

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

VIVENDO NO CARSTE COMPREENDENDO OS PROCESSOS NATURAIS DESTA PAISAGEM



VIVENDO NO CARSTE:
COMPREENDENDO OS PROCESSOS
NATURAIS DESTA PAISAGEM



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

PRESIDENTE

Jair Messias Bolsonaro

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

MINISTRO

Joaquim Leite

SECRETÁRIO EXECUTIVO

Fernando Wandscheer de Moura Alves

SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE

Angela Maria Santana Carvalho

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

PRESIDENTE

Marcos Simanovic

DIRETOR DE PESQUISA, AVALIAÇÃO E MONITORAMENTO DA BIODIVERSIDADE

Marcos Aurélio Venancio

COORDENADOR DO CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS- Cecav

Jocy Brandão Cruz

NÚCLEO DE COMUNICAÇÃO E EDUCAÇÃO AMBIENTAL DO Cecav

Thais Xavier Nunes

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

VIVENDO NO CARSTE: COMPREENDENDO OS PROCESSOS NATURAIS DESTA PAISAGEM

Organizadores
Luiz Eduardo Panisset Travassos
Isabela Dalle Varela



BRASÍLIA
JULHO DE 2022

© **ICMBio 2022.**

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

© dos autores 2022. Os direitos autorais das fotografias contidas nesta publicação são de propriedade de seus fotógrafos.

ORGANIZADORES

Luiz Eduardo Panisset Travassos
Isabela Dalle Varela

AUTORES

Luiz Eduardo Panisset Travassos
Mariana Barbosa Timo
Isabela Dalle Varela
Bruno Durão Rodrigues
Helena dos Santos Macedo

REVISÃO TÉCNICA

Jocy Brandão Cruz
José Carlos Ribeiro Reino

COORDENAÇÃO EDITORIAL

Flávio Silva Ramos (Editora IABS)
Esa Gomes Magalhães (Editora IABS)
Thais Xavier Nunes (Cecav)

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Bruno Silva Bastos (Editora IABS)

REVISÃO DE TEXTO

Luiz Eduardo Panisset Travassos

FOTO CAPA:

Região Cárstica de Pains. (Foto: Allan Silas Calux)

Catálogo na Fonte **Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

Vivendo no Carste: Compreendendo os processos naturais desta paisagem / Luiz Eduardo Panisset Travassos e Isabela Dalle Varela. (org). – Brasília: ICMBio, 2022.

ISBN 978-65-5693-045-9
42 p. ; Color.

1. Espeleologia. 2. Estudos Ambientais. 3. Áreas Cársticas. 4. Caverna. I. Luiz Eduardo Panisset Travassos. II. Isabela Dalle Varela. III. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio. IV. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - Cecav. V. Título.

CDU: 551.44

Sumário

APRESENTAÇÃO INSTITUCIONAL 7

APRESENTAÇÃO 8

INTRODUÇÃO 9

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Mariana Barbosa Timo

AFINAL, O QUE É O CARSTE? 11

Isabela Dalle Varela

Bruno Durão Rodrigues

**A FORMAÇÃO DOS SISTEMAS CÁRSTICOS
E SUAS FORMAS CARACTERÍSTICAS** 12

Isabela Dalle Varela

Mariana Barbosa Timo

Luiz Eduardo Panisset Travassos

CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DO CARSTE 18

Bruno Durão Rodrigues

Luiz Eduardo Panisset Travassos

POR QUE O CARSTE É IMPORTANTE? 22

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Isabela Dalle Varela

Mariana Barbosa Timo

PRINCIPAIS PROBLEMAS NA RELAÇÃO COM AS ATIVIDADES HUMANAS -----

27

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Heleno dos Santos Macedo

Isabela Dalle Varela

REGRAS GERAIS PARA SE VIVER NO CARSTE -----

34

Mariana Barbosa Timo

Luiz Eduardo Panisset Travassos

REFERÊNCIAS -----

36

APRESENTAÇÃO INSTITUCIONAL

As áreas cársticas são de extrema importância socioambiental e econômica para a sociedade. Essas paisagens oferecem recursos importantes, abrigam as maiores nascentes e são fontes de águas subterrâneas. Suas cavernas são habitadas por animais raros, além de preservarem material histórico, arqueológico e paleontológico de valor inestimável.

Por serem ambientes naturalmente frágeis e vulneráveis, o seu mal uso acentua fragilidades naturais inerentes às peculiaridades do meio físico, principalmente em relação ao incremento de processos erosivos e alterações nos recursos hídricos, tanto superficiais, quanto subterrâneos. O comprometimento no abastecimento de água ou contaminação, má drenagem das águas superficiais e catástrofes de colapso e subsidência do terreno são alguns exemplos de resultados prejudiciais.

Aprendemos que cada área cárstica é complexa e que tipos especiais de investigação são necessários para nos ajudar a melhor entender e viver. Uma gestão das áreas cársticas que compreenda essa dinâmica pode produzir muitos benefícios sociais, ambientais, econômicos e científicos e deve incluir a participação consciente dos cidadãos, proprietários, planejadores, servidores públicos, agricultores, pecuaristas e outros tomadores de decisão sobre o uso da terra. Além disso, o desenvolvimento urbano nessas áreas requer conjuntos especiais de regras e regulamentos para minimizar os problemas no presente e no futuro.

O Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (ICMBio/Cecav) espera que o conteúdo proposto ajude a conhecer um pouco mais sobre o carste, as cavernas e os processos envolvidos na sua formação e desenvolvimento, bem como o seu uso consciente. O Cecav deseja a todos uma ótima leitura!

Jocy Brandão Cruz

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

APRESENTAÇÃO

Os moradores das áreas cársticas precisam saber que suas atividades do dia-a-dia afetam tanto a água subterrânea que é utilizada para seu próprio consumo, quanto os ecossistemas naturais associados a essas regiões. Por essa razão, reconhecemos a necessidade de reunir informações resumidas para que as pessoas conheçam um pouco mais sobre o carste, as cavernas e os processos envolvidos na sua formação e desenvolvimento.

Acreditamos que este guia será útil para que moradores, fazendeiros, empresários, políticos, gestores e qualquer pessoa que viva ou trabalhe em áreas cársticas possam compreender um pouco mais sobre esse sistema natural. Além disso, esperamos que o guia seja útil para educadores e grupos de conservação na difícil tarefa de despertar a consciência da necessidade de preservação e uso racional dos recursos naturais.

Os organizadores

INTRODUÇÃO

*Luiz Eduardo Panisset Travassos
Mariana Barbosa Timo*

Ao olharmos para a geologia do território brasileiro, percebemos o quanto esta é complexa e diversa. E é justamente por causa dessa geodiversidade que existem cavernas formadas em diferentes tipos de rochas: calcários, arenitos quartzitos, formações ferruginosas e outros.

As rochas carbonáticas (calcários, dolomitos e mármore) se destacam entre os diversos tipos de rocha existentes na superfície terrestre devido às paisagens espetaculares que produzem. Nestas paisagens desenvolve-se um tipo especial de relevo: o CARSTE. Este relevo apresenta formas especiais, caracterizado pela presença de feições como dolinas, feições residuais, vales cegos, surgências, sumidouros, entre outras, sendo as cavernas uma de suas feições mais conhecidas^{1,2}. Todas essas feições são discutidas no capítulo 3.

Historicamente, as regiões cársticas se apresentam como locais adequados para o desenvolvimento das sociedades, muito em função da disponibilidade de recursos naturais. Por esse motivo, a atividade do ser humano pode causar impactos significativos neste ambiente especial. Em comparação com outros tipos de terrenos, esses ambientes naturalmente frágeis e vulneráveis, normalmente respondem mais rápida e dramaticamente ao estresse ambiental provocado pela atividade humana.

A crescente utilização do carste, para expansão urbana, uso da água e do solo, mineração, produção energética, industrialização e agricultura, muitas vezes se combinam para degradá-lo. Os geossistemas cársticos são partes espacialmente limitadas da paisagem natural que podem ter extraordinário significado geológico, geomorfológico, paleontológico e arqueológico, valores que justificam a sua proteção.

Se por um lado, desenvolver atividades humanas sobre o carste é algo positivo devido ao fato de ser fonte de recursos naturais, de outro lado, suas características se apresentam como um grande desafio para os gestores por causa de suas características especiais, como veremos ao longo do livro.

As áreas cársticas e províncias espeleológicas nacionais

Na década de 1970, pesquisadores brasileiros propuseram uma classificação do carste nacional, descrevendo os principais tipos de rochas carbonáticas. A partir disso, definiram cinco províncias espeleológicas principais: 1) Vale do Ribeira (São Paulo), 2) Bambuí (Bahia, Goiás e Minas Gerais), 3) Serra da Bodoquena (Mato Grosso do Sul), 4) Alto Rio Paraguai (Mato Grosso) e 5) Chapada de Ibiapaba (Ceará)³. Além destas, em 1986, os autores incluíram na classificação as províncias do Rio Pardo (Bahia), Serra Geral (Paraná) e Alto Urubu (Amazonas), sendo as últimas duas desenvolvidas em arenitos⁴. Ainda assim, o carste em carbonatos é o mais estudado e cobre algo em torno de 425.000 e 600.000 km², ou cerca de 7% do território brasileiro⁵.

Como atualmente o conceito de carste foi expandido para outros tipos de rochas e as cavernas por todo o país sofrem impactos por causa de atividades potencialmente degradadoras e poluidoras, surgiu a necessidade de geoespacializar os dados existentes do Patrimônio Espeleológico Brasileiro com o objetivo de promover uma melhor gestão e subsidiar a tomada de decisão^{6,7}.

A partir do ano 2000, as classificações foram atualizadas para 14 áreas cársticas brasileiras com base em um mapa geológico nacional⁸. A diferença neste caso é o fato de que foi usado o termo “região cárstica” para designar áreas com potencialidade de ocorrência de cavernas independentemente do tipo de rocha em que as mesmas estivessem inseridas. Em, 2005 analistas do CECAV iniciaram o desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento de áreas do território brasileiro que são favoráveis à ocorrência de cavernas. Assim, em 2009, foi publicado o Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas, com atualização em 2011, na forma do Mapa das Regiões Cársticas do Brasil, com 19 regiões cársticas, a saber: 1) Formação Caatinga (Bahia), 2) Formação Carajás (Pará), 3) Formação Salinas (Minas Gerais), 4) Formação Vazante (Minas Gerais), 5) Grupo Açungui (Paraná e São Paulo), 6) Grupo Apodi (Ceará e Rio

1 FORD; WILLIAMS (2007).

2 PILÓ (2000).

3 KARMANN; SÁNCHEZ (1979).

4 KARMANN; SÁNCHEZ (1986).

5 KARMANN (1994).

6 CECAV (2017).

7 TIMO (2014).

8 AULER; RUBBIOLI; BRANDI (2001).

Grande do Norte), 7) Grupo Araras (Mato Grosso), 8) Grupo Bambuí (Bahia, Distrito Federal, Goiás, Minas Gerais e Tocantins), 9) Grupo Brusque (Santa Catarina), 10) Grupo Corumbá (Mato Grosso do Sul), 11) Grupo Paranoá (Distrito Federal, Goiás, Minas Gerais e Tocantins), 12) Grupo Rio Pardo (Bahia), 13) Grupo Ubajara (Ceará), 14) Grupo Una (Bahia), 15) Grupo Vargem Grande (Piauí), 16) Grupo Xambioá (Pará e Tocantins), 17) Região Cárstica de São João Del Rei (Minas Gerais), 18) Região Cárstica Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais) e 19) Supergrupo Canudos (Bahia e Sergipe)⁹. Ressalta-se, aqui, que regiões que possuem cavernas não são necessariamente regiões cársticas (Figura 1 e 2). No entanto, mesmo assim, precisam ser manejadas de forma correta.

O CECAV (2022), destaca que, em 2009, seus analistas ambientais retrabalharam dados e ampliaram a classificação proposta em 2001, do Mapa Geológico do Brasil elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil e da base de dados do CECAV. Em 2018, no âmbito do projeto Áreas Prioritárias para a Conservação do Patrimônio Espeleológico, foi delimitada a área de interesse espeleológico no território brasileiro onde também foram consideradas as ocorrências de cavernas também em rochas não carbonáticas.

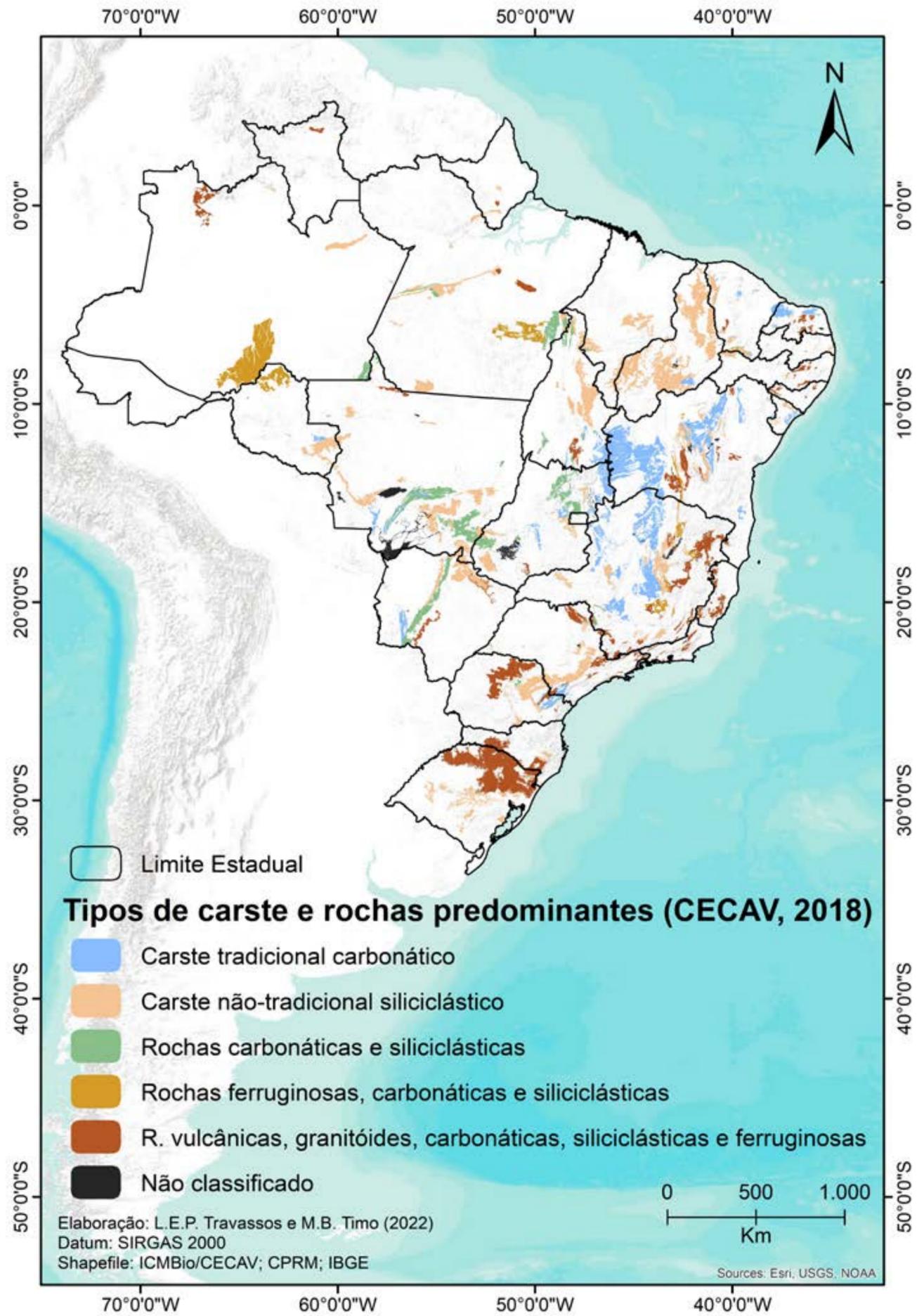


Figura 1 - Províncias Espeleológicas Brasileiras.

⁹ JANSEN; CAVALCANTI; LAMBLÉM (2012).

AFINAL, O QUE É O CARSTE?

*Isabela Dalle Varela
Bruno Durão Rodrigues*

O termo **CARSTE**, utilizado para designar um tipo especial de relevo, tem origem em uma região europeia entre a Itália e a Eslovênia, o *Carso* e o *Kras*, abundantes em afloramentos carbonáticos. Mais de 20% da superfície terrestre é caracterizada por fenômenos cársticos, sejam eles na superfície ou no subterrâneo. A associação desses processos e passagens subterrâneas, formam um complexo sistema tridimensional de condutos capazes de armazenar e transmitir água^{10,11}.

O carste e as cavernas são paisagens ao mesmo tempo diversas, fascinantes e ricas em recursos naturais. Em muitas cavernas, por serem nichos ecológicos únicos, há a presença de animais muito especializados que só existem nesses locais¹². Além da variedade de fauna e flora que inclui espécies endêmicas no carste, as cavernas também são habitats para microrganismos específicos, que auxiliam na sintetização de fármacos importantes¹³.

Vestígios paleontológicos e arqueológicos são preservados nesses locais, como prova do seu uso ao longo da história da humanidade. Assim, os muitos artefatos que documentam o desenvolvimento humano ao longo dos milênios são preservados no carste e em muitas cavernas, atribuindo a esses locais grande valor histórico e cultural^{14,15}.

O calcário e o dolomito são as rochas carbonáticas sedimentares mais importantes e diferem em termos de idade e formação. Essas rochas contêm mais de 50% de minerais carbonatos representados, principalmente, pela calcita e a dolomita, amplamente utilizados em diversos processos industriais. Assim, esses tipos de rochas são extremamente importantes como recurso econômico nacional e regional. Sua ocorrência favorece tanto a geração de milhares de empregos diretos e indiretos, como o fornecimento de água potável.

Essa última característica desse tipo de relevo é reforçada pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) que afirma que os aquíferos cársticos representam os mais significativos e seguros mananciais de água potável para a população com estimativas de que cerca de 25% da população mundial seja abastecida por esse tipo de aquífero^{16,17,18,19}. Diversas cavernas estão abertas ao turismo pelo mundo por mais de 400 anos e quase todos os países possuem pelo menos uma caverna aberta ao turismo e em vários tipos de rocha. Estima-se que aproximadamente 250 milhões de pessoas visitam cavernas turísticas, movimentando o turismo local e regional, afetando direta ou indiretamente cerca de 100 milhões de pessoas que dependem das cavernas turísticas para sua sobrevivência. Esses números podem dobrar se levarmos em consideração o carste em si e os que são Unidades de Conservação (UC) ou Geoparques^{20,21,22,23}.



Vale cárstico no PARNA Cavernas do Peruaçu, Minas Gerais
(Foto: L.E.P. Travassos).

- 10 WHITE (2002).
- 11 FORD; WILLIAMS (2007).
- 12 PIPAN; CULVER (2013).
- 13 BARTON; NORTHUP (2007).
- 14 SHERWOOD; SIMEK (2001).
- 15 VARELA (2017).
- 16 FORD; WILLIAMS (2007).
- 17 AURELI (2010).
- 18 CIGNA; FORTI (2013).
- 19 FORTI (2015).
- 20 FORD; WILLIAMS (2007).
- 21 AURELI (2010).
- 22 CIGNA; FORTI (2013).
- 23 FORTI (2015).

A FORMAÇÃO DOS SISTEMAS CÁRSTICOS E SUAS FORMAS CARACTERÍSTICAS

Isabela Dalle Varela
Mariana Barbosa Timo
Luiz Eduardo Panisset Travassos

A compreensão do aspecto geomorfológico do carste é de fundamental importância, pois é através do conhecimento de sua origem, forma, evolução e distribuição espacial que se torna possível avaliar corretamente as implicações do seu uso e ocupação²⁴.

As interações entre os elementos geológicos e as mais diversas formas de erosão são complexas e não podem ser percebidas de forma isolada. Na formação do relevo terrestre existem processos endógenos e exógenos que, embora sejam distintos, devem ser compreendidos como acontecimentos simultâneos em uma espécie de “luta” constante entre a resistência das rochas e a erosão¹². Assim, os processos oriundos do interior da Terra (tectonismo, vulcanismos, terremotos, dobramentos, falhamentos etc.) atuam como construtores da paisagem e aqueles externos, são modeladores movimentados pelas energias do Sol e da gravidade, sendo seus agentes a água e o ar.

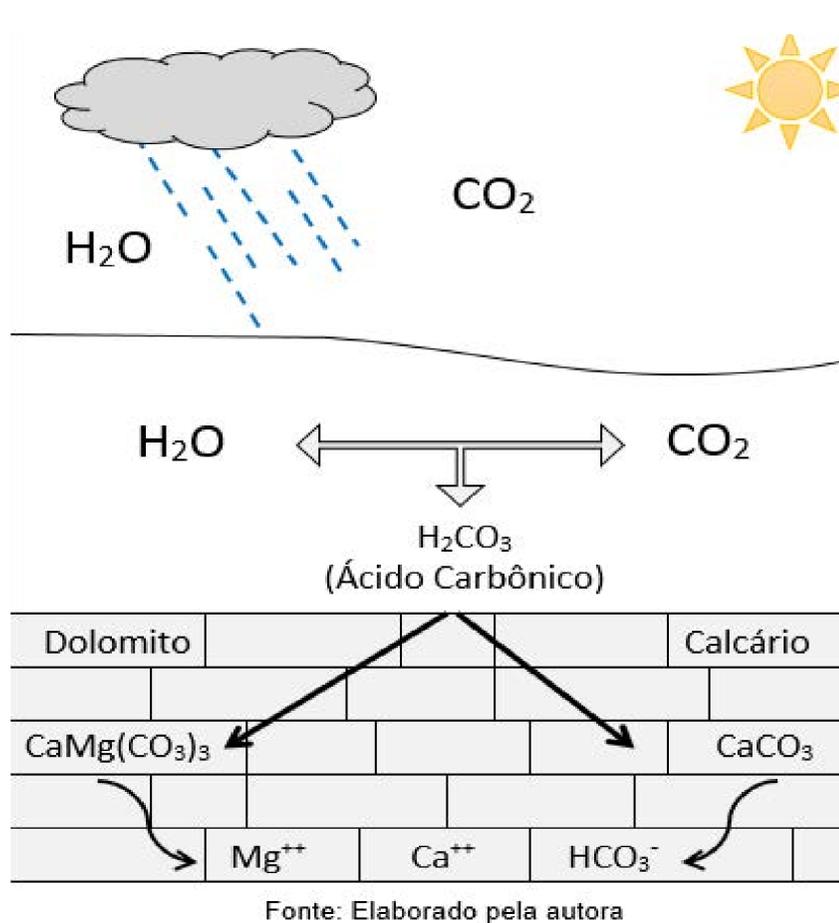


Figura 2 - Processo simplificado das reações químicas na formação do carste (VARELA, 2017).

O sistema cárstico (Figura 3) possui zonas de recarga (abastecidas pela água da chuva, degelo ou de rios) e zonas de descarga ou deposição. No caminho percorrido pela água diversas feições poderão ser formadas. Na superfície da zona de recarga, as mais comuns são os vales cegos, sumidouros, dolinas, *poljes* e os diversos tipos de *karren*. Já na zona de descarga é possível encontrar mais facilmente tufas e nascentes. No subterrâneo, a partir da superfície e por meio de juntas e fissuras, a água forma as cavernas e os espeleotemas²⁷.

No **CARSTE**, o processo predominante é o intemperismo químico que decompõe efetivamente os materiais constituintes das rochas, na presença de água, devido à alteração química desses minerais. Das modalidades de intemperismo químico, a que está mais diretamente relacionada com a formação deste relevo é a *dissolução*. No caso dos carbonatos, os minerais que contêm cálcio, magnésio, potássio e sódio são dissolvidos quando em contato com o ácido carbônico formado pela combinação de água e gás carbônico existente na atmosfera e nos solos^{32,25}, conforme Figura 3.

Assim, o principal responsável pela formação do carste em carbonatos é dissolução e os outros agentes como a erosão que, apesar de importantes, são secundários. A dissolução é fraca em rochas sedimentares detríticas e rochas não carbonáticas como as ígneas e metamórficas, embora seja mais rápida em regiões quentes e úmidas como os trópicos. Nesse caso, as rochas se dissolvem e decompõem mais rapidamente ao longo dos cristais e grãos soltos e facilmente submetidos à erosão. Essas rochas também se decompõem em uma variedade de minerais como a argila e os óxidos de minerais ferrosos. Em temperatura ambiente, na superfície, o quartzo se dissolve muito lentamente e requer vários anos para alcançar o equilíbrio em água pura. Entretanto, compostos orgânicos podem incrementar a velocidade da dissolução, mas ainda assim, não é possível conceber que somente a dissolução do arenito ou do quartzito, por exemplo, seja o único processo responsável pela formação das cavernas²⁶.

24 VARELA (2017).

25 CHRISTOPHERSON (2012).

26 PALMER (2012).

27 VARELA (2017).

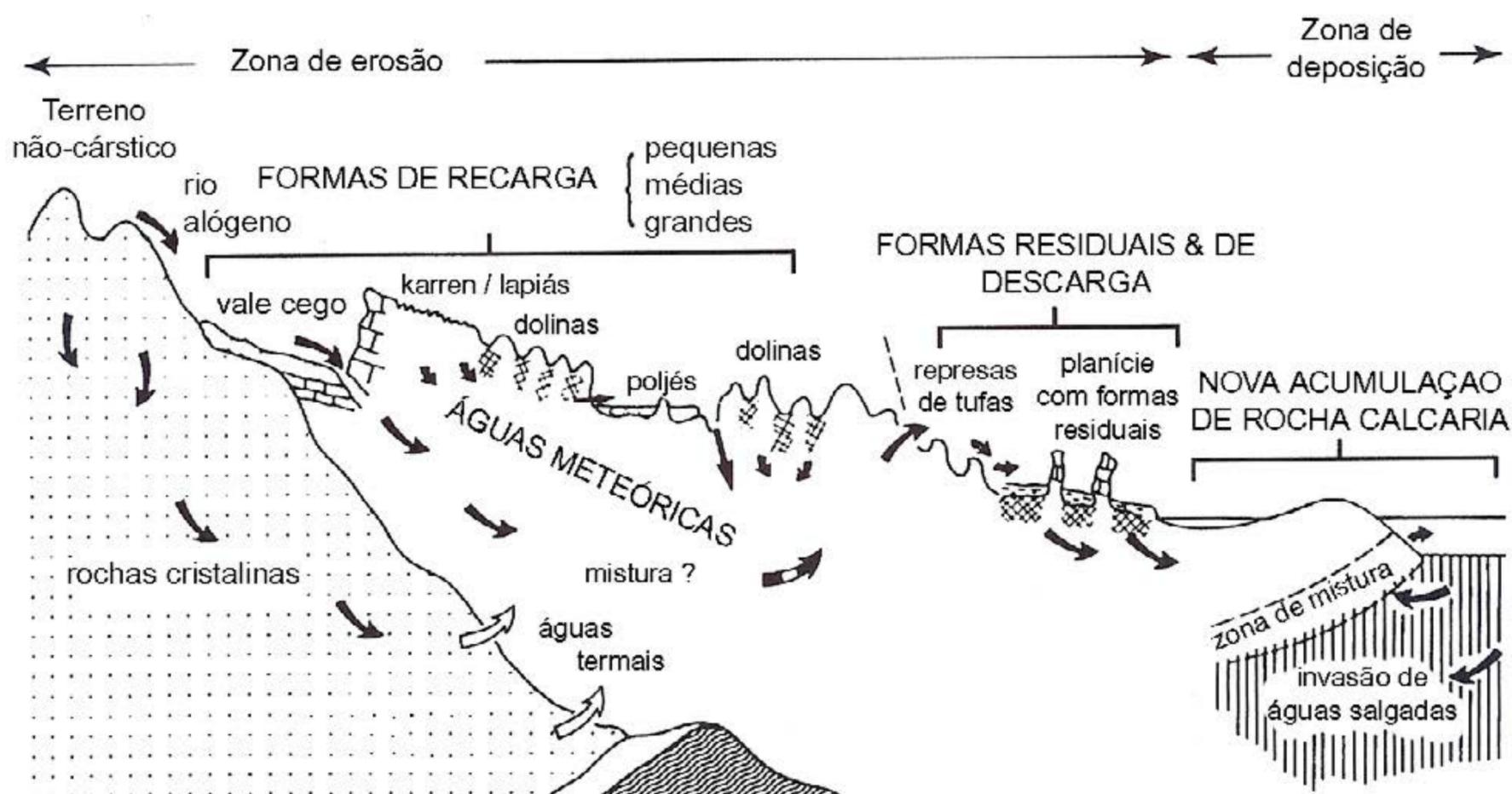


Figura 3 - Modelo conceitual geral de um sistema cárstico tradicional (Adaptado de Ford e Williams, 2007).

Tendo em vista o exposto, é possível afirmar a existência de estruturas que podem ser denominadas de *carste tradicional*, *carste não-tradicional* e *pseudocarste*. Outros irão preferir somente a nomenclatura de *carste-tradicional* e *carste não tradicional*.

Deve-se, aqui, chamar atenção para alguns pontos: 1) a água como matéria prima fundamental; 2) a presença de rochas altamente solúveis; 3) o intemperismo químico predominante; 4) os processos mecânicos como formas auxiliares na aceleração dos processos e, por fim; 5) um sistema que pode possuir centenas de quilômetros. Dessa forma, a existência de tais aspectos irá configurar o *carste* ou o *carste-tradicional*²⁸.

Por *carste não-tradicional*²⁹ é possível compreender o relevo que possui algumas feições cársticas, mas que foram elaboradas em litologias diferentes dos carbonatos ou evaporitos. São exemplos as paisagens que ocorrem em arenitos e em alguns tipos de quartzito. Relevos onde as feições geomorfológicas parecem com as do *carste*, mas são formadas por processos unicamente mecânicos, devem ser nomeados de *pseudocarste*³⁰. São exemplos desse último os tubos de lava ou as cavernas formadas no gelo.

Os sistemas cársticos e as cavernas são diferentes entre si quando ao tipo de rocha, dinâmica e evolução. Assim, conforme mencionado, rochas com baixa solubilidade também podem desenvolver feições características e como exemplos podemos citar as rochas siliciclásticas (quartzitos, conglomerados e arenitos), os granitóides e as formações feríferas (cangas, minério de ferro, itabiritos, hematitas compactas e lateritas)³¹. Tanto em rochas carbonáticas quanto nos outros tipos, é possível encontrar as depressões fechadas, as torres, diversos tipos de lapiás (*karren*) e as cavidades naturais subterrâneas. Para melhor entendimento, o sistema é dividido em *exocarste*, *epicarste* e *endocarste*.

Ao conjunto das formas superficiais do relevo cárstico dá-se o nome de **EXOCARSTE**³². As principais feições características do exocarste são os lapiás (*karren*), as dolinas, as uvalas, os poljes, os sumidouros, as surgências, as ressurgências e as formas residuais.

28 VARELA (2017).

29 ANDREYCHOUK et al. (2009).

30 PALMER (2012).

31 GUARESCHI; NUMMER (2010).

32 FORD; WILLIAMS (2007).

- **Lapiás (*karren*):** Os lapiás são caneluras vários tamanhos que são entalhados na superfície das rochas podendo formar extensos conjuntos denominados campos de lapiás (*karrenfeld* ou *karren field*)³³. Alguns autores descreveram estas feições em rochas com solubilidade mais baixa que a dos carbonatos como os arenitos, os quartzitos e até mesmo em certos granitos. No entanto, são pouco abundantes, se comparadas com o carste como um todo, contudo são as que melhor evidenciam a existência de processos de dissolução ativos em superfície³⁴. Além disso, essas formas geológicas têm grande importância hidrológica, pois parte da recarga do carste ocorre por meio delas. Existem vários tipos de lapiás que são classificados de acordo com sua forma e as características de onde se desenvolveram. O principal agente erosivo dos lapiás (*karren*) é a água da chuva, mas a atividade biológica de organismos vivos também pode desencadear o processo de formação destas feições³⁵. Podemos dividir os lapiás (*karren*) em três grupos principais de acordo com sua formação. O primeiro grupo é composto por aqueles que se formam pelo escoamento superficial, o segundo é formado pelos lapiás que se desenvolvem da combinação do escoamento de água com as influências tectônicas e o último grupo é aquele formado por aqueles de origem bioquímica³⁶.



Figura 4 - Detalhe das marcas de dissolução na rocha conhecidas como lapiás (Foto: L.E.P. Travassos).

- **Dolinas:** As dolinas são as feições mais típicas e representativas da paisagem cárstica^{37,38}, geralmente de forma circular ou oval que se formam na superfície do relevo cárstico e possuem frequentemente largura maior que a profundidade. Apresentam-se com ou sem água e são classificadas basicamente como sendo dolinas de abatimento ou dissolução. As dolinas de abatimento são formadas por processos físicos de controle estrutural incidentes na área de contato entre o solo e a rocha remanescente do colapso do teto e das paredes de cavernas, podendo ser simétricas ou assimétricas. Já as dolinas de dissolução são originadas da dissolução das rochas calcárias e, em geral, apresentam formas cônicas³⁹. Existem vários outros tipos de dolinas, mas optou-se por destacar apenas os dois tipos mais didáticos.



Figura 5 - Dolina de abatimento em Unaí, Minas Gerais (Foto: Mauro Gomes).



Figura 6 - Dolina de dissolução parcialmente preenchida por água em Cordisburgo, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).

33 FORD; WILLIAMS (2007).
 34 RODRIGUES et al. (2007).
 35 WHITE; CULVER (2012).
 36 RODRIGUES (2012).
 37 SAURO (2003).
 38 FORD; WILLIAMS (2007).
 39 ŠUŠTERŠIĆ (2000).

- **Uvalas:** Em alguns casos são as depressões fechadas de morfologia irregular resultantes da evolução e coalescência de duas ou mais dolinas, quando estas últimas desenvolvem superficialmente mais rápido que em profundidade⁴⁰. Em outros casos, sua formação pode receber influência significativa dos processos tectônicos⁴¹.



Figura 7 - Uvala preenchida de água na APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).

- **Poljes:** Também conhecidos como planícies cársticas, são as formas de absorção do carste de maior extensão superficial e tidas como formas poligenéticas resultantes da combinação de diferentes processos, inclusive os não cársticos, para sua formação^{42, 43}. A principal peculiaridade desta feição é a ausência de um lago permanente dentro da bacia e que pode se formar na época de chuvas intensas e desaparecer em épocas secas. Geralmente sofrem influência da oscilação do lençol freático e pode ser alimentado tanto pelo escoamento superficial, quanto pelas águas de circulação subterrânea. Entretanto, sua drenagem é feita exclusivamente através do sistema cárstico subterrâneo⁵⁴.



Figura 8 - Vista parcial de uma planície cárstica no município de Pains, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).

40 LLADÓ (1970).

41 ČALIĆ (2009).

42 LLADÓ (1970).

43 WHITE; CULVER (2012).

- **Sumidouros, surgências e ressurgências:** Sumidouros são pontos de infiltração por onde as águas do escoamento superficial são capturadas para uma drenagem subterrânea. Normalmente os sumidouros funcionam como recarga do aquífero, exercendo papel direto e fundamental nas mudanças do nível hídrico. Pode ser observada no interior de depressões fechadas de dimensões variadas ou em regiões onde não existam depressões de qualquer tipo (perda difusa)⁴⁴.

Já as *surgências*, são orifícios localizados onde a água subterrânea retorna à superfície. Tais feições são muito importantes para a ocupação histórica da paisagem pois podem ser usadas para suprir as necessidades básicas da população e para facilitar a irrigação de plantações⁴⁵. Destaca-se que tais feições podem ter fluxos perenes ou intermitentes, dependendo da quantidade de chuvas na região, ou se fazem parte de um rio perene. Quando o nível do lençol freático é mais baixo que a superfície topográfica, o mesmo orifício pode funcionar como surgência e sumidouro nas estações chuvosas, quando o volume de água é maior. Neste caso, a classificação correta para a feição é a designação francesa *estavelle*⁴⁶.



Figura 9 - Sumidouro na região de Cordisburgo, Minas Gerais (Foto: Mariana Barbosa Timo).

- **Formas Residuais:** As formas residuais são, principalmente, as torres, as banquetas, as verrugas e os afloramentos. Ao contrário das depressões, são formas remanescentes de relevo e provenientes da erosão diferencial da rocha⁴⁷. Ocorrem principalmente no carste tropical, onde é comum observar banquetas no topo das vertentes, verrugas na meia encosta e os paredões ao final do segmento⁴⁸.

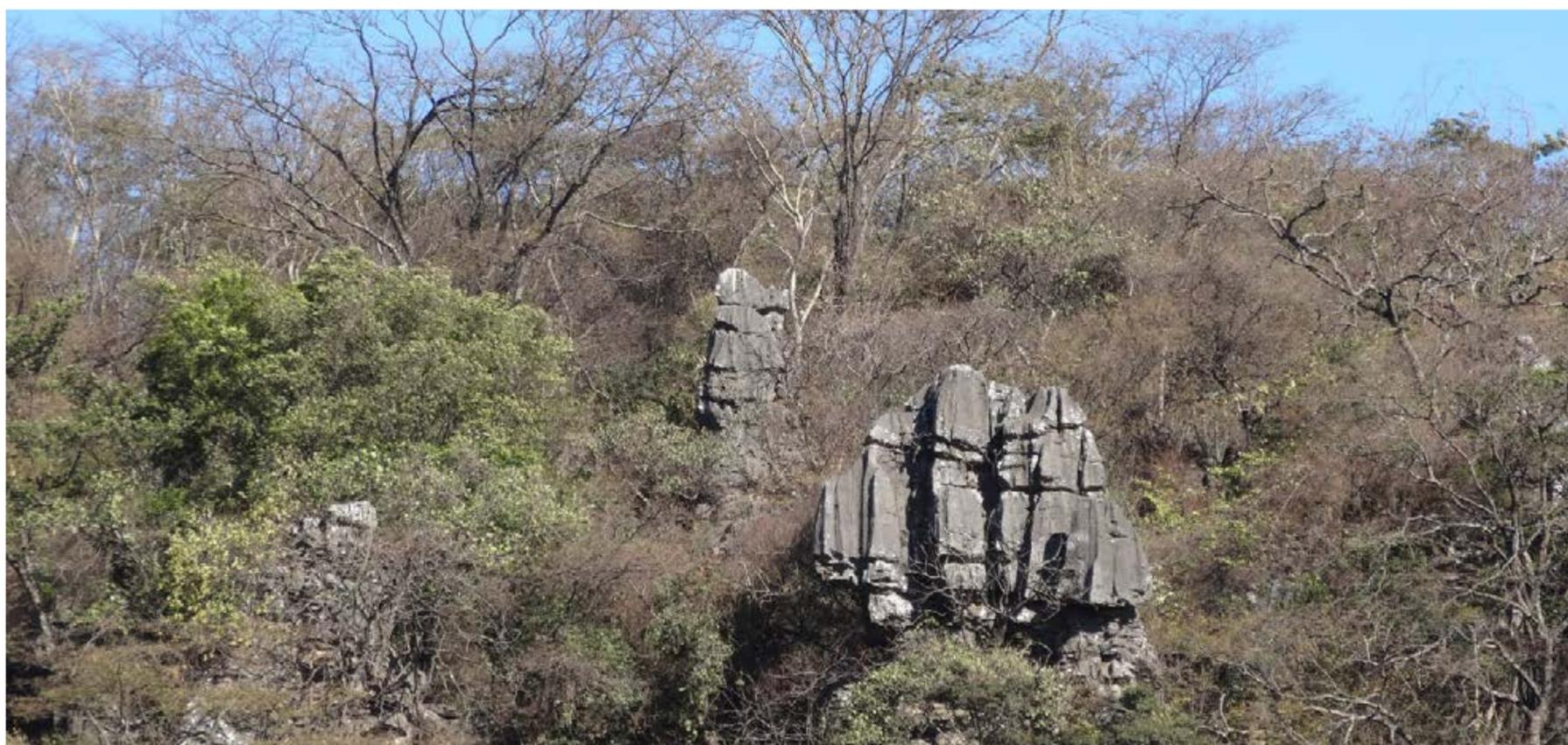


Figura 10 - Torre cárstica em meio à mata seca em Sete Lagoas, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).

Em direção ao subterrâneo, a **ZONA EPICÁRSTICA** pode ser definida sob vários pontos de vista. No entanto, a definição mais comumente utilizada leva em consideração a sua origem, as diferenças estruturais e a função hidrológica, por exemplo⁴⁹. Essa parte do carste é a região abaixo da superfície, compreendida pelo espaço entre o topo do afloramento e a cobertura de solo (quando esse existe). Para o sistema cárstico, o epicarste é uma importante zona

44 TRAVASSOS (2010).

45 WHITE; CULVER (2012).

46 TRAVASSOS et al. (2012).

47 PILÓ (2000).

48 KOHLER (1002).

49 KLIMCHOUCK (2004).

de recarga, pois concentra a infiltração difusa das águas pluviais⁸⁰. Existem autores que afirmam que o epicarste se desenvolve aproximadamente entre 3 e 10 metros de profundidade. Entretanto, algumas vezes a presença de solo é pequena ou inexistente e essas variações podem influenciar nas características⁵⁰.

Em suma, podemos dizer que o epicarste é a zona intermediária do carste, onde a atuação do clima, do solo, da vegetação e do fraturamento da rocha favorecerá o alargamento das fissuras e dará início ao processo de carstificação do sistema. Depressões fechadas como as dolinas, por exemplo, iniciam-se através das drenagens armazenadas nesta zona e alguns tipos de lapiás (karren) também costumam se desenvolver no epicarste⁵¹.

As feições mais significativas do **ENDOCARSTE** são as cavernas com seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos. O principal fator condicionante para a formação das cavernas, ou espeleogênese, é a atitude estrutural da rocha e sua relação entre a área de recarga e descarga do aquífero cárstico⁵². As cavernas podem ser caracterizadas pelo seu tamanho e morfologia: diâmetro dos condutos, projeção horizontal e padrão planimétrico. Entretanto, o conceito de caverna aceito atualmente é essencialmente centrado no ser humano⁵³. Conforme parágrafo único do artigo 1º do Decreto Federal nº6.640/2008, entende-se por cavidade natural subterrânea todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna ou buraco, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem, desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante.

Os depósitos endocársticos, ou **ESPELEOTEMAS**, são frequentemente encontrados no interior das cavidades naturais subterrâneas, ocupam os espaços abertos pelos processos erosivos e favorecem o processo de alargamento dos condutos permitindo, também, a identificação de evidências sobre as mudanças ambientais⁵⁴. Tais depósitos podem ser divididos em autóctones (gerados na própria caverna) e alóctones (de origem externa). Como autóctones destacam-se os depósitos químicos representados pelos espeleotemas, as argilas de descalcificação e os blocos abatidos, originários do deslocamento da rocha do teto e paredes da caverna. Já os alóctones são provenientes do transporte de sedimentos pela gravidade para as áreas de recarga dos aquíferos (dolinas, sumidouros, alargamento de fraturas, vales cegos etc.)⁵⁵.

50 FORD; WILLIAMS (2007).

51 WHITE; CULVER (2012).

52 FORD; WILLIAMS (2007).

53 WHITE (1988).

54 JENNINGS (1985).

55 PILÓ (2000).

CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DO CARSTE

Bruno Durão Rodrigues
Luiz Eduardo Panisset Travassos

As áreas cársticas que possuem permanentemente rios na superfície são raras. As chuvas rapidamente desaparecem para o subterrâneo através do terreno para fluir por condutos e fissuras da rocha em direção ao nível de base hídrico. Podem reaparecer como nascentes e fluir na superfície em terrenos menos permeáveis ou impermeáveis. Dessa forma, em função das atividades humanas, grande parte dessa água pode ser poluída e se espalhar rapidamente por grandes extensões⁵⁶.

Uma fração da água existente no ciclo hidrológico sofre infiltração por meio da gravidade e desloca-se para o subsolo. No caminho, uma parte é armazenada e, em certa medida, desloca-se abaixo da superfície. A água subsuperficial é de extrema importância aos processos naturais como a manutenção da umidade dos solos e abastecimento dos fluxos dos rios, lagos, lagoas e brejos, por exemplo. Além disso, é importante para os diferentes usos e atividades humanas. Contudo, o volume da água que atinge o subsolo, bem como a sua velocidade de deslocamento neste meio, dependem de vários e complexos fatores ambientais, como a cobertura pedolitológica, a cobertura vegetal, a topografia, a precipitação e o uso e ocupação do solo. A seguir, cada um desses fatores ambientais é demonstrado⁵⁷:

- A cobertura de solos e de rochas (substrato pedolitológico), são as unidades porosas e permeáveis de rochas e sedimentos que armazenam e transmitem volumes significativos de água subterrânea, recebendo o nome de aquífero.
- Em áreas cobertas pela vegetação, a infiltração é facilitada e as áreas de florestas amortecem a velocidade da água das chuvas impedindo, assim, a interceptação direta pelo solo. Nesse processo de interceptação, nem toda água chega ao solo e cerca de 1/3 evapora em direção à atmosfera, compondo o ciclo hidrológico que foi explicado anteriormente.
- De maneira geral, as áreas com maiores declividades ou inclinações favorecem o escoamento superficial direto. Isso faz com que a infiltração da água seja menor. Já as áreas com superfícies mais onduladas e as mais planas permitem um escoamento superficial menos veloz, aumentando a possibilidade de infiltração da água para a terra.
- O total de chuvas distribuído ao longo do ano em uma determinada área vai determinar o volume da recarga das águas subterrâneas. Chuvas bem distribuídas ao longo do ano favorecem maior volume de infiltração em qualquer tipo de terreno. Por outro lado, chuvas torrenciais favorecem o escoamento superficial e, por isso, menos infiltração e recarga.
- A forma como as sociedades utilizam e ocupam o solo está diretamente ligado às mudanças no volume de água que é armazenado. Como é mais conhecido pelas pessoas, nas áreas urbanas, a impermeabilização do solo impede a infiltração, favorecendo o aumento do escoamento superficial e menos recarga. Esse processo desencadeia enchentes e perdas humanas e materiais. Já nas áreas rurais, a infiltração é reduzida em função do desmatamento, uso do solo pela agropecuária, pela exposição das vertentes sem terraceamento para as plantações e pela compactação do solo decorrente do uso excessivo de máquinas ou uso das áreas como pasto.

Vencidos tais obstáculos, a água, uma vez infiltrada, passa a se mover abaixo da superfície pela ação conjunta da gravidade, bem como pelos constituintes físico-químicos dos solos, dos sedimentos e das rochas. Destaca-se, portanto, a estreita relação existente entre o volume total de certo material e o volume de vazios ou poros que eles contêm. A esta relação dá-se o nome de porosidade^{58, 59, 60} e é ela que irá favorecer o armazenamento e movimento da água nos aquíferos que irão abastecer os sistemas naturais e a população.

56 PETRIČ; RUBINIĆ (2017).

57 KARMAN (2001).

58 GUERRA; GUERRA (1997).

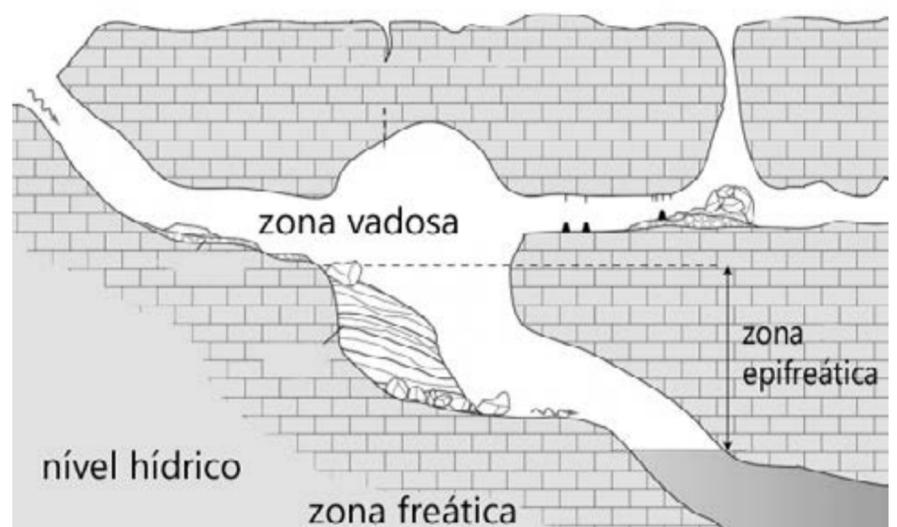
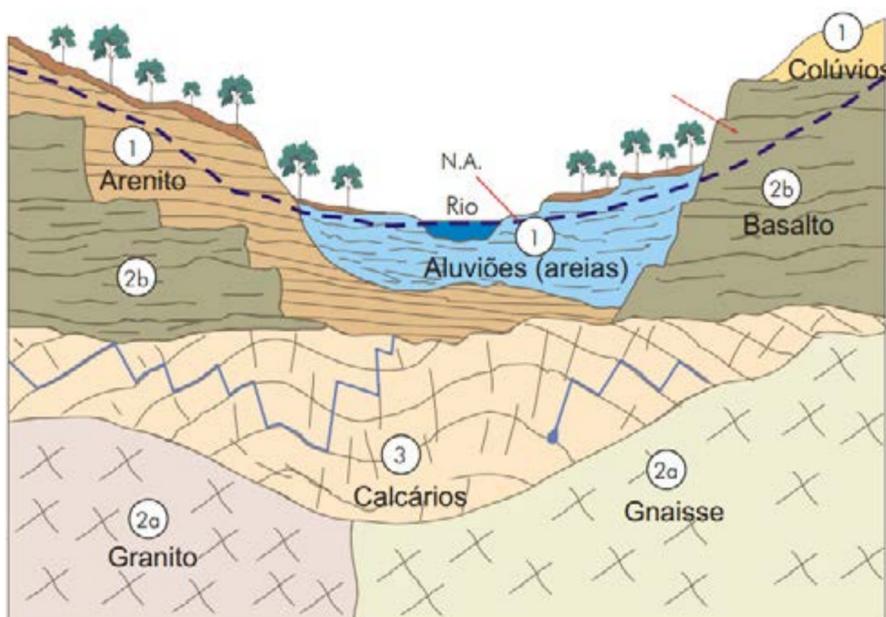
59 KARMAN (2009).

60 VALENTE; GOMES (2005).

Outra característica importante quando o assunto é a circulação da água abaixo da superfície é a permeabilidade. Entende-se por permeabilidade a capacidade que certas rochas e solos apresentam de transmitir água pelos poros e interstícios, sendo expressa pela quantidade de água que passa por uma seção em uma determinada unidade de tempo⁶¹. A permeabilidade mantém uma dependência direta entre o tamanho dos poros e a conexão entre eles (Figura 12). Sendo assim, um sedimento argiloso, por exemplo, possui uma alta porosidade. Entretanto, devido ao tamanho dos poros (textura), a água se adere por adsorção ocasionando, assim, uma permeabilidade baixa a muito baixa. O inverso ocorre com sedimentos arenosos que permitem melhor a passagem da água.

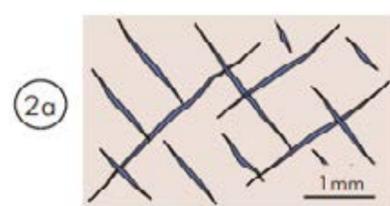
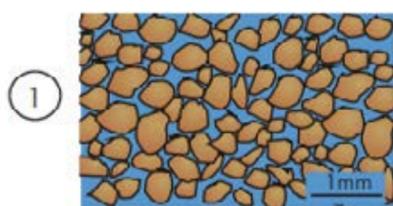
A porosidade nos sistemas cársticos pode ser dividida em três categorias principais, a primária, a secundária e a terciária. A **POROSIDADE PRIMÁRIA** ocorre quando está ligada aos vazios intergranulares das rochas (matriz de porosidade), a **SECUNDÁRIA**, quando se originam a partir do dobramento das rochas e formação de fraturamentos e, a **POROSIDADE TERCIÁRIA** que ocorre quando a circulação da água subterrânea se dá ao longo das fraturas de forma a promover a dissolução da rocha para a formação de condutos ou cavernas⁶².

O armazenamento, o tempo de permanência e a circulação das águas subterrâneas dependem essencialmente da porosidade e da permeabilidade dos constituintes da cobertura de solos e rocha, bem como de seu posicionamento ao longo do perfil que definirá as diferentes zonas de ocupação. No processo de circulação, a água pode estar temporariamente ou por um período maior em cada uma das zonas. O limite superior da água percolante em sub-superfície é dado a partir do ponto em que entra em contato com os limites entre o solo e as fissuras das rochas próximas à superfície. Já o limite inferior de percolação hídrica é definido quando as rochas não apresentam mais poros devido à pressão das rochas que estão acima⁶³. Assim sendo, de forma geral, tem-se duas zonas principais de circulação das águas subterrâneas, a zona não saturada e a zona vadosa (Figura 12).



Porosidade inter granular

Porosidade de fraturas tectônicas



Porosidade de condutos (cárstica)

Porosidade de fraturas tectônicas

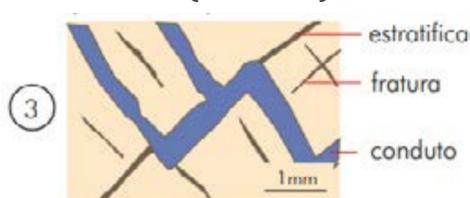


Figura 11 - Os três tipos fundamentais de porosidade conforme diferentes materiais numa seção geológica (Fonte: Modificado de Karmann, 2009).

Figura 12 - Modelo conceitual das zonas hídricas em um relevo cárstico. Fonte: Travassos, Timo e Rodrigues (2015, p. 43), modificado de Dandurand (2011).

É possível perceber que a *zona não saturada*, ou *vadosa*, é constituída pelo preenchimento parcial da água nos espaços vazios que contém ar. Em alguns tipos de rochas nesta zona dependendo dos constituintes, ocorrem os processos de filtração e depuração de poluentes que porventura estejam contidos na água. Contudo, dependendo da matriz de porosidade e permeabilidade, tal como das áreas cársticas, os processos de filtração e depuração de poluentes podem não ocorrer devido à alta permeabilidade. Isso faz com que a água potencialmente poluída atinja diretamente a próxima zona.

A *zona saturada* ou *freática* é formada pelo preenchimento total dos espaços vazios da rocha pela água. O limite superior da zona freática é definido pelo nível da água subterrânea ou superfície freática que também

define o limite inferior da zona vadosa. O limite inferior da zona freática é marcado pela presença de rochas impermeáveis que não permitem que água continue seu caminho vertical.

61 GUERRA; GUERRA (1997).

62 FORD; WILLIAMS (2007).

63 KARMAN (2009).

No carste ainda é possível considerar a existência de uma *zona intermediária* ou *epifreática* em função da oscilação do nível da zona saturada para cima ou para baixo, periodicamente. Nos períodos de seca, quando a recarga da água subterrânea é menor, o nível cai. Já nos períodos de chuva, o processo se inverte, pois, com o maior volume de água, a recarga aumenta e o nível freático sobe⁶⁴.

Recebem o nome de aquíferos as formações rochosas, quando possuem a capacidade de armazenar e de transmitir volumes significativos de água subterrânea para uso pelas sociedades⁶⁵. Justamente por esse tipo de uso, a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos e seu mapeamento tornam-se ferramentas fundamentais em qualquer gestão⁶⁶. Alguns problemas relatados em outros países podem ser facilmente identificados no Brasil.

Na China, por exemplo, a pesquisa em um aquífero carbonático apresentou a contaminação por mais de 30 tipos de contaminantes orgânicos e inorgânicos⁶⁷. Naquele país, outros pesquisadores identificaram que na água subterrânea de uma determinada região as concentrações de nitratos e sulfatos aumentaram, muito provavelmente em função de processos antrópicos⁶⁸. Processo similar de contaminação de um aquífero cárstico foi mencionado por pesquisadores no Punjab, o estado mais agrícola da Índia e o maior consumidor de fertilizantes⁶⁹.

No sudoeste da Irlanda, pesquisadores demonstraram que os aquíferos cársticos são altamente vulneráveis a poluição oriunda de fontes diversas, principalmente devido a urbanização e seus equipamentos, bem como devido à existência de inúmeras indústrias químicas e farmacêuticas⁷⁰.

Nos Estados Unidos, pesquisas demonstraram os problemas de contaminação nos aquíferos ocasionados por empreendimentos minerários abandonados. Os autores monitoraram a qualidade das águas em um córrego com pH quase neutro que apresentou altas concentrações de zinco, manganês, cádmio e arsênico⁷¹.

O uso inadequado dos aquíferos cársticos na Indonésia não causa somente a contaminação por diversos poluentes. Semarang, uma das maiores cidades daquele país, sofre com graves processos de subsidência do solo. O uso excessivo da água subterrânea causa esses abatimentos com perdas materiais e humanas⁷².

Esses foram apenas alguns exemplos que ilustram os principais problemas causados pelo uso mal planejado do carste e seus aquíferos. Destaca-se que tais problemas ocorrem em maior ou menor grau em função das características geológicas e geomorfológicas regionais, bem como devido ao conhecimento técnico em relação aos sistemas cársticos. No Brasil, os aquíferos cársticos encontram-se poluídos por fontes diversas. Na Região Cárstica Arcos-Pains (MG), por exemplo, os principais cursos d'água percolam superficialmente e subsidiam o fornecimento de água para o abastecimento público nas sedes de todos os municípios, distritos, vilas e bairros mais afastados; agricultura e pecuária; atividades industriais e minerárias. Apesar da utilização deste recurso representar apenas 1% do seu potencial, as águas encontram-se contaminadas devido à inexistência de sistemas de tratamento de esgotos nos principais centros urbanos⁷³.

De acordo com as características físicas regionais (e.g. topografia, litologia, cobertura pedológica, porosidade, permeabilidade etc.), os aquíferos podem ter maior ou menor capacidade de armazenamento e transmissão de volumes de água e são classificados em *livres*, *confinados* e *suspensos*. Os aquíferos livres são aqueles encontrados em profundidades que variam de poucos a dezenas de metros, cujo limite superior é a superfície freática. Normalmente apresentam-se em condições normais de temperatura e pressão atmosféricas. Os aquíferos confinados, por sua vez, são aqueles desenvolvidos em estratos rochosos permeáveis, mas estão limitados por rochas pouco permeáveis ou impermeáveis (aquicluda). Já os aquíferos suspensos são aqueles que estão acima da superfície freática, ou seja, localizam-se na zona vadosa e são limitados pelos aquitardes^{74, 75}.

No rol dos aquíferos desenvolvidos em diferentes litologias, destacam-se aqueles associados às rochas carbonáticas como muito importantes. Aproximadamente de 20 a 25% da população mundial depende parcial ou integralmente das águas originadas dos aquíferos cársticos^{76, 77}.

O conhecimento das peculiaridades hidrológicas do carste se apresenta em ascensão, não só pelo interesse como reservatório subterrâneo, mas também, pela sua fragilidade a uma série de problemas ambientais^{78, 79}. Normalmente, as regiões cársticas carbonáticas são regiões de grande interesse econômico e hidrogeológico, pois, na maioria das vezes, dispõem de planícies agricultáveis, valiosas reservas de água no subsolo e possuem grande

64 VARELA (2017).

65 FORD; WILLIAMS (2007).

66 WITKOWSKI (2007).

67 WANG et al. (2007).

68 GUO; JIANG; YUAN (2007).

69 KUMAR et al. (2007).

70 ALLEN; MILENIC (2007).

71 GAMMONS et al. (2007).

72 MARFAI; KING (2007).

73 MENEGASSE; GONÇALVES; FANTINEL (2002).

74 FORD; WILLIAMS (2007).

75 KARMANN (2009).

76 KOVAČIČ (2003).

77 IVÁN; MÁDL-SZOŃYI (2017).

78 RAVBAR; GOLDSCHIEDER (2007).

79 SANTOS; CRUZ; NASCIMENTO (2010).

importância ambiental⁸⁷. São, na verdade, grandes sistemas abertos compostos por dois subsistemas integrados - o hidrológico e o geoquímico - que operam em rochas muito suscetíveis à dissolução⁸⁰.

A paisagem cárstica abriga recursos naturais abundantes como a água e as rochas, mas que não são inesgotáveis. Necessitam, portanto, serem utilizados com responsabilidade, o que não é facilmente observado⁸¹. Uma prova disso é o fato de muitos lixões e demais formas inadequadas de disposição de resíduos sólidos urbanos em cidades médias no estado de Minas Gerais estarem localizados sobre o carste do Grupo Bambuí⁸².

Do ponto de vista hidrogeológico, as rochas carbonáticas são altamente permeáveis e favorecem os fluxos subterrâneos. Assim, devido à fina camada de solo (ou mesmo sua inexistência) na parte superior do aquífero, substâncias poluentes e contaminantes são solubilizadas nas águas de recarga com pouca ou nenhuma depuração, tornando tais aquíferos inadequados para uso. Soma-se a esse problema, o fato de existir uma estrutura cheia de condutos que permitem um fluxo de água muito rápido e em grandes distâncias o que aumenta, ainda mais, a vulnerabilidade dos aquíferos cársticos aos impactos ambientais.

80 FORD; WILLIAMS (2007).

81 TRAVASSOS; VARELA (2008).

82 VARELA (2017).

POR QUE O CARSTE É IMPORTANTE?

Luiz Eduardo Panisset Travassos
Isabela Dalle Varela
Mariana Barbosa Timo

Os terrenos cársticos são um dos tipos de paisagem que proporcionam aos seres humanos múltiplos e numerosos benefícios que são derivados dos serviços do ecossistema, bem como da atratividade estética. Devido às características intrínsecas especiais desse tipo de sistema ambiental, os efeitos das mudanças climáticas na recarga, as crescentes pressões sobre a qualidade da água subterrânea, a exploração de recursos naturais e a urbanização já causaram e vem causando a deterioração da paisagem e dos seus ecossistemas. Portanto, a sua proteção apresenta muitos desafios científicos e práticos que requerem abordagens específicas^{83, 84, 85}.

As várias formas de uso dessa paisagem são a medida de sua importância e é justamente por isso que devemos ter cuidado ao desenvolver nossas atividades nesses espaços.

A água é o recurso natural mais importante disponível no Planeta. Sendo insumo da maioria das atividades humanas, a água torna-se recurso cada vez mais estratégico, pois sua disponibilidade varia no tempo e no espaço. Com o crescimento populacional e urbano e o conseqüente decréscimo das áreas naturais, a oferta de água própria para o consumo tem sido afetada de forma significativa. Os riscos potenciais decorrentes das atividades antrópicas aumentam consideravelmente e a busca pelas alternativas à conservação dos recursos hídricos é um dos grandes desafios neste primeiro quarto do século XXI^{86, 87}.

Na forma líquida e sólida, a água cobre mais de 2/3 da superfície terrestre, e, na forma gasosa, é constituinte variável da atmosfera que pode ocupar até 4% de todo seu volume. Do total de água disponível no Planeta, 95,96% está concentrada nos oceanos, mares e em alguns lagos salgados e, os outros 4,04% representam a fração de água doce (Figura 14). Apenas nos 4,04% disponíveis para consumo humano e dessedentação animal, 2,97% estão localizados nas calotas polares e geleiras; 2,97% nas águas subterrâneas; 0,009% em lagos, lagoas e rios; 0,001% na forma de vapor d'água contido na atmosfera e 0,0001% na biosfera⁸⁸.

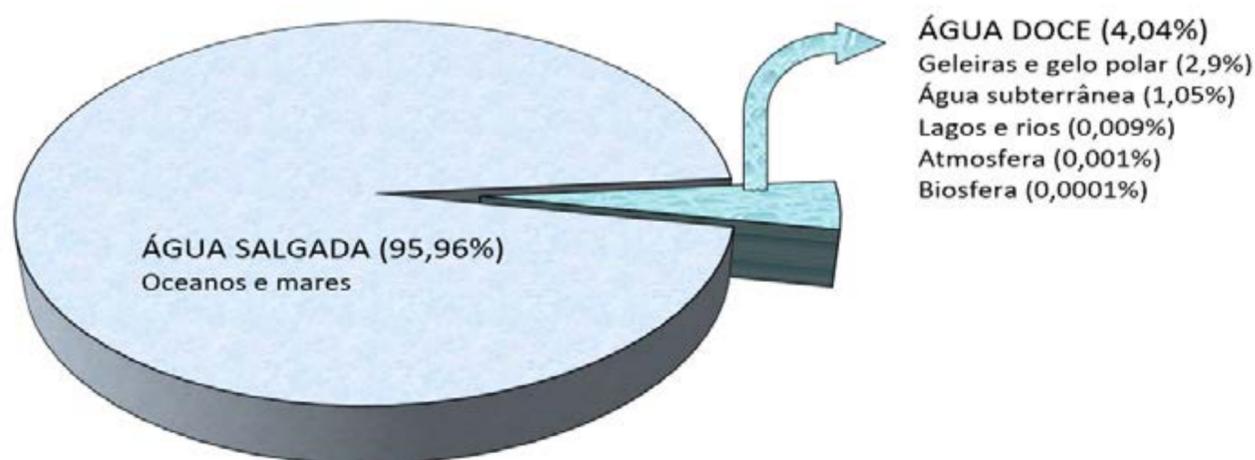


Figura 13 - A Distribuição da Água no Planeta Terra (GROTZINGER; JORDAN, 2013).

A circulação da água no Planeta ocorre por meio de forças (a energia solar, a força da gravidade e o movimento de rotação da Terra) que atuam simultaneamente e são responsáveis pelo chamado ciclo hidrológico.

O ciclo hidrológico é o princípio unificador fundamental de tudo que se refere na água no Planeta. O ciclo é o modelo pelo qual se representam a interdependência e o movimento contínuo da água nas fases sólida, líquida e gasosa nas diferentes reservas encontradas no Planeta^{89, 90, 91}, conforme Figura 14.

Partindo do princípio que o volume total de água é constante no Sistema Terra, o ciclo hidrológico pode ser analisado a partir de qualquer etapa, pois, o conjunto de processos age de forma integrada e possui como “combustível”

83 DREW; HÖTZL (1999).
84 RAVBAR; ŠEBELA (2015).
85 RAVBAR; KOGOVSĚK; PIPAN (2017).
86 RODRIGUES (2017).
87 MIRANDA; OLIVEIRA; SILVA (2010).
88 GROTZINGER; JORDAN (2013).
89 STRAHLER; STRAHLER (1997).
90 THOMPSON; TURK (1999).
91 MACHADO; TORRES (2012).

independente da escala de análise, a energia solar, a gravidade e o movimento de rotação da Terra que, em conjunto, são os grandes atores da circulação atmosférica.⁹²

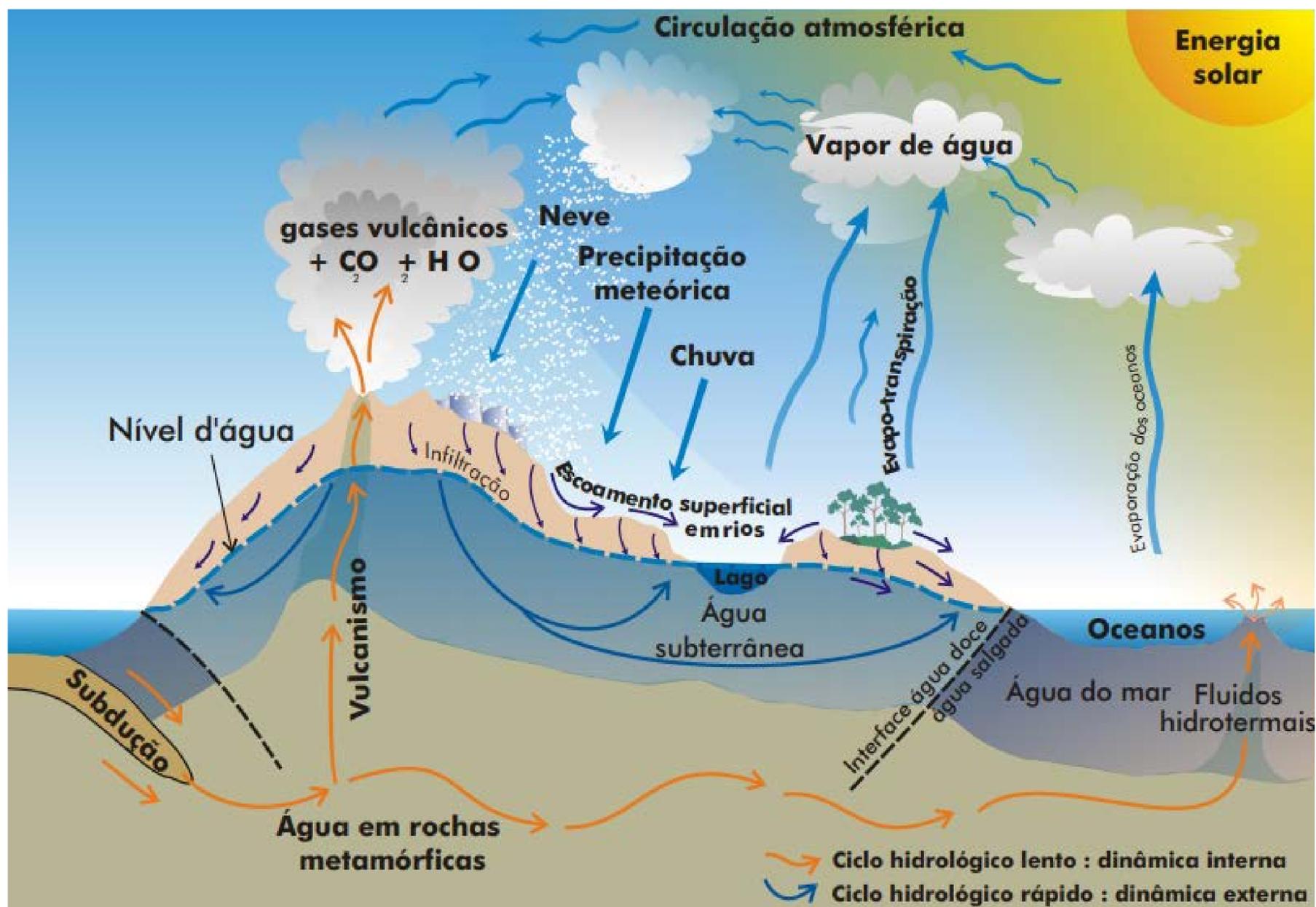


Figura 14 - Modelo conceitual do Ciclo Hidrológico (KARMAN, 2009).

Os recursos naturais e a água subterrânea

Em diversas regiões, os aquíferos cársticos muitas vezes oferecem as únicas reservas exploráveis de água, tornando-se, portanto, fontes inestimáveis para a manutenção da saúde humana, da segurança alimentar e do setor econômico como um todo.

Talvez as vantagens econômicas mais óbvias sejam os depósitos de calcário e dolomito que são utilizados para várias aplicações. De acordo com o DNPM⁹³, o mercado produtor de rochas britadas é formado por empresas de vários portes e natureza. Tais empresas variam desde as mineradoras típicas, cujo principal produto pode ser a própria brita ou outro produto mineral, como o calcário para fins agrícolas ou para fabricação de cimento, por exemplo. Além dessas empresas, o DNPM destaca a existência daquelas que pertencem a grupos produtores de cimento e/ou concreto sendo até mesmo coligadas a construtoras de vários portes.

Além do calcário para esses fins, para a fabricação de 1 tonelada de cal virgem são necessárias cerca de 1,8 toneladas de rocha calcária cujas propriedades químicas e a qualidade da queima são fatores determinantes para definir a qualidade comercial da cal virgem. Esse subproduto do calcário pode ser utilizado em diversos seguimentos econômicos, como por exemplo, nas indústrias siderúrgicas, na construção civil, no meio ambiente, na indústria química de papel e celulose, na indústria alimentícia e para a pelletização de minério de ferro e agricultura. A produção de cal do Brasil corresponde a 2,3% da produção mundial, ocupando a quinta posição no ranking dos países produtores^{94, 95}.

As rochas carbonáticas são compostas predominantemente por carbonato de cálcio (CaCO₃) e/ou carbonato de magnésio (MgCO₃). Independentemente da relação existente entre o carbonato de cálcio e o de magnésio, rochas

92 KARMANN (2009).

93 BRASIL (2016); KULAIF, Y.; RECUERO (2016).

94 BRASIL (2016).

95 GALO; GAMA JÚNIOR (2016).

como o calcário, dolomito e o mármore são importantes fontes para a obtenção de corretivos de acidez dos solos. Assim, as reservas lavráveis brasileiras estão relativamente bem distribuídas pelos estados com destaque para Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e Goiás que, juntos, detêm quase 60% das reservas medidas de calcário do país, além de Mato Grosso e Bahia⁹⁶.

Dados do DNPM afirmam que a produção mundial de cimento em 2014 totalizou 4.180 Mt⁹⁷, um crescimento de 2,5% em relação ao ano anterior que foi de 4.080 Mt. A Ásia, continente mais populoso do mundo, responde por mais de 75% da produção mundial de cimento. Em 2014, a China produziu 2.500 Mt de cimento, quantidade que representa 59,8% de toda a produção mundial, enquanto a Índia, segundo maior produtor mundial, produziu 280 Mt (6,7% da produção mundial). O Brasil é o maior produtor da América Latina, com 71 Mt, que responde por 1,7% de toda a produção mundial. Os principais insumos na fabricação do cimento são os calcários e as argilas. As maiores restrições para a utilização dessas rochas na produção de cimento são as suas composições químicas e as distâncias entre as jazidas e os mercados consumidores. Por isso, mais de 90% do cimento no mundo é consumido nos próprios países em que foi produzido⁹⁸.

Em relação à água, a percepção mais comum que se tem da água subterrânea cárstica é a de que ela não tem qualidade. Geralmente escutamos que a “água é dura” ou que “não é boa”. Existe algum fundamento de verdade nisso, embora isso esteja mais ligado ao tipo de recarga e à disposição de lixo e esgoto, por exemplo.

Rochas carbonáticas fraturadas permitem a rápida circulação das águas da chuva que recarregam os aquíferos. Assim, se na superfície as práticas de disposição de resíduos ou uso do solo não são adequadas, a água subterrânea pode ser rapidamente contaminada. No caso de áreas agrícolas, isso também pode ocorrer, levando excesso de elementos químicos para o aquífero⁹⁹. De forma geral, aquíferos profundos são mais mineralizados e, portanto, suas águas devem ser tratadas antes do uso.

Arqueologia, Paleontologia, História e Cultura

Feições geomorfológicas específicas do carste como as cavernas, as dolinas, as uvalas, os poljés, as nascentes e outros fenômenos geomorfológicos contribuem significativamente para a geodiversidade e são fundamentais para a biodiversidade e os serviços dos ecossistemas. Desde os primórdios da Humanidade, tais formas de relevo também são foco de atenção humana para recreação e bem-estar¹⁰⁰.

Além disso, as cavernas também oferecem oportunidades de estudo científico e educação, fornecendo uma visão sobre as condições ambientais, geomorfológicas, ecológicas e antropogênicas do passado. Portanto, nas áreas cársticas e suas cavernas, observamos sítios arqueológicos não perturbados e restos animais e humanos bem preservados¹⁰¹.

As áreas cársticas são a fonte mais importante de descobertas para os arqueólogos. Devido à sua incomparável condição de estabilidade, as cavernas e o carste têm a capacidade única de preservar vestígios de milhões de anos. Tipos específicos de vestígios que seriam perdidos em outros ambientes, incluem as pinturas rupestres pré-históricas, antigos sepultamentos, ferramentas, restos de alimentos consumidos, estátuas religiosas e evidências das primeiras formas de moradia e fogo. Ainda hoje, descobertas cruciais estão sendo feitas em cavernas e em áreas cársticas. Em várias partes do mundo, os únicos vestígios arqueológicos foram encontrados em cavernas. Por esta razão, é muito importante a proteção desse ambiente.

A Paleontologia é comumente 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. A palavra fóssil, por sua vez, tem origem da palavra *fossilis* que, em Latim, significa “extraído da terra”. São, portanto, os restos ou evidências diretas e indiretas de organismos vivos que ficaram preservados ao longo do tempo geológico. O objeto de estudo da Paleontologia são os seres que habitaram a Terra, desde bactérias unicelulares até os grandes mamíferos extintos durante a última glaciação, também conhecida como “Idade do Gelo” na interface do Pleistoceno com o Holoceno, há aproximadamente 11.000 anos. Ossos, dentes, troncos, conchas, pólenes, pegadas, ovos, excrementos, resinas vegetais, colônias de bactérias, algas e impressões diversas são alguns dos materiais preservados que são encontrados pelos pesquisadores no interior das cavernas^{102, 103}.

96 MARTINS JÚNIOR (2016).

97 Mt = Milhões de toneladas.

98 QUEIROZ FILHO; AMORIM NETO; DANTAS (2016).

99 DUCHARME; MILLER (1996); GILLMAN, J.; DULEY (2013).

100 HAMILTON-SMITH 2007; WILLIAMS 2008; TRAVASSOS (2010); EVANGELISTA; TRAVASSOS (2015a; 2015b); RAVBAR; KOGOVŠEK; PIPAN (2017).

101 RAVBAR; KOGOVŠEK; PIPAN (2017).

102 MACEDO NETO; RIBEIRO (2016).

103 TIMO; TRAVASSOS; VARELA (2017).



Figura 15 – Painel de pinturas rupestres na Lapa do Caboclo, PARNA Cavernas do Peruaçu, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).

O Parque Estadual do Sumidouro (PESU) está inserido na região do carste de Lagoa Santa (MG) e é dotado de um importante conjunto paisagístico-ambiental, histórico e cultural. Do ponto de vista científico e histórico a região em que o PESU está localizado é de grandiosa importância, pois, além dos Bandeirantes, Peter Wilhelm Lund ali desenvolveu uma série de pesquisas no campo da paleontologia que posteriormente vieram a corroborar com as proposições de Charles Darwin relativas à evolução das espécies em 1859. Em uma rápida contextualização, o pensamento científico à luz da primeira metade do século XIX na Europa encontrava-se amplamente amparado nas ideias ligadas à religião. O eminente naturalista francês George Cuvier (1769-1832) foi um dos defensores das ideias auxiliadas no Catastrofismo, ou Teoria das Revoluções. Lund, seguidor das ideias cuvierianas, em 1844, durante uma escavação na Lapa do Sumidouro, encontrou além de fósseis da megafauna pleistocênica, ossadas humanas na mesma camada de sedimentos. A essas ossadas humanas Lund deu o nome de “Homem de Lagoa Santa”. Estavam lançadas aí as bases das provas da convivência entre Homens e feras pleistocênicas.

Recreação e turismo

A apropriação dos elementos naturais é passo decisivo para transformá-los em atrativos para o ecoturismo. No caso das cavernas, a importância econômica do turismo realizado nestes espaços em algumas localidades do Brasil é bastante expressiva. Diversos são os destinos turísticos que têm nas cavernas o seu atrativo principal ou secundário¹⁰⁴.

No Brasil, o uso turístico das cavernas remonta ao século XVII com o início das romarias em Bom Jesus da Lapa, Bahia. Desde então, as motivações para se visitar as cavernas se dividiram em vários níveis, culminando em atividades de cunho educacional, de aventura, contemplativo, religioso e místico. Apesar dos danos que a utilização cultural do carste e das cavernas pode trazer, o turismo cultural ou as peregrinações a cavernas não são atividades novas. Esse tipo de utilização teria se difundido na Idade Média, quando peregrinos buscavam conhecer cavernas sagradas e igrejas subterrâneas. Pela importância histórica e cultural, essa atividade não pode ser negligenciada^{105, 106}.

104 LOBO; PERINOTTO; BOGGIANI (2008).

105 LOBO et al. (2010).

106 TRAVASSOS (2010a).

Parques nacionais, estaduais ou municipais contribuem para a preservação de áreas cársticas notáveis. Entretanto, as atividades turísticas devem ser cuidadosamente pensadas para evitar a degradação da saúde ambiental e consequentes problemas relacionados à perda de biodiversidade, erosão dos solos, assoreamento de cursos d'água e danos à qualidade das águas, por exemplo.

Diversidade biológica

O carste e suas cavernas oferecem a vantagem única de possuírem tanto organismos que interagem com o meio externo quanto aqueles que vivem somente nos subterrâneos, prova da evolução e isolamento geográfico destes organismos. Muitas destas espécies estão constantemente ameaçadas pelas atividades antrópicas e despertam o interesse de cientistas por apresentarem adaptações morfológicas e funcionais proporcionadas pela singularidade do ambiente subterrâneo e distribuição geográfica restrita.

Ao analisar a composição da fauna no ambiente subterrâneo, podemos identificar que muitos organismos passam parte ou todo o seu ciclo de vida nas cavernas, particularmente nas entradas. Em uma caverna, a entrada (zona eufótica) e a zona crepuscular ou de penumbra (zona disfótica) são refúgios de temperaturas extremas que podem ocorrer na superfície e, além disso, são zonas relativamente livres de predadores, pelo menos para vertebrados. Algumas aves fazem ninhos em cavernas e os animais visitantes mais conhecidos do público em geral são os morcegos. Dependendo da espécie, os morcegos usam cavernas como colônias de maternidade, como hibernáculo e como abrigos temporários durante os meses mais quentes do ano. Muitas espécies obrigatoriamente passam todo o ciclo de vida nas cavernas e são conhecidos como troglóbios ou troglobientes¹⁰⁴. A maioria deles não tem olhos nem pigmentos e possuem pernas alongadas e antenas. Alguns têm órgãos especializados que detectam cheiro e movimento para ajudá-los a navegar em um ambiente totalmente escuro e encontrar comida, evitar predadores ou encontrar um parceiro de acasalamento. Já os troglófilos são aqueles que podem completar seu ciclo de vida nas cavernas, mas também fora delas, em habitats de superfície¹⁰⁷.

Com poucos recursos direcionados para o investimento em pesquisas científicas para o entendimento deste ecossistema, observa-se um volume de dados insatisfatórios em determinados grupos taxonômicos, que são importantes para amparo e embasamento científico na tomada de decisão sobre o impacto das atividades antrópicas nas espécies tipicamente cavernícolas. Tal fato constrói um quadro preocupante quanto a base para referências destes grupos, que possuem poucas publicações no âmbito nacional. Isso leva os pesquisadores a utilizar como referencial teórico, trabalhos internacionais elaborados com faunas e biomas distintos aos observados no Brasil. Ressalta-se que os estudos da fauna cavernícola brasileira são os mais expressivos dentre os países da América Latina¹⁰⁸.



Figura 16 - Altar principal na Lapa de Antônio Pereira, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).



Figura 17 - Colônia de morcegos na Caverna das Mãos, Pará (Foto: Bruno Durão Rodrigues).

107 CULVER; PIPAN (2013)

108 TRAJANO; BICHUETTE (2006)

PRINCIPAIS PROBLEMAS NA RELAÇÃO COM AS ATIVIDADES HUMANAS

Luiz Eduardo Panisset Travassos
Helena dos Santos Macedo
Isabela Dalle Varela

A exploração minerária descontrolada pode prejudicar sistemas superficiais e subterrâneos¹⁰⁹. Mudanças no uso da terra também podem resultar em degradação do epicarste, que fornece funções vitais para os ecossistemas cársticos¹¹⁰. A conexão direta entre a superfície e os aquíferos abaixo dela fazem com que as águas cársticas subterrâneas sejam extremamente vulneráveis à poluição, que pode ser rapidamente levada a poços e nascentes¹¹¹, conforme resumido na Figura 18.

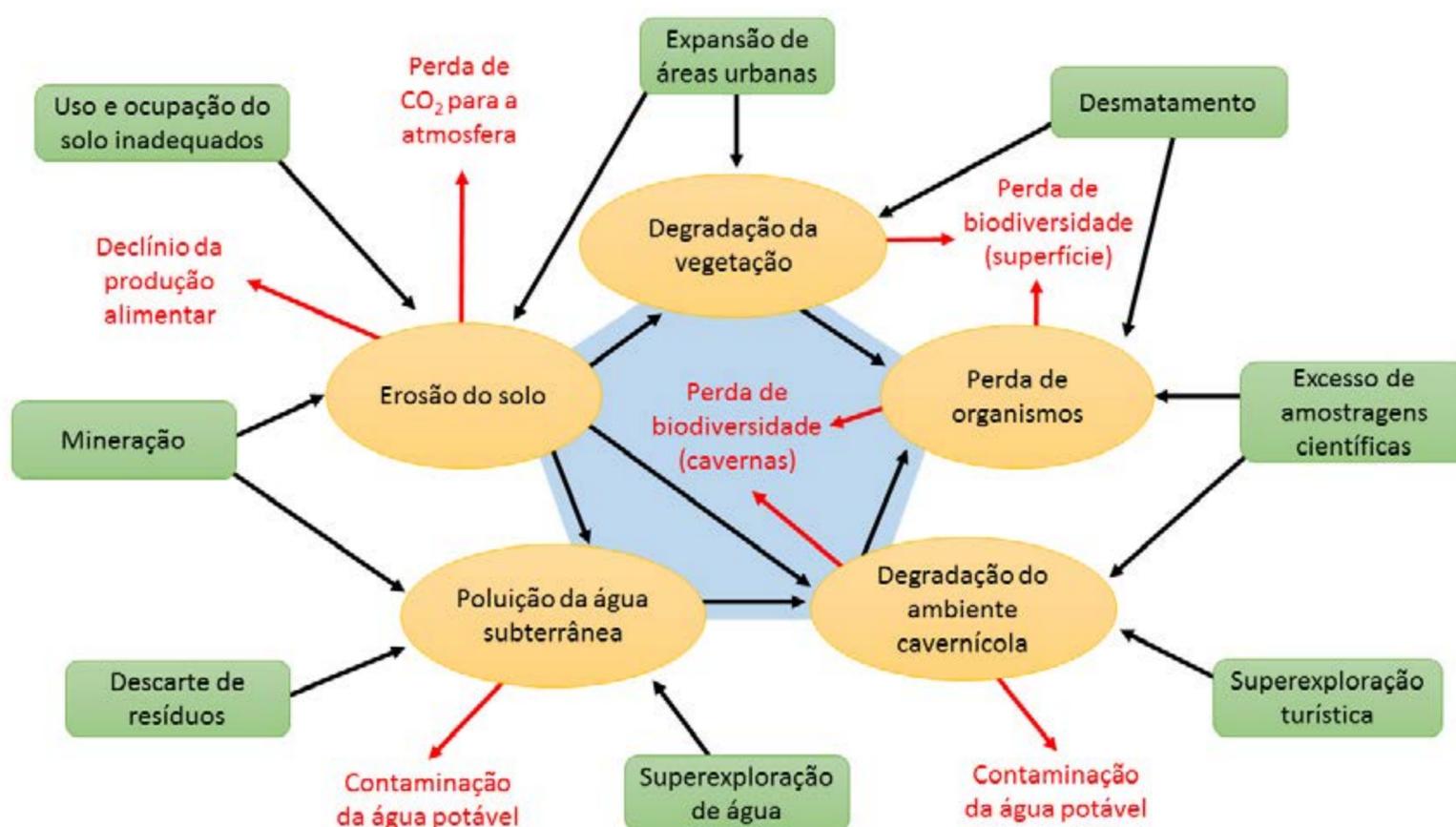


Figura 18 - Esquema de impactos interligados que afetam o carste e os ecossistemas cavernícolas (Elaborado por Isabela Dalle Varela com base em Goldscheider, 2012 e Forti, 2015).

Os impactos antrópicos em regiões cársticas são decorrentes da retirada da vegetação, expansão urbana, agricultura, exploração de água, mineração, atividades militares e turismo, entre outros. Tais ações podem resultar em diferentes tipos de contaminação, riscos naturais, degradação do ecossistema e perda de biodiversidade e geodiversidade.

Esses impactos também podem causar alteração de processos cársticos naturais como a dissolução, deposição e o ciclo do carbono. As cavernas são particularmente suscetíveis a essas mudanças, pois são caracterizadas por apresentarem temperaturas e umidade relativamente constantes durante todo o ano. Uma vez degradadas, a superfície cárstica e os ambientes subterrâneos muitas vezes demoram muito ou mesmo não se recuperam¹¹². Nas últimas décadas, a pressão sobre as paisagens cársticas aumentou consideravelmente, devido a disseminação intensiva e insustentável de assentamentos, infraestrutura, atividades industriais, desenvolvimento do turismo e uso intensivo do solo para a agropecuária e silvicultura. Tal remodelação e degradação exaustivas da paisagem se expandiram muito, em grande parte como resultado do desenvolvimento tecnológico e da mecanização, e podem intensificar a susceptibilidade natural do carste para contaminação e a degradação¹¹³.

Atividades de extração, de engenharia e o aterramento de dolinas tornaram-se um grande problema. Muitas dolinas são preenchidas com resíduos de construção para fins de nivelamento da superfície. Em outros casos, dolinas

109 PARISE; PASCALI (2003).

110 PIPAN; CULVER (2013).

111 RAVBAR; GOLDSCHIEDER (2009).

112 FORD; WILLIAMS (2007).

113 PARISE; PASCALI (2003).

são utilizadas como depósitos de diversos resíduos. Tais questões estão intimamente relacionadas com o desmatamento e, conseqüentemente, com a destruição da paisagem e erosão dos solos que altera a dinâmica de recarga e descarga hídrica. A presença de cobertura de solo, sedimentos e vegetação proporciona uma mínima absorção ou mesmo outros processos de limpeza naturais. A ausência dessas camadas protetoras permite o aumento da carga poluidora para as cavernas e água subterrânea. São diversos, portanto, os perigos provenientes das diferentes atividades humanas no carste. A maior contaminação se origina, principalmente, das águas residuais urbanas como o escoamento pluvial e esgoto, a contaminação por sistemas de transporte inadequados, derramamentos perigosos de substâncias contaminantes e disposição inadequada de resíduos sólidos. Alguns riscos sérios também podem derivar de atividades industriais, agrícolas, turísticas, esportivas e de construção^{114, 115}.



Figura 19 – Vista aérea de uma cava de mineração na APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais (Foto: L.E.P. Travassos).



Figura 20 – Mineração de calcário na Itália (Foto: Mariana Barbosa Timo).



Figura 21 – Área de mineração na região metropolitana de João Pessoa, Paraíba (Foto: Isabela Dalle Varela).



Figura 22 – Lavra de metacalcário em Simão Dias, Sergipe (Foto: Heleno dos Santos Macedo).

114 DREW; HOLTS (1999).

115 RAVBAR; KOGOVŠEK; PIPAN (2017).



Figura 23 - Ocupação e despejo de lixo em depressão cárstica na região metropolitana de Joao Pessoa, Paraíba (Foto: L.E.P. Travassos).

O crescimento contínuo da população e o desenvolvimento urbano em áreas cársticas aumentaram a necessidade da supressão de vegetação para a sua utilização para pecuária e agricultura e aumentaram as demandas de abastecimento de água. Além disso, as demandas de eletricidade urbana resultaram na construção de usinas hidrelétricas, resultando em mudanças nos regimes fluviais. O desenvolvimento urbano também levou ao aumento da construção civil e da mineração, exigindo a destruição de feições cársticas relevantes.

Dolinamentos, colapsos e problemas de drenagem

Em várias cidades do mundo, processos naturais de dolinamentos e colapsos da superfície atingiram o meio urbano e rural, especialmente a partir da década de 1970. Tais processos, por vezes, atingiram redes de esgoto que acabaram por contaminar a água subterrânea que era utilizada para abastecer muitos dos centros urbanos atingidos. Infelizmente, tais instalações não são as únicas estruturas e propriedades que são afetadas negativamente por processos de abatimento da superfície cárstica. No sudoeste do Missouri, uma fábrica e uma casa foram destruídas pela formação de uma dolina. Em ambos os casos, as estruturas foram demolidas tanto pela ação natural dos colapsos quanto pelos esforços subsequentes de remediação¹¹⁶. No Brasil, casos similares foram registrados a partir de 1980, causando perdas materiais significativas para a população¹¹⁷.

Regiões de carste encoberto são mais propícias a dolinamentos e colapsos. Na maioria dos casos este processo é desencadeado pela captação da água para o abastecimento humano ou o rebaixamento do lençol freático para viabilizar a exploração de recursos minerais, mas existem casos em que o processo ocorre através de processos naturais¹¹⁸.

No final de 2017 uma dolina de aproximadamente 15 metros de diâmetro foi aberta em uma fazenda utilizada para a plantação de soja na cidade de Coromandel (MG). O fenômeno pode estar relacionado à utilização da água para a irrigação.

Outro resultado negativo de se viver no carste sem os devidos cuidados, são alagamentos ou subsidência da superfície em função de alagamentos. Se por um lado casas ou outros equipamentos urbanos podem ser “engolidos”, de outro, alagamentos podem ocorrer em função da sobrecarga de água no sistema, proveniente de processos artificiais ou naturais de drenagem.

116 GILLMAN; DULEY (2013).

117 SALLUN FILHO (2009).

118 DAOXIAN (1993).

Contaminação da água subterrânea pelas atividades urbanas, rurais e industriais

O escoamento da água é o caminho mais fácil e rápido para que os contaminantes entrem nos sistemas cársticos. Conforme mencionado anteriormente, a água no carste é muito mais rapidamente transportada da superfície para o subterrâneo. Em áreas de recarga localizada como fraturas e entradas verticais de cavernas (abismos), por exemplo, a água superficial é ligada diretamente às águas subterrâneas. Esse problema aumenta consideravelmente devido à complexidade do sistema¹¹⁹ cujas conexões são pouco ou nada conhecidas. Além disso, quando as pesquisas demonstram as conexões entre áreas de recarga e descarga no carste, muitos sistemas apresentam ligações de dezenas de quilômetros, fato que torna ainda mais difícil a restrição das contaminações. A alta porcentagem de superfície impermeável em grandes áreas urbanizadas reduz a infiltração no carste e aumenta o fluxo terrestre causando enchentes catastróficas¹²⁰.

Agricultura

A expansão da atividade agrícola pode diminuir a vida selvagem, acelerar a erosão do solo, incentivar o corte de árvores e aumentar a exploração e contaminação da água, por meio do uso de fertilizantes e agrotóxicos. Além disso, os impactos também podem incluir o aumento das inundações, erosão acelerada do solo e o favorecimento de processos de dolinamentos e colapsos.

A substituição de vegetação natural pelas culturas ameaça a diversidade fitogeográfica e provoca a aceleração da erosão e o aumento das superfícies de afloramento de rocha. A agricultura intensiva, com irrigação, a exploração de pastagens, o desenvolvimento de estufas etc. podem causar poluição e afetar cavernas, cursos de água subterrâneos e nascentes. A irrigação e a modificação da hidrologia também podem causar o desenvolvimento de depressões de colapso.



Figura 24 - Dolina de abatimento em Unaí, Minas Gerais (Foto: Mauro Gomes).

O aumento da pressão sobre os níveis do solo tem como consequências a degradação dos horizontes do solo, sua compactação ou remoção através da erosão estimulada pelo uso descontrolado. As áreas cársticas são particularmente propensas a isso, tanto porque os solos de calcário são tipicamente pouco profundos (como a rocha a partir da qual derivam produzem pouco resíduo insolúvel) e porque os sistemas de juntas abertas facilitam a lavagem do solo. Além da erosão do solo, a agricultura também pode ter um grande impacto na química do solo. Os níveis de dióxido de carbono do solo resultam de “corte e queima” na agricultura, e tais mudanças são relevantes para a dissolução do calcário¹²¹.

119 RAVBAR; KOGOVŠEK; PIPAN (2017).

120 GAMS et al. (1993).

121 WILLIAMS (1993); COXON (2011).



Figura 25 - Prática agrícola sobre o carste da Formação Olhos d'água em Pinhão, Sergipe (Foto: Crédito: Heleno dos Santos Macedo).

Os poluentes nas águas cársticas tendem a ser rapidamente direcionados e concentrados para os condutos subterrâneos. Como resultado deste e de outros fatores, os recursos hídricos são especialmente sensíveis à contaminação e poluição.

As mudanças no uso da terra como desmatamento, reflorestamento e conversão de pastagens para agricultura terão implicações para a recarga de águas subterrâneas, devido à mudança nas taxas de evapotranspiração, e podem promover a redução da disponibilidade de água superficial.



Figura 26 - Prática agrícola sobre o carste e ao fundo da image, lavra de metacalcário da Formação Olhos D'água em Simão Dias, Sergipe. (Foto: Heleno dos Santos Macedo).

A modificação e a intensificação das terras agrícolas existentes também podem resultar em mudanças na recarga de águas subterrâneas. Os sumidouros e dolinas possibilitam uma conexão direta ao aquífero, com pouca ou nenhuma atenuação, de modo que os contaminantes mais frequentemente associados às águas superficiais, que normalmente não entrariam por recarga difusa (por exemplo, fosfato ou pesticidas adsorvidos em sedimentos em suspensão), podem entrar diretamente nos condutos. Além disso, muitas áreas cársticas têm um mosaico de rocha nua e solos finos, e a falta de cobertura protetora combinada com fissuras ampliadas em solução na rocha carbonática cria uma vulnerabilidade extrema à poluição proveniente de fontes agrícolas. A contaminação por nitrato (decorrente da disseminação de fertilizantes inorgânicos e orgânicos e liberação de nitrogênio do solo devido à mudança de uso da terra e resíduos de fazenda e efluentes do tanque septicamente armazenados), fósforo (que promove a eutrofização de rios e lagos), pesticidas (que variam muito em sua toxicidade, mobilidade e persistência) e patógenos microbianos (os microorganismos envolvidos incluem bactérias, vírus e parasitas protozoários).

Mesmo nos países economicamente mais avançados, a legislação e a prática ambiental são muitas vezes inadequadas para evitar a deterioração dos ecossistemas cársticos, especialmente enquanto a pressão da população ainda está crescendo. Isto é geralmente porque os procedimentos de gestão desenvolvidos para condições de captação convencionais são menos adequados quando aplicados ao carste com sua maior dimensão subterrânea e solos que são facilmente erodidos.

O controle da erosão do solo nas áreas cársticas também é muito importante e depende da eficiência dos processos de revegetação ou reflorestamento. No carste, o solo tende a ser raso e mais pedregoso e, por isso, apresentam baixa capacidade de retenção de nutrientes por causa da rápida drenagem da água para o subterrâneo por meio de fendas na rocha. Em alguns casos, o material de cobertura é rapidamente levado para o subterrâneo podendo causar o bloqueio de condutos, desvio de drenagens subterrâneas e o soterramento de espécies da fauna.

Se a rápida infiltração ocorre nestes locais, igualmente rápido será o transporte dos poluentes para o subterrâneo e sua disseminação. Por causa das atividades antrópicas, a gama de poluentes prováveis inclui nitratos, fosfatos, cloretos, metais pesados, hidrocarbonetos, ácidos industriais, bactérias e vírus.

Mineração

As regiões cársticas hospedam importantes depósitos minerais, como chumbo, zinco, ferro e manganês. Além disso, quase metade do petróleo do mundo está localizada em reservatórios de carbonato¹²².

A rocha carbonática é uma matéria-prima vital para as sociedades industriais modernas. Contudo, a sua exploração representa o impacto antropogênico mais dramático no terreno cárstico. A mineração pode causar destruição parcial ou total de cavernas, alterar padrões de paisagem e sua integridade, alterar a hidrografia natural, alterar profundamente os ecossistemas preexistentes e o substrato, destruir o habitat natural e interromper a sucessão natural, aumentar a emissão de poeira, a poluição sonora e o tráfego no entorno do empreendimento, e pode ser considerado uma das atividades mais destrutivas do homem em áreas cársticas¹²³.

A remoção da rocha durante o processo de extração resulta na modificação ou na destruição de feições de cársticas relevantes. Em termos de processo, o impacto principal das pedreiras é a remoção da rocha, mas também pode incluir componentes de deposição, como a instalação de pilhas de estéril. A extensão do impacto será uma função da localização e do tamanho da pedreira em relação à paisagem geral e às formas de relevo locais. O redirecionamento da drenagem no sopé das bancadas pode levar à formação de dolinas localizadas.

O conflito mais grave surge quando a caverna se coloca como um obstáculo na instalação e expansão das áreas de lavra. Em muitos casos, é uma situação em que as perdas de um lado se tornam inevitáveis. Além da perda da própria caverna, há uma ocorrência de intensa fragmentação e desfiguração da superfície devido à construção de estradas de acesso, depósitos estéril e barragens de rejeitos.

A destruição dos sítios arqueológicos e paleontológicos é outro possível impacto. Exemplos de destruição total ou parcial desses locais por minerações podem ser citados em todo o mundo. Um exemplo importante desse impacto é a destruição total da caverna Lapa Vermelha, localizada em Pedro Leopoldo (MG). A caverna tornou-se famosa pelo trabalho do cientista Peter Lund, que descobriu lá, entre 1835 e 1845, milhares de fósseis de animais do Pleistoceno extintos. Peter Lund ainda descobriu cerca de 30 crânios humanos em um estado fóssil que se tornou conhecido como o “Homem da Lagoa Santa”. Depois disso, no início da década de 1970, a equipe da arqueóloga Annette Laming-Emperaire encontrou nesta caverna durante as escavações, o fóssil humano mais antigo (*Homo sapiens*) encontrado na América, com cerca de 12.500 a 13.000 anos, chamado “Luzia”.



Figura 27 - Dolina preenchida com resíduos sólidos, Pinhão, Sergipe. (Foto: Heleno dos Santos Macedo).



Figura 28 - Extração artesanal de metacalcário sem permissão para lavra em Simão Dias, Sergipe (Foto: Heleno dos Santos Macedo).

122 FORD; WILLIAMS (2007).

123 PARISE (2009); DARWISH et al. (2011).

A propagação de vibrações no maciço rochoso devido à detonação de cargas explosivas é outro potencial impacto da atividade. Além disso, o aumento da poluição sonora, que corresponde à parte da energia liberada e transmitida pelo ar no ato da detonação, é observada. Também destacamos a possível interferência nos sistemas hidrológicos e a poluição dos aquíferos. As pedreiras localizadas a montante das cavernas podem degradar os cursos de água que posteriormente se tornam subterrâneos, alterando a integridade física e biológica do sistema cárstico.

A poeira é um dos impactos mais visíveis, invasivos e potencialmente irritantes associados à mineração. A poeira pode ocorrer como poeira fugitiva da escavação, das estradas de transporte e da explosão, ou pode ser de fontes pontuais, como perfuração, esmagamento e triagem. As condições do local que afetam o impacto das poeiras geradas durante a extração de pedra de agregado e dimensão incluem propriedades de rocha, umidade, qualidade do ar ambiente, correntes de ar e ventos predominantes, tamanho da operação, proximidade com centros populacionais e outras fontes de poeira próximas¹²⁴. A poeira pode ser transportada por escoamento para dentro das cavernas, preenchendo seus condutos. Pode também impermeabilizar o solo, influenciando o processo de infiltração da água.

É importante entender que tão importante quanto a paisagem cárstica é, sem dúvida, as atividades de mineração. Existem diferenças óbvias entre uma empresa ambientalmente responsável que produz benefícios econômicos e sociais reais para o contexto em que opera e uma empresa que traz benefícios pontuais que não compensam os danos ambientais inerentes à extração da rocha. Neste caso, não pode haver justificativa para os impactos sobre o carste, especialmente os irreversíveis, se não há benefícios sociais e econômicos reais, e se a empresa não se preocupa com a correção ambiental.

Assim, percebe-se que a diversidade de problemas causados pelo impacto humano ao tentar lidar com as dificuldades inerentes ao viver em regiões cársticas indica claramente que uma compreensão completa da estrutura e características deste sistema ambiental é um pré-requisito para o tratamento racional dos seus problemas ambientais relacionados. Além disso, há de se criar mecanismos de gestão em áreas cársticas que busquem harmonizar as atividades humanas e o sistema cárstico.

REGRAS GERAIS PARA SE VIVER NO CARSTE

Mariana Barbosa Timo
Luiz Eduardo Panisset Travassos

No carste, os processos de autodepuração das águas são geralmente menos efetivos devido à infiltração rápida (fluxo de alta velocidade) e filtração reduzida (fluxo de conduto). O grau de fracionamento e carstificação das vias subterrâneas e as respectivas condições hidrológicas determinam os processos de transporte subterrâneo^{125, 126, 127}.

Por esses motivos e muitos outros, o manejo destes ambientes deve considerar todos os recursos naturais encontrados na região, bem como a interação entre vários componentes (bióticos, abióticos e culturais). Qualquer interferência no sistema provavelmente desencadeará impactos indesejáveis e irreversíveis no equilíbrio natural de qualquer um desses componentes e pode ter implicações para todos os outros elementos. As orientações e diretrizes que são efetivas nos diversos ecossistemas existentes na superfície terrestre podem não ser tão efetivos ou até mesmo falhar em áreas cársticas. Por conseguinte, faz-se necessário o estabelecimento de procedimentos específicos para garantir a proteção de forma satisfatória deste ambiente. Atenção especial deve ser dispensada para projetos de instalação de aterros sanitários, tanques de armazenamento subterrâneo (cisternas), poços de petróleo e gás, tubulações e instalações que fabricam e/ou armazenam materiais perigosos. Os planos de controle e monitoramento dos impactos devem prever, minimamente, a identificação e proteção das características vulneráveis do sistema cárstico; monitoramento do microclima cavernícola e da qualidade da água subterrânea; e educação ambiental sobre as medidas para a conservação do carste e das cavernas^{128, 129}.

A proteção das regiões cársticas tem muitas vezes focado em cavernas, e não é dada atenção necessária para a proteção e gerenciamento adequado da área total do carste como uma unidade terrestre. O carste e cavernas podem ser satisfatoriamente protegidos por qualquer uma das categorias disponíveis de área protegida. A categoria de área protegida utilizada para a proteção deste geossistema deve ser escolhida para atender às necessidades de proteção da região em questão. A delimitação da área a ser protegida deve levar em consideração, sempre que possível, os limites da bacia hidrográfica. Quando esta prática não for possível, a região a ser preservada deve considerar, no mínimo, os principais recursos a serem protegidos e, também, o uso de controles ambientais que garantam a qualidade das águas que contribuem para a gênese do sistema cárstico¹³⁰.

A manutenção dos fluxos hídricos naturais deve ser sempre a prioridade número 1 para a preservação do ambiente cavernícola, mas também é preciso levar em consideração que as questões hidrológicas podem ser menos proeminentes na preservação de alguns fenômenos cársticos, como a ocorrência de uma forma incomum de *karren* (lapiás) ou de um habitat singular. No caso específico de uma caverna única, talvez isolada e desconectada do nível de base, pode ser que a conservação adequada venha a ser alcançada por meio da proteção do monumento natural como um todo. No entanto, em todos os casos, deve ser dada atenção à salvaguarda das bacias hidrográficas das águas subterrâneas e das infiltrações locais.

Na Europa, as orientações para a proteção das regiões cársticas abrangem critérios biológicos específicos, incluindo a presença de espécies raras ou geograficamente restritas, bem como seus valores científicos¹³¹. A prioridade em proteção deve ser de áreas com alto valor natural, social ou cultural e que apresentem uma ampla gama de valores dentro do único sítio. Além disso, deve-se priorizar os locais que sofreram uma degradação ambiental mínima e que representem um ecossistema frágil de seu país ou zona biogeográfica. Contudo, deve ser dada especial atenção à proteção das áreas cársticas que, por uma razão ou outra, não foram incluídas nas áreas prioritárias para a conservação, haja vista que quaisquer intervenções antrópicas nessas áreas podem causar impactos em outros lugares. Tais áreas devem ser identificadas pelas autoridades competentes e os controles ambientais ou programas de educação ambiental introduzidos para garantir uma gestão adequada. Também é preciso considerar o estabelecimento de acordos ou convênios patrimoniais, aprovados pelos proprietários de terras. Neste instrumento deve estar prevista a indenização em detrimento das áreas protegidas.

O estabelecimento de áreas protegidas ou unidades de conservação não é, por si só, suficiente para garantir a proteção do carste. A correta gestão deste geossistema exige conhecimentos específicos e interdisciplinares e, na maioria dos países, está em estágio inicial de desenvolvimento. Os órgãos ambientais competentes devem reconhecer a importância deste ambiente e promover o estabelecimento de parcerias com instituições internacionais para aumentar sua própria capacidade^{132, 133, 134}.

125 WATSON et al. (1997).

126 WHITE (1988).

127 KIRÁLY (2002).

128 WATSON et al. (1997).

129 RAVBAR; KOGOVŠEK; PIPAN (2017).

130 WATSON et al. (1997).

131 RAVBAR; KOGOVŠEK; PIPAN (2017).

132 WATSON et al. (1997).

133 RAVBAR; KOGOVŠEK; PIPAN (2017).

134 DCR (1997).

O plano de gestão de áreas cársticas, a nível regional ou local, deve envolver e considerar os interesses de todas as partes interessadas, estando aberto à opinião pública e à revisão contínua ou regular. Sugere-se que o documento aborde, no mínimo, os dados contidos na tabela, a seguir:

REQUISITOS MÍNIMOS PARA A GESTÃO DE ÁREAS CÁRSTICAS
• O diagnóstico e a descrição detalhada da área em estudo
• A identificação dos principais processos atuantes no sistema e a identificação de ameaças ou potenciais fontes poluidoras
• O estabelecimento de resultados (metas) para a proteção da área em questão
• A identificação de princípios e estratégias para o alcance dos resultados esperados
• Os métodos a serem adotados para monitorar a eficácia do plano estabelecido

Fonte: Adaptado a partir de Watson et al. (1997), DCR (1997), Veni et al. (2001) e Cigna e Forti (2013).

É importante ressaltar que os limites das áreas de recarga de água no carste geralmente vão além dos limites das unidades de rocha em que o carste se desenvolveu. Por esse motivo, a rede de drenagem de uma área cárstica pode ser influenciada pela água que vem de outros tipos de terreno.

Existe um grande potencial para a mudança hidrológica nos locais turísticos, desenvolvidos devido à instalação de passarelas, estruturas de entrada, estacionamento e sanitários. Acima de uma caverna, o revestimento do solo com concreto ou asfalto o torna quase impermeável, alterando a natureza permeável do carste. Assim, a água necessária para a formação dos espeleotemas pode ser drasticamente reduzida ou eliminada. O redirecionamento da drenagem pode alterar os padrões de fluxo e favorecer a percolação de água em determinadas áreas de uma caverna que antes não a recebia. Isso causa mudanças na deposição química, bem como morte de fauna. Uma maneira de minimizar esses efeitos é incentivar a construção de áreas de estacionamento com cascalho ou incluir faixas de infiltração e drenagens transversais no design dos estacionamentos, por exemplo. As instalações sanitárias de um empreendimento turístico também podem contaminar o carste por causa dos vazamentos. Uma alternativa a esse problema é a construção cuidadosa de estruturas sanitárias, bem como a utilização de sistemas onde os resíduos são desidratados e podem ser usados posteriormente como fertilizante¹³⁵.

A visitação, mesmo que para fins científicos, pode ter um impacto cumulativo significativo sobre os valores físicos e biológicos, tanto em nível local quanto em nível regional do ambiente cavernícola. Por conseguinte, é necessário preparar e implementar planos de gestão que proporcionem o acesso às cavernas, garantindo a manutenção de limites adequados ao número de visitantes, quando necessário, e instituir práticas de mínimo impacto ou outros meios para proteger o meio ambiente. Os princípios básicos da formulação deste código devem considerar, no mínimo, os itens reunidos na tabela a seguir:

REQUISITOS MÍNIMOS PARA A GESTÃO DE CAVERNAS TURÍSTICAS
• Um consenso entre grupos de usuários e os de gestão, visando o sucesso da prática
• A consolidação de uma documentação sistemática, incluindo a publicação de dados sobre as pesquisas desenvolvidas na região
• A melhor proteção natural para cavernas e o carste é o aumento da consciência dos visitantes individuais, especialmente no que diz respeito ao seu impacto e responsabilidades ambientais
• Os métodos a serem adotados para monitorar a eficácia do plano estabelecido

Fonte: Adaptado a partir de Watson et al. (1997), DCR (1997), Veni et al. (2001) e Cigna e Forti (2013).

A maioria dos impactos envolvendo a exploração mineral no carste envolve a poluição visual e da água, bem como a perda de valores recreativos e de conservação. Os recursos minerais que são ideais para a mineração, são muitas vezes os mais carstificados, e muitas vezes há um forte movimento de conservação.

135 Veni et al. (2001).

REFERÊNCIAS

- ALEY, T.J.; WILLIAMS, J.H.; MASSELLO, J.W. **Groundwater contamination, and sinkhole collapse induced by leaky impoundments in soluble rock terrane**. Missouri: Missouri Department of Natural Resources, 1972 (Engineering Geology Series n. 5).
- ALLEN, A.R.; MILENIC, D. Groundwater vulnerability assessment of the Cork Harbour area, SW Ireland. **Environmental Geology**, v.53, n.3, p.485-492, 2007.
- ANDREYCHOUK, V.; DUBLYANSKY, Y; EZHOV, Y; LYSENIN, G. **Karst in the Earth's Crust: its distribution and principal types**. Poland: University of Silesia/ Ukrainian Academy of Sciences/ Tavrichesky National University-Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009.
- AULER, A.; RUBBIOLI, E.L.; BRANDI, R. **As grandes cavernas do Brasil**. Belo Horizonte: Rona Editora, v. 1, 2001. 230 p.
- AURELI, A. The UNESCO IHP's Shared Aquifer Resources Management Global Project **AQUAmundi**, n.1, p.1-6, 2010
- BARTON, H.A.; NORTHUP, D.E. Geomicrobiology in cave environments: past, current and future perspectives. **Journal of Cave & Karst Studies**, v.69, n.1, p.163-178, 2007.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2016.
- ĆALIĆ, J. **Uvala - Contribution to the Study of Karst Depressions (with selected examples from Dinarides and Carpatho-Balkanides)**. 2009. 213f. Dissertation (Doctorate in Karstology) - University of Nova Gorica, Graduate School, Nova Gorica.
- CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. **Base digital de dados geoespecializados de cavernas do Brasil**. Brasília: ICMBio/CECAV, 2017.
- CHRISTOPHERSON, R.W. **Geossistemas: uma introdução à Geografia Física**. 7.ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- CIGNA, A.A., FORTI, P. Caves: the most important geotouristic feature in the world. **Tourism and Karst areas**, v.6, n.1, p.9-26, 2013.
- COCEAN, P. Environment Threats in Romanian Karst.-In: Proceedings of Speleo Brazil 2001. Brazil, 2001.
- CULVER, D.C.; PIPAN, T. Subterranean Ecosystems. In: LEVIN, S.A. (Ed.) **Encyclopedia of Biodiversity**. 2.ed. Massachusetts: Academic Press, 2013. p.49-62.
- DAOXIAN, Y. **Environmental Change and Human Impact on Karst in Southern China**. Catena: Cremlingen-Destedt, 1993.
- DARWISH, T., KHATER, C., JOMAA, I., STEHOUWER, R., SHABAN, A. AND M. HAMZE. Environmental impact of quarries on natural resources in Lebanon. *Land Degradation & Development*, 22: 345-358. 2011.
- DCR - VIRGINIA DEPARTMENT OF CONSERVATION AND RECREATION. **Living on Karst: a Reference Guide for Landowners in Limestone Regions**. USA: Cave Conservancy of the Virginias, 1997. Disponível em: <<http://www.dcr.virginia.gov/natural-heritage/livingonkarst>>. Acesso em 05 jun 2017.
- DREW, D.; HÖTZL, H. **Karst Hydrology, and Human Activities**. Rotterdam: International Association of Hydrologists, 1999.
- DUCHARME, C.B.; MILLER, T.M. **Water use of Missouri**. Missouri Department of Natural Resources, Division of Geology and Land Survey, 1996.

EVANGELISTA, V.K.; TRAVASSOS, L.E.P. Estratégias para o Geoturismo e Geoconservação no Parque Estadual do Sumidouro, Minas Gerais. **Brazilian Geographical Journal: geosciences and humanities research medium**, v. 6, p. 67-97, 2015b.

EVANGELISTA, V.K.; TRAVASSOS, L.E.P. Geotourism and Geoconservation at The Sumidouro State Park Minas Gerais Brazil. **ACKMA Journal**, v. 99, p. 11-20, 2015a.

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

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

GALO; D. de B.; GAMA JÚNIOR, N.A. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2016. p.36-37.

GAMMONS, C.H.; MILODRAGOVICH, L.; BELANGER-WOODS, J. Influence of diurnal cycles on metal concentrations and loads in streams draining abandoned mine lands: an example from High Ore Creek, Montana. **Environmental Geology**, v.53, n.3, p. 611-622, 2007.

GILLMAN, J.; DULEY, B. Living with limestone: Missouri, USA. **Carbonates Evaporites**, v.28, p.243-249, 2013.

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

GROTZINGER, J.; JORDAN, T. **Para Entender a Terra**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

GUARESCHI, V. D.; NUMMER, A. V. Relevos cársticos em rochas não calcárias: uma revisão de conceitos. In: FIGUEIREDO, L. C.; FIGUEIRÓ, A. S. (Org.). **Geografia do Rio Grande do Sul: Temas em debate**. Santa Maria: UFSM, 2010. p.183-194.

GUERRA, A.T.; GUERRA, A.J.T. **Novo Dicionário Geológico/Geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997

GUO, F.; JIANG, G.; YUAN, D. Major ions in typical subterranean rivers and their anthropogenic impacts in southwest karst areas, China. **Environmental Geology**, v.53, n.3, p. 533-541, 2007.

IVÁN, V.; MÁDL-SZOŃYI, J. State of the art of karst vulnerability assessment: overview, evaluation, and Outlook. **Environment Earth Science**, v.76, n.3. p.112, 2017.

JANSEN, D.C; CAVALCANTI, L.F. LAMBLÉM, H.S. Mapa de Potencialidade de Ocorrência de Cavernas no Brasil, na escala 1:2.500.000. **Revista Brasileira de Espeleologia**, Brasília, v.2, n.1, p.42-57, 2012

JENNINGS, J. N. **Karst Geomorphology**. New York: Basil Blackwell Inc., 1985.

KARMANN, I. Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, Wilson et al. (Org.). **Decifrando a terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L.E. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. **Revista Espeleotema**, v.13, p.105-167, 1979.

KARMANN, I.; SÁNCHEZ, L.E. Speleological provinces in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY, 9, 1986, Barcelona. **Anais...** Barcelona: International Union of Speleology (UIS), 1986. p.151-153.

KARMMAN, I. **Evolução Dinâmica Atual do Sistema Cárstico do Alto Vale do Ribeira de Iguape, Sudeste do Estado de São Paulo**. 1994. 228f. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo.

- KIRÁLY, L. Karstification, and groundwater flow. In: GABROVŠEK, F. (ed.) **Evolution of karst: from prekarst to cessation**. Ljubljana: ZRC Publishing, 2002. p.155-190.
- KLIMCHOUK, A. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes, and variants of geomorphic evolution. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, Czech Republic, v.2, n. 1, 2004.
- KOVAČIČ, G. The Protection of Karst Aquifers: the Example of the Bistrica Karst Spring (SW Slovenia). **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.32, n.2, 219-234, 2003.
- KULAIF, Y.; RECUERO, C. Brita e Cascalho. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2016. p.34-35.
- KUMAR, M. et al. A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India. **Environmental Geology**, v. 53, n. 3, p. 553-574, 2007.
- Langer, W. Potential Environmental Impacts of Quarrying Stone in Karst - A Literature Review. U.S. Geological Survey (USGS), Version 1.0, 39p. 2002
- LLADÓ, N.L. El aparato cárstico. In: LLADÓ, N. L. **Fundamentos de Hidrogeologia Carstica** (introducción a la geo-espeleología). Madrid, 1970.
- LOBO, A.S.L.; PERINOTTO, J.A.J.; BOGGIANI, P.C. Espeleoturismo no Brasil: panorama geral e perspectivas de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ecoturismo**, São Paulo, v.1, n.1, p.62-83, 2008.
- LOBO, H.A.S.L.; SALLUN FILHO, W.; VERÍSSIMO, C.U.V.; TRAVASSOS, L.E.P.; FIGUEIRE-DO, L.A.V. de; RASTEIRO, M.A. 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**. Brasília: Ministério do Turismo, 2010. p. 35-58.
- MACEDO NETO, F.; RIBEIRO, L.C.B. Paleontologia. In: SANCHÉZ, L.H.; LOBO, H.A. (Orgs.). **Guia de boas práticas ambientais na mineração de calário em áreas cársticas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016.
- MACHADO, P.J.de O.; TORRES, F.T.P. **Introdução à Hidrogeografia**. São Paulo: Cengage Learning, 2012
- MARFAI, M.A.; KING, L. Monitoring land subsidence in Semarang, Indonesia. **Environmental Geology**, v.53, n.3, p. 651-659, 2007.
- MARTINS JÚNIOR, F.L. Calcário agrícola. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2016. p.38-39.
- MENEGASSE, L.N.; GONÇALVES, M.J.; FANTINEL, L.M. Disponibilidades Hídricas na Província Cárstica de Arcos-Pains-Doresópolis, Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**. São Paulo: São Paulo, 2002
- MIRANDA, R.A.C. de; OLIVEIRA, M.V.S.de; SILVA, D.F. da. Ciclo Hidrológico Planetário: Abordagens e Conceitos. **GeoUERJ**, v.1, n.1, p.109-119, 2010.
- PALMER, A.N. **Geología de Cuevas**. Dayton: Cave books, 2012.
- PARISE, M.; PASCALI, V. Surface and subsurface environmental degradation in the karst of Apulia (southern Italy). **Environmental Geology**, v.44, p.247-256, 2003
- PARISE, M. Hazards in karst.-In: Bonacci, O. (ed.). Sustainability of the karst environment: Dinaric karst and other karst regions. International Interdisciplinary Scientific Conference, Croatia, 185 p. 2009.

- PETRIČ, M.; RUBINIĆ, J. Specifics of Karst Hydrology. In: HAJNA, N.Z. et al. (Ed.) **LIFE and water on Karst: monitoring of transboundary water resources of Northern Istria**. Ljubljana: Založba ZRC, 2017. p.16-22
- PILÓ, L. B. Geomorfologia Cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.1, n.1, p.88-102, 2000.
- PIPAN, T.; CULVER, D.C. Forty years of epikarst: what biology have we learned? **International Journal of Speleology**, v.42, n.3, p.215-223, 2013.
- QUEIROZ FILHO, A. de A.; AMORIM NETO, A.A.; DANTAS, J.O.C. Cimento. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Sumário Mineral**. Brasília: DNPM, 2016. p.46-47.
- RAVBAR, N.; GOLDSCHIEDER, N. Comparative application of four methods of groundwater vulnerability mapping in a Slovene karst catchment. **Hydrogeology Journal**, v.17, n.3, p.725-733, 2009.
- RAVBAR, N.; GOLDSCHIEDER, N. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia. **Acta carsologica**, v.36, n.3, p. 397-411, 2007.
- RAVBAR, N.; KOGOVSĚK, J.; PIPAN, T. Environmental value, and vulnerability of karst resources. In: HAJNA, N.Z. et al. (Ed.) **LIFE and water on Karst: monitoring of transboundary water resources of Northern Istria**. Ljubljana: Založba ZRC, 2017. p.23-34.
- RAVBAR, N.; ŠEBELA, S. The effectiveness of protection policies and legislative framework with special regard to karst landscapes: Insights from Slovenia. **Environmental Science & Policy**, v.51, p.106-116, 2015.
- RODRIGUES, M. L. Classificação e tipologia dos lapiás. Contributo para uma terminologia das formas cársticas. **Finisterra**, v.47, n.93, p.147-158, 2012.
- RODRIGUES, M. L.; CUNHA, L.; RAMOS, C.; PEREIRA, A. R.; TELES, V.; DIMUCCIO, L. **Glossário ilustrado de termos cársticos**. Lisboa: Edições Colibri, 2007.
- SALLUN FILHO, W. Subsidiência e colapso em terrenos cársticos. In: TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosângela do (Orgs.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p.99-110.
- SANTOS, R.A., CRUZ, M.J., NASCIMENTO, S.A. **Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos Cársticos: Subsídios para uma Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos**. **Cadernos de Geociências**, v.7, n.1, p.52-63, 2010.
- SHERWOOD, S.; SIMEK, J. Cave Archaeology in the Eastern woodlands. **Midcontinental Journal of Archaeology**, v.26, n.2, p.135-137, 2001
- STRAHLER; STRAHLER, A.N. **Introducing Physical Geography**. 2.ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1997
- ŠUŠTERŠIČ, F. Are collapse dolines formed only by collapse? **Acta Carsologica**, Ljubljana, v.29, n.2, p.213-230, 2000.
- THOMPSON, G.R.; TURK, J. **Earth Science and the Environment**. 2.ed. Nova York (EUA): Harcourt Brace and Company, 1999.
- TIMO, M.B. **Mapeamento geomorfológico da região Cárstica do Córrego do Cavalo, Piumhi (MG)**. 2014. 133f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Belo Horizonte
- TIMO, M.B.; TRAVASSOS, L.E.P.; VARELA, I.D. Espeleologia no Licenciamento Ambiental. Belo Horizonte: Instituto Minere, 2017. (Apostila para o Curso de Espeleologia e Licenciamento Ambiental)

TRAJANO, E.; BICHUETTE, M. E. **Biologia subterrânea**: introdução. São Paulo: Redespeleo, 2006.

TRAVASSOS, L.E.P. **Considerações sobre o carste da região de Cordisburgo, Minas Gerais, Brasil**. Belo Horizonte: Tradição Planalto, 2010.

TRAVASSOS, L.E.P. **A importância cultural do carste e das cavernas**. 2010a. 373f. Tese (Doutorado em Geografia), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Disponível em <<http://pct.capes.gov.br/teses/2010/32008015003P4/TES.PDF> >. Acesso em 30 abr. 2017.

VALENTE, O.F.; GOMES, M.A. **Conservação de Nascentes**: hidrologia e manejo de bacias hidrográficas de cabeceiras. Viçosa: Aprenda Fácil, 2005.

VARELA, I.D. **Meio ambiente e direito à saúde: uma análise da disposição de resíduos sólidos urbanos no carste de Minas Gerais**. 2017. 230f. Tese (Doutorado em Geografia) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Belo Horizonte.

VENI, G. et al. Living with Karst: a fragile foundation. Alexandria: American Geological Institute, 2001.64p.

WANG, Y. et al. Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. **Environmental Geology**, v.53, n.3, p.479-484, 2007.

WATSON, J.; HAMILTON-SMITH, E.; GILLIESON, D.; KIERNAN, K. (Eds.) Guidelines for cave and karst protection. Gland, Switzerland, and Cambridge: IUCN, 1997.

WHITE, W.B. **Geomorphology, and hydrology of karst terrains**. New York: Oxford University Press, 1988.

WHITE, W.B. Karst hydrology: recent developments and open questions. **Eng. Geol.**, v.65, p.85-105, 2002

WHITE, W.B.; CULVER, D.C. (Ed.). **Encyclopedia of Caves**. 2ed. London: Elsevier Academic Press, 2012.

WILLIAMS, P.W. **Environmental Change and Human Impact on Karst Terrains: An Introduction**. Catena, Cremlingen-Destedt, xvi + 268 p. 1993.

WITKOWSKI, A. J. Groundwater vulnerability assessment and mapping important current issues in groundwater protection. **Environmental Geology**, v.53, n.3, p. 477-478, 2007.



MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

