunidades (I.CS)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
I.CS1. Divulgar informação relativa à implantação do empreendimento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Informação acessível, transparente e atualizada sobre o projeto e seus impactos subsidia processos de participação, consultas públicas, mediação e negociação de eventuais conflitos. 2. Durante a etapa de implantação, podem ocorrer alterações de projeto, atrasos ou mudanças de cronograma, incidentes ou acidentes que afetem a comunidade. 3. Pessoas e grupos têm interesse em conhecer oportunidades de emprego, prestação de serviços e fornecimento à empresa, seja para a etapa de implantação, seja para a operação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Emitir boletins com informação sobre o andamento das obras de implantação. • Utilizar meios de divulgação de informação levando em conta a diversidade do público interessado, o nível de detalhe técnico, o grau de escolaridade do público, a composição étnica e de gênero, as estruturas de liderança locais, o grau de associativismo etc. • Realizar reuniões setoriais com comunidades afetadas, reuniões com pequenos grupos, que poderão manifestar interesses e preocupações específicas, encontros com lideranças comunitárias, imprensa, meios eletrônicos ou outros meios de comunicação locais. • Formular um sistema de indicadores sociais e econômicos, que sejam capazes de adiantar e revelar tendências, além de identificar previamente a ocorrência de situações econômicas e sociais indesejáveis.
I.CS2. Implantar um mecanismo de registro de reclamações e gestão de conflitos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reconhecer possíveis conflitos de interesse entre o projeto e as atividades desenvolvidas pela comunidade, por exemplo, em relação ao uso da água ou sítios com interesse histórico ou turístico. 2. Encontrar formas de gerenciar os conflitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer um canal de recebimento de queixas e reclamações e um sistema consistente de registro, de amplo conhecimento e facilmente acessível às partes interessadas; • Adotar um canal de comunicação direto, como uma linha 0800, ouvidoria, um site mantido pela empresa, encontros e reuniões periódicas com grupos específicos da comunidade, implantação de um escritório da empresa em local de fácil acesso.
I.CS3. Implementar os programas de gestão pertinentes e avaliar seus resultados	<ol style="list-style-type: none"> 1. A implementação de programas e planos de ação, de acordo com o planejado na etapa de estudo de viabilidade, é essencial para evitar e minimizar impactos adversos e para maximizar os benefícios. Também são requisitos externos decorrentes de licenças ambientais, condições de financiamento etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definir, mediante consulta às partes interessadas, indicadores de progresso e de resultados dos programas sociais. • Manter registro sistemático de avanço dos programas de gestão e correspondentes indicadores de desempenho.
I.CS4. Convidar entidades para constituir uma comissão de acompanhamento da implantação	<ol style="list-style-type: none"> 1. Garantir um processo transparente e facilitar a construção de um canal permanente de diálogo com a empresa; 2. Informar sobre cronograma e as ações adotadas durante a implantação, esclarecendo eventuais dúvidas que poderiam evoluir para situações de conflito. 	<ul style="list-style-type: none"> • Identificar grupos e/ou indivíduos que poderão ser envolvidos no processo de acompanhamento da implantação do empreendimento. • Estabelecer calendário de visitas monitoradas à área do empreendimento. • Realizar reuniões com o objetivo de informar sobre as ações adotadas pela empresa, visando a proteção ambiental • Elaborar previamente plano para conduzir o processo de acompanhamento. • Manter registro das ações desenvolvidas.

3.3. RECOMENDAÇÕES PARA A ETAPA DE OPERAÇÃO

As práticas recomendadas para a etapa de operação de uma mina são, em grande parte, idênticas àquelas recomendadas para a etapa de implantação. Nos quadros apresentados nesta seção, as práticas já descritas na seção anterior não são repetidas, indicando-se apenas as práticas pertinentes a esta etapa.

As práticas a serem adotadas nesta etapa decorrem, em larga medida, das conclusões dos estudos e levantamentos feitos anteriormente, ou seja, são ações de mitigação desenhadas para cada mina, ou mesmo para determinadas estruturas em uma mina, como uma pilha de estéril.

As práticas recomendadas nesta seção são de caráter geral, podendo ou não ser válidas para uma mina em função da presença ou ausência dos componentes do carste ou de características da comunidade que são objeto de cada prática. Assim, na ausência de vestígios paleontológicos ou arqueológicos, naturalmente, não são aplicáveis muitas das recomendações a seguir.

Por outro lado, diversas práticas relacionadas nesta seção aplicam-se à maioria das minas em operação, em particular àquelas relacionadas à biodiversidade e ao desenvolvimento comunitário sustentável, a exemplo das práticas relacionadas à recuperação de áreas degradadas e à atualização do mapeamento das partes interessadas.

As práticas aqui apresentadas, que têm os ambientes cársticos como foco, devem se somar a outras práticas ambientais adotadas na operação de minas, e poderão ser agrupadas em programas afins ou organizadas em um sistema de gestão. Modalidades de gestão ambiental estão fora do escopo deste Guia, mas é oportuno lembrar que a aplicação das recomendações de boas práticas, aqui elencadas, gera grande volume de dados e informação que convém organizar em bases acessíveis.

Bases de informação bem estruturadas podem servir não apenas à própria gestão do empreendimento, mas também à gestão territorial em escala municipal ou regional, à avaliação de impactos cumulativos, à pesquisa científica e outras finalidades. A gestão da informação e do conhecimento é uma ferramenta de grande valia para a aplicação eficaz das recomendações deste Guia.

Geossistemas cársticos

Operação - Geossistemas Cársticos (O.GC)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
Várias práticas da etapa de implantação aplicam-se também à etapa de operação, a exemplo de I.GC1, I.GC2, I.GC3, I.PA1, I.BI4, I.BI5, I.BI6, I.CS1		
O.GC1. Estabelecer, mediante consulta à comunidade e às autoridades, plano de manejo de cavidades localizadas em propriedades da empresa	<ol style="list-style-type: none"> 1. Valorizar o patrimônio espeleológico mediante ações de educação e divulgação; 2. Facilitar a continuidade de pesquisas acadêmicas ou aplicadas de potencial interesse para o avanço do conhecimento sobre o carste; 3. Possibilitar possíveis benefícios econômicos à comunidade, caso haja fluxo regular de visitantes. 	As formas possíveis de uso dependerão de estudo específico.

Paleontologia e Arqueologia

Operação - Paleontologia e Arqueologia (O.PA)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
O.PA1. Implantação dos Programas de Monitoramento e Salvamento Paleontológico e Arqueológico	<p>Para a Arqueologia, a ação é imprescindível durante a fase anterior ao início de produção da mina, principalmente durante a fase de movimentação de solos, pois de fato constituem a melhor maneira de proteção do patrimônio arqueológico com o avanço da frente de trabalho.</p> <p>Estas ações são imprescindíveis durante toda a fase de produção da mina, pois de fato constituem a melhor maneira de proteção do patrimônio paleontológico, passível de ser seccionado com o avanço das frentes de lavras em materiais rochosos.</p>	Trata-se de implementar uma série de ações listadas nos itens abaixo e que serão executadas por empresa ou equipe de paleontologia e/ou arqueologia com vasta experiência em programas ambientais. Estes serão capazes de fazer a tomada de decisões em primeira instância, para posteriormente implantar cursos de capacitação de paleontologia e de arqueologia, habilitando profissionais para o monitoramento sistemático que perdurará até o fim da vida útil da mina.
O.PA2. Cursos de Capacitação em Paleontologia e Arqueologia	É necessário para manter a qualificação técnica em Paleontologia e Arqueologia de todos os funcionários envolvidos enquanto perdurar o processo de exploração mineral.	Deverão ser ministrados cursos teóricos e práticos para os colaboradores das frentes de escavação que poderão, assim, auxiliar nas pesquisas por meio do reconhecimento prévio de registros paleontológicos e/ou arqueológicos. Estes cursos deverão ocorrer uma vez ao ano, tendo como objetivo manter a atualização de base dos funcionários já capacitados, assim como possibilitar a qualificação de novos colaboradores.
O.PA3. Palestras de Educação Patrimonial	Possui caráter informativo e auxilia a população local a compreender o passado remoto, as formas de vida e os povos pretéritos que habitaram a região. É uma maneira de valorizar a relevância científica e social que os registros fósseis e os vestígios da cultura material possuem no contexto do desenvolvimento regional por meio do turismo paleontológico/arqueológico. Proporciona ainda uma constante inserção cultural se prestando a qualificar e motivar novos guias a atuarem em mostras expositivas.	Preferir palestras e, até mesmo, minicursos para a população, em especial para o público estudantil, inserido na região diretamente afetada pela produção mineral, como forma de apresentar as informações sobre os fósseis e os povos pretéritos em seus ambientes de vida no passado, possibilitando uma reflexão mais ampla acerca da ciência e da importância desses registros como elementos de exploração econômica por meio do turismo paleontológico/arqueológico.

Operação - Paleontologia e Arqueologia (O.PA)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
O.PA4. Treinamento de Técnicos para acompanhamento de frente de lavra e acompanhamento do decapeamento do estéril (monitoramento)	Com os treinamentos específicos, pode-se evitar a contratação de equipes de paleontólogos/arqueólogos para o monitoramento da frente de lavra, reduzindo drasticamente os custos.	Trata-se de treinamentos específicos e intensos que podem durar de 6 a 12 meses. Deve ser iniciado com curso teórico seguido por acompanhamento e aperfeiçoamento de técnicas em campo, notadamente práticas de reconhecimento de fósseis e de vestígios arqueológicos (como cerâmica, material lítico, material malacológico, arqueológica histórica, arte rupestre) durante os avanços das frentes de lavras.
	O estéril que sempre é desprezado pela mineração pode conter importantes registros paleontológicos. Confirmado a sua potencialidade fossilífera nos estudos anteriores, é preciso ficar atento durante o seu decapeamento. Para tal, deve-se fazer o acompanhando deste processo de forma sistemática. Em razão do grande volume de material rochoso mobilizado, aumenta-se em muito a possibilidade de descobertas paleontológicas.	Deve-se acompanhar de forma direta as escavações da rocha estéril, podendo ou não ser necessário a separação de porções do material para posterior triagem. No caso de serem identificados registros paleontológicos, as escavações devem ser paralisadas no local do achado, sem prejuízo das áreas adjacentes que podem continuar sendo lavradas. A área do achado deverá ser isolada até o completo salvamento dos fósseis. Cada registro paleontológico deve ser fotografado e georreferenciado e realizada a sua contextualização geológica por meio da descrição das rochas, níveis estratigráficos, tipos de estruturas sedimentares presentes e, se possível, estudos tafonômicos.
O.PA5. Separação, triagem e resgate de fósseis (monitoramento)	Devido ao grande volume de rochas retiradas todos os dias durante a lavra, a triagem de parte desse material é a forma mais prática de proteção do patrimônio passível de ser seccionado pela mina, ou seja, uma forma de monitoramento sistemático sobre os materiais rochosos atravessados.	A cada desmonte de rochas do maciço deverão ser coletados e transportados pequena porção de material a ser triado por técnicos da paleontologia, a fim de identificarem possíveis registros paleontológicos. Quando achados, estes devem ser transportado até o laboratório para preparação e acondicionamento.
O.PA6. Salvamento de achados fortuitos	É a única forma de garantir a proteção destes registros para que não sejam destruídos durante o processo de lavra.	Como primeira ação, as atividades de escavações deverão ser paralisadas e o local isolado até que o responsável técnico pelo programa de paleontologia e/ou arqueologia possa tomar ciência, momento em que determinará as providências necessárias. Na sequência, a ocorrência fóssil ou a evidência arqueológica deverá ser escavada dentro dos critérios e metodologias exigidas, garantindo a sua total integridade física para que, então, seja transportado até o laboratório de paleontologia/arqueologia para as demais ações.
O.PA7. Vistoria paleontológica sistemática	Para garantir e manter a sistematização do programa paleontológico	Por meio de visitas periódicas e reuniões com as equipes de acompanhamento paleontológico. Associa-se também à análise dos indicadores de qualidade dos estudos e às propostas de melhorias para todo o processo.
O.PA8. Implantação de laboratório para trabalhos paleontológicos e arqueológicos	Trata-se de um espaço importante para o bom andamento do programa haja vista proporcionar ambiente e equipamento necessário para preparação do exemplar fóssil e limpeza e catalogação da evidência arqueológica.	Compreende uma sala dotada de instrumentos para estudos e pré-preparação de fósseis e/ou cuidados com as evidências arqueológicas. Deve ser provida de água corrente, lupa binocular, instrumentos para preparação de fósseis (cinzéis, pincéis, canetas pneumáticas, sacos de areia), caixas para acondicionamento, materiais para colagem e restauro do espécime/evidência arqueológica.
O.PA9. Preparação básica e pré-identificação de achados paleontológicos e/ou arqueológicos	Compreende a segunda etapa da pesquisa paleontológica, vindo logo após a coleta em campo. Sem que haja a devida preparação do fóssil não há como identificar, classificar e estudar de maneira geral o exemplar.	Consiste na retirada completa ou parcial do fóssil da rocha que o envolve. Pode ser realizado utilizando-se apenas processos mecânicos como canetas pneumáticas, pequenos ponteiros e martelos, ou mesmo quimicamente, por meio do desgaste da rocha com ácidos corrosivos, que dissolvem o sedimento sem atacar o fóssil. Ao final da preparação, já é possível fazer a identificação de qual parte do organismo compõe o exemplar, possibilitando dar início aos estudos científicos que poderão levar à sua classificação taxonômica.
	Etapa importante para a Arqueologia, pois os vestígios coletados em campo serão analisados, limpos e classificados quanto ao tipo de material (lítico, cerâmica, malacológico, etc) e separados segundo as suas características tipológicas.	Compreende a limpeza, classificação, catalogação e restauro das peças buscando-se manter a máxima integridade física do exemplar, requisito essencial para que se possa fazer estudos mais detalhados.

Operação - Paleontologia e Arqueologia (O.PA)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
O.PA10. Acondicionamento e catalogação dos achados fósseis e arqueológicos	Trata-se de procedimento essencial para a adequada conservação e organização dos registros paleontológicos e/ou arqueológicos dentro das coleções científicas.	Compreende o armazenamento dos fósseis após seu registro catalográfico em documento (livro de tomo impresso ou registro digital dos dados) contendo informações pertinentes ao exemplar tais como: data e responsável pela coleta e unidade geológica. A cada fóssil será atribuído um número de coleção que o identificará dentro da reserva técnica.
		Compreende o armazenamento dos vestígios da cultura material após seu registro catalográfico em documento (livro de tomo impresso ou registro digital dos dados) contendo informações pertinentes tais como: data, responsável pela coleta, nível de deposição, coordenadas UTM, tipo de material. A cada material será atribuído um número de coleção que o identificará dentro da reserva técnica.
O.PA11. Transporte e inserção dos achados em repositório de referência	Tem por objetivo resguardar o Patrimônio Paleontológico de forma a manter a integridade dos exemplares, por meio de seu adequado acondicionamento, o que garantirá a presença de todas as características originais que se fazem necessárias aos estudos científicos e, mesmo, a exposições em museus e mostras públicas.	Compreende o transporte dos exemplares mediante autorização emitida pelo órgão responsável (no caso do Brasil, o DNPM). Esses deverão ser depositados em uma instituição previamente escolhida por este órgão, normalmente centros de pesquisas e museus reconhecidos nacionalmente. Na sequência, os fósseis serão catalogados/tombados, passando a compor o acervo científico para os estudos subsequentes.
O.PA12. Prospecção de cavidades identificadas no maciço	É importante para comprovação da existência ou inexistência de registros paleontológicos e/ou arqueológicos em seu interior, evitando a destruição deste patrimônio.	Deverá ser feita investigação por meio de caminhamentos no interior da cavidade acompanhados de análise de sedimentos de preenchimento, a fim de identificar quaisquer vestígios fósseis presentes em seu interior. As ocorrências podem estar associadas a condições subaéreas ou subaquáticas.
		Deverá ser feita a identificação de possíveis painéis de arte rupestre nas paredes externas e/ou internas da cavidade. Estes painéis deverão ser fotografados e classificados segundo a sua tradição rupestre. Os painéis de grandes dimensões deverão ter a sua área isolada para que se possa realizar o estudo detalhado do sítio arqueológico.
O.PA13. Programa de salvamento das cavidades com registros paleontológicos/ arqueológicos	Desde que comprovado o potencial paleontológico e/ou arqueológico da cavidade seccionada, é a única forma de garantir a proteção do patrimônio arqueológico e paleoespeleológico.	Deverão ser resgatados todos os fósseis identificados durante a prospecção da cavidade, além de serem executadas novas escavações para busca e resgate de registros paleontológicos, que possam estar cobertos por sedimentos de preenchimento da cavidade. Esta prospecção pode ser realizada conjuntamente com o programa de arqueologia, já que em parte comunga com metodologias de coletas similares, assim como nos mesmos materiais preservados no substrato das cavidades.
O.PA14. Documentação	Tem a função de registrar os trabalhos realizados e esclarecer os órgãos reguladores sobre as ações levadas a cabo pelo programa paleontológico/arqueológico, durante todas as etapas da mina.	Deverá ser confeccionado relatório consolidando toda a informação gerada pelo programa de paleontologia e/ou de arqueologia, desde os estudos de viabilidade até o final da fase de operação.
O.PA15. Implantação de Museu de História Natural	Para tentar garantir a popularização dos conhecimentos arqueológicos e paleontológicos resgatados, criando-se, assim, senso de pertencimento à população local, que acaba por se envolver na preservação de novas ocorrências paleontológicas e espeleológicas, que possam a vir acontecer em áreas próximas.	Implantar espaço museológico com peças e materiais sem grandes interesses científicos, a fim de divulgar o conhecimento gerado com os programas de paleontologia e arqueologia.

Biodiversidade

Operação – Biodiversidade (O.BI)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
O.BI1. Continuidade da implantação dos programas de recuperação de áreas degradadas	A continuidade da implantação dos programas de RAD na fase operacional da mina permite: (a) reduzir o passivo ambiental; (b) demonstrar à comunidade e aos órgãos reguladores o cumprimento de compromissos de proteção; (c) recuperação ambiental e que a empresa adquira conhecimento e experiência em RAD. Os programas de RAD podem ser classificados em quatro grupos: práticas edáficas, práticas topográficas e geotécnicas, práticas hídricas e práticas ecológicas.	<ul style="list-style-type: none"> • As práticas edáficas são relativas ao manejo e proteção do solo como remanejar o solo superficial logo após a retirada da vegetação; • As práticas topográficas e geotécnicas incluem as relativas à estabilidade de bancadas e pilhas de estéril, para recuperar as bancadas situadas em cotas superiores da cava assim que atinjam sua posição final; • As práticas hídricas visam à conservação da qualidade e quantidade das águas superficiais e subterrâneas, como a coleta, o transporte e o lançamento final das águas pluviais, visando à estabilidade das áreas recuperadas; • As práticas ecológicas são referentes ao manejo de fauna e vegetação, como reestabelecimento de vegetação em áreas em recuperação que deve seguir o plano estabelecido, tal como as áreas degradadas entre 1 ha e 2 ha, vizinhas de matas naturais, podem ser recuperadas por meio de sucessão natural.
O.BI2. Continuidade da gestão de RAD	As ações de controle e gestão de RAD são importantes para garantir que as práticas operacionais continuem atingindo os resultados fixados no planejamento.	<ul style="list-style-type: none"> • Deve-se conhecer os pontos de vista da comunidade; • Orientar tecnicamente os trabalhos a serem executados; • Capacitação técnica da equipe envolvida; • Desenvolvimento e implementação sistemática de procedimentos operacionais; • Provisão de recursos (humanos, físicos e financeiros); • Acompanhamento, monitoramento, registro e documentação.
O.BI3. Atualização periódica do Prad e plano de fechamento	Mudanças tecnológicas, de mercado, legais, de projeto assim como alteração nas expectativas das partes interessadas podem ocorrer durante a vida útil da mina. Sendo assim, a revisão e atualização do Prad/PF deve, naturalmente, refletir ajustes ou mudanças ocorridas durante a vida útil da mina.	<ul style="list-style-type: none"> • Atualização da avaliação de impactos ambientais e sociais; • Manter atualizado o mapeamento de partes interessadas; • A periodicidade da atualização do Prad/PF deve ser definida por cada empresa. Um período frequentemente utilizado é de 3 a 5 anos. Existem perguntas que podem nortear a necessidade de atualizar o Prad/PF tais como: <ul style="list-style-type: none"> • “Houve mudanças no plano de lavra (e.g teores)?” • “Novas estruturas foram adicionadas à mina?”
O.BI4. Permanecer atento a evidências de cavidades e fauna subterrânea de interesse potencial à conservação	Para atender aos objetivos de conservação da fauna subterrânea.	<ul style="list-style-type: none"> • Implantar programa de treinamento periódico e informação a funcionários e colaboradores, diferenciado pela área de atuação, mostrando a importância das cavernas e da fauna subterrânea, permitindo a identificação de possíveis cavidades (achados fortuitos) e ações a serem tomadas. • Implantar rotinas de paralisação das atividades e isolamento do local, em caso de identificação de novas cavidades e fauna subterrânea (achados fortuitos), e comunicação e equipe de especialistas.
O.BI5. Em caso de novo achado espeleológico, avaliar, por meio de estudo ambiental Ad hoc	Porque o novo achado pode ter importância para a conservação de sistemas subterrâneos	<p>Paralisar a obra e contatar biólogos (de preferência aqueles que realizaram o estudo ambiental), para novo estudo.</p> <p>1ª etapa: avaliação rápida, tipo RAP (Rapid Assessment Procedures), com foco principal no ambiente (tipos e distribuição de habitat e substratos, fontes de alimento etc) e táxons observados durante todo o ano em outras cavernas da área.</p> <p>Se a nova caverna estiver de acordo com padrões observados para outros sistemas subterrâneos estudados na área (se foram detectados), retomar as atividades de mineração.</p> <p>Se contiver singularidades não observadas na região (ou se, anteriormente, não tiver sido detectado nenhum padrão relacionando ambiente e fauna), proceder com estudo dentro dos mesmos critérios e métodos dos iniciais.</p>

Desenvolvimento comunitário sustentável

Operação – Comunidades (O.CS)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
O.CS1. Atualizar diagnóstico socioambiental	<ol style="list-style-type: none"> 1. As características socioeconômicas das comunidades sob influência da mina vão mudando, em parte devido à própria atividade mineradora e, por outro lado, por forças motrizes mais amplas. 2. A atualização e o acompanhamento do desenvolvimento socioeconômico local podem ser usados para manter atualizada a identificação de impactos, a avaliação de sua importância e, por consequência, os programas de mitigação ou compensação correspondentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Entrevistas e questionários especialmente elaborados. • Atualizar dados referentes aos aspectos demográficos, organização e dinâmica econômica, infraestrutura e serviços básicos, finanças públicas, organização social e contexto sociopolítico.
O.CS2. Desenvolver um sistema de indicadores sociais e econômicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ferramenta que possibilita melhor compreensão da realidade local. 2. Facilitar o monitoramento sistemático das mudanças que deverão ocorrer localmente e tendências sociais e econômicas na área de influência do projeto. 3. Verificar se e de que forma a empresa está contribuindo para o desenvolvimento da comunidade. 	<p>Consulta pública para definir conjunto de indicadores que deverão ser monitorados, precedido por processo de mobilização e esclarecimento da população sobre os objetivos do programa.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utilizar cartilhas especialmente formuladas para esse fim, material de divulgação produzido em linguagem acessível, encontros e pequenas reuniões em escolas, associações da sociedade civil, conselhos municipais, ente outros. • Envolver o poder público local e compartilhar informações. • Produzir material impresso e criar um site.
O.CS3. Atualizar mapeamento das partes interessadas	<ol style="list-style-type: none"> 1. As partes interessadas podem variar com o tempo longo da vida útil da mina, os grupos ou indivíduos que se aproximam ou se afastam, que demonstram maior ou menor interesse nas atividades ou impactos decorrentes da mineração. 2. As características e impactos das distintas etapas do desenvolvimento de um projeto podem gerar demandas, preocupações e expectativas que vão se alterando ao longo do tempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Atualizar o mapeamento das partes interessadas sempre que houver alguma mudança ou alteração importante no projeto, nas condições sociais, nos programas e projetos sociais implementados pela empresa. • Considerar os diferentes interesses e posições dos atores na comunidade, entre os tomadores de decisão e os beneficiários de programas socioambientais já desenvolvidos pela empresa, como trabalhadores, fornecedores locais, proprietários de terra. • Elaborar matriz de partes interessadas, com identificação de instituições nomes de lideranças, endereços, contatos.
O.CS4. Implementar os programas de gestão pertinentes e avaliar seus resultados	<ol style="list-style-type: none"> 1. A implementação de programas e planos de ação, de acordo com o planejado na etapa de estudo de viabilidade, é essencial para evitar e minimizar impactos adversos e para maximizar os benefícios. É também requisito externo decorrentes de licenças ambientais, condições de financiamento etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Definir, mediante consulta às partes interessadas, indicadores de progresso e de resultados dos programas sociais. • Manter registro sistemático de avanço dos programas de gestão e correspondentes indicadores de desempenho.
O.CS5. Convidar entidades para constituir uma comissão de acompanhamento da operação	<ol style="list-style-type: none"> 1. Garantir um processo transparente e facilitar a construção de canal permanente de diálogo com a empresa. 2. Informar sobre cronograma e ações adotadas durante a implantação, esclarecendo eventuais dúvidas que poderiam evoluir para situações de conflito. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elaborar previamente plano para conduzir o processo de acompanhamento. • Estabelecer calendário de visitas monitoradas à área do empreendimento. • Realizar reuniões, com o objetivo de informar sobre as ações adotadas pela empresa, visando à proteção ambiental. • Manter registro das ações desenvolvidas.
O.CS6. Facilitar e promover o acesso a cavernas e outros componentes do sistema cárstico	<ol style="list-style-type: none"> 1. Divulgar e conhecer os valores, as características e a importância dos ambientes cársticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Turismo. • Pesquisa acadêmica. • Atividades espeleológicas de grupos.

3.4. RECOMENDAÇÕES PARA A ETAPA DE DESATIVAÇÃO

Nas etapas de desativação e pós-fechamento, as recomendações relativas ao manejo da área deverão advir do acervo de informação e conhecimento construído nas etapas anteriores, cabendo poucas recomendações de ordem geral. Grande parte das recomendações para esta etapa são similares àquelas válidas para minas localizadas em ambientes não cársticos (portanto, não apresentadas aqui).

Desativação (D)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
D1. Identificar e avaliar os impactos socioambientais do fechamento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Subsidiar a tomada de decisões relativas ao fechamento da mina. 2. Minimizar os impactos adversos do fechamento 3. Identificar questões ambientais críticas que devem ser monitoradas após o fechamento da mina. 4. Avaliar o grau de dependência do município ou comunidade em relação à atividade de mineração. 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar a perda de arrecadação tributária, principalmente municipal, perda de empregos e renda, diminuição da atividade econômica local, redução de qualidade e alcance dos serviços públicos, perda de qualidade de vida da população local. • Avaliar situação futura das nascentes e águas subterrâneas, caso haja bombeamento durante a fase de operação.
D2. Atualizar o plano de fechamento, promovendo ajustes, se necessários	<ul style="list-style-type: none"> • Orientar as ações e medidas a serem tomadas visando garantir a proteção da qualidade ambiental, a recuperação das áreas degradadas, possibilitando um uso futuro compatível com as demandas locais e regionais, e a constituição de um legado benéfico e duradouro para a comunidade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Rever os objetivos de fechamento, de modo que estejam alinhados aos objetivos das políticas de desenvolvimento local e regional, às características de uso do solo e às expectativas da comunidade e que devem ser captadas mediante processos estruturados de consulta.
D3. Atualizar mapeamento de partes interessadas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Os grupos ou indivíduos potencialmente afetados podem ser outros na fase de fechamento, diferentes daqueles identificados nas etapas iniciais do projeto ou durante sua operação, uma nova configuração de partes interessadas pode se apresentar, incluindo proprietários de terra do entorno, autoridades do governo local, agências de desenvolvimento, fornecedores locais e regionais. 2. As preocupações e interesses podem variar, passando a considerar os impactos decorrentes do fechamento da mina, como a perda de postos de trabalho, o declínio das atividades econômicas etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliar como e em que grau grupos ou indivíduos serão afetados, identificando quais são os grupos mais vulneráveis ao fechamento da mina, qual a abrangência dos impactos associados ao fechamento (local, regional), quais grupos ou indivíduos poderiam contribuir para aprimorar a definição dos objetivos do fechamento (governos locais, prefeituras, agências de desenvolvimento, proprietários de terras, arrendatários, comunidades próximas etc), quem são os beneficiários dos programas sociais atuais da empresa, quais são as organizações representantes dos trabalhadores (conselhos, sindicatos, associações profissionais), quem são os fornecedores diretos e indiretos da empresa.
D4. Comunicar as informações sobre o processo de fechamento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fornecer informação relevante, que possibilite a participação dos interessados em momentos apropriados do planejamento do fechamento. 2. Subsidiar processos de participação, mediação e negociação de eventuais conflitos. 3. Contribuir para o fortalecimento da participação dos moradores na busca de soluções para eventuais conflitos, na fase de fechamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elaborar plano específico de comunicação com informação transparente, objetiva, atualizada, em linguagem acessível ao público ao qual se destina, considerando as diferenças e diversidade de interesses dos vários grupos e indivíduos que possam ser afetados pelo projeto e seu fechamento. • O formato e os meios de divulgação da informação devem levar em conta a diversidade do público interessado, o nível de detalhe técnico, o grau de escolaridade, a composição étnica e de gênero, as estruturas de liderança locais, o grau de associativismo etc. • Considerar os trabalhadores diretos – de nível operacional, técnico e gerencial – assim como a mão de obra terceirizada e a cadeia de fornecedores. • Utilizar diferentes meios e ferramentas, como reuniões setoriais com comunidades afetadas, com pequenos grupos, com lideranças comunitárias, imprensa, meios eletrônicos ou outros meios de comunicação locais.
D5. Implantar os programas de desativação descritos no Plano de Fechamento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Atingir os objetivos de fechamento estabelecidos previamente, discutidos com as partes interessadas e aprovados pelas autoridades responsáveis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desmontagem de instalações elétricas e equipamentos. • Desmontagem ou demolição de edifícios. • Remoção e destino final de resíduos e entulho. • Investigação e remediação de áreas contaminadas. • Preparar o relatório "as built", visando descrever detalhadamente os trabalhos realizados e seus resultados.

Desativação (D)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
D6. Monitorar parâmetros de interesse	<ol style="list-style-type: none"> 1. Coletar evidências de execução satisfatória dos programas de desativação e do plano de fechamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitoramento geotécnico de pilhas de estéril, taludes de cava e outras estruturas. • Monitoramento do nível d'água subterrâneo. • Monitoramento de vazão de nascentes. • Monitoramento da qualidade das águas superficiais.
D7. Acompanhar os indicadores de desenvolvimento e qualidade de vida	<ol style="list-style-type: none"> 1. Avaliar se a presença da mineração está contribuindo de fato para o desenvolvimento local. 2. Facilitar o monitoramento sistemático das mudanças que poderão ocorrer durante as fases de desativação e pós-fechamento. 3. Avaliar os resultados dos programas de mitigação dos impactos socioeconômicos do fechamento da mina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Selecionar variáveis de relevância, que sejam capazes de revelar a situação social e econômica local e a capacidade ou não de a comunidade desenvolver-se de forma sustentável na ausência da mineração. • Selecionar indicadores, quantitativos ou qualitativos, que permitam desenvolver análises comparativas e identificar tendências. • A seleção dos indicadores deve levar em conta alguns critérios básicos, como ser representativo, relevante, ter simplicidade e facilidade de interpretação, servir de fundamento para a tomada de decisões. • A participação das partes diretamente interessadas possibilita que a construção dos indicadores seja mais ajustada à realidade local, definindo melhor o que é importante acompanhar.
D8. Desenvolver programas que fomentem a diversificação da base produtiva local	<ol style="list-style-type: none"> 1. Promover o desenvolvimento - ou criar as condições para que isso venha a ocorrer - de outras atividades paralelas à mineração e dela independentes, diversificando a base produtiva local. 2. Formular e implementar modelo de desenvolvimento local sustentável de longo prazo. 	<ul style="list-style-type: none"> • A empresa deve adotar diferentes iniciativas, como compartilhar com a comunidade conhecimentos e habilidades nas áreas de comércio, administração, finanças, logística, abastecimento, por meio da promoção da capacitação e qualificação de agentes locais, como pequenos comerciantes e empreendedores. • Desenvolver programas de alfabetização de adultos ou de capacitação de jovens adultos.

3.5 RECOMENDAÇÕES PARA A ETAPA DE PÓS-FECHAMENTO

Na etapa pós-fechamento, as recomendações relativas ao carste dependerão dos arranjos para transferência da custódia da área a terceiros, os quais, por sua vez, dependem em larga medida dos requisitos legais de cada jurisdição.

As recomendações relativas ao manejo da área deverão advir do acervo de informação e conhecimento construído nas etapas anteriores, cabendo poucas recomendações de ordem geral. Por esse motivo, esta seção apresenta apenas três práticas, uma relativa à biodiversidade e outra, ao desenvolvimento comunitário sustentável.

Pós-fechamento (PF)		
O que fazer?	Por que fazer?	Exemplos de como fazer
PF1. Caso o uso pretendido tenha finalidade de conservação ambiental, acompanhar a regeneração da vegetação e da fauna por meio de monitoramento	Para garantir o pleno alcance desse objetivo.	<ul style="list-style-type: none"> Definir indicadores apropriados a cada caso.
PF2. Envolver as partes interessadas no monitoramento pós-fechamento	Possibilitar partilha de responsabilidades, favorecendo o processo de empoderamento da comunidade (empowerment), no sentido de que ela tenha influência e capacidade de ação e decisão sobre os temas que a afetem diretamente na fase pós-fechamento da mina.	<ul style="list-style-type: none"> Definir os aspectos que serão monitorados com a participação das partes interessadas, assim como os meios de armazenamento e divulgação dos dados e informações obtidas nesse processo; Identificar e avaliar a capacidade da comunidade, lideranças e instituições locais para participar de forma ativa do acompanhamento da situação da área após o fechamento da mina. Constituir comitê de monitoramento com participação de outros grupos interessados, do governo local, representantes de conselhos profissionais, de instituições de ensino superior, com a responsabilidade de produzir relatórios e comunicados com informação relevante sobre os aspectos monitorados. Os objetivos, metas e resultados devem ser regularmente reavaliados e revistos quando o período de acompanhamento pós-fechamento, por parte da empresa, for longo.
PF3. Manter “cuidado permanente ou cuidado ativo” na área, quando necessário	Garantir que a empresa execute as ações necessárias para atingir os objetivos de fechamento e que podem perdurar por vários anos.	<ul style="list-style-type: none"> O cenário de “cuidado permanente” deve resultar em compromisso contratual ou legal de transferência de responsabilidade pela continuidade das ações requeridas para o novo responsável pela área, após a transferência de custódia.

4. EXEMPLOS

De forma a ilustrar a execução de boas práticas por parte de uma empresa de mineração, foram selecionados três casos reais para sugerir exemplos de como uma boa prática pode se tornar ação efetiva dentro da empresa. A seleção foi feita pela Coordenação Técnica que elaborou o presente Guia, em conjunto com a responsável pela sistematização das boas práticas. Os casos selecionados foram:

- Avaliação das práticas de recuperação ambiental da Mina Saivá, em Rio Branco do Sul, Paraná;
- A promoção da conscientização sobre a importância do carste por meio das regras verdes;
- O programa Ativos Ambientais.

4.1 AVALIAÇÃO DAS PRÁTICAS DE RECUPERAÇÃO AMBIENTAL

A mina Saivá fornece calcário para a fábrica de cimento de Rio Branco do Sul, Estado do Paraná. A rocha estéril é disposta em pilhas situadas nas proximidades da cava. Conforme as pilhas vão sendo construídas, um sistema de drenagem de águas pluviais é instalado e vegetação rasteira é plantada com objetivo inicial de conter processos erosivos. O objetivo de longo prazo de recuperação ambiental é o restabelecimento de vegetação nativa.

A recuperação de áreas degradadas (RAD) é uma atividade cujos resultados somente se concretizam depois de longo período. Por esse motivo, é importante avaliar periodicamente não apenas os resultados parciais, mas também as próprias práticas utilizadas, de modo a identificar eventuais problemas e corrigi-los o mais cedo possível.

Um procedimento de avaliação de práticas de recuperação de áreas degradadas foi aplicado a essa mina. Mediante comparação com um conjunto de boas práticas obtidas de fontes nacionais e internacionais, foi elaborado índice de atendimento às recomendações aplicáveis a essa mina. As boas práticas recomendadas incluem não somente medidas bem conhecidas das empresas – fazer levantamento do potencial espeleológico em áreas favoráveis à ocorrência de cavernas –, mas também práticas de prevenção de situações que possam requerer medidas adicionais de recuperação, como vazamento de derivados de petróleo.

O procedimento de avaliação de práticas de recuperação ambiental (Neri e Sánchez, 2013) elencou 150 boas práticas agrupadas em planejamento, operação e gestão. As práticas de operação, por sua vez, incluíam práticas de caráter topográfico e geotécnico, de caráter hídrico, de caráter edáfico e de caráter ecológico.

Inspeções técnicas, análise de documentos e entrevistas permitem coletar evidências sobre o atendimento às práticas aplicáveis ou desvios em relação a estas. Um sistema de pontuação – com ponderação baseada na importância de cada prática para o atendimento dos objetivos de RAD – informa o gestor sobre os pontos fortes e fracos do processo de RAD.

Por meio da avaliação das práticas, é possível melhorar os controles gerenciais, estabelecer metas e aprimorar as próprias práticas, reduzindo a exposição da empresa a riscos oriundos de práticas inconsistentes com o estado da arte da gestão ambiental.

Neste caso, destacaram-se as práticas de manejo de solo e de vegetação. O problema da escassez de solo orgânico foi resolvido mediante o emprego de solo de alteração e argilas, ao passo que o procedimento de revegetação se caracteriza pelo emprego inicial de gramíneas e leguminosas de ciclo curto, adaptadas ao clima da região, as quais rapidamente contribuem para o enriquecimento do solo, tornando-o mais adequado para receber mudas de espécies arbóreas nativas. No viveiro, faz-se compostagem com base no aproveitamento de resíduos vegetais, utilizados na produção de mudas. Quando o composto é formado, é misturado com vermiculita para o preenchimento do saco de mudas. O produto da compostagem supre a deficiência de matéria orgânica no solo.

4.2 PROMOVENDO A CONSCIENTIZAÇÃO SOBRE A IMPORTÂNCIA DO CARSTE POR MEIO DAS REGRAS VERDES

Muitas empresas têm desenvolvido e aplicado ferramentas de gestão que podem contribuir para minimizar os impactos de suas atividades sobre o carste. A conscientização sobre a importância dos ambientes cársticos e suas fragilidades contribui para evitar e reduzir certos impactos. O envolvimento de funcionários, fornecedores e prestadores de serviços é crucial para o sucesso de programas e medidas que visem à proteção do carste, seus recursos e das comunidades que nele vivem.

Um exemplo é a iniciativa da Votorantim Cimentos denominada "Regras Verdes", parte de sua Política Ambiental Global. Desde 2015, a empresa vem disseminando sua Política Ambiental, pautada em nove princípios e elaborada para nortear os esforços para o desenvolvimento sustentável. A partir dos nove princípios, um conjunto de dez Regras Verdes foi desenvolvido para facilitar a compreensão e aplicação da Política por todos os funcionários, garantindo o seu cumprimento nas atividades executadas.

A Política Ambiental e as Regras Verdes abrangem todos os aspectos ambientais ligados à produção de cimento. Diversas regras aplicam-se à proteção do carste, como exemplificado a seguir:



As Regras Verdes foram desenvolvidas com base nos princípios da Política Ambiental para facilitar o seu entendimento e disseminação a todos os nossos funcionários.

- 1 ---  Proteger e respeitar o meio ambiente – ar, terra e água.
- 2 ---  Proteger espécies da nossa biodiversidade – flora e fauna.
- 3 ---  Minimizar a geração de resíduos – reuso, reciclagem e destinação responsável.
- 4 ---  Maximizar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa – produção, transporte e operações de apoio.
- 5 ---  Monitorar continuamente os impactos ambientais e desenvolver um plano para definir metas de redução.
- 6 ---  Comprometer-se como usado mais alto nível de tecnologia de controle de poluição, sempre que possível.
- 7 ---  Respeitar cavernas e sítios culturais, geológicos, históricos, paleontológicos e arqueológicos.
- 8 ---  Dialogar abertamente. Respeitar vizinhos e partes interessadas.
- 9 ---  Reduzir o uso de matérias-primas virgens sempre que possível. Maximizar o uso responsável e eficiente de recursos.
- 10 ---  Reabilitar áreas durante a operação e após o fechamento.

Uma cartilha de divulgação distribuída para todos os colaboradores e prestadores de serviços mostra exemplos de como colocar em prática os princípios.

7 RESPEITAR CAVERNAS, SÍTIOS CULTURAIS, GEOLÓGICOS, HISTÓRICOS, PALEONTOLÓGICOS E ARQUEOLÓGICOS



As cavernas, sítios históricos, paleontológicos, arqueológicos e culturais pertencem à humanidade e devem ser preservados.

VEJA ALGUNS EXEMPLOS DE COMO COLOCAR EM PRÁTICA ESTA REGRA:

- ◉ Ao encontrar evidências de cavernas ou sítios culturais, geológicos, históricos, paleontológicos e arqueológicos, informar ao responsável pela área de Meio Ambiente da sua Unidade.
- ◉ Procure se informar quanto às características destes locais para facilitar sua identificação.



A Política Ambiental Global e as Regras Verdes também têm sido disseminadas por meio de treinamentos, visando capacitar os gerentes das unidades para repassar os princípios e enfatizar sua importância. Atualmente, a companhia possui por volta de 500 multiplicadores.

Muitas empresas de mineração que desenvolvem atividades em áreas cársticas são de grande porte e operam diversas minas. No entanto, comunicar claramente as políticas da empresa com relação ao carste (ou à sua responsabilidade socioambiental, de modo geral) está ao alcance de empresas de qualquer porte, inclusive das pequenas.

Fonte: Votorantim Cimentos, Política Ambiental Global e Regras Verdes (2015).

4.3 PROGRAMA ATIVOS AMBIENTAIS

O Programa Ativos Ambientais, fruto da Cooperação Técnica Votorantim Cimentos (VC), o Instituto Amigos da Reserva da Biosfera da Mata Atlântica (RBMA) e a Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE), teve como objetivo desenvolver um modelo de Plano de Gestão Territorial Sustentável para a mineração de calcário para cimento no domínio da Mata Atlântica e aplicá-lo nos estudos de caso da unidade da Votorantim Cimentos Ribeirão Grande - São Paulo e Laranjeiras - Sergipe. No final do projeto, inúmeras ações de uso sustentável para os Ativos Socioambientais foram propostas, de forma a valorizar os ativos ambientais e propiciar a conservação da biodiversidade.

A elaboração do plano incluiu três fases:

A Fase Prévia, de planejamento e escopo, teve como objetivo organizar o planejamento ambiental e estabelecer as premissas do trabalho, incluindo definição da equipe, da área de estudo e do entorno, dos ativos socioambientais a serem considerados e das atividades a serem realizadas, definindo também o cronograma físico e financeiro e consolidando um plano de trabalho.

A Fase Diagnóstica teve como objetivo a elaboração de diagnóstico socioambiental, a partir de análise das informações disponíveis, elaboração preliminar de banco de dados geográficos, reconhecimento e levantamentos de campo.

A Fase Analítica e Propositiva teve como objetivo a elaboração da proposta de gestão Territorial Sustentável (PGTS), abrangendo uma síntese dos principais passivos ambientais identificados, caracterização dos ativos socioambientais e dos ativos institucionais, realização de análise situacional estratégica, elaboração de proposta preliminar do zoneamento da propriedade e formulação das recomendações por zona, por propriedade e por eixo institucional.

Os ativos ambientais considerados foram: estoque e sequestro de carbono, recursos hídricos, habitat, riqueza de espécies, espécies de particular interesse, patrimônio artístico, cultural, histórico, arqueológico e espiritual. No caso dos ativos institucionais potenciais, foram incluídos planejamento e gestão integrada do patrimônio socioambiental, monitoramento ambiental, proteção e fiscalização da propriedade, projetos socioambientais, pesquisa científica, recreação, turismo e educação ambiental.

Vista parcial da lagoa - área do Retiro / Unidade Laranjeiras / SE. Foto: Patricia Rossi

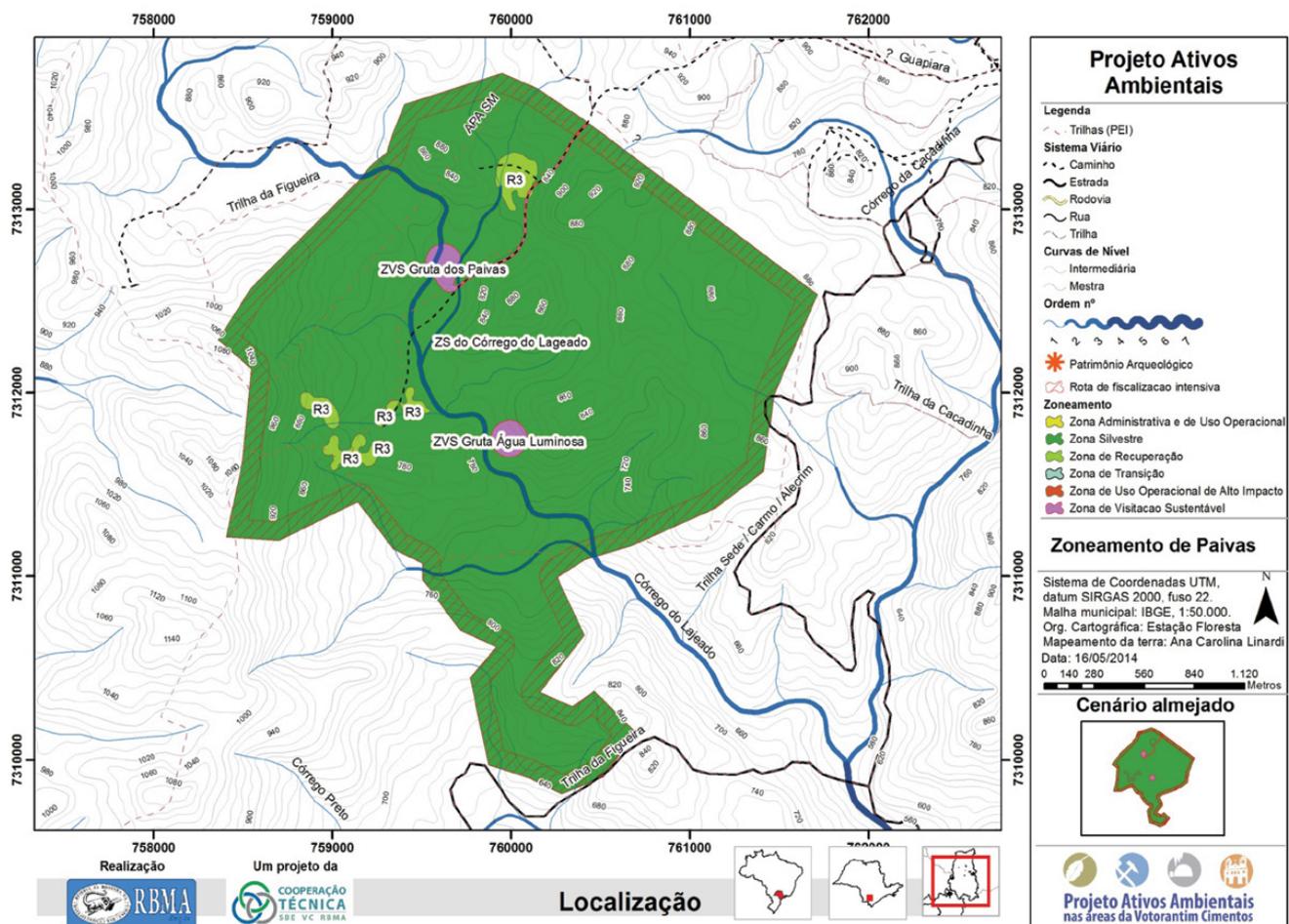


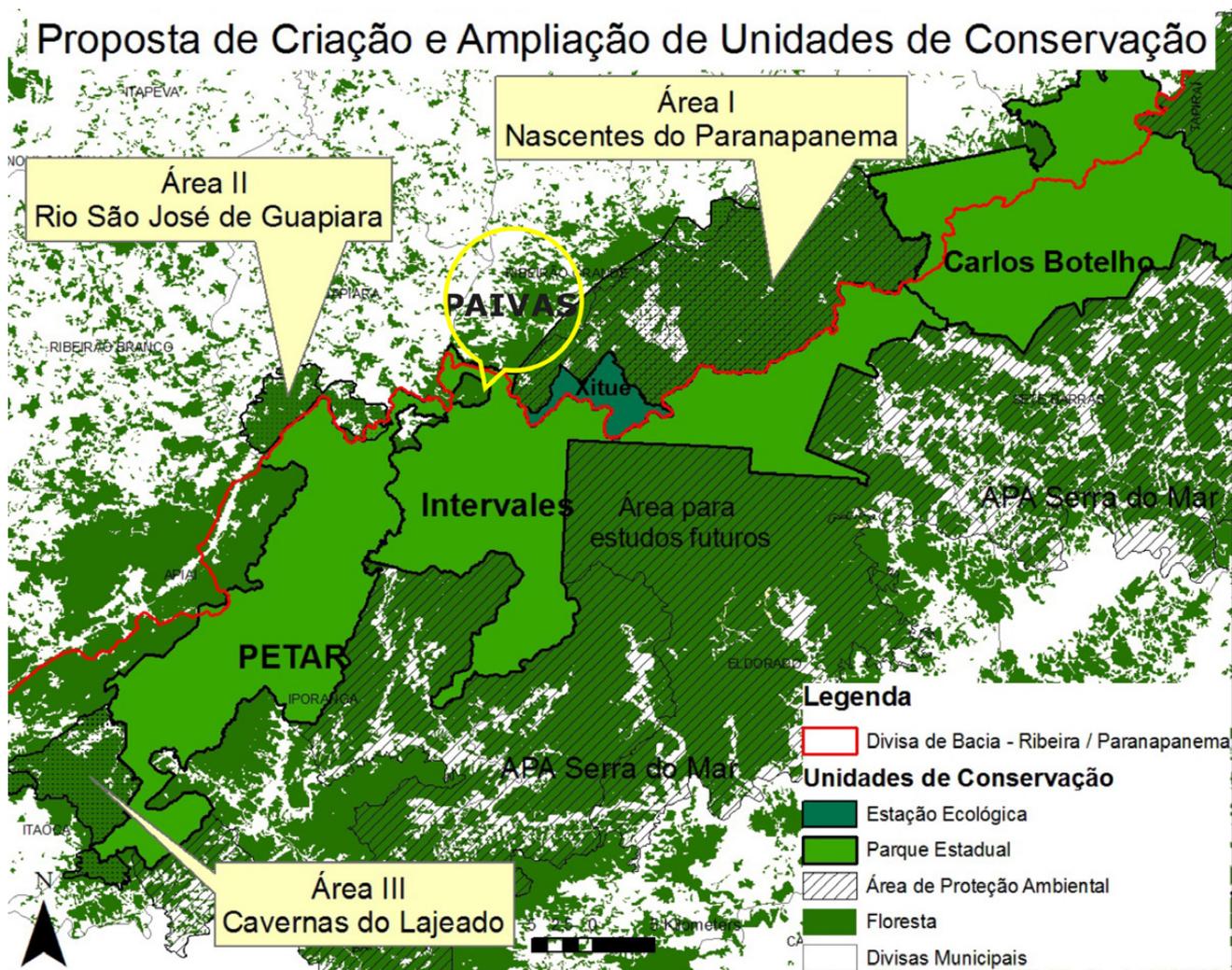
Por fim, as recomendações foram elaboradas para cada propriedade e para cada zona dentro de uma propriedade, e também por eixo institucional, este representado por: conformidade legal e regularização fundiária, planejamento e gestão integrada do patrimônio socioambiental, monitoramento ambiental, proteção e fiscalização dos recursos da propriedade, projetos socioambientais, pesquisa científica, recreação, turismo e educação ambiental.

No projeto piloto da unidade de Laranjeiras, foi identificada uma área não utilizada e que congrega recursos com potencial atrativo para a implantação de um trajeto - na conformação de trilha com características de um roteiro de percurso curto e de fácil acesso. A implantação da Trilha do Retiro, além de valorizar referidos atributos, possibilita a interação da comunidade interna da empresa e do entorno no uso de um novo atrativo que pode atender a duas demandas: recreativa e educação ambiental. Em 2015, a Votorantim Cimentos, em parceria com a Reserva da Biosfera da Mata Atlântica, desenvolveu um projeto técnico-executivo e uma proposta de manejo para a trilha, com vistas à sua implantação para 2017. A foto abaixo é a vista de um dos pontos da trilha do retiro inserida na unidade de Laranjeiras.

Outra área estudada no piloto da unidade de Ribeirão Grande foi Paivas, no sudeste do Estado de São Paulo. Nessa área predomina a zona silvestre, considerada uma área que deve ter baixa intervenção. Apesar da existência de reservas de rocha calcária, o local é vizinho de dois parques estaduais e tem importante concentração de ativos ambientais. Na área há presença de cavernas relevantes, incluindo a Gruta dos Paivas, considerada a terceira maior do Estado, Arcão e Água Luminosa, todas já constituindo roteiros consolidados de visitação do PEI há mais de 20 anos.

Apesar de ter os processos do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) aprovados, a Votorantim Cimentos absteve-se da mineração de calcário na área. Além disso, a VC, em parceria com a Secretaria do Estado de São Paulo, busca a doação e o enquadramento de Paivas no Parque Estadual Intervales.





A figura abaixo sintetiza as etapas de trabalho para a elaboração do Plano de Gestão Territorial Sustentável (PGTS):

PLANO DE GESTÃO TERRITORIAL SUSTENTÁVEL





Foto: Allan Calux



GLOSSÁRIO

Termo ou Expressão	Explicação dos autores dos respectivos capítulos
Agradação	Processo de acumulação (acréscimo) de sedimentos num determinado local ou sítio deposicional.
Aluvião (alúvio)	Depósitos inconsolidados de materiais detríticos transportados pela água, geralmente associados a sistemas fluviais formando acúmulos em leitos, margens de rios e em suas planícies de inundação (planícies aluviais), constituídos por cascalho, areia, silte e argila.
Apomorfia	A condição mais recente em uma série de transformação, surgida por modificação de uma condição mais antiga (série de transformação: sequência de modificações que uma determinada estrutura sofreu, tornando-se sucessivamente mais derivada).
Assoreamento	Acumulação de sedimentos em um canal ou corpo d'água (leito de rio, conduto subterrâneo, lago) causando o seu entulhamento ou aterramento.
Autapomorfia	Caráter apomórfico para um único ramo terminal em um cladograma (árvore filogenética).
Biótopo	Bios (vida); Topo (lugar). Área física caracterizada por determinado conjunto de fatores abióticos, onde vivem grupos de organismos perfeitamente adaptados às condições específicas ali existentes.
Capital social	Expressa a capacidade de uma comunidade estabelecer laços de confiança interpessoal e redes de cooperação, que agrega recursos reais ou potenciais, visando à produção de bens coletivos.
Caçadores/coletores	Grupo de povos compostos apenas por indivíduos que viviam exclusivamente da caça e/ou coleta de alimentos. As principais características destes grupos eram as seguintes: pequena quantidade de pessoas, já que precisavam caçar e coletar alimentos todos os dias e quanto menor o número de dependentes, maiores as chances de sobrevivência; não dominavam as técnicas de agricultura; não produziam cerâmica.
Colmatação	Preenchimento de espaços na rocha tais como condutos cársticos, poros e descontinuidades por materiais detríticos transportados ou pela precipitação de substâncias em solução.
Colúvio (coluvião)	Depósitos sedimentares mal selecionados constituídos por fragmentos de rocha e outros materiais detríticos transportados ou deslocados a partir de encostas de morros pela ação combinada da gravidade e da água, muitas vezes diferenciando-se das rochas subjacentes. "Solos transportados".
Comunidade	Grupo ou conjunto de grupos sociais que ocupam uma área geograficamente delimitada, cujos membros mantêm relações de reciprocidade, compartilham valores e a mesma herança cultural e histórica, predominando os contatos sociais primários.
Comunidade anfitriã	Grupo de pessoas que vivem ou trabalham em uma mesma localidade (um bairro, uma vila, uma cidade) na qual opera, será implantado ou desativado o empreendimento. A comunidade pode incluir membros que se mudaram temporariamente para outros locais.
Corrosão	Decomposição de rochas (erosão) por ação química da água.
Curva de rarefação	Relação do número de espécies amostradas em função do esforço amostral (área amostrada ou número de indivíduos amostrados), que permite, por exemplo, comparar o número de espécies entre conjuntos com diferentes esforços amostrais.
Diagênese	Também conhecida como "litificação" (lithos=rocha), abrange o conjunto de processos físicos e químicos que atuam na consolidação dos sedimentos até a sua transformação em rocha sedimentar propriamente dita. Excepcionalmente, alguns destes processos podem ocorrer após a formação da rocha por sua nova exposição às condições superficiais.
Difusão iônica	Movimento de íons ou moléculas em uma solução influenciado por diferenças de concentração nessa solução, segundo o gradiente de maior para menor concentração, buscando atingir um equilíbrio.
Dinâmica crustal	Conjunto de forças, movimentos e transformações atuantes na crosta terrestre (camada mais externa da Terra, litosfera), de escala global a local.
Dolomito	Rocha sedimentar composta predominantemente pelo mineral dolomita, um carbonato de cálcio e magnésio, cuja fórmula química é $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Empoderamento (<i>empowerment</i>)	A definição de empoderamento aproxima-se do conceito de autonomia, pois refere-se à capacidade de indivíduos ou grupos poderem decidir sobre as questões que lhes dizem respeito. Empoderar é o processo pelo qual indivíduos, organizações e comunidades adquirem capacidade para negociar, influenciar, agir e tomar decisões sobre temas que afetam suas vidas. De modo mais amplo, empoderamento é o fortalecimento da liberdade de escolha e ação, com transferência de responsabilidade para a tomada de decisões.
Estratigrafia	Condição de organização e distribuição geográfica de sucessões litológicas, tendo em vista a forma dos estratos (camadas), sua composição, textura, estruturas primárias e secundárias, conteúdo fóssilífero e cronologia, e na perspectiva dos ambientes de formação e transformação envolvidos.
Envolvimento das partes interessadas (<i>stakeholder engagement</i>)	Processo amplo e inclusivo que se desenvolve entre a empresa e indivíduos ou grupos potencialmente afetados, positiva ou negativamente, pelo empreendimento, englobando um conjunto de atividades métodos e abordagens participativas, que se estende por toda vida de um projeto.

Termo ou Expressão	Explicação dos (as) autores (as) dos respectivos capítulos
Estruturas estromatolíticas	São estruturas produzidas por processos sedimentares e biológicos, resultantes da interação de comunidades microbianas bentônicas (principalmente cianobactérias e bactérias) com o meio em que vivem. Os estromatólitos são considerados o registro de vida mais antigo do planeta.
Fácies	Variações distintivas em uma rocha, de caráter composicional, textural, estrutural, biológico, que remetem a especificidades do seu ambiente deposicional (para rochas sedimentares) ou das condições diagenéticas/deformacionais/metamórficas, possivelmente envolvidas no histórico dessa rocha.
Fauna Pleistocênica	Compõe o conjunto de animais que habitaram o planeta durante o Pleistoceno, entre 2,58 milhões e 11.700 anos atrás.
Fissura	Qualquer descontinuidade na rocha, representada por planos de acamamento, veios (descontinuidades preenchidas por minerais recristalizados), fraturas ou diáclases (quando não há deslocamento relativo ao longo do plano da fissura), falhas (quando há deslocamento relativo, evidenciando movimentos diferenciais de partes do bloco rochoso) e juntas de dissolução.
Gestão de conflitos	Gestão que se ocupa diretamente da administração e condução de situações em que ocorrem divergência ou incompatibilidade de interesses, entre indivíduos ou comunidade em relação a um projeto ou empreendimento. A gestão de conflitos utiliza diferentes técnicas, práticas e processos que podem envolver consulta, mediação e negociação, visando alcançar um acordo.
Grupo monofilético	Grupo (táxon) formado por um ancestral e todos os seus descendentes (p. ex., Tetrapoda, incluindo anfíbios, répteis, aves e mamíferos). Se algum descendente for excluído, tem-se um grupo parafilético, como é o caso dos Reptilia quando excluem Aves e Mammalia, pois estes últimos são originários de linhagens reptilianas.
Hidráulica	Comportamento dos fluidos em repouso (hidrostática) e em movimento, considerando as propriedades e forças envolvidas no escoamento (hidrocinética e hidrodinâmica).
Hipógeo	Subterrâneo (sinônimos).
Hiporreico	Aquífero poroso sob o leito de rios e suas laterais, na transição entre as águas de superfície e as águas subterrâneas ¹⁶ .
Homo <i>neanderthalensis</i>	Embora haja uma controvérsia sobre ser realmente uma subespécie do homem atual ou não pertencerem à linhagem humana, os estudos sobre o Homem de Neanderthal (uma referência ao local onde foram encontrados os primeiros fósseis, vale do rio Neander, na Alemanha) afirmam que é uma espécie que viveu há aproximadamente 300 e 29 mil anos. Aqueles que consideram descendentes do Homem atual classificam-no como Homo sapiens neanderthalensis, enquanto os paleantropólogos, que não o consideram como pertencentes à linhagem humana, mas sim de outra espécie, classificam como Homo neanderthalensis.
Horticultores/agricultores	Grupo de povos que dominavam as técnicas de plantio de ervas, tubérculos e outros vegetais. Embora tenham um amplo domínio sobre as técnicas de cultivo, isto não exclui a continuidade de práticas de caça e coleta de alimentos. Normalmente, estes povos já possuíam um domínio da cerâmica (mas não é via de regra), e a população era consideravelmente maior – graças à produção de alimentos.
Ichno-marcas	São traços, marcas ou vestígios, ou seja, presença indireta da interação de organismos com o substrato. O termo icnitos remete à preservação em rochas, em especial sedimentares.
Imagem orbital	Dados de sistemas sensores remotos a bordo de satélites artificiais em órbita da Terra. Os sensores são detectores de radiação emitida/refletida pela superfície e atmosfera terrestre em diferentes comprimentos de onda, processada e convertida em sinais padronizados.
Isótopo [composição isotópica]	Átomos do mesmo elemento químico cujos núcleos têm o mesmo número atômico (Z), mas diferentes massas atômicas. [Materiais constituídos por átomos de um elemento químico apresentando determinada razão (proporção) atômica].
Jazimento fossilífero	Trata-se de localidades que constituem depósitos naturais com ocorrência anormal de fósseis, dispostos em certos pontos da superfície ou subsuperfície do planeta.
Manancial	Qualquer corpo d'água ou fonte superficial ou subterrânea utilizada como fonte de abastecimento humano, industrial, animal ou de irrigação.
Mármore	Rocha constituída predominantemente de calcita e/ou dolomita recristalizada (minerais neoformados) por efeito de metamorfismo (condições de pressão e temperatura diferentes daquelas em que se formou).
Mastofauna do Pleistoceno	Mamíferos, geralmente de grande porte, que viveram durante o período Quaternário, entre 2,58 milhões e 11.700 anos atrás (Pleistoceno).
Morfogênese	Processos de elaboração ou modelagem de formas e estruturas de relevo.
Morfotipo	Tipo baseado na morfologia.
Nível de base	Nível altimétrico mínimo da água numa dada região, abaixo do qual não há escoamento nem erosão.

¹⁶ Gibert J, Danielopol DL, Stanford JA (1994) Groundwater ecology. San Diego: Academic Press.

Termo ou Expressão	Explicação dos autores dos respectivos capítulos
Oficina de lascamento	Tipo de sítio arqueológico onde os povos do passado fabricavam as suas ferramentas de pedra, normalmente por meio da "batida" de um pedaço de rocha dura sobre outra mais "mole". Nas chamadas oficinas de lascamento, é possível encontrar os fragmentos da produção de artefatos de pedra.
Onivoria	Hábito alimentar que consiste em itens de origem vegetal e animal em proporções aproximadamente iguais (p. ex., o hábito alimentar biológico dos humanos).
Paleobiota Pleistocênica	Compõe o conjunto de seres vivos que habitaram o planeta durante o Pleistoceno, entre 2,58 milhões e 11.700 anos atrás.
Parataxonomia	Classificação baseada no agrupamento de organismos semelhantes, por não especialistas na taxonomia dos mesmos, utilizando características externas ¹⁷ .
Partes interessadas (stakeholders)	As partes interessadas compreendem todos os indivíduos ou grupos que, direta ou indiretamente, possam ser afetados por um projeto ou atividade, positiva ou negativamente, além daqueles que tenham algum interesse ou influência sobre seus resultados. Incluem as comunidades locais, representantes do poder público local e regional, organizações da sociedade civil, lideranças políticas, religiosas, representações de classe, grupos sociais vulneráveis, entre outros.
Poljé	Ampla depressão cárstica aplainada, formando uma bacia fechada com margens normalmente íngremes e fundo ocupado por depósitos aluviais, podendo apresentar sumidouros e/ou exurgências (surgências) e comportamento hidrológico complexo (inundações, secas, atividade e inatividade sazonais, anuais, plurianuais) em função da organização dos sistemas cársticos marginais a ela.
População-fonte	População autossustentável, isto é, cuja taxa reprodutiva é suficiente para equilibrar a taxa de mortalidade local. Havendo excesso, pode ser fonte de migrante para outros locais ¹⁸ .
População-sumidouro	População cuja manutenção depende do afluxo de migrantes originários de outras fontes, extinguindo-se caso tal afluxo cesse ¹⁹ .
Regressão biológica	Série de transformação em que os estados derivados correspondem a estruturas ou funções menos desenvolvidas, desorganizadas ou perdidas.
Risco geológico	Possibilidade de ocorrência de fenômenos ou eventos geológicos tais como escorregamentos, erosão, assoreamento, inundação, colapso e subsidência, induzidos ou de caráter natural, que podem causar algum tipo de dano econômico ou social.
Ruiniforme	O que lembra ruínas. Um tipo de relevo onde a paisagem se parece com ruínas abandonadas. Geralmente, é formado por ação erosiva eólica ou pluvial (corrosiva, no caso do carste).
Salinização	Acumulação ou aumento da concentração de sais na água ou no solo em níveis prejudiciais, de forma natural em consequência de altas taxas de evaporação (baixa pluviosidade) e/ou induzida por modificações nas condições de drenagem e acumulação de compostos salinos.
Subsuperfície	Zona logo abaixo da superfície.
Suficiência amostral	Esforço amostral (área ou número de indivíduos) minimamente necessário para obtermos "a composição característica" da comunidade.
Tabuliforme (relevo)	Relevo de formas planas horizontais ou subhorizontais
Táxon	Unidade taxonômica nomeada (p. ex., <i>Pimelodella kronei</i> , Siluriformes, Teleostei), na qual conjuntos de indivíduos ou de espécies são assinalados.
Zoomorfo	Desenhos encontrados nos painéis rupestres e que retratam figuras de animais.

Fontes adicionais de consulta sugeridas:

Field, M.S. (comp.) 2002 (2aed.). *A lexicon of cave and karst terminology with special reference to environmental karst hydrology*. Washington: U.S Env.Prot.Agency, Supercedes EPA/600/R-99/006 , 214pp.

IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 1999. Glossário Geológico. Rio de Janeiro: IBGE-DIBIS, 214pp. <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/glossariogeologico.pdf>. Acesso em 29/03/2016.

MINEROPAR-Serviço Geológico do Paraná (sem data). Glossário.

<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/glossario/conteudo.php?conteudo=A>. Acesso em 29/03/2016.

PROSSIGA-Portal de Recursos Minerais. Glossário.

http://recursosminerais.ibict.br/glossario/glossario_d.html. Acesso em 29/03/2016.

17 Majka, CG; Bondrup-Nielsen, S. 2006. Parataxonomy: a test case usnig Beetles. *Animal Biodiversity and Conservation*, 29(2): 149-156.

18 Fong DW, 2004. Intermittent pools at headwaters of subterranean drainage basins as sampling sites for epikarst fauna. In: Jones WK, Culver DC, Herman JS, editors. *Epikarst. Karst Waters Inst Spec. Publ. 9: 114-188. Proceedings of the symposium; 2003 October 1-4; Shepherdstown, USA.*

19 Fong DW, 2004. Op cit.

EQUIPE TÉCNICA

Allan Silas Calux, Bacharel em Geografia pelo Instituto de Geociências da UNICAMP, Mestre em Análise Ambiental pelo Instituto de Geociências da UFMG e doutorando em Geoquímica e Geotectônica pelo Instituto de Geociências da USP.

Ana Claudia Neri, Geóloga pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita (UNESP), mestre em engenharia e doutora em ciências de engenharia pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Consultora.

Eleonora Trajano, Bióloga, Especialista em Espeleobiologia, Bacharel e Licenciada pelo Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Mestre em Zoologia, Doutor e Livre-Docente em Ciências Biológicas, atualmente Professor Titular aposentada pelo Instituto de Biociências da USP, docente do curso de Pós-graduação em Bioética do Centro Universitário São Camilo e Prof. Colaborador junto ao Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva da Universidade Federal de São Carlos.

Elvis Pereira Barbosa, Licenciado em História, Mestre em Arqueologia, é Professor Assistente do curso de História da Universidade Estadual de Santa Cruz - UESC em Ilhéus, BA.

Francisco Macedo Neto, Biólogo, Especialista em Paleontologia pelo CRBio. Consultor ambiental e responsável técnico da GeoPac - Consultoria em Geologia e Paleontologia, desenvolvendo desde 2007 projetos de grande porte em Linhas de Transmissão Elétrica, Gasodutos, Hidrelétricas e PCHs. Nos últimos 4 anos, vem atuando de forma continuada na área de espeleologia.

Helena Kowarick Spiritus, consultora ambiental, Bacharel em Ciências Biológicas, Mestre em Avaliação e Gestão Ambiental pela Oxford Brookes University/UK. Foi a Coordenadora Executiva do Guia pela Votorantim Cimentos, em conjunto com Heros Lobo, entre janeiro e outubro de 2015.

Heros Augusto Santos Lobo, Bacharel em Turismo, Especialista em Gestão e Manejo Ambiental em Sistemas Florestais, Mestre em Geografia, Doutor em Geociências e Meio Ambiente. Professor Adjunto da Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba. Foi o Coordenador Executivo do guia em conjunto com Regiane V. Dias, Helena K. Spiritus e Stefanie L. F. Palma.

Luciano Festa Mira, graduando em Geografia pela UFSCar, Agente de Análise Ambiental pela FVR, possui mais de 15 anos de experiência em desenvolvimento de projetos relacionados a meio ambiente, projetos socioambientais e projetos de base comunitária. Atuou na coordenação do planejamento participativo do guia juntamente com Patrícia Regina Rossi Cacciatori.

Luis Enrique Sánchez, Engenheiro de Minas, Bacharel em Geografia, Doutor em Economia dos Recursos Naturais, é Professor Titular de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Foi o coordenador técnico do Guia.

Luiz Carlos Borges Ribeiro, Geólogo, Doutor em Geologia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - estratigrafia e paleontologia. Diretor do Complexo Cultural e Científico de Peirópolis da Pró-Reitoria de Extensão da Universidade Federal do Triângulo Mineiro UFTM. Geólogo da UFTM. Consultor ambiental nas áreas de Geologia, Paleontologia e Espeleologia pela GeoPac - Consultoria Ambiental.

Mylène Luíza Cunha Berbert-Born, Geóloga pela Universidade de Brasília e Mestre em Geoquímica Ambiental pela Universidade Federal de Ouro Preto e Pesquisadora no Departamento de Gestão Territorial do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, atuando em espeleologia, geologia e hidrogeologia de terrenos cársticos.

Patrícia Regina Rossi Cacciatori, Bacharel em Turismo, Especialista em Ecoturismo, Mestre em Gestão Educativa. É consultora e pesquisadora em Projetos de Desenvolvimento do Turismo e Meio Ambiente junto às iniciativas pública e privada nos âmbitos nacional, regional e municipal, Organizadora e Coordenadora Pedagógica em educação continuada em Cursos de Monitoria Ambiental e Gestora em Planejamento participativo. Atuou na coordenação do planejamento participativo do guia juntamente com Luciano Festa Mira.

Regiane Velozo Dias, Geóloga, Mestre em Geotécnica Ambiental, com especialização em Ambiente e Sustentabilidade e atualmente exerce a função de Coordenadora Corporativa de Meio Ambiente na Votorantim Cimentos. Foi a coordenadora executiva do guia, juntamente com Heros Lobo, desde o início do projeto em 2012 até Dezembro de 2014.

Solange Silva-Sánchez, Bacharel em Ciências Sociais, Mestre e Doutora em Sociologia pela Universidade de São Paulo/USP, com pós-doutoramento em Ciências Ambientais, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental do Instituto de Energia e Ambiente PROCAM/IEE/USP.

Stefanie Linzmaier Felix Palma, Engenheira Ambiental, Consultora Corporativa de Meio Ambiente na Votorantim Cimentos. Foi colaboradora no desenvolvimento do Guia, entre abril de 2014 a outubro de 2015, e Coordenadora Executiva pela Votorantim Cimentos, em conjunto com Heros Lobo, desde outubro de 2015 até sua finalização.

AGRADECIMENTOS

AGRADECIMENTO ESPECIAL À CPRM

Ao SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB/CPRM, por conceder à geóloga Mylène L.C. Berbert-Born irrestritas condições para o seu envolvimento no projeto de elaboração do Guia, congraçando-se com seus objetivos.

Agradecemos as pessoas abaixo (em ordem alfabética) pela autorização de uso de fotos e ilustrações.

Abel Perez Gonzalez	Luciano Emerich Faria
Alexandre Camargo	Luis Enrique Sánchez
Allan Silas Calux	Luis Fábio Silveira
Ana Claudia Neri	Luiz Carlos Borges Ribeiro
Antonio Carlos Sequeira Fernandes	Luiz Eduardo Panisset Travassos
Antônio José Dourado Rocha	Marcos Philadelphi
Carolina Reis	Maria Elina Bichuette
Castor Cartelle	Mirna Mangini
Daniel Borges	Mylène Luiza Cunha Berbert-Born
Dante Fenolio	Mirna Mangini
Eleonora Trajano	Patricia Rossi
Elvis Pereira Barbosa	Rafael Costa da Silva
Flávia Pellegatti Franco	Rafael Rodrigues Camargo
Francisco Macedo Neto	Renata Brandt
Heros Augusto Santos Lobo	Roberto Falzoni
Hertz Figueiredo	Rodolfo Nogueira
José Aloísio Cardoso	Thiago da Silva Marinho
Janice Muriel Cunha	William Sallun Filho
João Allievi	Wilson Uieda

Colaboradores do projeto e revisores de capítulos específicos (em ordem alfabética)

Castor Cartelle, Prof. Dr.	Museu de Ciências Naturais da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Marco Antonio Batalha, Prof. Dr.	Universidade Federal de São Carlos
Maria Elina Bichuette, Profa. Dra.	Universidade Federal de São Carlos
Rubens Hardt, Prof. Dr.	Sociedade Brasileira de Espeleologia

Participantes da consulta pública (em ordem alfabética)

Daniel Luis Gomes
 Lucas Vinícius Ferreira Malafaia
 Marcelo Augusto Rasteiro
 Márcio Mota Pereira
 Rafael Rodrigues Camargo
 Roberto Costa De Paula
 Ronaldo Cesar Rocha dos Santos
 Susi Missel Pacheco



COOPERAÇÃO
TÉCNICA
SBE VC RBMA

