

GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA: A TRANSFORMAÇÃO E O DINAMISMO DA PAISAGEM

KARST GEOMORPHOLOGY: The Transformation and Dynamism of the Landscape

Luiz Eduardo Panisset Travassos

Doutor em Geografia e Doutor em Carstologia

Professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Geografia da PUC Minas, Brasil

Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq

luizepanisset@gmail.com

Resumo

A geomorfologia cárstica constitui um campo essencial da geografia física que é marcado pela interação entre processos naturais e a presença humana. Este trabalho, desenvolvido a partir de uma conferência apresentada no encerramento do SINAGEO 2025, discute a transformação e o dinamismo das paisagens cársticas, articulando dimensões científicas, ambientais e culturais. O carste é compreendido não apenas como resultado da dissolução de rochas carbonáticas e de outras litologias, mas também como um sistema complexo que integra geologia, hidrologia, ecologia e sociedade. O texto recupera a presença do carste no imaginário cultural, desde a pré-história até as representações literárias e artísticas, além de destacar os primeiros registros cartográficos e a contribuição de autores clássicos da Carstologia. São analisadas as principais feições morfológicas, das nanoformas às macroformas, com ênfase em dolinas, uvalas, poljes e condutos subterrâneos. A água é abordada como agente morfodinâmico e morfogenético, com destaque para a relevância estratégica dos aquíferos cársticos, que abastecem cerca de 25% da população mundial. Por fim, discute-se a relação entre carste e sociedade, abrangendo os usos agrícolas, os riscos urbanos e o valor patrimonial e turístico das paisagens cársticas. A síntese reforça a individualidade, a heterogeneidade e a imprevisibilidade desses sistemas, reafirmando a máxima: “Espere o inesperado no carste”.

Palavras-chave: Carste; Geomorfologia; Paisagem.

Abstract

The karst geomorphology is a key field in physical geography, characterized by the interaction between the natural processes and the human presence. This paper, derived from a lecture delivered in the closing session of SINAGEO 2025, discusses transformation and the dynamism of karst landscapes, integrating the scientific, environmental, and cultural dimensions. Karst is not merely the result of carbonate rock dissolution or other soluble lithologies but also a complex system that brings geology, hydrology, ecology, and society together. This study revisits the cultural significance of the karst from prehistory to its representation in literature and art, highlighting early cartographic records and the contributions of classical karstology authors. The main landforms are analyzed, from nanoforms to macroforms, with emphasis on dolines, uvalas, poljes, and underground conduits. Water is presented as the central morphodynamic and morphogenetic agent, underscoring the strategic importance of karst aquifers, which supply nearly 25% of the world's population. It ends by exploring the relationship between karst and society and addressing agricultural practices, urban risks, and the patrimonial and touristic value of karst landscapes. The synthesis emphasizes individuality, heterogeneity, and unpredictability as defining features of karst systems, and reaffirms the principle: “Expect the unexpected from karst.”

Keywords: Karst; Geomorphology; Landscape.

1. INTRODUÇÃO

A geomorfologia cárstica ocupa um lugar de destaque na ciência por sua capacidade de revelar processos dinâmicos e complexos que moldam o relevo terrestre. Segundo Ford e Williams (2007), os sistemas cársticos resultam da interação entre litologia, hidrologia e clima, o que os torna modelos privilegiados para compreender processos geomorfológicos dinâmicos.

Estudar o carste é estudar a transformação contínua da paisagem, mediada sobretudo pela ação da água em contato com rochas altamente solúveis, mas também, em muitos casos, por outras litologias suscetíveis à dissolução e à erosão diferencial. Do ponto de vista conceitual, é importante destacar que o carste opera como um sistema integrado de transferência de massa e energia, no qual a dissolução não é um “evento pontual”, mas um processo cumulativo que reorganiza a conectividade hidráulica e a arquitetura de poros e fraturas continuamente. Consequentemente, a evolução do relevo cárstico combina tempos longos (formação de grandes depressões e redes de condutos) com respostas rápidas (mudanças abruptas no fluxo subterrâneo, colapsos e reativações de condutos), o que reforça o caráter dinâmico e, muitas vezes, não linear desses ambientes.

Essa perspectiva ajuda a compreender o porquê do carste ser um laboratório natural privilegiado: nele, a relação entre formas e processos é frequentemente mais direta do que em outros sistemas geomorfológicos; é também, mais heterogênea no espaço, pois pequenas diferenças litológicas, estruturais ou hidrológicas podem produzir contrastes morfológicos marcantes em curtas distâncias. Assim, a leitura geomorfológica do carste exige atenção simultânea à superfície e ao subterrâneo, articulando evidências morfológicas ao funcionamento hidrogeológico.

O encerramento do XV Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO), em 2025, ofereceu a oportunidade de se revisitar a trajetória histórica, científica e cultural do estudo do carste e reafirmar a sua importância para a compreensão dos sistemas naturais e da sua interface com a sociedade.

O carste não deve ser compreendido apenas como um fenômeno físico de dissolução da rocha, mas como um sistema complexo de múltiplas dimensões, no qual fatores geológicos, hidrológicos, ecológicos e culturais se articulam. Nesse enquadramento, o objetivo do texto é explicitar como a transformação e o dinamismo do carste decorrem de três eixos complementares: (i) a natureza sistêmica da carstificação, que integra recarga, circulação subterrânea e descarga; (ii) a produção multiescalar de formas, das microfeições

de dissolução aos grandes compartimentos morfoestruturais; e (iii) a interface sociedade-carste, na qual uso do solo, ocupação urbana e exploração econômica podem intensificar riscos e vulnerabilidades, sobretudo em função da sensibilidade hidrogeológica do sistema.

A recuperação de dimensões históricas e culturais também reforça que o carste não é apenas uma categoria físico-natural, mas uma paisagem com valor simbólico e patrimonial, o que implica desafios específicos de gestão: conciliar abastecimento hídrico, segurança territorial, conservação e usos turísticos em um contexto de alta variabilidade ambiental. Assim, oferecemos uma visão abrangente da transformação e do dinamismo da paisagem cárstica, indo da sua representação na cultura e no imaginário humanos até a sua relevância na gestão dos recursos naturais e na sustentabilidade.

2. O CARSTE NO IMAGINÁRIO CULTURAL E NA PRÉ-HISTÓRIA

Desde tempos remotos, as cavernas e as paisagens cársticas desempenharam papéis centrais na cultura humana. Na Pré-História, os abrigos rochosos serviram como morada, espaço ritual e suporte à arte rupestre, constituindo os primeiros registros da interação entre o homem e o ambiente cárstico. Estudos arqueológicos confirmam que, em diversas culturas, as cavernas funcionaram, simultaneamente, como abrigo e como espaço simbólico, revelando a importância do carste para a construção de imaginários coletivos (Travassos, 2011; De Waele; Gutiérrez, 2022). Exemplos disso podem ser observados em diversas regiões do mundo, incluindo na Europa mediterrânea, no norte da África e na Ásia. Casas-cavernas, como as de Matmata, na Tunísia, revelam a adaptação humana a um ambiente geológico específico, em que a escavação de espaços subterrâneos proporcionava proteção climática e segurança (Figura 1).



Figura 1: À esquerda, a paisagem árida de Matmata (Tunísia) e à direita, entrada de uma casa troglodita.
Fonte: Acervo do autor.

Além da função de abrigo, o subterrâneo tende a operar como um “marcador” de alteridade na experiência humana: um espaço que reconfigura a percepção, a orientação e a temporalidade. Essas condições sensoriais e espaciais contribuem para que cavernas e paisagens cársticas sejam, recorrentemente, lugares de rito, passagem e memória, atravessando diferentes formações culturais. A dimensão simbólica, portanto, não é um “acréscimo” externo ao carste, mas uma das formas pelas quais a sociedade atribui sentido e valor a uma geografia marcada por vazios, sombras e água “invisível”.

Essa leitura cultural também se conecta ao presente: quanto mais uma paisagem é investida de sentido, maior tende a ser o seu potencial de mobilização social em torno da conservação, do turismo e do patrimônio. Em áreas cársticas, isso é particularmente relevante, pois a mesma caverna pode ser, simultaneamente, arquivo arqueológico, reservatório hídrico, atrativo turístico e referência identitária, ou seja, há sobreposições que demandam mediação e gestão cuidadosas.

A presença das cavernas na vida humana, como abrigos naturais e espaços de produção simbólica, remonta às primeiras ocupações do Pleistoceno. Os registros rupestres encontrados em locais como Chauvet e Lascaux (França) ou Altamira (Espanha) revelam a associação do ambiente subterrâneo a rituais, caça e mitologias. No Brasil, exemplos significativos estão na Serra da Capivara (PI) e na região de Lagoa Santa (MG), onde Peter Wilhelm Lund identificou não apenas fósseis da megafauna, mas também vestígios da presença humana antiga.

Na arte clássica e medieval, a caverna simboliza tanto um refúgio quanto uma ameaça. O subterrâneo era visto como um espaço liminar entre a vida e a morte, entre o humano e o divino. Ao longo da história, poetas e artistas evocaram essas paisagens como metáforas do inconsciente, do sagrado e do proibido.

O carste também foi incorporado à produção artística e literária. Em sua obra “A Divina Comédia”, Dante Alighieri descreve o inferno como um grande abismo, com Satanás aprisionado no gelo da zona central do nono círculo — uma metáfora espacial que remete ao poder do subterrâneo. As ilustrações de Gustave Doré deram vida a essa imagem. Já Leonardo da Vinci, em sua pintura “Virgem das Rochas”, evidencia a presença simbólica e estética das cavernas na tradição renascentista, associando o ambiente cárstico a elementos de sacralidade (Figura 2).

No século XX, o imaginário da fantasia popularizou o subterrâneo, ainda mais, como espaço de aventura, mistério e transformação. Obras como “O Senhor dos Anéis”, de J.R.R. Tolkien, e filmes da saga “Star Wars” evocam cenários cavernosos que remetem ao carste

como metáfora da luta interna e coletiva. Essas representações revelam como a paisagem cárstica se insere não apenas no campo físico, mas também no simbólico, como um território de projeções culturais e representações.

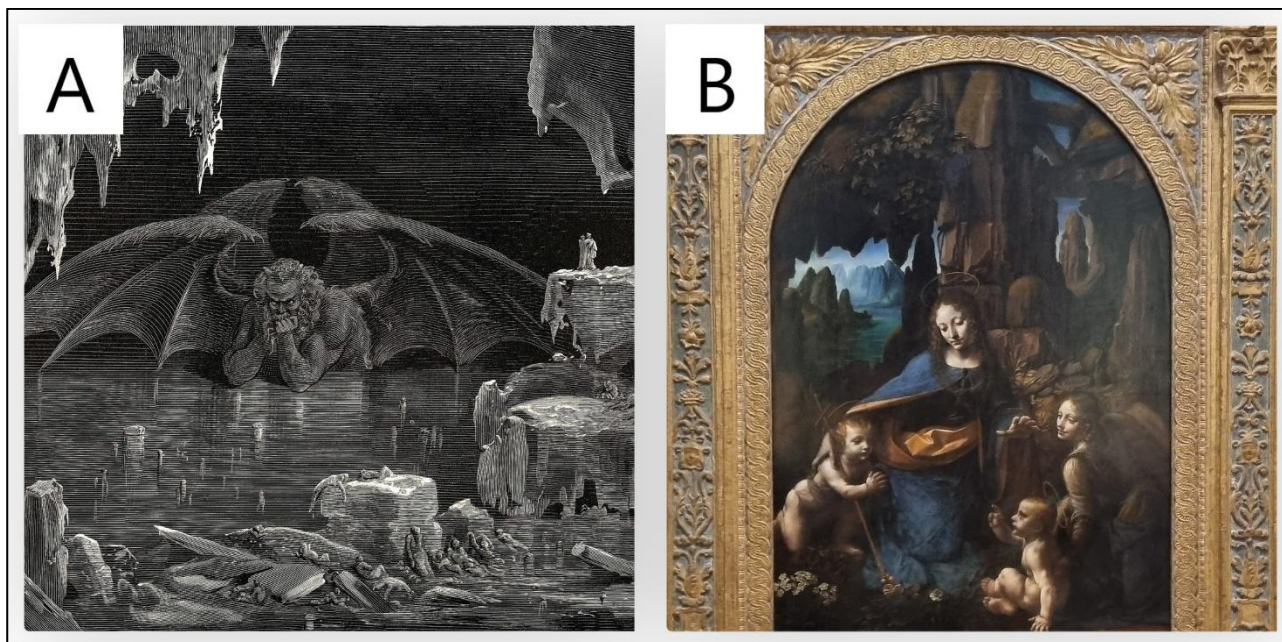


Figura 2: Representações do subterrâneo na iconografia ocidental: (A) Gravura de Gustave Doré, ilustrando “O Inferno de Dante” ambientado em uma caverna, com presença de espeleotemas (estalactites) e um lago subterrâneo (Fonte: Domínio Público). (B) Cena sacra, ambientada em uma gruta como espaço de proteção e espiritualidade, na obra “A Virgem das Rochas”, de Leonardo Da Vinci (Foto: Acervo do autor).

Dessa forma, o imaginário do carste funciona como uma “porta de entrada” para a própria consolidação do interesse científico: o que primeiro aparece como mistério, refúgio ou ameaça, mais tarde se converte em objeto de descrição sistemática, classificação e explicação causal. Essa passagem do simbólico ao científico não elimina o valor cultural do carste; ao contrário, amplia o repertório de leituras possíveis e reforça a ideia de que a compreensão geomorfológica ganha densidade quando reconhece que paisagens também são construções históricas, afetivas e políticas.

3. PRIMEIROS REGISTROS CARTOGRÁFICOS E FUNDADORES DA CARSTOLOGIA

A consolidação científica do carste tem raízes nos séculos XVI e XIX. Um marco inicial é o mapa *Nova descriptione del Friuli* (1563), no qual já era possível identificar a expressão *il charso* (Figura 3). Esse registro cartográfico demonstra que a paisagem cárstica do planalto de Kras (ou Carso), na atual fronteira entre Eslovênia e Itália, já despertava interesse por suas peculiaridades. Esse registro é mais do que uma curiosidade

terminológica: ele indica que, já no século XVI, a paisagem do Carso se destacava por sua “anomalia hidrológica” — a ausência de drenagem superficial contínua e a predominância de infiltração e ressurgências — e por uma morfologia marcada por depressões, campos pedregosos e cavernas. Nesse sentido, a cartografia antecipa um ponto central da carstologia: a necessidade de representar, ao mesmo tempo, o visível (formas superficiais) e o funcional (rotas subterrâneas da água), algo que permanece como um desafio metodológico até hoje.

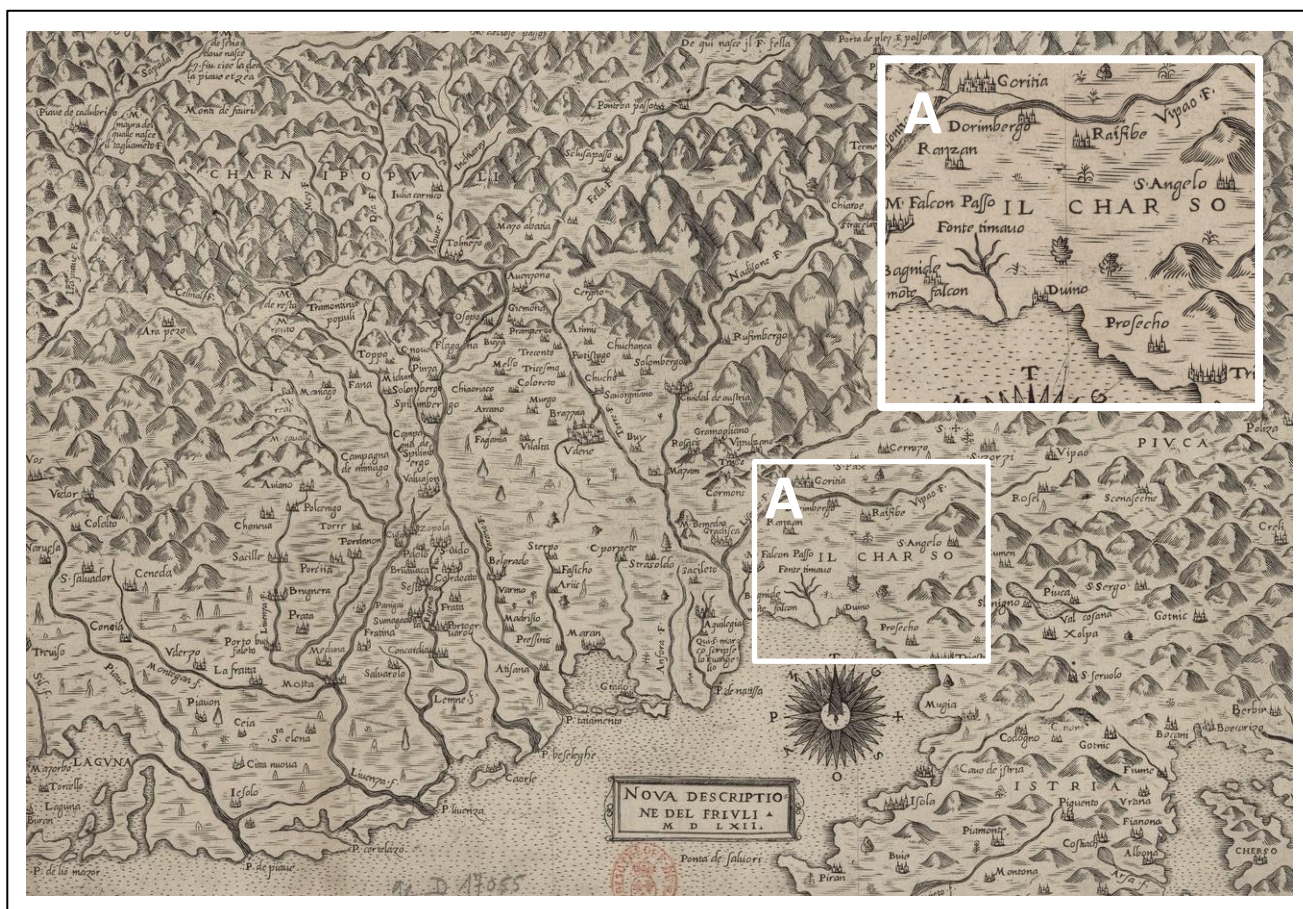


Figura 3: *Nova descriptione del Friuli* (Friuli, Ducado do Friul). [Camocio], 1562. Mapa em latim. Escala aprox. 1:540.000. 1 folha (390 × 275 mm).

Fonte: Bibliothèque nationale de France (BnF), Département Cartes et plans, GE D-17055.

No século XIX, o estudo sistemático da carstologia foi consolidado por figuras de destaque como:

- Édouard-Alfred Martel, considerado o pai da espeleologia moderna, responsável por expedições pioneiras em cavernas europeias;
- Albrecht Penck e Friedrich Katzer, que avançaram no entendimento geomorfológico e geológico do carste;

- Jovan Cvijić, cuja obra *Das Karstphänomen* (1893) marcou a primeira grande monografia geográfica sobre o tema. Suas conferências na Sorbonne contribuíram para consolidar a Carstologia como disciplina científica;
- Albrecht Grund, que reforçou as bases geomorfológicas da classificação cárstica.

As contribuições desses autores podem ser lidas como a constituição de um “duplo fundamento” para a carstologia moderna. De um lado, a exploração e a documentação do subterrâneo, com procedimentos de observação direta, registro e sistematização de percursos, que consolidam a espeleologia como prática científica. De outro, a construção de um vocabulário geomorfológico capaz de descrever e comparar formas e processos, articulando morfologia, estrutura geológica e circulação hídrica em um mesmo quadro interpretativo.

Esse movimento também redefine o carste como um objeto propriamente geográfico: não apenas um conjunto de cavidades naturais subterrâneas, mas uma paisagem com organização espacial, dinâmica e regionalização possível, na qual as relações entre superfície e subsuperfície são essenciais para compreender o relevo, a água e a ocupação humana. Cvijić é particularmente importante porque rompeu com as explicações místicas sobre o carste e o apresentou como um fenômeno geográfico a ser estudado cientificamente. A sua obra de 1893 é, até hoje, considerada um marco de fundação da disciplina, tanto pela descrição morfológica quanto pela tentativa de compreender os mecanismos hidrológicos.

Martel, por sua vez, deu corpo à exploração espeleológica como ciência. As suas expedições às cavernas francesas, inglesas e espanholas sistematizaram a prática de penetrar no subterrâneo não apenas como aventura, mas também como metodologia de pesquisa. O carste foi reconhecido como um fenômeno geográfico singular, resultado da interação entre a litologia, o clima, a estrutura geológica e a dinâmica hidrológica, e esses autores definiram conceitos fundamentais que perduram até hoje.

4. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

A geomorfologia cárstica baseia-se na ação da água, como agente químico e físico, capaz de dissolver rochas e de gerar uma série de formas de relevo superficiais e subterrâneas. Em termos de processo, a carstificação pode ser entendida como a construção progressiva de caminhos preferenciais para a água: a dissolução amplia descontinuidades (e.g. juntas, fraturas e planos de estratificação), e essa ampliação, por

sua vez, aumenta a eficiência hidráulica do sistema, reforçando a concentração do fluxo e realimentando a própria dissolução. Assim, a hidrologia não é apenas “resposta” do carste; é um dos mecanismos que produzem a morfologia, selecionando trajetórias subterrâneas e definindo onde haverá maior capacidade de erosão química, colapso e deposição.

Essa lógica ajuda a explicar por que sistemas cársticos são altamente heterogêneos, mas coexistem: zonas de circulação lenta e difusa com condutos de fluxo rápido coexistem; áreas de armazenamento com rotas preferenciais de transporte; e setores em diferentes estágios evolutivos, nos quais condutos ativos podem conviver com galerias fósseis e níveis abandonados.

O sistema cárstico pode ser compreendido a partir de quatro grandes conjuntos de formas. Ford e Williams (2007) detalham as categorias recarga, descarga, acumulação e formas residuais como eixos centrais para a interpretação da organização dos sistemas cársticos (Figura 4). As formas de recarga correspondem às zonas onde a água penetra no sistema, seja de forma difusa, infiltrando-se por fissuras e fraturas, seja de forma concentrada, através de sumidouros ou condutos. Já as formas residuais resultam da dissolução diferencial das rochas, dando origem a feições, como torres, que se destacam na paisagem pela resistência relativa ao processo de carstificação.

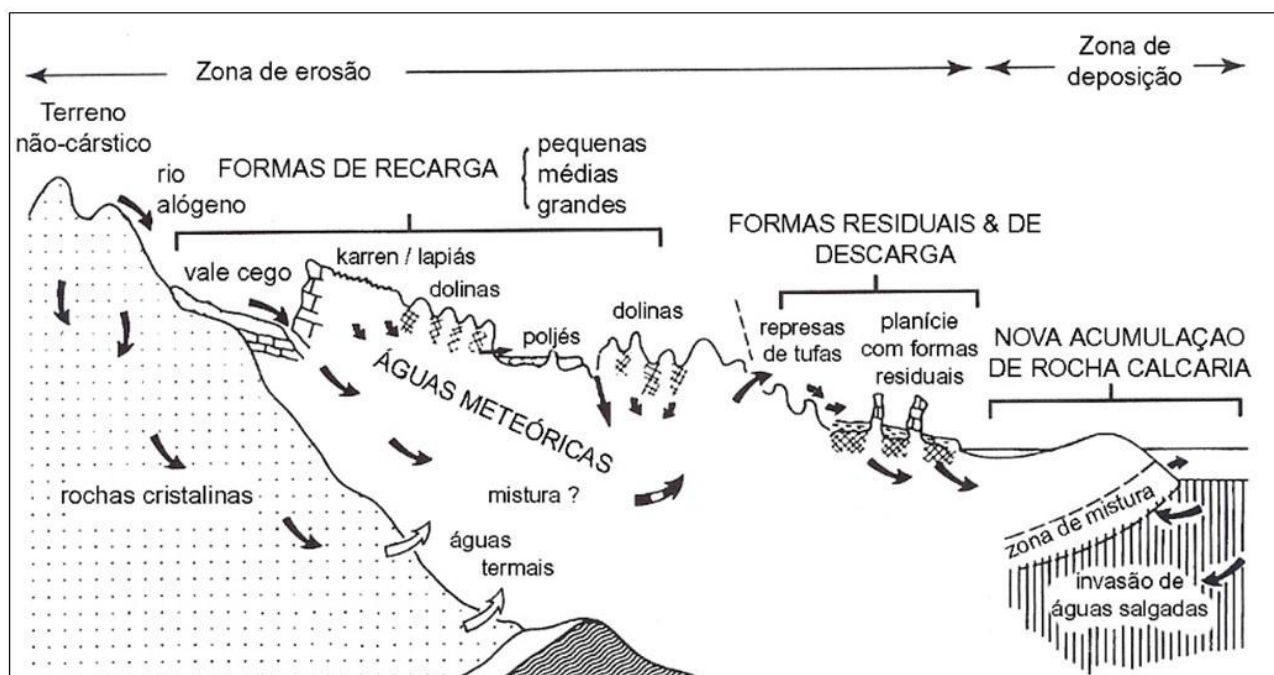


Figura 4: O complexo sistema cárstico com a circulação da água, bem como as feições de superfície divididas em forma de recargas residuais, descarga e acumulação.

Fonte: Adaptado de Ford e Williams (2007, p. 3).

As formas de descarga representam os locais das nascentes da água subterrânea, expressas por surgências e ressurgências que marcam os pontos de retorno da circulação hídrica à superfície. Por fim, as formas de acumulação correspondem a depósitos de sedimentos ou de minerais que se formam em decorrência da própria dinâmica interna do sistema, como ocorre com os espeleotemas no ambiente subterrâneo.

De acordo com Veress (2020, p. 632), a classificação de áreas cársticas deve considerar múltiplos fatores, como a geologia e o clima, a fim de enquadrar uma região em um ou mais tipos de carste. Essa abordagem facilita o estudo teórico e prático, permitindo compreender a diversidade interna das paisagens cársticas.

A geomorfologia cárstica, além da dissolução e da precipitação, caracteriza-se também por fenômenos de erosão mecânica, colapso e subsidência. A dualidade entre condutos ativos e fósseis cria sistemas subterrâneos complexos, muitas vezes com múltiplas gerações de cavernas sobrepostas. Uma implicação geomorfológica direta é que a paisagem cárstica “incorpora” descontinuidades e heranças: variações do nível de base, mudanças climáticas e reorganizações da drenagem podem reativar condutos, capturar fluxos ou promover abandono de níveis subterrâneos. Desse modo, a evolução do carste frequentemente se expressa como uma superposição de gerações morfológicas, nas quais formas atuais registram tanto processos atuais quanto fases pretéritas de funcionamento hidrológico.

5. A ESCALA DAS FEIÇÕES CÁRSTICAS

A variedade de feições cársticas é ampla e pode ser classificada de acordo com a sua dimensão, considerando-se o menor destes três parâmetros: comprimento, largura ou profundidade. De Waele e Gutiérrez (2022) ressaltam que a classificação por meio de escalas é essencial para distinguir processos locais de processos regionais, facilitando a análise comparativa entre diferentes áreas cársticas. Sendo assim, distinguem-se diferentes escalas morfológicas: as “nanoformas” correspondem a estruturas menores do que 1 milímetro, perceptíveis apenas em detalhes muito pequenos da superfície rochosa; as “microformas” têm dimensões entre 1 milímetro e 1 centímetro, enquanto as “pequenas formas” variam de 1 centímetro a 1 metro. Em uma escala intermediária, as “mesoformas” ocupam a faixa entre 1 metro e 100 metros, englobando feições bastante comuns em áreas cársticas. Por fim, as “macroformas” são aquelas que ultrapassam 100 metros, podendo atingir vários quilômetros de extensão e configurar os elementos mais expressivos da

paisagem cárstica. Essa classificação tem valor didático e metodológico, permitindo que pesquisadores e estudantes compreendam a escala de atuação dos processos cársticos.

A leitura por escalas não é apenas classificatória; ela orienta hipóteses sobre controle de processo. Em geral, as feições menores tendem a responder mais diretamente a condições imediatas (e.g. chuva, cobertura de solo, microambiente químico e exposição), enquanto as feições de maiores expressam controles estruturais e hidrogeológicos mais amplos, como padrões de fraturamento, compartimentação do relevo e integração regional da drenagem subterrânea. Por isso, uma análise robusta do carste combina observações “de detalhe” (microformas), com interpretação do arranjo espacial e funcional do sistema (macroformas), evitando reduzir a paisagem a um inventário de formas desconectadas.

6. PRINCIPAIS FORMAS DO RELEVO CÁRSTICO

Entre as formas superficiais de dissolução em pequena escala, destacam-se os *karren* e as *kamenitzas*, caracterizados por sulcos, ranhuras e depressões rasas que se desenvolvem no topo das rochas carbonáticas. Essas feições resultam da ação direta da água sobre superfícies expostas, servindo como evidências imediatas da interação entre a precipitação e a dissolução química do carbonato (Figura 5).

Do ponto de vista interpretativo, essas microfeições são particularmente úteis porque funcionam como “indicadores de processo”: expressam a direção do escoamento, a permanência da umidade e os padrões de dissolução diferencial, permitindo inferir as condições locais de carstificação e até as mudanças recentes no regime hídrico superficial. Em trabalhos de campo, a associação entre essas formas e a cobertura pedológica/vegetal também ajuda a discutir o papel do CO₂ do solo e da infiltração concentrada na intensificação da dissolução.

Em uma escala maior, encontram-se as dolinas, depressões fechadas típicas das paisagens cársticas. Elas podem ter origem em diferentes processos, como a dissolução, o colapso ou a subsidência. As dolinas são reconhecidas como feições entre as mais versáteis do relevo cárstico, podendo surgir tanto por dissolução natural quanto por ação antrópica, especialmente em áreas urbanizadas (Stevanović, 2019). Modelos conceituais elaborados por Waltham e Fookes (2003) contribuíram para sistematizar sua classificação por mecanismos genéticos, ao mesmo tempo em que destacaram a complexidade da evolução e a diversidade tipológica dessas feições. Além da gênese natural, as dolinas também podem ser induzidas pela ação humana, com registros de grandes colapsos em

áreas urbanas em diversas partes do mundo. Estudos recentes apontam, ainda, para a ocorrência de dolinas associadas à mineração e ao bombeamento intensivo de água subterrânea.

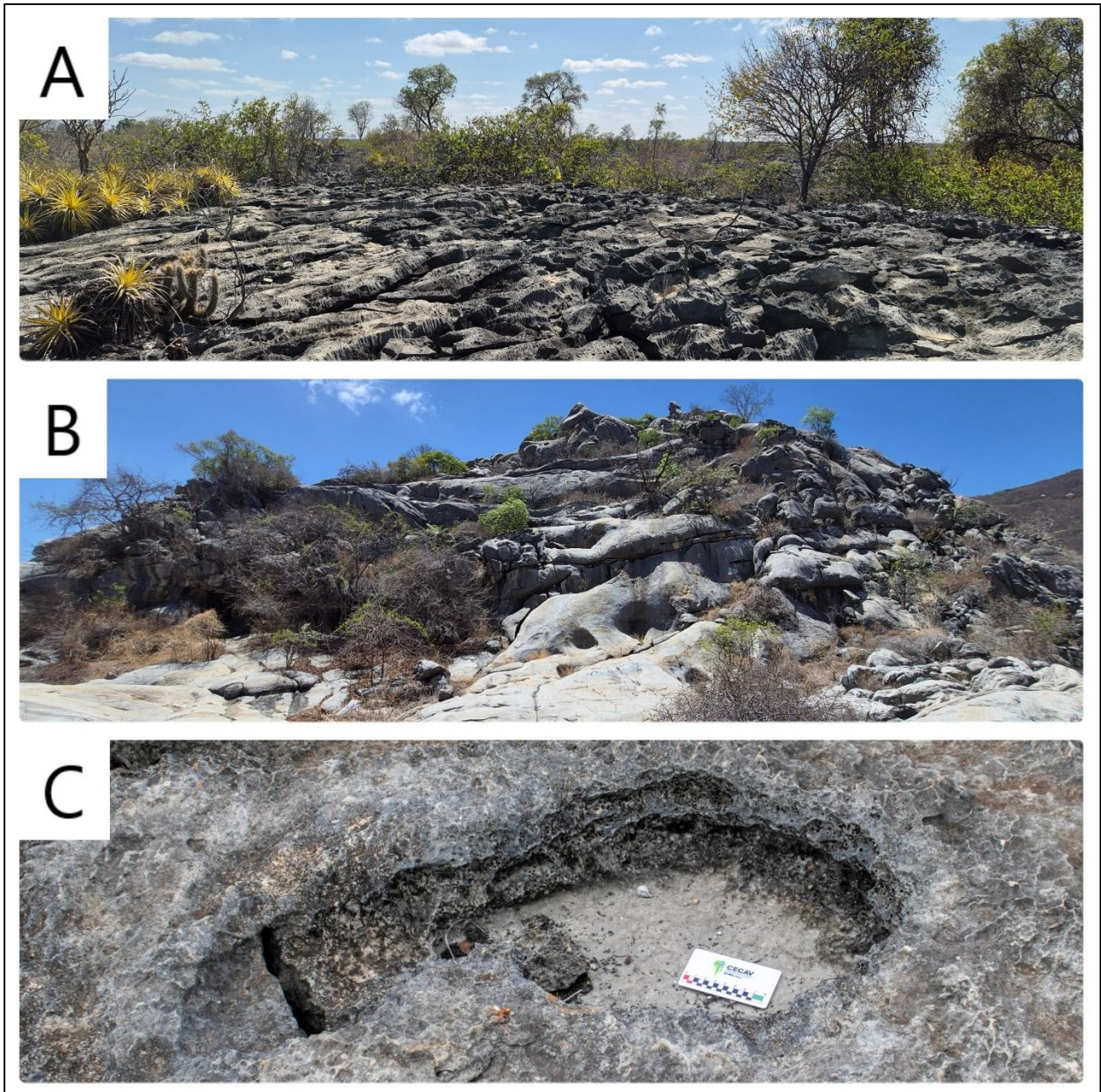


Figura 5: Campos de lapiás (*karrenfield*) e *kamenitzas* em superfície cárstica. (A) *Karrenfield* carbonático com feições predominantemente aéreas, marcado predominantemente por *rillenkarren* e *rinnenkarren*. (B) Afloramento carbonático com evidência de *karren* subaéreos, combinando caneluras e sulcos de escoamento concentrado no maciço do Gruta Casa de Pedra, Martins, Rio Grande do Norte. (C) *Kamenitza* desenvolvida em campo de lapiás da Furna Feira, Rio Grande do Norte. Escala de 10 cm na imagem.

Fonte: Acervo do autor.

Em termos evolutivos, as dolinas podem ser entendidas como “nós” do sistema cárstico: pontos onde convergem a drenagem superficial, a infiltração e a reconfiguração do subsolo. Em dolinas de colapso (Figura 6), o gatilho costuma ser a perda de suporte em cavidades ou condutos, enquanto, em dolinas de subsidência, o rebaixamento pode ser gradual, associado ao rearranjo de materiais sobre um vazio em crescimento. Essa distinção é relevante para diagnóstico e gestão, pois envolve escalas temporais e sinais precursores distintos, com implicações diretas para o mapeamento de risco, o monitoramento e as obras de infraestrutura.



Figura 6: Vista aérea da Dolina do Xavier, dolina de abatimento localizada em Felipe Guerra, carste potiguar. O diâmetro da dolina corresponde a aproximadamente 35 metros.

Fonte: Acervo do autor.

As uvalas representam depressões compostas resultantes da coalescência de dolinas. Segundo Čalić (2011), a sua evolução evidencia o caráter dinâmico e progressivo da carstificação, revelando a interconexão entre feições individuais que tendem a formar sistemas mais amplos. A discussão sobre uvalas evidencia um ponto metodológico mais amplo: em carstologia, a classificação morfológica nem sempre coincide com a classificação genética. Depressões compostas podem resultar tanto de coalescência progressiva quanto de controles estruturais (e.g. falhas, dobramentos e zonas de fraturamento), e a mesma forma pode ser “reutilizada” por diferentes processos ao longo do tempo. Por isso, a leitura de uvalas como feições dinâmicas reforça a necessidade de integrar morfologia, estrutura e hidrologia na interpretação da evolução do relevo.

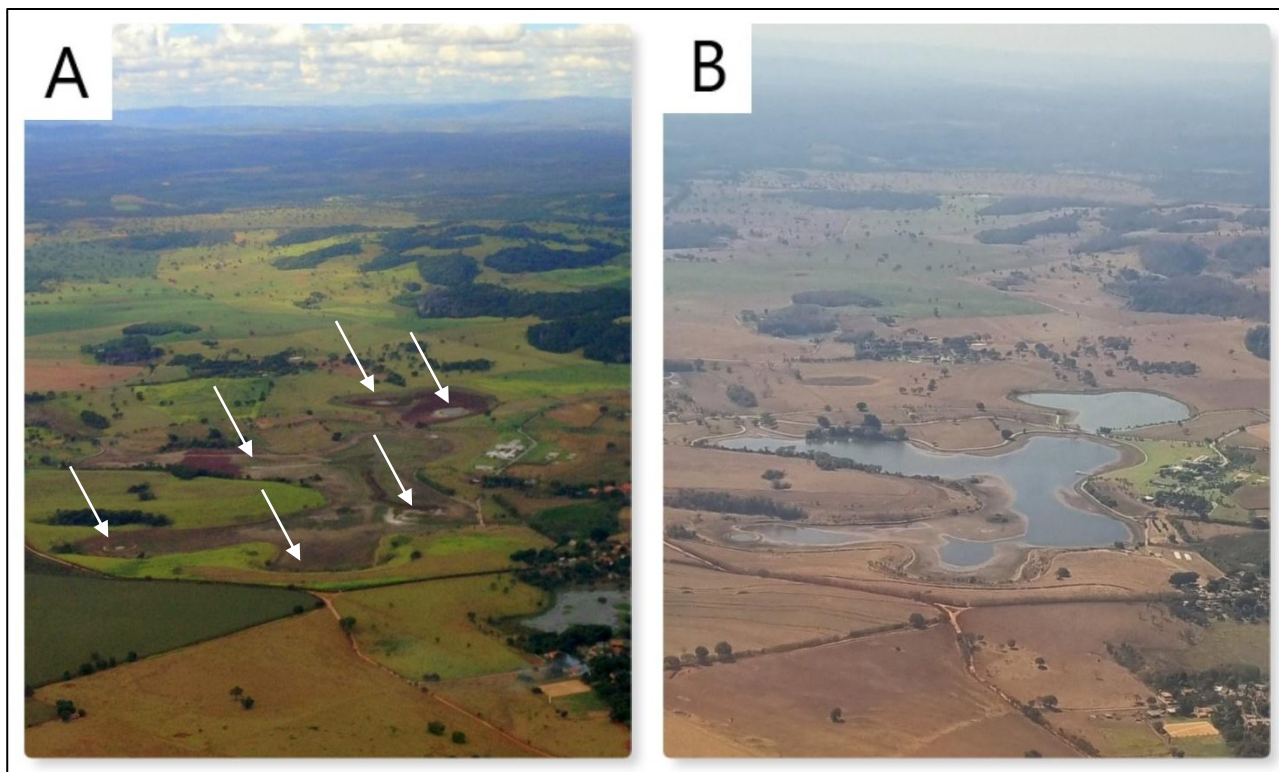


Figura 7: Vista aérea de uma uvala na APA Carste de Lagoa Santa, Minas Gerais. Em (A), é possível identificar, por meio das setas, os sumidouros. Em (B), essa uvala está parcialmente cheia de água.
Fonte: Acervo do autor.

Ainda mais expressivos são os poljes, grandes depressões fechadas e planas, que podem atingir dimensões de quilômetros. Eles estão diretamente associados a sistemas de drenagem subterrânea e têm relevância tanto geomorfológica como socioeconômica, já que as suas superfícies planas são frequentemente utilizadas para a agricultura. Nos Bálcãs, os poljes constituem áreas agrícolas fundamentais (Figura 8), mas exemplos semelhantes podem ser encontrados no Brasil, onde comunidades rurais utilizam o relevo cárstico como base produtiva. Além do papel geomorfológico, poljes costumam ser áreas-chave para a compreensão da relação carste–sociedade, pois frequentemente concentram solo mais espesso, água sazonal e uso agrícola, ao mesmo tempo em que podem estar sujeitos a inundações periódicas e perdas rápidas de água por sumidouros. Essa ambivalência — alta aptidão produtiva *versus* vulnerabilidade hidrológica — é um exemplo claro de como o funcionamento do carste condiciona oportunidades e riscos territoriais.

No ambiente subterrâneo, a morfologia do carste é dominada pelos condutos, os canais que orientam a circulação hídrica. Esses condutos estão conectados a sumidouros, pontos de infiltração concentrada e surgências (ou ressurgências), que marcam o retorno das águas subterrâneas à superfície. Juntos, esses elementos configuram a rede

hidrogeológica cárstica, desempenhando papel central na disponibilidade e na distribuição da água potável.



Figura 8: Vista panorâmica de um *polje* em Tomislavgrad, Bósnia e Herzegovina. Percebe-se fundo plano ocupado por uso agrícola (parcelamento visível) sobre depósitos colúvio-aluviais. O polje é delimitado por afloramentos rochosos e cobertura vegetal rasteira nos quais predominam processos de dissolução de fraturas e recuo de vertentes. **Fonte:** Acervo do autor.

A rede de condutos não deve ser vista como um “tubo” simples: trata-se de uma arquitetura ramificada, com trechos ativos e fósseis, conectividade variável e possível reorganização rápida diante de mudanças na recarga ou de bloqueios sedimentares. Em termos geomorfológicos, isso significa que a paisagem subterrânea pode reorganizar a drenagem de forma abrupta, redistribuindo os pontos de surgência e alterando a eficiência do sistema, com reflexos tanto na disponibilidade hídrica quanto na estabilidade do terreno.

7. A ÁGUA COMO AGENTE MORFODINÂMICO E MORFOGENÉTICO

A água é o motor da dinâmica cárstica. Por meio da dissolução, cria vazios subterrâneos; por meio da precipitação, ela forma espeleotemas, como estalactites e estalagmites. Essa dupla capacidade — dissolver e precipitar — é um dos elementos mais didáticos do carste: o mesmo fluxo que amplia os vazios também pode registrar, em depósitos minerais, a história hidroquímica do sistema. A morfogênese cárstica não se limita, portanto, à escultura de formas: ela inclui a construção de volumes (espeleotemas) e a reorganização interna de condutos por meio de preenchimentos sedimentares, o que pode modificar as trajetórias de fluxo e favorecer a migração de zonas ativas ao longo do tempo.

A complexidade do fluxo subterrâneo é ilustrada pelo projeto WOKAM – *World Karst Aquifer Map* (Figura 9), que demonstra que aproximadamente 12 a 13% da superfície terrestre livre de gelo é composta por rochas carbonáticas e que 20–25% da população mundial depende de água proveniente de aquíferos cársticos (Chen *et al.*, 2017). Essa hidrodinâmica, com fluxos, frequentemente rápidos e turbulentos, em condutos, garante alta produtividade, mas também uma elevada vulnerabilidade à contaminação capaz de transportar poluentes por longas distâncias em curto intervalo de tempo.

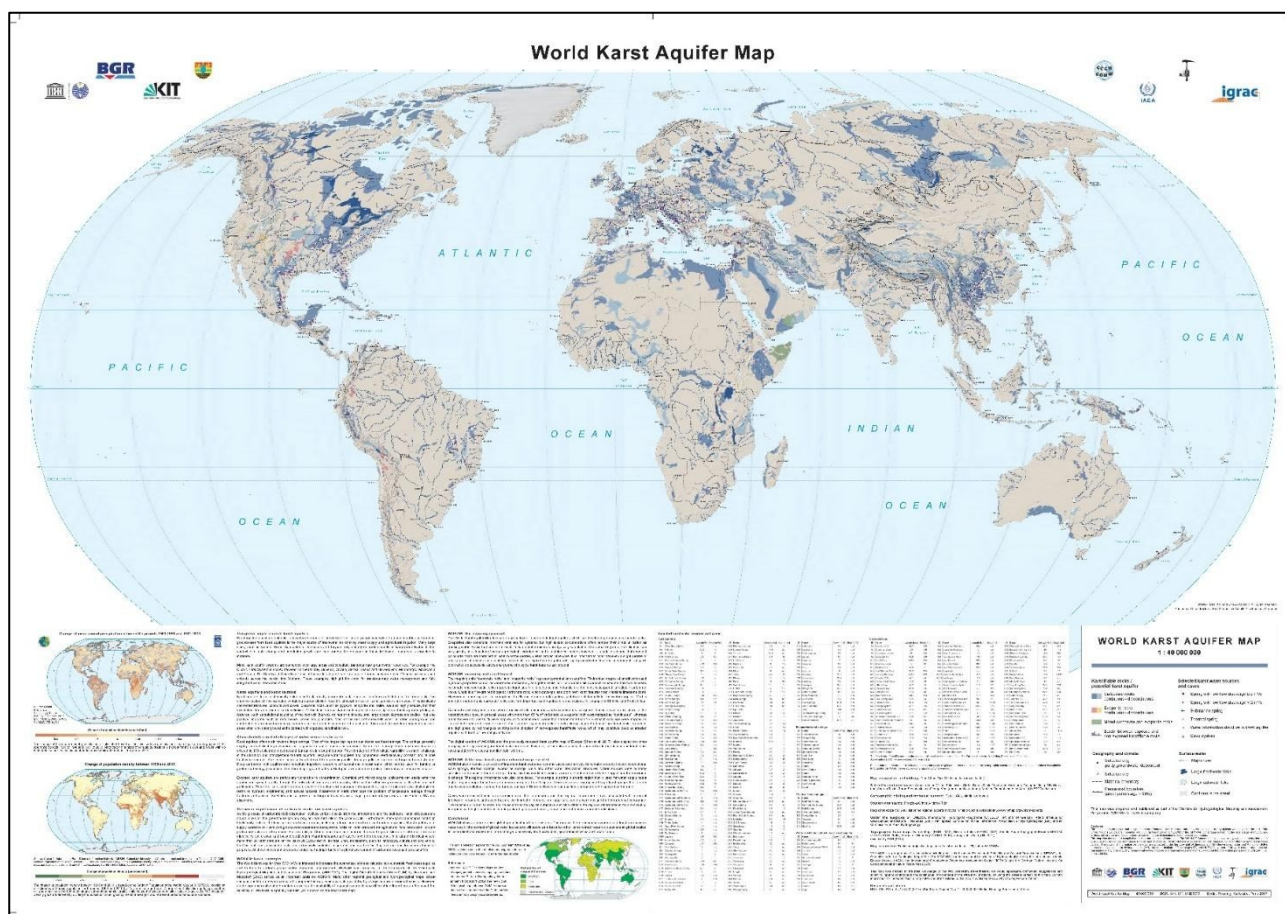


Figura 9: Distribuição global de aquíferos cársticos (*World Karst Aquifer Map*; escala 1:140.000.000). O mapa sintetiza, em escala planetária, a ocorrência e a extensão de áreas com potencial aquífero cárstico associadas a rochas solúveis (com predominância de carbonatos), evidenciando os principais cinturões cársticos nos continentes. As áreas em tons de azul representam a espacialização dos aquíferos/terrenos cársticos mapeados (com gradações e classes conforme a legenda original), enquanto os símbolos complementares indicam elementos hidrogeológicos de interesse (e.g., ocorrências/pontos de referência e informações associadas ao contexto hidrogeológico regional), úteis para análises comparativas, avaliação de vulnerabilidade e planejamento de gestão de águas subterrâneas em ambientes cársticos.
Fonte: Chen *et al.* (2017).

Do ponto de vista da gestão ambiental, essa vulnerabilidade exige abordagens preventivas: o controle rigoroso de fontes potenciais de contaminação na recarga, proteção de áreas de sumidouros e de zonas de infiltração concentrada, além do monitoramento

sistemático da qualidade da água em surgências estratégicas. Em sistemas com fluxos rápidos, medidas corretivas tendem a ser tardias, pois o tempo de resposta entre a introdução de um contaminante e a sua chegada a uma captação pode ser curto, reduzindo, assim, as margens de intervenção.

Além disso, eventos extremos de precipitação podem intensificar a conectividade hidráulica e aumentar os pulsos de turbidez e contaminação, reforçando o fato de que a gestão do carste é inseparável da compreensão do regime hidrológico e sua variabilidade.

A circulação subterrânea em terrenos cársticos caracteriza-se por fluxos rápidos e turbulentos, em contraste com a percolação lenta em aquíferos porosos. Stevanović (2019) explica que, em função dessa dinâmica hídrica, os aquíferos cársticos apresentam alta vulnerabilidade à contaminação. A presença de condutos de grandes dimensões significa que poluentes podem se deslocar por quilômetros em poucas horas, alcançando poços e surgências. Esses dados evidenciam a importância estratégica da pesquisa em hidrogeologia cárstica, tanto do ponto de vista ambiental quanto do social.

8. O CARSTE E A SOCIEDADE

As paisagens cársticas foram historicamente ocupadas e transformadas pelas sociedades humanas, em parte porque oferecem água, abrigo, solo relativamente fértil nas suas depressões e, em muitos casos, paisagens de forte valor simbólico. A experiência mostra que práticas agrícolas podem modificar a dinâmica superficial e subterrânea do sistema de modo significativo, com a construção de terraços em encostas, o preenchimento de depressões para cultivo, a remoção de blocos em campos pedregosos e a abertura de drenos que alteram a recarga. No carste, tais intervenções não permanecem restritas à superfície: elas frequentemente repercutem no fluxo subterrâneo, na qualidade da água e na estabilidade do terreno, o que amplia a necessidade de planejamento territorial orientado por critérios hidrogeológicos.

No entanto, a ocupação intensiva e desordenada também aumenta a vulnerabilidade a desastres, como o surgimento de dolinas induzidas e a contaminação de aquíferos. Casos relatados em cidades da Itália e da América Central evidenciam os riscos da urbanização sobre áreas cársticas sem o devido planejamento. De Waele e Gutiérrez (2022) destacam que a urbanização em áreas cársticas, sem planejamento adequado, está diretamente associada à ocorrência de colapsos, subsidências e contaminação hídrica.

O carste urbano é um desafio crescente. Casos emblemáticos incluem o colapso de grandes dolinas em Guangxi (China), que afetou vilarejos inteiros, e episódios, no Kentucky (EUA), em que dolinas engoliram rodovias e até veículos em movimento.

No Brasil, a expansão urbana sobre áreas cársticas, como na região metropolitana de Belo Horizonte, coloca em risco não apenas as construções, mas também a qualidade da água subterrânea, frequentemente captada em poços localizados em áreas industriais e residenciais. Esses exemplos reforçam que o carste urbana demanda governança específica do risco, baseada em cartografia geotécnica, inventário de feições, monitoramento de deformações e integração entre o licenciamento urbano, a gestão da drenagem e a proteção de aquíferos. Em termos práticos, isso implica reconhecer dolinas e subsidências como processos geomorfológicos ativos, incorporando a sua probabilidade e os seus gatilhos (rebaixamento do lençol, vazamentos, sobrecarga e alteração da recarga) às rotinas de planejamento e manutenção da infraestrutura.

Por outro lado, o carste constitui também um espaço de identidade cultural, de turismo e de patrimônio natural. Regiões como Bonito (MS), PETAR (SP) e Parque Nacional Cavernas do Peruaçu (MG) demonstram como o turismo de natureza pode ser aliado à geoconservação, desde que praticado de forma planejada. Sítios classificados pela UNESCO demonstram o valor universal do carste como paisagem cultural e geológica a ser preservada. No campo do turismo e do patrimônio, a sustentabilidade depende de compatibilizar a visitação com a integridade física e ecológica do sistema subterrâneo, o que envolve capacidade de carga, controle da iluminação, gestão de trilhas, prevenção de impactos em espeleotemas e protocolos de segurança. Em áreas de alto valor científico e cultural, a conservação tende a ser mais efetiva quando articulada à educação ambiental e à valorização social do lugar, reforçando o carste como patrimônio natural e cultural e não apenas como recurso cênico ou econômico.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da geomorfologia cárstica permite destacar características centrais que definem a singularidade desses ambientes. Em primeiro lugar, observa-se a **individualidade** dos sistemas, já que cada carste apresenta peculiaridades locais impossíveis de serem reduzidas a um modelo único. Essa singularidade faz com que cada região cárstica se constitua como um verdadeiro laboratório de observação, no qual processos semelhantes podem produzir respostas distintas. Outro aspecto fundamental é

a **heterogeneidade**, expressa na diversidade de formas e processos que se manifestam mesmo em contextos geológicos semelhantes. Dolinas, uvalas, poljes, condutos e surgências variam em escala, morfologia e dinâmica, o que demonstra que a carstificação é um fenômeno de elevada complexidade.

Somam-se a isso as **dualidades** próprias do sistema cárstico, como a coexistência de recarga difusa e concentrada, a infiltração, que pode ocorrer de forma lenta ou rápida, a presença de dupla porosidade — intergranular e em condutos — e os fluxos subterrâneos de naturezas distintas que ocorrem em paralelo. A quarta característica é a **variabilidade**, que evidencia o caráter instável e em constante transformação da paisagem cárstica. Diferentemente de outros ambientes geomorfológicos, onde os processos podem ser modelados com relativa previsibilidade, o carste rompe com a linearidade: fluxos subterrâneos bifurcam, condutos mudam repentinamente de direção e colapsos podem ocorrer de forma inesperada.

Essa imprevisibilidade, longe de ser considerada um obstáculo, deve ser compreendida como uma característica intrínseca. Nesse sentido, o carste ensina a ciência a lidar com a incerteza, um desafio cada vez mais relevante em tempos de mudanças climáticas e de pressões antrópicas crescentes. Assim, consolidou-se a máxima que orienta a pesquisa e a gestão dessas paisagens: “Espere o inesperado no carste”.

A geomorfologia cárstica sintetiza, portanto, a complexidade dos processos naturais e suas implicações diretas para a sociedade. Assim, estudar o carste significa, ao mesmo tempo, compreender o papel fundamental da água na escultura do relevo, avaliar os riscos associados à ocupação humana em áreas de elevada fragilidade ambiental e reconhecer a dimensão simbólica e cultural dessas paisagens. Trata-se de um campo de investigação essencialmente interdisciplinar, que exige diálogo com a hidrogeologia, a ecologia, a arqueologia, a geografia cultural e as ciências sociais aplicadas à gestão do território.

No encerramento do SINAGEO 2025, reforça-se essa compreensão ao ser evidenciado que conhecer o carste é pensar o futuro da água, da ocupação humana e da preservação do patrimônio natural. O carste constitui, ao mesmo tempo, uma memória geológica — testemunho de processos que remontam a milhões de anos — e um horizonte de desafios ambientais urgentes para o presente e o futuro. Mais do que um alerta, a máxima “Espere o inesperado no carste” deve ser tomada como um convite ao aprofundamento do conhecimento científico, à ampliação das estratégias de conservação e à promoção de uma convivência mais consciente e sustentável entre a sociedade e a natureza.

Como desdobramento aplicado, a síntese aponta três prioridades convergentes. A primeira é científica: ampliar os monitoramentos e os modelos que integrem superfície e subterrâneo, de modo a reduzir as incertezas sobre a conectividade hidráulica e a evolução morfológica; a segunda é territorial: incorporar o carste aos instrumentos de planejamento e gestão do uso do solo, reconhecendo zonas de recarga e setores de maior propensão à subsidência e ao colapso como áreas críticas; a terceira é sociocultural: fortalecer a percepção pública do carste como patrimônio e como infraestrutura natural estratégica para a água, condição essencial para legitimar políticas de proteção e orientar práticas de turismo e de conservação.

REFERÊNCIAS

BNF - Bibliothèque nationale de France (BnF). **Nova descriptione del Friuli (Friuli, Ducado do Friul)**, 1562. Département Cartes et plans, GE D-17055, 2012. Disponível em : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b84947021>. Acesso em: 17 dez. 2025.

ČALIĆ, J. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. **Geomorphology**, v.134, n. 1–2, p. 32–42, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.029>.

CHEN, Z.; AULER, A. S.; BAKALOWICZ, M.; DREW, D.; GRIGER, F.; HARTMANN, J.; JIANG, G.; MOOSDORF, N.; RICHTS, A.; STEVANOVIĆ, Z.; VENI, G.; GOLDSCHIEDER, N. The World Karst Aquifer Mapping Project: Concept, Mapping Procedure, and Map of Europe. **Hydrogeology Journal**, v. 25, n. 3, p. 771–785, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3>.

CVIJIĆ, J. **CARSTE: uma monografia geográfica (1895)**. Belo Horizonte: PUC Minas, 2017. Tradução de Luiz Eduardo Panisset Travassos.

DE WAELE, J.; GUTIÉRREZ, F. **Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves**. John Wiley & Sons, 2022. 912p.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. John Wiley & Sons, 2007. 576p.

STEVANOVIĆ, Z. Karst Waters in Potable Water Supplies: A Global-Scale Overview. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 23, p. 662, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8670-9>.

TRAVASSOS, L. E. P. **The Cultural Importance of Karst and Caves**. 2011. 318 f. Tese (Doutorado em Carstologia) – University of Nova Gorica, Graduate School, Nova Gorica, 2011.

VERESS, M. Karst types and their karstification. **Journal of Earth Science**, v.31, n.3, p. 621–634, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12583-020-1306-x>.

WALTHAM, A. C.; FOOKES, P. G. Engineering classification of karst ground conditions. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, v. 36, n. 2, p. 101–118, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1144/1470-9236/2002-33>.