



Geomorfologia de Áreas Cársticas

Organização:

- Luiz Eduardo Panisset Travassos





Geomorfologia de Áreas Cársticas

Organização:

- Luiz Eduardo Panisset Travassos

MOSSORÓ- RN, 2026.

UERN



Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Reitora

Cicília Raquel Maia Leite

Vice-Reitor

Francisco Dantas de Medeiros Neto

Diretor da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Francisco Fabiano de Freitas Mendes

Chefe do Setor Executivo da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Jacimária Fonseca de Medeiros

Chefe do Setor de Editoração da Editora Universitária da Uern (Eduern)

Lindercy Francisco Tomé de Souza Lins

Conselho Editorial das Edições UERN

Andreza Tacyana Félix Carvalho

Francisco Fabiano de Freitas Mendes

Franklin Roberto da Costa

Fernanda Abreu de Oliveira

Gleisson do Carmo Oliveira

Ismênia Gurgel Martins

Jacimária Fonseca de Medeiros

Lindercy Francisco Tomé de Souza Lins

Maria Ione da Silva

Otoniel Fernandes da Silva Júnior

Patrícia Batista Barra

Kalidia Felipe de Lima

Saulo Gomes Batista

Sérgio Luiz Pedrosa Silva

Capa e Diagramação

Gabriela Mabel Alves Vieira

**Catálogo da Publicação na Fonte.
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte.**

Geomorfologia de Áreas Cársticas-Vol.V [recursoeletrônico]./ Luiz Eduardo Panisset Travassos (org.). – Mossoró, RN: Edições UERN, 2026.

99 p.

ISBN: 978-85-7621-576-9 (E-book).

Coleção: Geomorfologia do Brasil.

1. Geomorfologia de Áreas Cársticas. 2. Processos geomorfológicos. 3. Geomorfologia - Brasil. I. Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. II. Título.

UERN/BC

CDD 551.4

Bibliotecário: Aline Karoline da Silva Araújo CRB 15/ 783

Sumário:



APRESENTAÇÃO.....

05

1.

GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA E O PASSADO HUMANO: PERSPECTIVAS DAS GEOCIÊNCIAS PARA AS PESQUISAS SOBRE PRÉ-HISTÓRIA

Leandro Vieira da Silva.

07

2.

GEOFORMAS CÁRSTICAS EM ROCHAS NÃO CARBONÁTICAS: O CASO DE PARAÚNA, GOIÁS

Guilherme Lima Brasil dos Santos;
Luiz Eduardo Panisset Travassos;
André Augusto Rodrigues Salgado.

18

3.

CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DO CARSTE TRADICIONAL DE BALDIM, MINAS GERAIS

João Victor Gonçalves Mendonça;
Luiz Eduardo Panisset Travassos;
Jorge Batista de Souza.

27

4.

IMPACTOS DO CRESCIMENTO URBANO EM REGIÕES CÁRSTICAS: ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL NO CARSTE DE MINAS GERAIS

Lucas Diniz de Areda;
Luiz Eduardo Panisset Travassos;
Jorge Batista de Souza.

50

5.

EVOLUÇÃO DAS CAVERNAS EM SERGIPE

Heleno dos Santos Macedo;
Hélio Mário de Araújo;
Luana Pereira Lima.

80





Geomorfologia do Brasil

Apresentação

A **Coleção Geomorfologia do Brasil**, editada pela Edições Uern - EDUERN, reúne contribuições de pesquisadores e pesquisadoras de diferentes regiões do país que apresentaram seus trabalhos no XV Simpósio Nacional de Geomorfologia (SINAGEO), realizado em Natal (RN), entre os dias 4 e 8 de agosto de 2025.

Composta por 14 volumes temáticos, a coleção expressa a diversidade e a vitalidade da produção científica brasileira em Geomorfologia, contemplando desde abordagens clássicas até perspectivas inovadoras que integram novas tecnologias, análises ambientais e dimensões sociais da paisagem. Cada livro reflete o compromisso coletivo de fortalecer e divulgar o conhecimento geomorfológico produzido no Brasil, promovendo diálogo entre diferentes áreas e instituições.

... OS VOLUMES QUE COMPÕEM A COLEÇÃO SÃO:



1. Intemperismo, Solos e Paisagem

organizado por Davi do Vale Lopes (UFRN)



2. Processos e Formas de Vertente

organizado por Grace Bungenstab Alves (UFBA)



3. Geomorfologia Fluvial e Lacustre

organizado por José Yure Gomes dos Santos (UFRN)
e Filipe da Silva Peixoto (UERJ)



4. Geomorfologia Costeira, Marinha e Eólica

organizado por Antônio Rodrigues Ximenes Neto (UFRN)



5. Geomorfologia de Áreas Cársticas

organizado por Luiz Eduardo Panisset Travassos (PUC-MG)



6. Geomorfologia Estrutural

organizado por Abner Monteiro Nunes Cordeiro (UFRN)



7. Geomorfologia Ambiental

organizado por Glairton Cardoso Rocha (IFPI)



8. Quantificação de Processos, Modelagem e Geocronologia

organizado por Kleber Carvalho Lima (UPE)
e Everton Vinicius Valezio (UPE)



9. Mapeamento Geomorfológico: Básico e Aplicado

organizado por Rosangela Garrido Machado Botelho (IBGE)



10. Risco Geomorfológico: Diagnóstico, Prevenção e Previsão

organizado por Maria Carolina Villaça Gomes (UERJ)



11. Antropoceno e Geomorfologia Urbana

organizado por Guilherme Borges Fernandez (UFF)
Miguel Felipe (UFJF)
e Maria Luíza de Oliveira Terto



12. Geodiversidade e Patrimônio Geomorfológico

organizado por Thiara Oliveira Rabelo (UFRN)
e Luciana Martins Freire (UFPA)



13. Geotecnologias e Inteligência Artificial Aplicadas à Geomorfologia

organizado por Paulo Victor do Nascimento Araújo (IFRN)
e Sílvio Braz de Sousa (UFRN)



14. Ensino de Geomorfologia na Educação Formal e Não Formal

organizado por Emanuel Lindemberg Silva Albuquerque (UFDFPar)
e José Falcão Sobrinho (UVA)

Mais do que uma coletânea de textos, esta coleção constitui um registro histórico da consolidação da geomorfologia brasileira em múltiplas frentes — teórica, metodológica e aplicada. Esperamos que cada volume inspire novas leituras do relevo, novas formas de pensar a paisagem e novos caminhos de pesquisa comprometidos com a compreensão das dinâmicas da superfície terrestre.

Desejamos a todos uma excelente leitura!

*Jacimária Fonseca de Medeiros, Thaís Guimarães,
e Marco Túlio Mendonça Diniz*

Organizadores da Coleção Geomorfologia do Brasil



GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA E O PASSADO HUMANO: PERSPECTIVAS DAS GEOCIÊNCIAS PARA AS PESQUISAS SOBRE PRÉ-HISTÓRIA

Leandro Vieira da Silva¹ |

PALAVRAS-CHAVE: Geomorfologia Cárstica, Pré-História, Arqueologia, Lagoa Santa.

RESUMO

Na primeira parte do trabalho, propõe-se abordar a aplicação desse conhecimento no campo da Arqueologia Pré-Histórica, ressaltando o debate em torno da atração dos seres humanos por ambientes cársticos. Destaca-se que a Geomorfologia Cárstica é imprescindível para o estudo de culturas pretéritas, pois se trata de uma especialidade que possui diversos métodos e técnicas de interesse para a Pré-História. Considera-se aqui que sua participação extrapola a ideia comum de oferecer apenas subsídios à Arqueologia, pois, na verdade, ela pode se tornar absolutamente decisiva para a correta interpretação do registro arqueológico em locais abrigados. A disseminação de sua importância torna-se ainda mais relevante, posto que muitos arqueólogos não têm formação acadêmica ou mesmo algum tipo de treinamento formal em Geomorfologia. Já na segunda parte desta publicação, o trabalho apresenta um recorte espacial em relação às pesquisas arqueológicas realizadas na Província Cárstica de Lagoa Santa, região central do Estado de Minas Gerais, a fim de demonstrar como a Geomorfologia Cárstica contribuiu para explicar a formação de alguns sítios arqueológicos. Independentemente dos temas, problemas e objetivos dessas pesquisas, a Geomorfologia Cárstica tem apoiado o entendimento da ocupação humana naquele território, ampliando as informações sobre a trajetória dos povos originários, desde os primeiros paleoamericanos que chegaram à região. Ademais, ajuda na crítica e na revisão de certos dogmas tradicionais que dominaram por muito tempo as explicações sobre o estilo de vida desses grupos de caçadores-coletores e dos horticultores-ceramistas. Pelo fato de o autor desta publicação ser arqueólogo e geógrafo, com vivências no campo da Geomorfologia, e ainda apresentar experiência em pesquisas geoarqueológicas no carste de Lagoa Santa, o trabalho mostra um panorama dessas investigações sob a perspectiva da Geomorfologia Cárstica, de forma a ressaltar sua relevância para a compreensão da Pré-História regional.

¹ Doutor em Arqueologia pela Universidade de São Paulo, leandro.vieira@meioambiente.mg.gov.br



INTRODUÇÃO

Antes de tratar das contribuições que a Geomorfologia Cárstica pode oferecer aos estudos da Pré-História, torna-se necessário abordar a Geoarqueologia, enquanto disciplina que aplica os métodos e as técnicas do campo das Geociências, incluindo a Geomorfologia, para a resolução de problemas arqueológicos. A Geoarqueologia surgiu da práxis arqueológica de utilizar o conhecimento das Geociências para embasar teorias, métodos, técnicas e interpretações sobre os contextos arqueológicos e foi utilizada desde os primórdios da Arqueologia para compreender as estratigrafias de culturas do Velho Mundo.

No século XIX, os estudos pré-históricos que envolviam noções de ciências naturais estavam, em termos de qualidade e quantidade, descompassados entre a Europa e os Estados Unidos. No Velho Continente, o naturalista Charles Lyell publicou, em 1863, o livro *Geological Evidences of the Antiquity of Man*, considerado um marco histórico para esta etapa “pré-geoarqueologia”, já que na obra existe uma clara ligação entre Arqueologia e Geologia. Contemporaneamente a ele, vários estudos foram desenvolvidos conforme os princípios teóricos e metodológicos de investigação científica da época (Rapp; Hill, 1998).

Ao mesmo tempo, do outro lado do Atlântico, nos Estados Unidos, a aplicação das Ciências da Terra era tímida e pouco expressiva, bem como o próprio conhecimento da pré-história de maneira geral, salvo honrosas exceções, como Cyrus Thomas, William Henry Holmes e Frederick Putnam, que aplicaram métodos geológicos para associar depósitos antropogênicos com remanescentes da fauna extinta no vale do Mississippi, nos chamados mounds (Rapp; Hill, 1998).

No último terço do século XIX, as pesquisas pré-históricas europeias estavam centradas em cronologias e sequências sedimentares. Tratava-se de localizar artefatos dentro dos estratos sedimentares, sempre na tentativa de verificar e explicar a associação entre artefatos, restos humanos e remanescentes da fauna extinta, e muitas vezes esses locais estavam situados em ambientes cavernícolas (Silva, 2013).

Em 1837, Jacques Boucher de Crévecoeur Perthes encontrou, no vale do rio Somme, França, artefatos de pedra lascada em níveis de seixos, por ele datados como muito antigos. Sem impacto imediato, o trabalho foi relegado e caiu no ostracismo. Dois decênios depois, pesquisadores retomaram os estudos de Perthes e se convenceram de que os artefatos ali encontrados apontavam que os humanos já estavam presentes na última era glacial (Rapp; Hill, 1998). Ficou finalmente comprovada a antiguidade da presença humana na Europa e isso fez com que os pesquisadores se voltassem com especial atenção às questões paleoambientais, fortalecendo a importância das Geociências para o estudo do passado humano.



No século XX, com a Arqueologia estabelecida como ciência pela corrente teórica do historicismo cultural, os arqueólogos incorporaram definitivamente os depósitos sedimentares em suas investigações, a exemplo da obra de Sir William Flinders Petrie, de 1904, *Methods and Aims in Archaeology*, que apresenta princípios elementares de estratigrafia a serem observados durante as escavações. Além das preocupações cronoestratigráficas, houve uma expansão qualitativa com a entrada de novas técnicas, como a aerofotografia, e novas abordagens, como a Geomorfologia. A título de exemplo dessas inovações, destaca-se o estudo dos kurgans, montículos de terra no antigo Turkestão, por Raphael Pumpelley e Hubert Schmidt (Araújo, 1999).

Entretanto, a partir dos anos 1960, essa linha teórica da Arqueologia passou a ser alvo de uma nova corrente denominada Processualismo. A preocupação excessiva com cronologias e, por extensão, com os estratos sedimentares, entendidos como algo apenas para obter datações, foi questionada. Autores como Lewis Binford (1962) entendiam que a cultura humana era determinada por meios externos, como o meio ambiente e a demografia. As camadas sedimentares não foram analisadas pelos seguidores dessa nova corrente como cápsulas cronológicas, mas como elementos-chave para entender como eram os paleoambientes e como esses interferiam nas culturas humanas. A mudança na cultura material passou a ser explicada fundamentalmente pelas mudanças ambientais, e o comportamento humano seria padronizado, o que permitiria, por sua vez, aplicar generalizações de médio alcance sobre o comportamento humano diante das mudanças ambientais.

E, em fins do século XX, a partir dos anos 1980, uma nova corrente teórica floresceu na Arqueologia, o Pós-Processualismo, que, sem negar os avanços feitos pelo Processualismo, criticou as generalizações e focou no particularismo de cada cultura, direcionando seus estudos para os aspectos cognitivos e ideacionais do comportamento humano. Sem descartar a ideia de que as sociedades se adaptam ao meio ambiente, essa corrente privilegiou as agências e a dimensão simbólica da cultura.

METODOLOGIA

Depois dessa rápida contextualização histórica das três correntes teóricas da Arqueologia, com ênfase em sua fase inicial para explicar como as Geociências adentraram na disciplina, o presente trabalho volta-se agora para a Geomorfologia Cárstica, posto que os ambientes abrigados contribuem para o conhecimento de aspectos fundamentais da vida de inúmeras populações do passado. Não somente indicam o local onde estão



situados vestígios de forma destacada na paisagem, mas também preservam, ao longo do tempo, uma série desses elementos antrópicos dos processos erosivos provocados pelos ventos, pela gravidade e, principalmente, pelas chuvas em ambientes a céu aberto.

A má conservação dos vestígios é um problema recorrente na maior parte dos sítios arqueológicos. Entre as várias especialidades da Geomorfologia, a Geomorfologia Cárstica se destaca justamente por investigar ambientes que preservam o registro arqueológico, incluindo vestígios de natureza orgânica, bem como os aspectos físicos das cavidades, como zonas fóticas e afóticas, áreas internas, espeleotemas, sedimentos, sumidouros, entre outros elementos. Esses elementos também são relevantes para a análise arqueológica, diante das intervenções que os seres humanos fazem nestes ambientes.

Segundo Araújo (2008), os ambientes abrigados possuem as seguintes características, consideradas muito interessantes para a pesquisa arqueológica: 1) pequena incidência de água meteórica; 2) incidência limitada de radiação solar; 3) amplitude térmica pouco pronunciada; 4) pouca atividade biológica, tanto de fauna quanto de flora; 5) tendência à acumulação de sedimentos.

À medida que as pesquisas passam a abranger todos os aspectos de uma cavidade, as descrições e interpretações não ficam restritas a artefatos, sepulturas ou estruturas localizadas, mas também a um tempo-espaço muito peculiar e que apenas os ambientes abrigados podem proporcionar. Nesse contexto, os elementos físicos não devem ser vistos apenas como um adendo nas caracterizações dos sítios arqueológicos, mas como elementos importantes por fornecerem pistas diretas para entender a ocupação humana, para interpretar a formação das camadas sedimentares e até mesmo por poderem fazer parte da cultura material, como será exemplificado adiante.

Assim, serão apresentados alguns exemplos de pesquisas já realizadas no carste de Lagoa Santa e uma hipótese para explicar certos aspectos da vida de populações pré-históricas naquela região, a partir da paisagem cárstica.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

AS PESQUISAS NO CARSTE NA INTERFACE COM A GEOMORFOLOGIA

De acordo com Kohler (2021), o carste de Lagoa Santa situa-se a 30 quilômetros ao norte de Belo Horizonte e desenvolve-se sobre o bloco interfluvial Ribeirão da Mata-Rio das Velhas, em uma área de aproximadamente 400 km². Esse bloco é constituído por metassedimentos carbonáticos altamente metamorfizados, com teores de carbonato de cálcio acima de 95% da Formação Sete Lagoas, Grupo Bambuí, do Proterozoico Superior.



Essa formação geológica abriga restos de megafauna extinta e foi o berço da Paleontologia e da Arqueologia brasileiras, com destaque para uma população paleoamericana que teria vivido na região por volta de 12.000 a 8.000 anos atrás, denominada “lagoassantenses”. Entre as várias pesquisas relativas à Arqueologia, destacam-se aquelas realizadas na Lapa Vermelha IV, município de Pedro Leopoldo, situada no interior do Monumento Natural Estadual da Lapa Vermelha. A pesquisa nesse abrigo foi realizada pela Missão Franco-Brasileira entre 1973 e 1976, sob coordenação da arqueóloga Anette Laming-Emperaire, tornando-se posteriormente mundialmente famosa pelos restos de uma mulher encontrados nessas escavações, batizada pelo pesquisador Walter Neves como “Luzia” (Neves; Piló, 2008).

Diante dessa complexa estratigrafia, Malta (1995) realizou investigação geomorfológica que tinha, entre outros objetivos, compreender a gênese da cavidade e o conseqüente processo de sedimentação no interior do abrigo. O modelo explicativo apresentado pela pesquisadora incluiu ainda a dolina próxima à cavidade.

De acordo com a interpretação, um processo de dolinamento modificou a topografia da localidade:

- 1.** O grande bloco encontrado na base do abrigo é *in situ*, correspondendo ao remanescente de uma parede de uma antiga galeria no afloramento que interligava dois sumidouros;
- 2.** Houve um desabamento que abriu o abrigo e, segundo as datações radiocarbônicas, esse evento ocorreu antes de 25.000 anos;
- 3.** Após o desabamento da antiga galeria, houve uma série de deslocamentos da parte superior do abrigo, depositando blocos, calhaus e plaquetas sobre os blocos do primeiro desabamento, o qual também teria ocorrido antes de 25.000 anos;
- 4.** A queda desses blocos originou, simultaneamente, a entrada de sedimentos amarelados silto-arenosos, que envolveu todo esse material clástico em período anterior a 22.000 anos;
- 5.** Nesse período teria ocorrido um grande aporte de água carbonatada oriunda de quatro grandes espeleotemas existentes no paredão; a infiltração da água formou um piso estalagmítico incipiente e branqueou parte desses sedimentos;
- 6.** O forte mergulho dos sedimentos em direção aos dois sumidouros demonstra que eles estavam funcionando no período, a partir dos contatos abruptos, com mergulho de 25° entre as camadas;



- 7.** Esses movimentos dos sumidouros poderiam estar associados ao rebaixamento do nível de base local, resultante de um colapso que originou a atual dolina na área adjacente;
- 8.** Por volta de 15.000 anos, uma nova sequência sedimentar adentra o abrigo, com sedimentos vermelhos que nivelaram o piso e provenientes do topo do maciço;
- 9.** Nesses sedimentos havia estruturas típicas de fluxos torrenciais, que desciam pelo maciço através de dois cones que margeiam o abrigo, nivelando o piso por volta de 9.500 anos; os vestígios de ocupação humana passam a aparecer com mais visibilidade somente a partir de 6.800 anos;
- 10.** Até 4.000 anos, o abrigo ainda era ocasionalmente visitado, como indica a pequena quantidade de vestígios encontrados;
- 11.** De 4.000 a 3.000 anos, a quantidade de vestígios aumenta, indicando que o abrigo se tornou um espaço mais confortável e, por volta de 3.000 anos, a descida de sedimentos vermelhos do topo cessa, em razão do rebaixamento dos cones, ficando com o aspecto encontrado nos anos 1970 pela equipe da missão franco-brasileira.

Nesse modelo explicativo, a famosa Luzia foi encontrada nos sedimentos vermelhos e de forma desconectada em várias camadas, aspecto que pode ser explicado por ter sido arrastada ao longo, em direção ao sumidouro, conforme os truncamentos e o mergulho geral das camadas (Figura 1).

A pesquisa realizada por Malta (1995) demonstra o quanto pode ser complexo o entendimento de um registro arqueológico em ambientes cársticos, em razão do grande dinamismo que essa formação apresenta. Outra pesquisa no carste é aquela realizada na Lapa do Niáctor, município de Jaboticatubas (Silva, 2013). Aqui, apresenta-se outro tipo de linha de investigação, relacionada com aspectos visuais e artísticos no carste.

O abrigo tem 30 metros de extensão máxima de uma entrada para outra e uma largura máxima de 9 metros da parte mais funda até o talude. Com teto alto, apresenta espeleotemas fossilizados apenas no lado leste, o que indica percolação de água intensa da vertente do abrigo em tempos mais remotos, provavelmente por meio de sulcos, furos e diáclases de deslocamento que originaram essas formações. Os blocos rochosos que formam o talude entre o piso atual e o espelho d'água do rio estão todos com suas pontas inclinadas para baixo, e a base é composta por uma grande camada de rocha compacta. O piso do abrigo é levemente inclinado do fundo para as partes mais rebaixadas em direção ao talude. Tal inclinação é muito pouco perceptível, sendo notada somente na porção mais elevada do abrigo, na entrada leste, onde estão os espeleotemas.



FIGURA 1: Corte estratigráfico feito pela Missão Franco-Brasileira, observar o contato abrupto com o paredão e o mergulho das camadas. Créditos: Arquivos da Missão Franco-Brasileira, cedidos por André Prous.



FONTE: Silva (2015)

Esse desnível divide virtualmente o abrigo em duas partes: a entrada leste, que é mais alta, e a entrada oeste, mais baixa. A entrada leste apresenta piso rochoso, com poucos sedimentos, espeleotemas e concreções; o salão do abrigo propriamente dito, amplo e nivelado, sem depressões; no lado leste do abrigo, o paredão recua, formando um pequeno compartimento com um bloco aflorado em superfície. Em relação à sua atratividade humana, o abrigo mostra-se favorável por ser inteiramente luminoso, sem incidência direta de raios solares, por estar com sua face para o sul e no fundo de um vale. As chuvas, de acordo com moradores locais, atingem a faixa limítrofe do talude, ficando as partes mais recuadas protegidas.

No contexto da pesquisa que investigou a natureza da composição sedimentológica do abrigo (Silva, 2013; Silva, 2022), houve a menção aos diversos elementos antrópicos do abrigo, e um deles foi a única pintura rupestre reconhecível no afloramento. Trata-se de um pequeno cervídeo em vermelho, e sua filiação está ligada à Tradição Planalto. Essa tradição está distribuída entre os estados do Paraná e da Bahia, tendo Minas Gerais como seu possível foco central. Caracteriza-se pelos grafismos pintados predominantemente na cor vermelha e destacam-se representações zoomórficas, como cervídeos, peixes e pássaros.

Contudo, o que mais chamou a atenção nesse desenho foi o fato de estar situado atrás de um grande espeleotema, na entrada do abrigo; ou seja, para quem entra no abrigo, ele não é visível. A questão sobre o grau de visibilidade de um grafismo pode ter significados sociais e, nesse caso, parece que o seu autor não queria que fosse visto. Além de pequeno, o desenho passa completamente despercebido para aqueles que o desconhecem. Nesse contexto, o espeleotema que está escondendo também faz parte



do registro arqueológico, pois os vestígios são interpretados conforme o seu contexto. Aqui, tem-se um exemplo de um elemento da Geomorfologia Cárstica integrando uma evidência arqueológica.

Nesse sentido, ainda na Lapa do Niáctor, um dos espeleotemas constituiu o próprio vestígio arqueológico. Trata-se de uma escultura com um rosto humano de características indígenas, feita na base de uma estalagmite, orientada para o rio Taquaraçu, que margeia o abrigo (Figura 2).

Independentemente da época em que foi feita, seja no período histórico ou no pré-histórico, essa escultura tinha relevância para aquele contexto geográfico. Acredita-se que as carrancas, para o contexto brasileiro, tenham surgido na bacia do rio São Francisco, em contextos de influências indígenas, e que, coincidentemente, a Lapa do Niáctor esteja localizada nessa bacia hidrográfica. Essas representações estariam ligadas ao mundo das águas para afastar o infortúnio e trazer sorte (Câmara, 1937).

Nesse registro arqueológico, sabe-se que a pesca assumiu grande importância desde os lagoassantenses, há 11.000 anos, até recentemente, no período histórico, configurando-se como um ponto importante de pesca (Silva; Prous, 2014).

Entretanto, a falta de uma compreensão mais ampla sobre esse vestígio fez com que essa escultura não tivesse o devido destaque para sua preservação e, lamentavelmente, foi destruída (Prous; Baeta; Rubbioli, 2003). De toda forma, o registro dessa evidência é importante, pois é possível que existam outras ocorrências do gênero em sítios arqueológicos pelo Brasil, e destaca-se que elementos do carste, no caso de um espeleotema, foram escolhidos como suporte para a realização de uma comunicação visual.



FIGURA 2: Rosto humano esculpido na base de uma estalagmite.



FONTE: Prous, Baeta e Rubbiolli (2003)

Uma hipótese geomorfológica para a Pré-História

Por fim, o próprio conjunto da paisagem cárstica pode contribuir para a compreensão de determinados aspectos da vida das populações pré-históricas que ali viveram. De acordo com Prous (2003) e Da Glória (2021), os lagoassantenses apresentam marcas de estresse de crescimento em seus ossos; além disso, o comprimento do fêmur dessas populações indica baixa estatura, algo incomum para grupos caçadores-coletores.

Esse aspecto incomum pode estar ligado, hipoteticamente, às características extremadas do próprio ambiente cárstico; à deficiência de certas vitaminas ou de proteínas; ou mesmo ser decorrente do estresse hídrico que ocorre na paisagem cárstica de Lagoa Santa. Esse carste apresenta numerosas dolinas e, na época das chuvas, essas formações rebaixadas formam lagos, deixando o aspecto do carste como uma verdadeira área pantanosa. Recentemente, o carste de Lagoa Santa obteve o título de sítio Ramsar (UFMG, 2017), o que demonstra seu aspecto hidrológico diferenciado na época das chuvas.

Entretanto, na estação seca, a água superficial escoar para os sumidouros, tornando-se uma drenagem criptorreica, ou seja, subterrânea, restando poucos cursos d'água perenes, como o córrego Samambaia. Isso evidencia que a paisagem cárstica de Lagoa Santa poderia ser muito estressante para grupos humanos que dependiam exclusivamente da caça de animais, da coleta de vegetais e da pesca, já que não praticavam agricultura, diante de contextos hidrológicos extremos. Deve-se levar em



consideração que o clima era mais seco ao final do Pleistoceno e que gradativamente se tornou mais úmido ao longo do Holoceno naquela região, o que certamente tornava o ambiente ainda mais desafiante (Raczka et al., 2013).

Um dado interessante é que os esqueletos recuperados do Grande Abrigo de Santana do Riacho, situado na Serra do Cipó, de formação quartzítica e, portanto, fora do carste, do mesmo período e próximos a Lagoa Santa, apresentavam maior robustez em seus esqueletos e higidez nos dentes (Alvim, 1977; Prous, 2003). A resposta para essa deficiência nutricional, refletida nos ossos desses grupos, pode estar na própria dinâmica da paisagem cárstica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há muito tempo, a conexão entre Arqueologia e Geomorfologia Cárstica vem sendo estabelecida para investigar as trajetórias das populações que viveram no carste de Lagoa Santa. Entretanto, ainda será preciso investir mais em questões geomorfológicas para auxiliar de forma efetiva as interpretações relacionadas aos grupos paleoamericanos. Mais pesquisas sobre o carste, não somente sobre as cavidades, mas também em relação à sua paisagem, ajudam a compreender os processos de ocupação desse espaço natural. Assim como ocorre em outros ambientes de formação geomorfológica, a exemplo do fluvial, do litorâneo e do glacial, o estudo do relevo contribui para entender os sítios arqueológicos, os quais estão à mercê de todos os processos aos quais a ciência geomorfológica se dedica.

Ademais, a associação entre arqueólogos, geoarqueólogos e geomorfólogos pode ajudar a revisar velhos paradigmas sobre a relação dos seres humanos com as cavidades. O resultado dessas pesquisas é sentido nos entendimentos sobre o uso antrópico no espaço cárstico. Essas informações têm impacto direto nos estudos ecológicos, pois, interpretando os cenários do passado, é possível também realizar pontes com a paleoecologia.

Nessa linha, a Geomorfologia Cárstica é um caminho fundamental para entender os processos de adaptação humana no espaço cárstico. No entanto, alerta-se que isso não poderá ser realizado a partir da perspectiva geomorfológica “pura”, pois, se o geomorfólogo não tiver treinamento formal em Arqueologia, sobretudo em relação às correntes teóricas da disciplina, as quais foram brevemente expostas no início deste trabalho, corre-se o risco de construir uma visão simplificada, excessivamente determinista e até mesmo etnocêntrica do registro arqueológico. Por outro lado, não há dúvidas de que arqueólogos sem formação em Geomorfologia podem não conseguir fazer a leitura do espaço; por isso, é preciso considerar todo o conhecimento de que o campo geomorfológico já dispõe.



Diante de populações caçadoras-coletoras tão antigas como os lagoassantenses, que dependiam fortemente dos recursos naturais do carste e que não desenvolveram sistemas de escrita que deixassem documentos sobre suas vidas, restaram aos pesquisadores da Pré-História seus esqueletos, seus vestígios e a paisagem em que viveram por milênios.

REFERÊNCIAS

- ALVIM, M. Os antigos habitantes da área arqueológica de Lagoa Santa, MG. **Arquivos do Museu de História Natural**, Belo Horizonte, v. 2, p. 119-174, 1977.
- ARAÚJO, A. As geociências e suas implicações em teoria e métodos arqueológicos. **Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia**, São Paulo, n. 3, p. 35-45, 1999.
- ARAÚJO, A. Geoarqueologia em sítios abrigados: processos de formação, estratigrafia e potencial informativo. In: RUBIN, J.; SILVA, R. (orgs.). **Geoarqueologia: teoria e prática**. Goiânia: UCG, 2008. p. 71-92.
- BINFORD, L. R. Archaeology as Anthropology. **American Antiquity**, v. 28, n. 2, p. 217-255, 1962.
- CÂMARA, A. A. **Ensaio sobre as construções navaes indígenas do Brasil**. 2. ed. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1937. 261 p. (Brasiliana, v. 92).
- DA GLÓRIA, P. Bioarqueologia dos primeiros habitantes do Brasil Central: saúde e estilo de vida na região de Lagoa Santa, Minas Gerais. **Cadernos do LEPAARQ (UFPEL)**, v. 18, p. 7-40, 2021.
- KOHLER, H.C. Geomorfologia Cárstica. In: GUERRA, A.T.; CUNHA, S. (orgs.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 15. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2021. p. 309-334.
- MALTA, I. **Dinâmica e evolução do sistema cárstico da Lapa Vermelha de Pedro Leopoldo, MG**. 1995. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- NEVES, W.; PILÓ, L. B. **O povo de Luzia**. São Paulo: Editora Globo, 2008. 336 p.
- PROUS, A. **Arqueologia brasileira**. 2. ed. Brasília: Editora da UNB, 2003. 613 p.
- PROUS, A.; BAETA, A. M.; RUBIOLLI, E. **O patrimônio arqueológico da região de Matozinhos: conhecer para proteger**. Belo Horizonte: Del Rey, 2003. 132 p.
- RACZKA, M. F.; OLIVEIRA, P. E. de; BUSH, M.; MCMICHAEL, C. H. Two palaeoecological histories spanning the period of human settlement in southeastern Brazil. **Journal of Quaternary Science**, v. 28, n. 2, p. 144-151, 2013.
- RAPP, G.; HILL, C. **Geoarchaeology: the Earth-Science approach to archaeological interpretation**. New Haven; Londres: Yale University Press, 1998. 274 p.
- SILVA, L.V. da. **O antropogênico e o geogênico na pré-história de Lagoa Santa: estudo geoarqueológico da Lapa do Niáctor**. 2013. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- SILVA, L.V. da; PROUS, A. O papel dos resíduos de combustão na formação dos estratos sedimentares na Lapa do Niáctor: o elemento antrópico como agente dominante na sedimentação em abrigos. **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, v. 23, p. 107, 2014.
- SILVA, L.V. da. Fogueiras da pré-história no vale do rio Taquaraçu: análise geoarqueológica da matriz sedimentar da Lapa do Niáctor, Jaboticatubas, Minas Gerais. **Revista de Geografia**, v. 1, p. 107-122, 2022.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Com a chancela de RAMSAR. **Boletim UFMG**, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <https://www.ufmg.br/boletim/bol1980/4e5.shtml>. Acesso em: 20 jul. 2025.



GEOFORMAS CÁRSTICAS EM ROCHAS NÃO CARBONÁTICAS: O CASO DE PARAÚNA, GOIÁS

Guilherme Lima Brasil dos Santos¹

Luiz Eduardo Panisset Travassos²

André Augusto Rodrigues Salgado³

PALAVRAS-CHAVE: Carste não tradicional, Arenito, Relevo Ruiniforme, Fluvio-carste.

RESUMO

Relevos cársticos são modelados predominantemente por processos de dissolução rochosa e são comumente associados à litologia carbonática. Todavia, embora com menor intensidade, esse processo também ocorre em rochas como arenitos, quartzitos e granitos. Nesses casos, o relevo é considerado carste não tradicional. Neste trabalho, discutem-se os fatores de formação de geossítios areníticos ricos em geoformas cársticas localizados no município de Paraúna, Goiás. O objetivo é verificar se a gênese dessas geoformas está relacionada a processos de carstificação. Para o estudo, analisaram-se os relevos ruiniformes presentes no Parque Estadual de Paraúna e o cânion com caverna atravessada por um rio na Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Ponte de Pedra. A metodologia empregada incluiu a análise do mapeamento da área de estudo e o uso de softwares de geoprocessamento, a fim de classificar essas unidades geológicas. Incluiu, ainda, trabalho de campo para reconhecimento das geoformas. Nesse trabalho de campo, realizaram-se sobrevoos de drone com o objetivo de obter maior detalhamento das geoformas observadas. Como resultado, identificou-se influência de carstificação em localidades do município, mesmo que o mapeamento geológico aponte baixa presença de carbonatos nos arenitos da região. A análise no Parque Estadual de Paraúna aponta a presença de feições menores típicas de relevo cárstico ruiniforme, formadas a partir do desenvolvimento de uma depressão fechada típica de uvala. Para a caverna e o cânion da Ponte de Pedra, verificou-se tratar-se de um fluvio-carste formado pelo abatimento do teto de uma antiga caverna. Sendo assim, a atual cavidade representa o único segmento preservado de um antigo paleocanal subterrâneo. Conclui-se que os geossítios do município de Paraúna constituem um carste não tradicional. Por fim, esses resultados indicam a necessidade de considerar processos de carstificação nos estudos acerca da morfogênese de diversos geossítios, mesmo que não se localizem sobre rochas carbonáticas.

1 Mestrando do Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal de Goiás,
guilhermelbrasil@gmail.com

2 Professor Doutor do curso de Geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais,
luizepanisset@gmail.com

3 Professor Titular do Instituto de Ciências Socioambientais (IESA) da Universidade Federal de Goiás
salgado@ufg.br



INTRODUÇÃO

O termo carste é uma versão em português da palavra alemã ‘Karst’, que deriva da palavra eslovena ‘Kras’, nome atribuído a uma região carbonática na Eslovênia. Essa região é considerada um dos berços da espeleologia moderna, e a adoção do termo pela literatura científica consolidou-se como referência internacional para designar relevos e sistemas geológicos formados predominantemente pela dissolução de rochas carbonáticas. Tal denominação tornou-se popular na literatura científica para descrever formas geológicas resultantes da dissolução de rochas calcárias (Kranjc, 2011). Conforme Ford e Williams (2007), o carste deve ser compreendido como um sistema integrado, resultante da interação entre fatores geológicos, hidrológicos e geomorfológicos. Esse caráter sistêmico envolve também processos biogeoquímicos e hidrogeológicos, que explicam a diversidade e a complexidade das formas superficiais e subterrâneas geradas pela carstificação. Tal sistema se desenvolve prioritariamente em rochas com alta solubilidade, sendo caracterizado por intensos processos de intemperismo químico. Em sua definição clássica, o carste é descrito como exclusivo em rochas calcárias (Cvijic, 1895; 2017). Essa perspectiva tradicional tem sido ampliada com o reconhecimento de processos de dissolução atuantes em rochas não carbonáticas. Tais ambientes deram origem ao conceito de “carste não tradicional”, que busca diferenciar estas ocorrências daqueles contextos em calcários.

Sendo assim, formações cársticas também têm sido reconhecidas em rochas siliciclásticas, como quartzitos, arenitos e granitos (White, 1988; Goudie, 2009). Nesses terrenos, o desenvolvimento de geoformas como dolinas, karren, cavernas e sumidouros geralmente ocorre em menor escala, condicionado por fraturas, descontinuidades estruturais e fluxos hídricos concentrados, que favorecem a dissolução localizada (Travassos, 2019).

Paisagens cársticas possuem grande importância devido à sua geodiversidade, conceito análogo à biodiversidade, que representa a variedade de elementos bióticos e abióticos em uma paisagem (Brilha, 2005; Gray, 2004). No âmbito da geodiversidade, os sistemas cársticos se destacam não apenas pela variedade de formas geomorfológicas, mas também por sua relevância científica, cultural, recreacional, econômica e estética. Estes ambientes apresentam uma relação complexa entre águas superficiais e subterrâneas, conferindo-lhes valores intrínsecos, culturais, científicos, recreacionais, econômicos e estéticos (Williams, 2008).

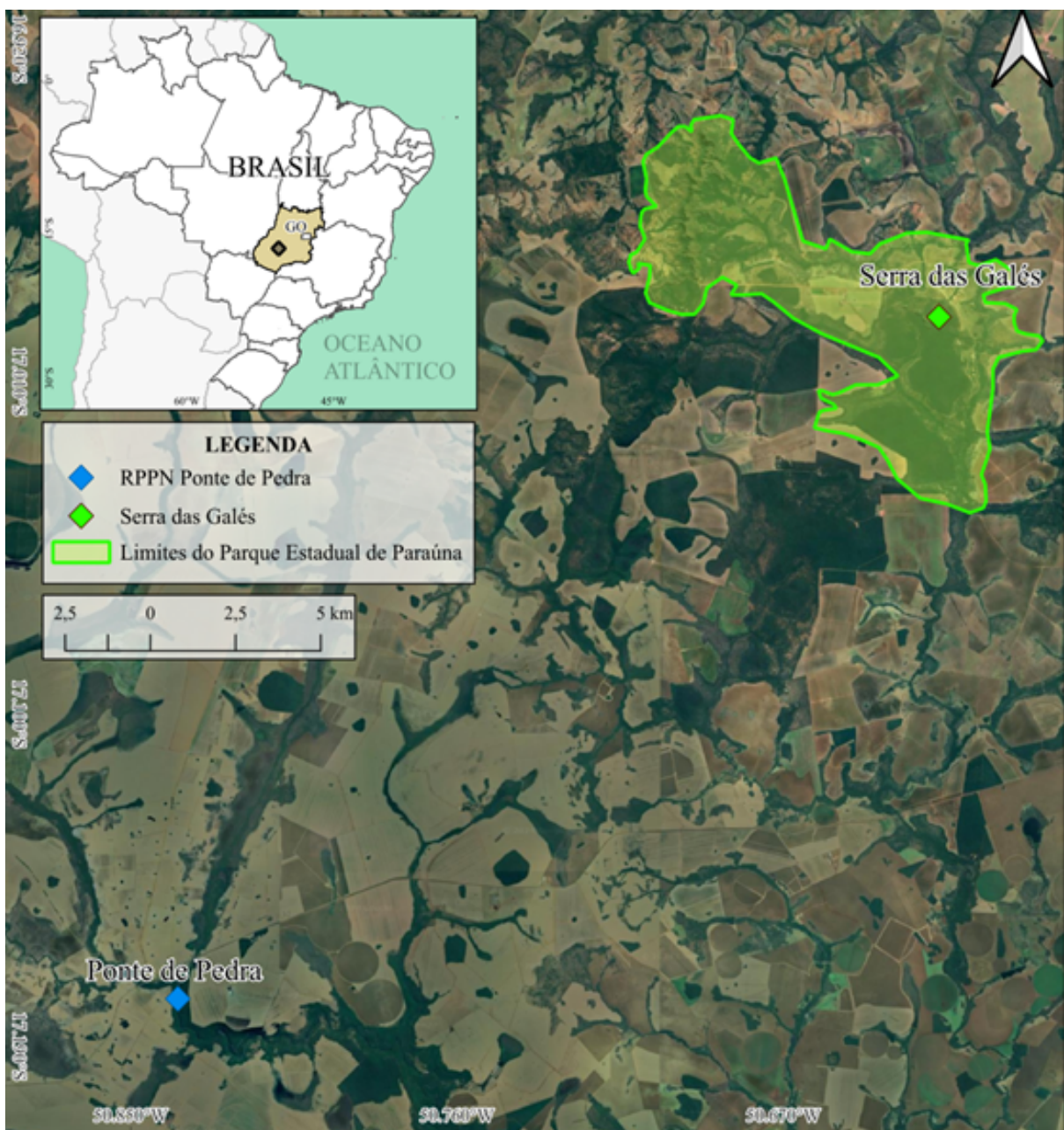
Localizado no estado de Goiás, o município de Paraúna destaca-se por abrigar importantes geopatrimônios com morfologias peculiares (Figura 1). A ocorrência de geoformas em arenitos na região levanta questões relevantes acerca dos mecanismos de gênese, visto que muitas dessas feições apresentam semelhanças morfológicas



com processos de carstificação clássicos. Algumas dessas feições indicam mecanismos de formação distintos daqueles tradicionalmente associados aos carstes clássicos, despertando interesse científico em sua origem.

Entre os locais de maior interesse geomorfológico, destacam-se o Parque Estadual de Paraúna, com formações ruiformes (Figura 2), e a Reserva Particular de Patrimônio Natural Ponte de Pedra, onde um curso d'água atravessa uma cavidade rochosa, originando uma ponte natural (Figura 3). Ambas as formações estão sobre arenitos, mas suas geoformas sugerem processos de dissolução diferenciados, tornando essas áreas objeto de estudo relevantes tanto para a Geomorfologia quanto para o Geopatrimônio.

FIGURA 1: Mapa de localização dos geopatrímônios em Paraúna, Goiás.



FONTE: Elaborado pelos autores.



Dessa forma, a pesquisa tem como objetivo analisar a gênese das geoformas situadas no município de Paraúna, em especial aquelas localizadas no Parque Estadual de Paraúna e na Reserva Particular do Patrimônio Natural Ponte de Pedra, buscando verificar em que medida sua formação pode estar associada a processos cársticos. Mais especificamente, pretende-se avaliar se essas áreas podem ser consideradas cársticas em sua morfogênese, ainda que assentadas sobre litologias siliciclásticas, onde os processos de dissolução química ocorrem de forma menos intensa que em rochas carbonáticas. Dessa forma, a investigação procura contribuir para o entendimento do carste não tradicional e de suas implicações para a geomorfologia regional e para a valorização do geopatrimônio local.

FIGURA 2: Geoformas residuais presentes na Serra das Galés, no Parque Estadual de Paraúna. A: Pedra do Cálice (à esquerda) ao lado de uma torre residual maior; B: Pedra da Tartaruga; C: Vista panorâmica de parte da Serra das Galés.



FOTOS: L.E.P. Travassos



FIGURA 3 : Visão interna da Ponte de Pedra. O ambiente mostra paredes de rocha intensamente modeladas pela ação da água, evidenciando feições típicas do carste. Pedra.



FOTO: L.E.P. Travassos

METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho combinou revisão bibliográfica, análise geoespacial e observação de campo, visando avaliar se as geoformas encontradas no município de Paraúna podem ser atribuídas a processos cársticos, mesmo estando inseridas em litologias predominantemente areníticas.

Na **primeira etapa**, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica direcionada a três frentes: (i) estudos teóricos e empíricos sobre carste não tradicional; (ii) pesquisas relativas à morfogênese em arenitos e outras litologias não carbonáticas; e (iii) obras que abordam a geologia e a geomorfologia do estado de Goiás, fundamentais para contextualizar o recorte espacial da pesquisa. Essa base teórica permitiu estabelecer parâmetros de comparação entre os registros clássicos de carstificação e as feições observadas em Paraúna.

A **segunda etapa** correspondeu à análise geoespacial. Foram utilizados dados cartográficos e geológicos disponibilizados pela CPRM (2008), processados no software QGIS 3.34.6, com o objetivo de identificar as unidades litoestratigráficas predominantes e verificar possíveis inconsistências ou lacunas nos mapeamentos existentes da área de estudo. Além disso, aplicaram-se modelos digitais de elevação (MDE) de 12 metros de resolução, obtidos pelo sensor ALOS-PALSAR, para análises de hipsometria e declividade, possibilitando uma melhor caracterização do relevo e a identificação de padrões associados à gênese das formas.

Por fim, a **terceira etapa** consistiu no trabalho de campo, realizado em visitas às áreas selecionadas. Nessa fase, priorizaram-se a observação direta das geoformas e o registro fotográfico sistemático, de modo a documentar as feições superficiais e estruturas



potencialmente relacionadas à morfogênese cárstica. Durante as atividades de campo, buscou-se reconhecer indícios de dissolução, colapso ou outras evidências morfológicas que pudessem sustentar a hipótese de carstificação em litologias areníticas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Parque Estadual de Paraúna, observa-se um relevo predominantemente ruiforme, caracterizado pela presença de torres residuais que se assemelham às torres cársticas. Tal morfologia levanta a hipótese de que houve a ocorrência de processos de arenização, frequentemente associados a carste não tradicional, em rochas siliciclásticas. Este processo consiste na dissolução gradual do quartzo próximo à superfície, em especial no limite dos cristais, que libera grãos de areia individuais facilmente removidos por água corrente (Martini, 1979).

Conforme Wray (1997), apesar da baixa solubilidade do quartzo, a dissolução em rochas félsicas pode ocorrer de forma significativa, desde que haja fatores como a velocidade das reações químicas e a taxa de fluxo da água. Conforme Martini (1979), relações mais rápidas promovem a arenização superficial, enquanto reações lentas permitem a penetração da água e a formação de estruturas mais profundas. A remoção contínua dos íons dissolvidos pelo fluxo de água impede a saturação precoce das soluções, favorecendo a continuidade do processo (Douglas, 1969; Rimstidt; Barnes, 1980). O relevo ruiforme encontrado na Serra das Galés em Paraúna pode estar associado a condições específicas que permitiram a atuação prolongada destes mecanismos, resultando na morfologia atual.

Silva e Maia (2024) apontam que a dinâmica de formação dos sistemas cársticos em rochas não carbonáticas está fortemente associada à estrutura, como fraturas e planos de acamamento, que funcionam como condutos preferenciais para o fluxo hídrico, promovendo permeabilidade secundária que potencializa os processos de dissolução entre os grãos. Na Serra das Galés foi identificada a presença de concavidades de morfologia similar à de condutos (Figura 4).



FIGURA 4: Possíveis vestígios de paleocondutos na Serra das Galés. A: Reentrância em geoforma residual de morfologia alongada, com fundo arredondado; B: Cavidade circular na Pedra dos Três Magos; C: Concavidades em rocha com formato semelhante à Pedra do Cálice. Os limites das feições estão destacados por linhas amareladas, e os vazios preenchidos com polígonos amarelos de baixa opacidade.

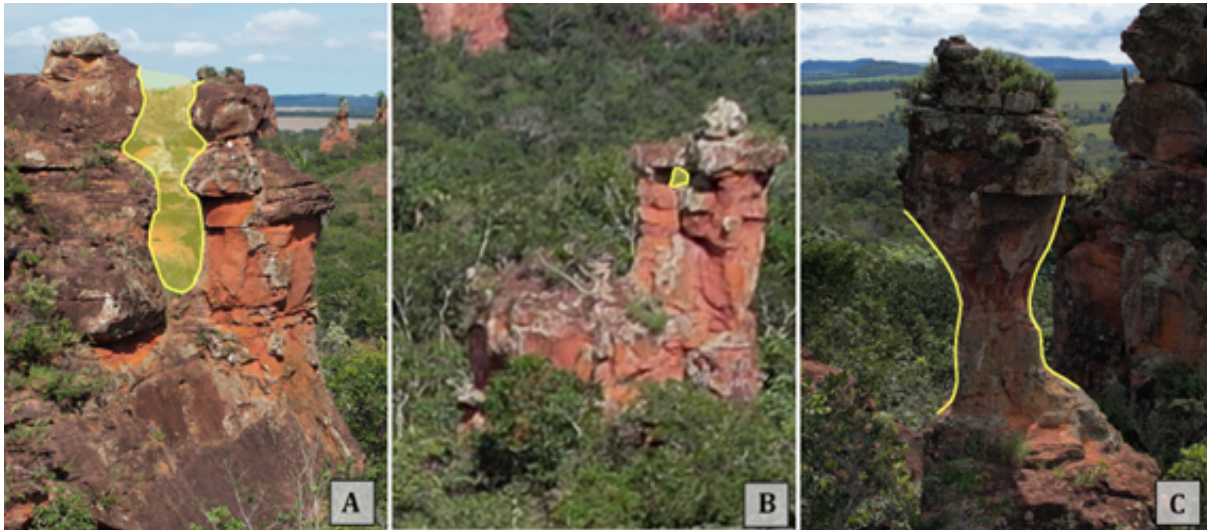


FOTO: L.E.P. Travassos

Foram identificadas feições de fratura residual desenvolvidas entre dois maciços, com fundo arredondado e morfologia semelhante à de condutos (Figura 4A). Além disso, observaram-se pequenas cavidades circulares que atravessam a rocha (Figura 4B), interpretadas como vestígios de paleocondutos típicos. Em paralelo, especula-se que a reentrância presente em rochas com formato similar ao da Pedra do Cálice (Figura 4C) seja outro resquício desses condutos, tendo possivelmente desempenhado papel importante para a modelagem da forma atual.

Na área da Ponte de Pedra, foi identificada a presença de blocos colapsados ao longo do leito do Rio Ponte de Pedra, sugerindo a possibilidade de abatimento da maior parte do antigo teto de caverna (Figura 5C), fato que caracterizaria a atual Ponte de Pedra como o que sobrou de um amplo fluviocarste que existiu no passado. Verificou-se a ocorrência de espeleotemas, como estalactites e estalagmites, no interior da formação (Figura 5B). A presença desses espeleotemas indica condições favoráveis para a percolação hídrica e deposição mineral, sendo provável que sejam compostos por material carbonático (Figura 5).



FIGURA 5: Geoformas associadas à Ponte de Pedra. A: Vista do interior da cavidade, evidenciando a presença de uma abertura superior (claraboia) e uma saída inferior. B: Espelotema do tipo coluna localizado no interior da Ponte de Pedra. C: Blocos colapsados ao longo do curso do Rio Ponte de Pedra, nas proximidades da cavidade.



FOTO: L.E.P. Travassos

A hipótese é de que a Ponte de Pedra é originada por um fluviocarste, formada por um processo originado da relação entre o sistema cárstico e a ação fluvial (Sweeting, 1972). A existência de uma entrada e saída, caracterizadas por sumidouro e ressurgência ao longo do curso do rio, reforça a ideia de que a geoforma foi moldada pela ação fluvial em ambiente subterrâneo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos no trabalho, conclui-se que o município de Paraúna abriga geoformas que, embora localizadas em litologias areníticas, apresentam características típicas de ambientes cársticos. A existência de estruturas, tais como o relevo ruiforme presente na Serra das Galés e a caverna com presença de espeleotemas, na Ponte de Pedra, reforça a hipótese de que houve atuação de processos de dissolução química, mesmo em rochas de menor solubilidade.

Estas evidências sugerem que as duas áreas possam ser consideradas como carste não tradicional. Este reconhecimento tem implicações relevantes não apenas para os estudos geomorfológicos, mas também para ações do geopatrimônio local, que depende do entendimento adequado de seus processos formadores para que esses sejam devidamente valorizados.



REFERÊNCIAS

- CVIJIĆ, J. **CARSTE: Uma monografia geográfica** (1895). Belo Horizonte: PUC Minas, 2017. Tradução de Luiz Eduardo Panisset Travassos.
- DOUGLAS, I. The efficiency of tropical humid denudation systems. **Transactions of the Institute of British Geographers**. V. 46, P. 1-16, 1969
- GOUDIE, A.S. Global deserts and their geomorphological diversity. *In: Geomorphology of desert environments*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. p. 9-20.
- FORD, D.C; WILLIAMS, P. W. **Karst hydrogeology and geomorphology**. John Wiley & Sons, 2007.
- KRANJC, Andrej. The Origin and evolution of the term “Karst”. **Procedia-Social and Behavioural Sciences**, V. 19, P. 567-570, 2011.
- MARTINI, J.E.J., Karst in Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Eastern Transvaal. **Ann. S. Afr. Geol. Surv.** V. 13, P. 115-128, 1979.
- SILVA, M.B.; MAIA, R.P. Aspectos morfoestruturais do carste em arenitos no NE brasileiro: Exemplo da Serra da Capivara – PI. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, V. 25, N. 1, P. 1-23, 2024.
- SWEETING, M.M. **Karst Landforms**. London: Macmillan and New York: Columbia University Press, 1972.
- RIMSTIDT, J. D.; BAMES H. L. The kinetics of silica-water reactions. **Geochimica et Cosmochimica Acta** V. 44, N. 11, P. 1683-1699, 1980.
- TRAVASSOS, L.E.P. **Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica**. 1 ed. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, 2019.
- WRAY, R.A.L. A global review of solutional weathering forms on quartz sandstones. **Earth-Science Reviews**, v. 42, n. 3, p. 137-160, 1997.
- WHITE, W.B. **Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains**. 1ª ed. New York: Oxford University Press, 1988.



CARACTERIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DO CARSTE TRADICIONAL DE BALDIM, MINAS GERAIS

João Victor Gonçalves Mendonça¹

Luiz Eduardo Panisset Travassos²

Jorge Batista de Souza³

PALAVRAS-CHAVE: Carste; Geomorfologia; Espeleologia; Baldim (MG); Conservação.

RESUMO

Este estudo apresenta a caracterização geomorfológica e o inventário de feições cársticas no município de Baldim, Minas Gerais, por meio de uma abordagem multiescalar que combina mapeamento regional (1:100.000) e inventário detalhado (1:25.000). A partir de dados geológicos, topográficos, hidrográficos e climáticos, foram delimitados oito compartimentos morfoesculturais e identificadas 45 feições diagnósticas do carste, incluindo dolinas, uvalas, lagoas temporárias, sumidouros e um polje de ~1.828 ha. A maioria das feições concentra-se no setor centro-norte do município, associada a calcários da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí) e a patamares hipsométricos intermediários (~750–900 m). A leitura geomorfológica e a interpretação de imagens de alta resolução permitiram refinar a detecção do exocarste e subsidiar a gestão territorial, o licenciamento ambiental e ações de geoconservação. Os resultados reforçam a importância do polje como estrutura-chave de redistribuição hídrica e energética e indicam lacunas relevantes no cadastro espeleológico oficial. A metodologia aplicada contribui para a valorização do patrimônio espeleológico e orienta medidas de proteção e de uso sustentável em áreas sensíveis do Carste Mineiro.

¹ Geógrafo, Mestre em Geografia pela PUC Minas. jaovgm03@gmail.com

² Doutor em Carstologia pela University of Nova Gorica, Eslovênia Professor permanente do curso de Geografia da PUC Minas; Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq. luizepanisset@gmail.com

³ Doutor em Geografia pela PUC Minas; Professor permanente do curso de Geografia da PUC Minas profjbatista@gmail.com



INTRODUÇÃO

As paisagens cársticas resultam de interações entre a litologia solúvel, a estrutura, o clima e a hidrologia subterrânea (White, 1988; Ford e Williams, 2007; Palmer, 2007). No Brasil, os carbonatos do Grupo Bambuí sustentam relevos carstificados amplamente documentados em Minas Gerais, depositados sobre o embasamento do Cráton do São Francisco e expressos em formações clássicas como a Sete Lagoas, a Serra de Santa Helena, a Lagoa do Jacaré e a Serra da Saudade (Dardenne, 1978; Uhlein; Paim, 1989; Auler; Zogbi, 2005). Persistem lacunas em escala municipal para áreas fora dos limites da APA Carste de Lagoa Santa — como o caso de Baldim, ao norte da RMBH (Figura 1) —, onde é necessário um inventário sistemático que integre a leitura geomorfológica e a cartografia de feições para refinar a detecção do exocarste.

À luz do arcabouço litoestratigráfico e da conectividade hidrológica típica de terrenos carbonáticos, foi adotada uma abordagem multiescalar que combina mapeamento exploratório (1:100.000) e inventário detalhado (1:25.000), ancorada em bases geológicas (CPRM, 2009), modelos digitais de elevação de 30 m (INPE, 2011) e rede hidrográfica de referência (IGAM, 2009; IBGE, 2009), com interpretação à luz da taxonomia do relevo para ordenar compartimentos e feições de forma coerente no gradiente morfoestrutural (Ross, 1992) e com procedimentos de geoprocessamento consolidados para integração, análise espacial e validação cruzada (Câmara et al., 2004).

No escopo deste estudo, o objetivo geral é caracterizar

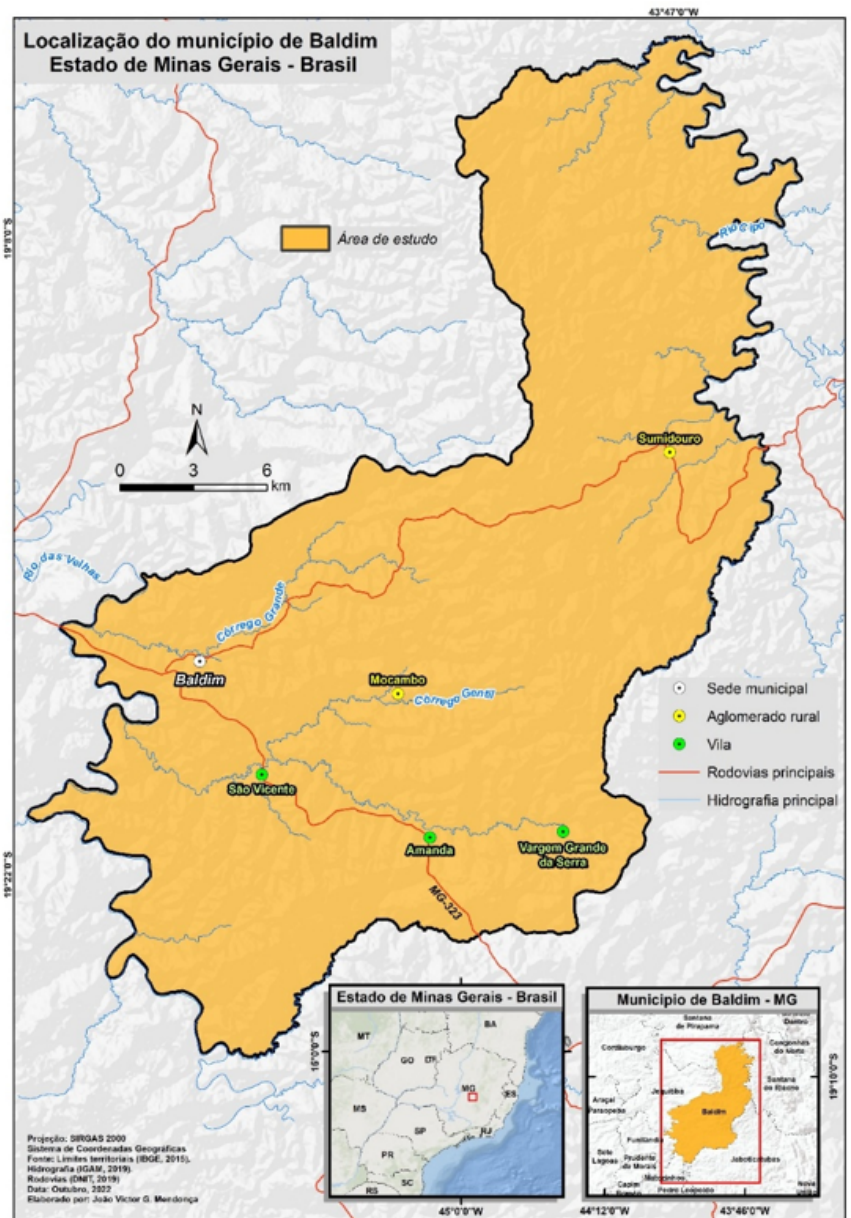


FIGURA 1: Localização da área de estudo no Município de Baldim Estado de Minas Gerais. **FONTE:** Elaborado pelos autores



o carste de Baldim e identificar suas principais feições; especificamente, definem-se os compartimentos morfodinâmicos em escala regional, identificam-se feições cársticas prioritárias, discutem-se as implicações para a geoconservação e o espeleoturismo e registram-se limitações e direções para o monitoramento. Entende-se que a leitura multiescalar revela padrões do exocarste, suas relações com a hipsometria e com os domínios hidrogeológicos, o que favorece a tomada de decisões de gestão e licenciamento.

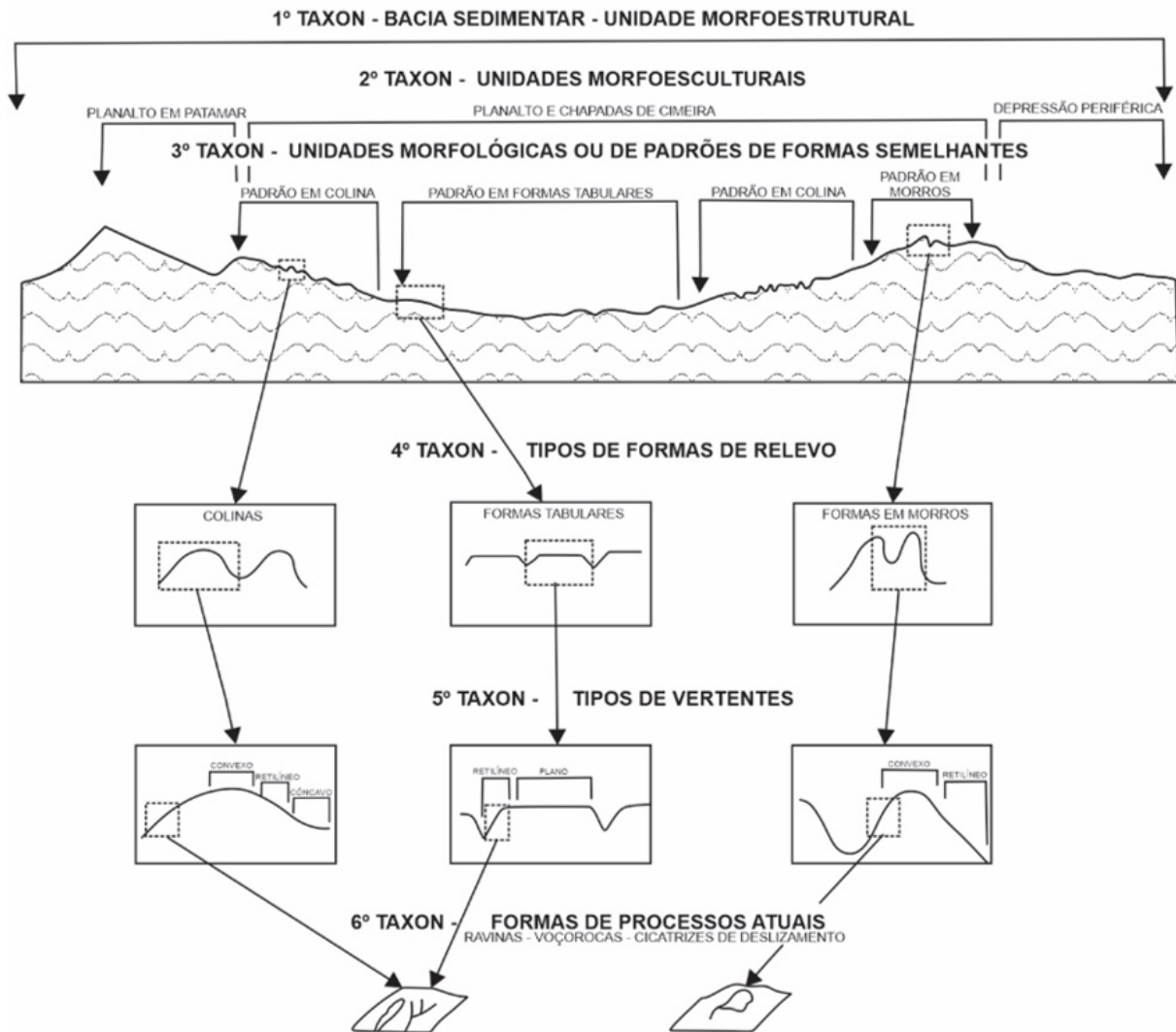
REFERENCIAL TEÓRICO

A análise geomorfológica aplicada ao carste articula morfoestrutura, morfoescultura e processos atuantes, organizando o espaço por meio de uma taxonomia do relevo que permite reconhecer padrões regionais (compartimentos) e formas elementares (feições), conforme mencionado por Christofolletti (1980) e Ross (1992). No quadro taxonômico de Ross (1992), as grandes unidades reúnem várias unidades morfoesculturais (2º táxon) que refletem controles climáticos, resistência litológica e arranjo estrutural; o 3º táxon agrupa padrões de formas semelhantes por rugosidade e dissecação; o 4º táxon individualiza formas (planícies fluviais, morros, colinas) e o 5º detalha as geometrias de vertentes (topo, face, base); já o 6º táxon trata formas menores e atuais (voçorocas, ravinas, assoreamentos, lixiviação), com forte influência antrópica. Essa hierarquia taxonômica (Figura 2) mostra-se útil para a caracterização de ambientes cársticos e para orientar mapeamentos em múltiplas escalas, do reconhecimento regional ao inventário detalhado de feições.

A morfogênese cárstica deriva, sobretudo, da dissolução de rochas mais solúveis (calcários, dolomitos, gipsitas) e de sua interação com água levemente ácida (Bögli, 1980; White, 1988). As morfologias superficiais — lapiás/karren, dolinas, uvalas, poljes — e as subterrâneas — condutos e cavernas — resultam da integração entre estrutura, litofácies e gradientes hidráulicos (Ford; Williams, 2007; Palmer, 2007; Audra; Palmer, 2007; Travassos, 2019). No carste, a conectividade hidrológica entre superfície e subsuperfície confere singularidade ao sistema e torna feições como dolinas, uvalas, poljes e sumidouros expressões de reorganização do escoamento e de redistribuição de massa por dissolução, subsidência e abatimento (White, 1988; Piló, 2000; Ford; Williams, 2007; Piló, 2000).



FIGURA 2: Classificação taxonômica do relevo proposta por Ross (1992).

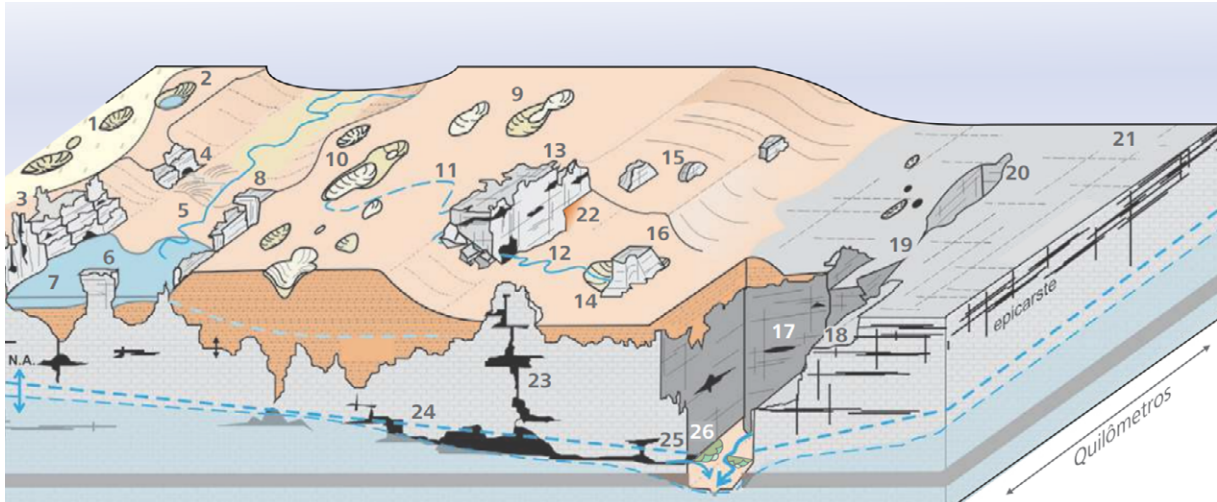


FONTE: Ross (1992).

O carste (Figura 3) apresenta três zonas interligadas. O epicarste desempenha papel fundamental no desenvolvimento do carste: é uma zona altamente permeável, situada logo abaixo da superfície, composta por rochas carbonáticas intemperizadas (Travassos, 2019). A proximidade do epicarste com a superfície eleva o contato da rocha com o CO₂ atmosférico e aumenta o “custo” energético da dissolução; por isso, as feições de dissolução tendem a ser mais alargadas próximo à superfície e mais estreitas em profundidade, onde o CO₂ diminui. Em síntese, a zona epicárstica é a principal via de drenagem da água rumo a níveis mais profundos, favorecendo a evolução de discontinuidades (fraturas, fissuras) — processo particularmente rápido em rochas ricas em calcita e dolomita (Ford; Williams, 2007; Timo, 2014).



FIGURA 3: Feições Cársticas.



LEGENDA: 1. Campo de dolinas; 2. Dolina com lago; 3. Maciço lapiezado com torres e bancadas; 4. Surgência; 5. Poljé; 6. Hume; 7. Lagoa cárstica; 8. Torres; 9. Uvalas; 10. Dolina com sumidouro intermitente; 11. Drenagem subterrânea; 12. Ressurgência; 13. Escarpa calcária (paredão); 14. Sumidouro; 15. Verrugas; 16. Afloramento em dolina; 17. Cânion cárstico; 18. Patamares; 19. Ponte natural; 20. Clarabóia/dolina de colapso; 21. Pavimento calcário; 22. Abrigo sob rocha; 23. Abismo; 24. Caverna; 25. Ressurgência temporária; 26. Tufas calcárias

FONTE: Berbert-Born (2016)

No endocarste, a morfologia subterrânea é marcada por condutos (cavernas, grutas, lapas, abismos, furnas), com depósitos químicos e clásticos; seu desenvolvimento resulta das reações entre água, CO₂ e carbonato de cálcio, variando conforme as heterogeneidades de composição e a posição estratigráfica (Bögli, 1980; Piló, 2000; Travassos, 2019). A água infiltra-se pela rocha exposta ou por corpos hídricos superficiais, adquire propriedades da litologia e percorre caminhos preferenciais sujeitos a fraturamentos e rupturas; do ponto de vista hidrológico, diâmetros muito pequenos (5–15 mm) já são suficientes para a circulação no subsistema — ainda que a legislação defina “caverna” pelo acesso humano (Ford; Williams, 2007).

Quanto às feições superficiais, dolinas podem resultar de dissolução concentrada, abatimento por colapso de tetos de condutos ou subsidência por sufusão; uvalas correspondem a coalescências de dolinas, e poljes formam grandes depressões com fundo plano e alagamento sazonal (White, 1988; Piló, 2000; Ford; Williams, 2007; Travassos, 2019). Em ambientes intertropicais, a pedogênese e a sazonalidade reforçam o papel do epicarste. No plano hidrogeológico, é comum reconhecer dupla ou tripla porosidade (matriz, fraturas e condutos) e distinguir zonas vadasas, freáticas e epicársticas; a densidade de dolinas e a presença de ponores/sumidouros funcionam como proxies de conectividade e vulnerabilidade do aquífero (Bögli, 1980; White, 1988; Travassos, 2019).



No contexto de classificação e tipificação, distingue-se (i) o carste tradicional (rochas carbonáticas/evaporíticas), (ii) o carste não tradicional (dissolução em siliciclásticas/félsicas com porções solúveis) e (iii) o pseudocarste (morfologias análogas por processos não dissolutivos, como piping e colapsos em coberturas). Essa distinção evita interpretações equivocadas e direciona os protocolos de inventário e de gestão, conforme Travassos (2019).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi conduzida a partir de uma estratégia integrada em cinco frentes: (i) compilação de dados secundários, (ii) interpretação geomorfológica multiescalar, (iii) triagem visual em imagens de satélite (~2 m), (iv) verificação em campo e (v) síntese cartográfica.

Inicialmente, reuniram-se as bases temáticas de referência: cartografia geológica em escala regional e local (CPRM, 2003; 2009), Modelo Digital de Elevação de 30 m para derivação de declividade, hipsometria e formas do terreno (INPE, 2011), rede hidrográfica oficial (IGAM, 2009; IBGE, 2009), séries climáticas para contextualização sazonal e identificação de extremos (INMET, 2023) e mapeamentos de uso e cobertura da terra (INPE/EMBRAPA, 2018). As camadas foram normalizadas em um mesmo sistema de referência e grade cartográfica, verificadas quanto a lacunas e topologia, e submetidas a operações padrão de geoprocessamento — dissoluções, overlays e cruzamentos espaciais — conforme práticas de análise espacial (Câmara et al., 2004; Longley et al., 2005).

Com as bases integradas, a interpretação multiescalar foi realizada em duas janelas cartográficas complementares. Na escala 1:100.000, organizou-se a paisagem em compartimentos morfoesculturais, cruzando litologia, estrutura, relevo e drenagem para reconhecer padrões de dissecação e superfícies de aplainamento. Esse passo fornece o arcabouço de contexto no qual as feições cársticas se inserem, reduzindo vieses de amostragem e orientando a busca por áreas-chave. Em seguida, na escala 1:25.000, estruturou-se o inventário de feições com foco em depressões fechadas (dolinas, uvalas, poljes), feições de recarga e descarga (sumidouros e surgências) e elementos epicársticos/subsuperficiais inferíveis, sempre interpretados à luz dos condicionantes litoestruturais definidos na etapa regional.

A interpretação visual utilizou imagens de satélite para realçar assinaturas morfológicas e hidrológicas típicas do carste: contornos circulares com shading interno (depressões fechadas), alinhamentos de depressões ao longo de fraturas, marcas de encharcamento sazonal em fundos planos, sumidouros pontuais em talvegues efêmeros



e contrastes de textura associados a afloramentos carbonáticos. Essa leitura foi apoiada por produtos derivados do MDE (mapas de declividade e de curvatura de vertente) para distinguir depressões naturais de artefatos de dados e priorizar alvos com maior consistência geomorfológica (INPE, 2011; Câmara et al., 2004). Quando pertinente, camadas de uso e cobertura foram sobrepostas para verificar possíveis interferências antrópicas (aterros, escavações, estradas) que pudessem mimetizar formas cársticas (INPE/EMBRAPA, 2018).

A verificação em campo concentrou-se em pontos de controle distribuídos por setores com maior densidade interpretada de feições e/ou maior incerteza da assinatura remota. Em cada ponto, registraram-se coordenadas, croquis e fotografias, além de observações sobre morfologia, presença de evidências de recarga/descarga (infiltração ativa, surgências), material de preenchimento e estabilidade das bordas. Esses dados serviram para confirmar as tipologias (dissolução, abatimento, sufusão) e ajustar os limites mapeados no gabinete, reduzindo falsos positivos e negativos e refinando a compreensão do papel do epicarste na conectividade do sistema.

Por fim, a síntese cartográfica integrou os resultados em dois produtos: (a) o mapa de compartimentos (1:100.000), que comunica a organização espacial do relevo e seus controles litoestruturais, e (b) o mapa-inventário de feições (1:25.000), com cada ocorrência geocodificada, tipificada e anotada (gênese interpretada, evidências, grau de confiança). A composição cartográfica adotou simbologia e convenções compatíveis com o uso técnico (classes, rótulos e hierarquia visual) e metadados completos (fontes, datas, escalas, precisão planimétrica), assegurando a reprodutibilidade e a portabilidade dos insumos para avaliações ambientais e de planejamento. Todo o fluxo — da preparação de dados à validação e consolidação dos mapas — seguiu princípios de rastreabilidade e controle de qualidade recomendados na literatura de SIG e análise espacial (Câmara et al., 2004; Longley et al., 2005), mantendo, ao longo do processo, o vínculo explícito entre a base geológica/hidrográfica (CPRM, 2003; 2009; IGAM, 2009; IBGE, 2009), o relevo derivado (INPE, 2011), o contexto climático (INMET, 2023) e a cobertura atual da paisagem (INPE/EMBRAPA, 2018).

ÁREA DA PESQUISA

Baldirim, ao norte da RMBH, combina um quadro socioeconômico de baixo crescimento demográfico e envelhecimento relativo com uma base produtiva ancorada na agropecuária e em pequenas agroindústrias; embora indicadores de



educação e longevidade tenham avançado, a renda per capita permanece aquém dos polos urbanos vizinhos, e a expansão recente tende a se alinhar a eixos viários, gerando pressões difusas sobre o espaço rural (IBGE, 2023; COBRAPE, 2014).

No contexto geológico-geomorfológico o município assenta-se no Cráton do São Francisco, com predomínio de unidades do Grupo Bambuí — Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade — recobertas por depósitos quaternários (Figura 4); nesse arcabouço, carbonatos da Lagoa do Jacaré oferecem meio altamente favorável à carstificação, enquanto discontinuidades estruturais orientam a drenagem subterrânea e a implantação de feições (Dardenne, 1978; Uhlein; Paim, 1989; CPRM, 2009).

O clima regional enquadra-se nos tipos Aw/Cwa de Köppen-Geiger, com sazonalidade típica do Sudeste. Na escala de Baldim, diante da ausência de estação do INMET no município, utilizou-se a estação automática de Sete Lagoas (série 2016–2023), que indica temperatura média mensal de aproximadamente 21,7 °C (amplitude ~8 °C; máx. 24,8 °C; mín. 16,6 °C) e precipitação média mensal em torno de 120 mm, com episódios superiores a 470 mm no verão (jan–fev) de 2021 e 2023. Esse regime, característico de climas tropicais sazonais, expressa um balanço hídrico com recarga concentrada no verão e recessão no inverno, coerente com pulsos de recarga e com implicações geomorfológicas e hidrogeológicas para a ativação de dolinas e encharcamentos (Köppen; Geiger, 1936; Martins et al., 2018; INMET, 2023).

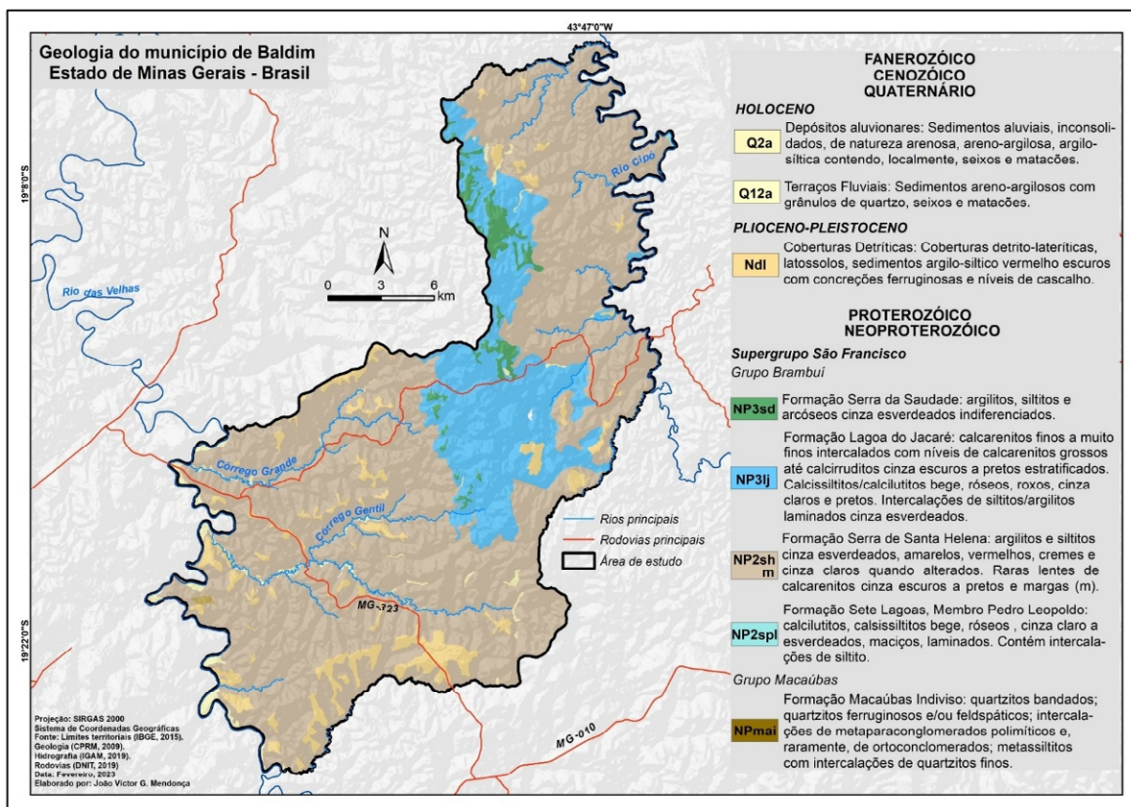


FIGURA 4: Mapa geológico simplificado do município de Baldim, Minas Gerais.
FONTE: Elaborado pelos autores.



Hidrograficamente (Figura 5), Baldim integra a bacia do rio das Velhas e se organiza em sub-bacias que convergem para níveis de base locais, combinando dois domínios hidrogeológicos principais — Carbonatos–Metacarbonatos e Poroso/Fissural — com maior densidade de cursos na margem direita; em contextos carbonáticos, é esperada a recarga focada por dolinas/ponores e a descarga por surgências, refletindo a conectividade típica de sistemas cársticos.

Considerando o potencial espeleológico, o mapeamento nacional do CECAV (2012) estrutura o território em cinco classes (Muito Alto, Alto, Médio, Baixo, Ocorrência improvável) e aponta que ~78,4% das cavernas brasileiras concentram-se em áreas Muito Alto/Alto, ~12,8% em Médio e ~8,7% em Baixo/Improvável — majoritariamente em rochas carbonáticas e formações ferríferas —, fornecendo critérios robustos para a definição de zonas sensíveis e condicionantes de licenciamento em nível local.

A compartimentação do relevo em Baldim (Figura 6), fundamentada na taxonomia do relevo proposta por Ross (1992) e em produtos derivados do MDE de 30 m, revela quatro unidades geomorfológicas (ou padrões de formas dominantes): colinas amplas; colinas dissecadas e morros baixos; morros e serras baixas; e tabuleiros. Nesses compartimentos, superfícies suavizadas alternam-se com depressões fechadas e vales encaixados desenvolvidos sobre áreas carbonáticas.

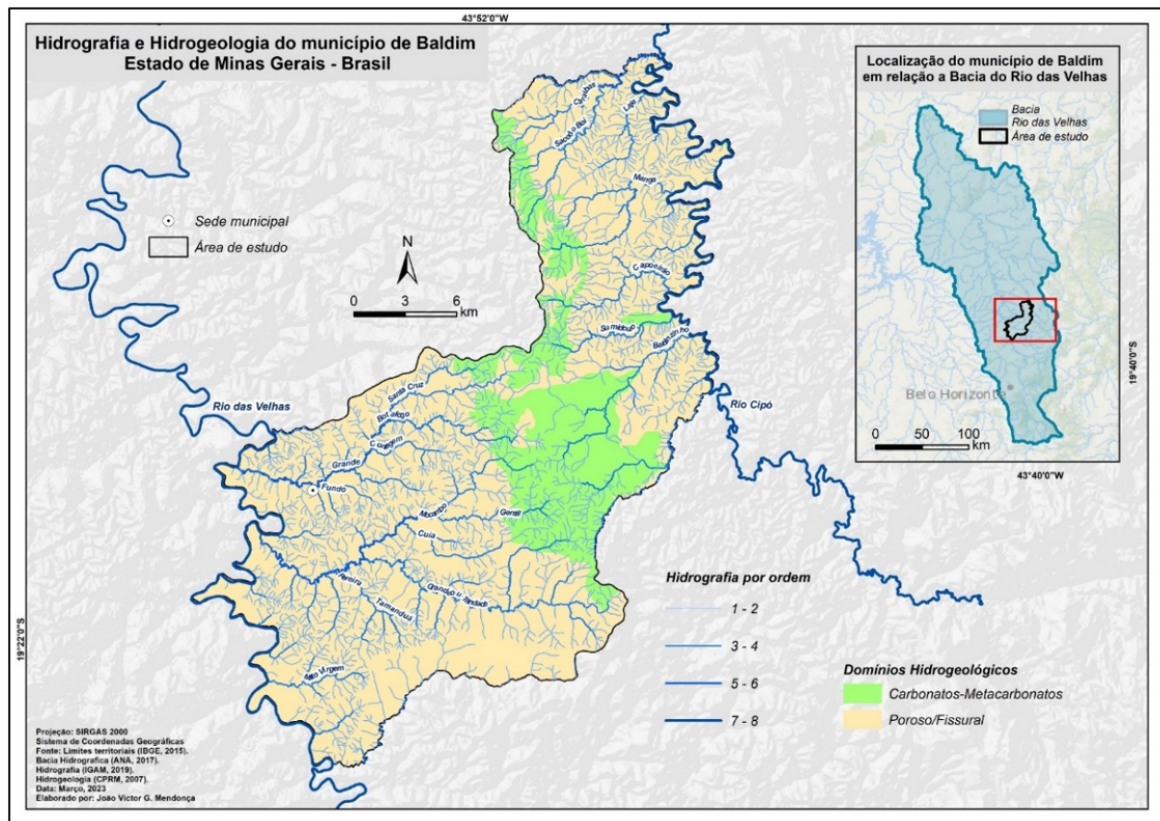


FIGURA 5: Mapa da hidrografia e dos domínios hidrogeológicos.

FONTE: Elaborado pelos autores.

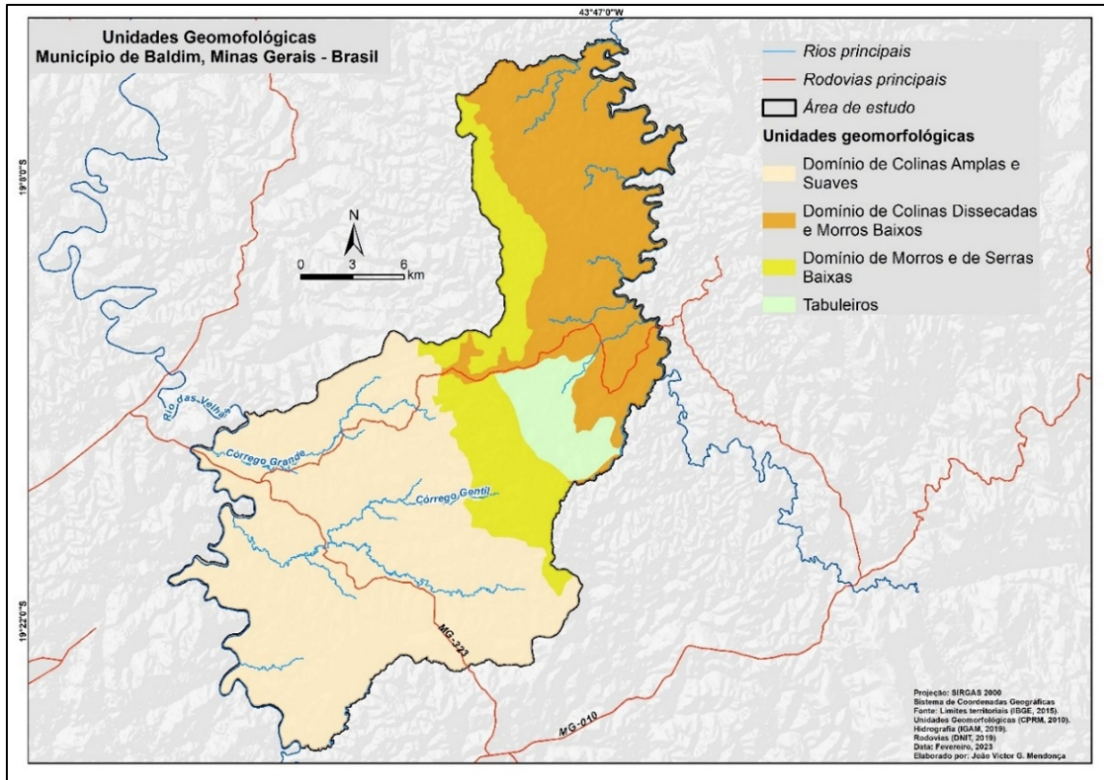


FIGURA 6: Mapa das unidades geomorfológicas do município de Baldim, Minas Gerais.
FONTE: Elaborado pelos autores.

Esses padrões se articulam a uma base pedológica (Figura 7) formada, sobretudo, por Cambissolos, Latossolos e Neossolos — com Argissolos e Plintossolos em posições específicas de relevo —, cujas propriedades texturais e estruturais controlam a infiltração, a estabilidade das bordas de dolinas e a suscetibilidade a processos erosivos em vertentes de recarga difusa (EMBRAPA, 2011; IBGE, 2015).

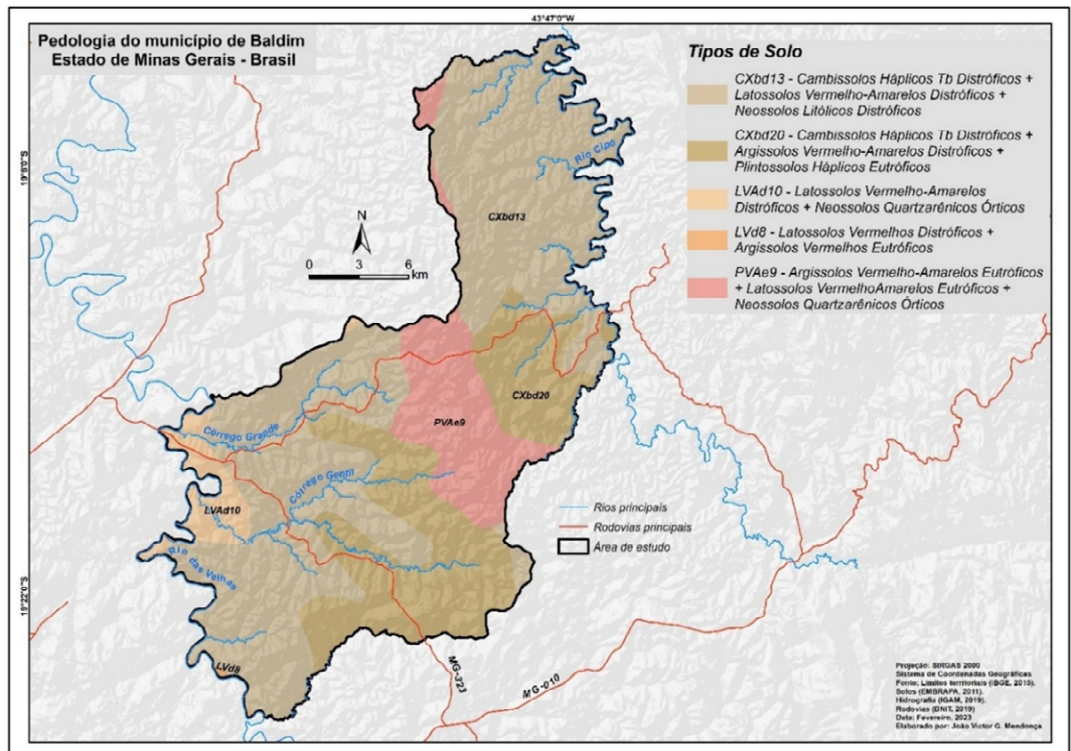


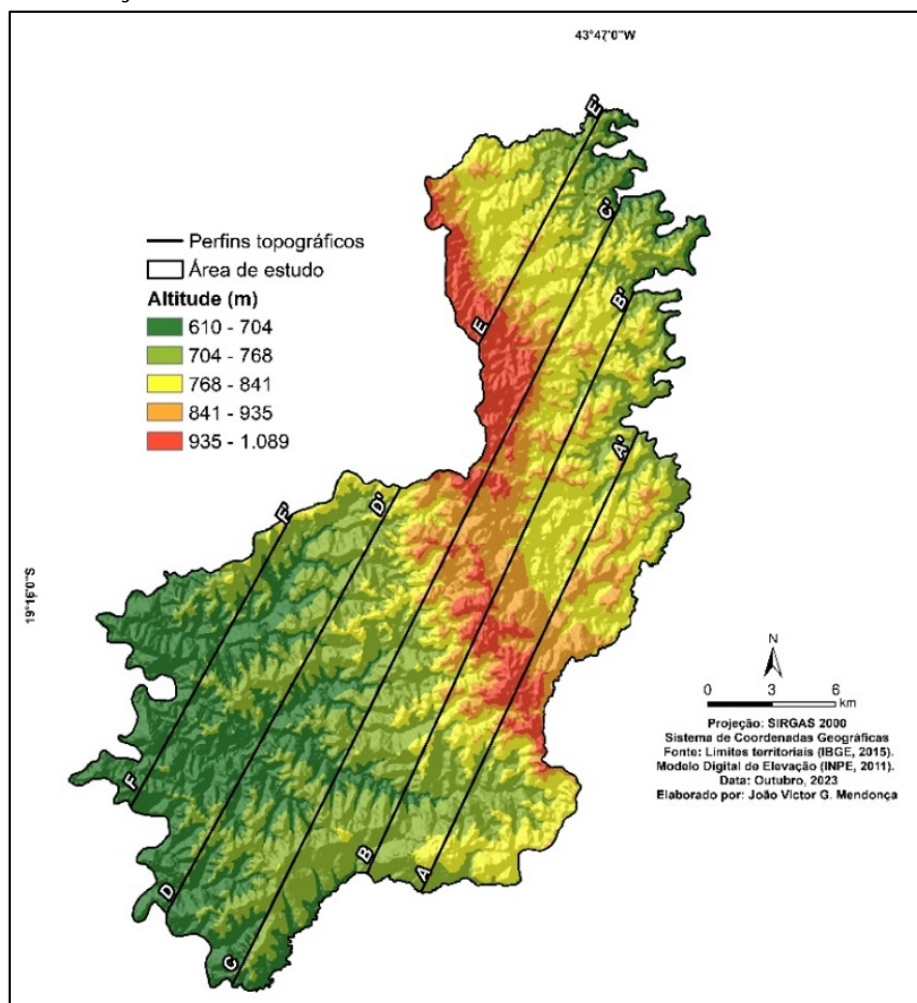
FIGURA 7: Mapa dos principais tipos de solo do município de Baldim, Minas Gerais.
FONTE: Elaborado pelos autores.



RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapeamento geomorfológico em escala 1:100.000, elaborado com base na escala taxonômica de Ross (1992), delineou oito compartimentos para o município de Baldim, ampliando e refinando a leitura oficial em 1:250.000 (CPRM), que reconhecia apenas quatro domínios. A principal divergência refere-se à substituição do compartimento “Tabuleiros” por superfícies suavemente onduladas em depressão, associadas a áreas de subsidência e reorganização da drenagem. Os compartimentos identificados são: Morros dissecados com vales encaixados; Colinas suave-onduladas; Colinas onduladas; Colinas dissecadas; Planície do Rio das Velhas; Planície fluvial do Rio das Velhas; Superfície suave ondulada em depressão; e Vale fluvial do Rio Cipó. Essa compartimentação resulta da integração entre geologia, hipsometria, declividade, perfis topográficos e verificação de campo.

Para sustentar a compartimentação, foram elaborados seis perfis topográficos (Figura 8), com base no MDE de 30 m (INPE, 2011), orientados SW–NE, além de um mapa geomorfológico (Figura 9), que organizou a paisagem e serviu de base para a prospecção das feições do exocarste.



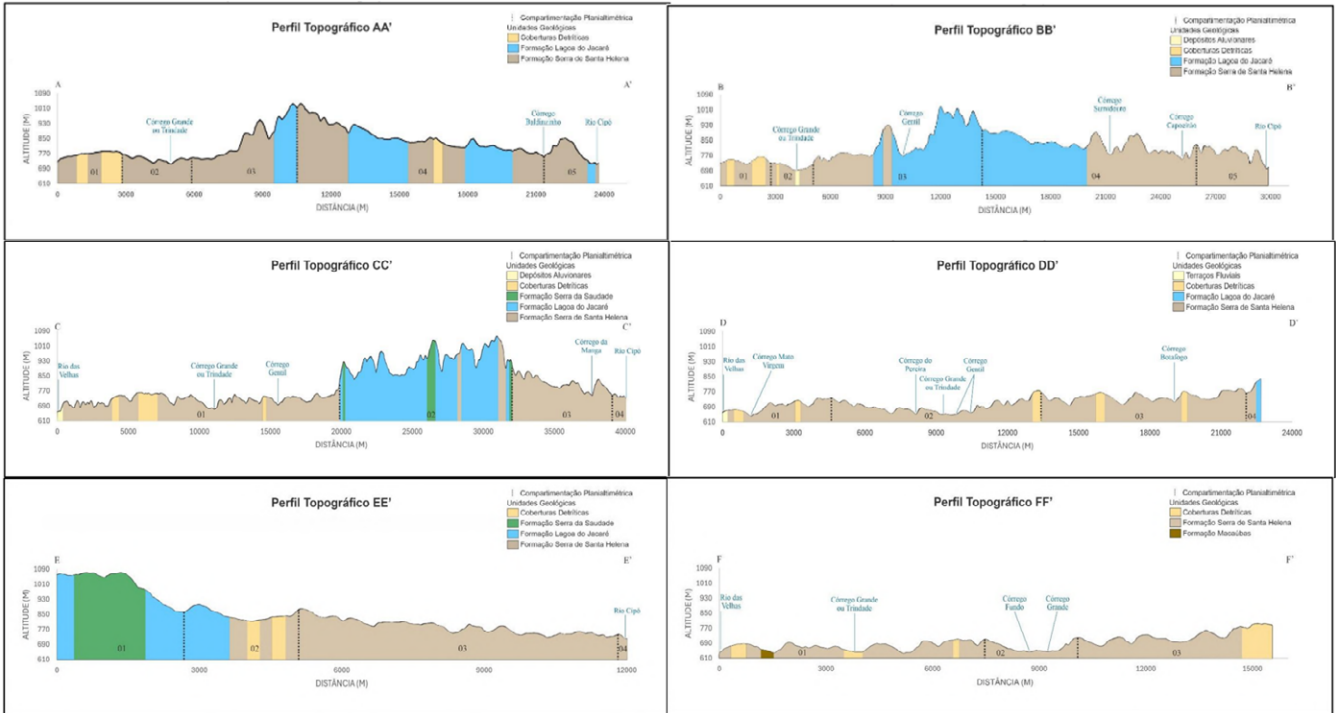


FIGURA 8: Perfis topográficos traçados na área de estudo.

FONTE: Elaborado pelos autores

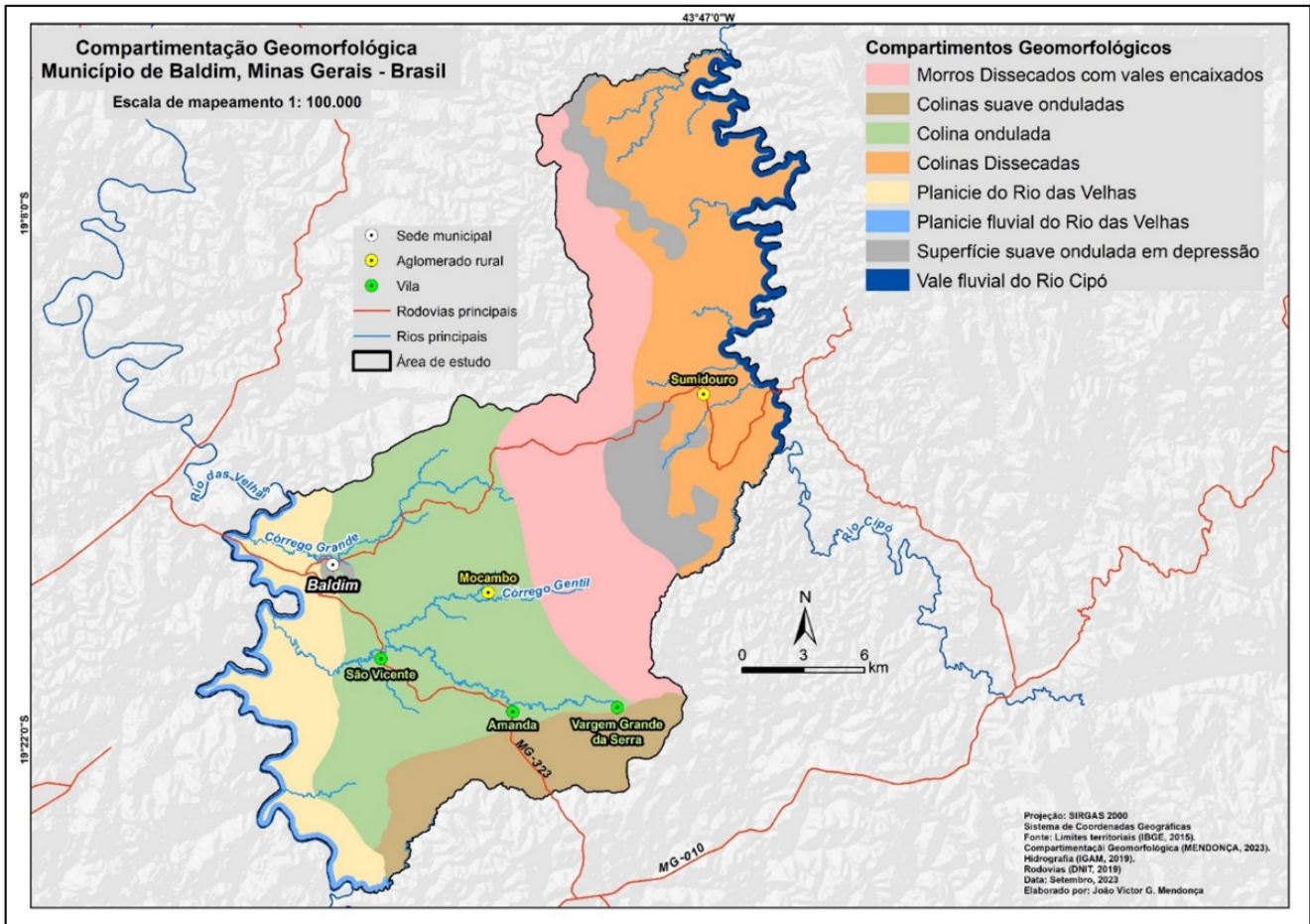


FIGURA 9: Mapa de compartimentos geomorfológicos do município de Baldim, Minas Gerais, em escala 1:100.000.

FONTE: Elaborado pelos autores.



Em etapa subsequente, o território municipal foi subdividido em 40 quadrantes de 25 km², compatíveis com a escala de inventário 1:25.000 (Figura 10). A análise sistemática de imagens de alta resolução (SAS Planet/Bing, 2 m) associada às campanhas de campo realizadas entre 2023 e 2024 orientou a identificação e caracterização das feições cársticas, resultando na elaboração do mapa exploratório de feições.

O inventário em escala 1:25.000 registrou 45 feições cársticas distribuídas em 12 dos 40 quadrantes, com maior concentração na porção centro-norte do município, onde afloram rochas carbonáticas do Grupo Bambuí. Além dos registros de feições obtidos nesta pesquisa, o estudo também incorporou sete cavernas previamente cadastradas no CANIE (2022).

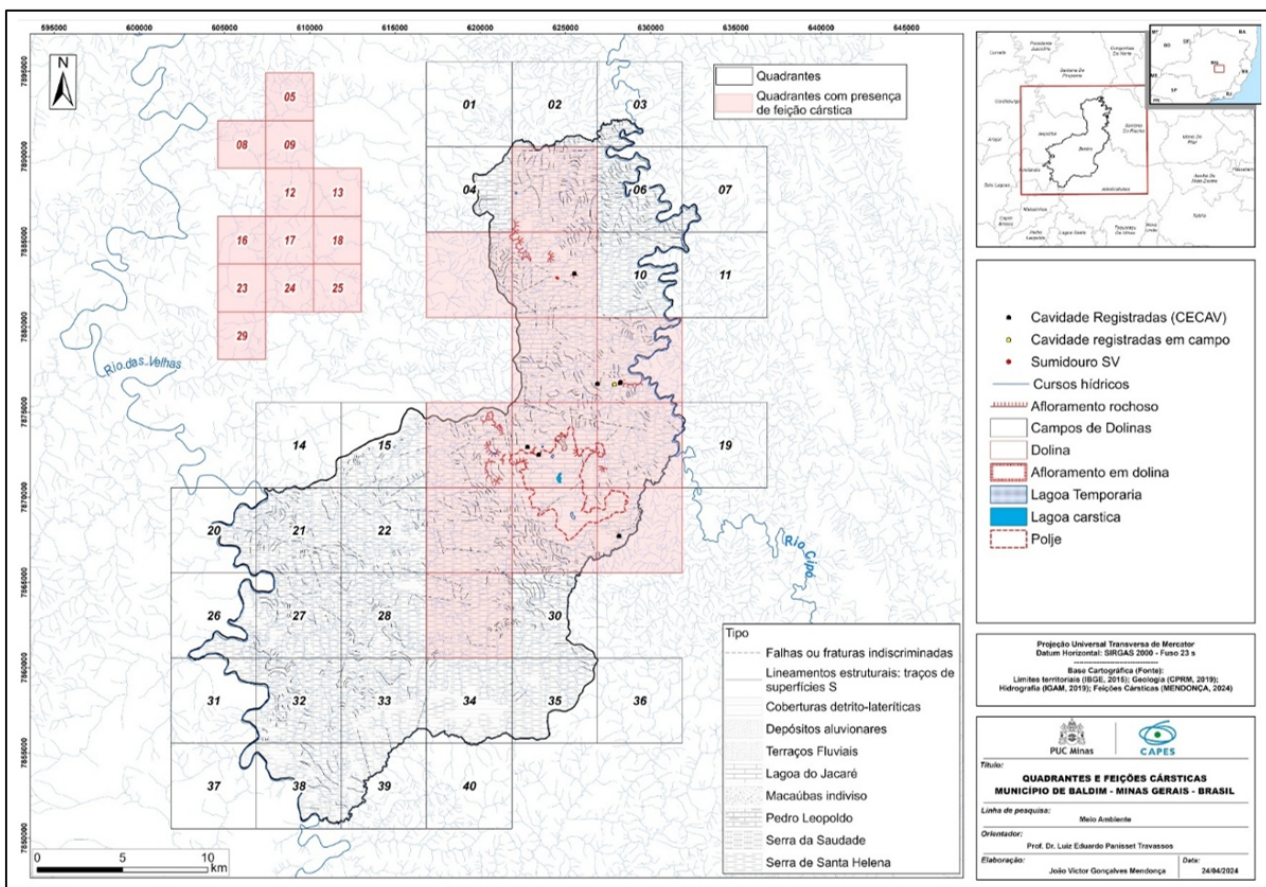


FIGURA 10: Disposição dos quadrantes em relação ao município de Baldim e às feições cársticas mapeadas.

FONTE: Elaborado pelos autores.

Entre as ocorrências mais expressivas, destaca-se um polje situado na região centro-leste do município ($19^{\circ}15'22.62''S$ / $43^{\circ}48'51.87''W$), abrangendo os quadrantes 16, 17, 18, 24 e 25 e totalizando aproximadamente 1.828 hectares. O polje apresenta piso plano circundado por elevações suaves e, em seus limites internos, ocorrem processos ativos de dissolução, com lagoas temporárias e múltiplas dolinas interconectadas, configurando um campo de dolinas bem desenvolvido (Figura 11).

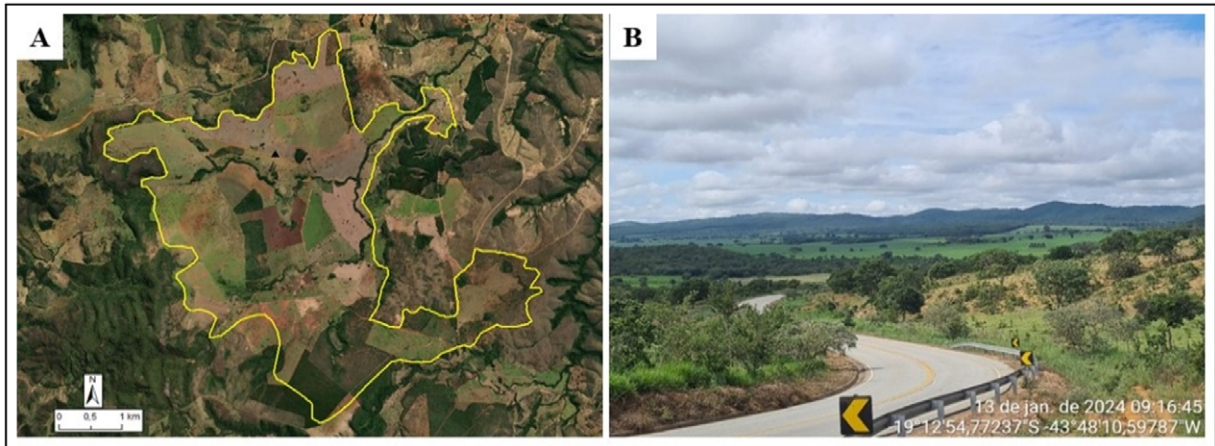


FIGURA 11: Polje em Baldim, MG. (A) Visão vertical com contorno amarelo que delimita o polje. (B) Visão oblíqua da porção central, evidenciando o piso relativamente plano e as bordas mais elevadas.

FONTE: Fotos de J.V.G. Mendonça (2024).

A configuração da feição segue as características delineadas por White (1988), manifestando-se como uma ampla depressão fechada, caracterizada por um piso plano circundado por elevações. Em concordância com a interpretação de Travassos (2019), foram identificados, nos limites internos, processos ativos de dissolução cárstica, expressos pela ocorrência de lagoas temporárias e de múltiplas dolinas coalescentes, que, em determinados setores, constituem um campo de dolinas.

O campo de dolinas (Figura 12) localiza-se no interior do polje, no quadrante 17 ($19^{\circ}13'53.90''S$ / $43^{\circ}48'43.87''W$), abrangendo uma área de aproximadamente 26 hectares e reunindo 11 dolinas individualizadas e não coalescentes. A maior delas, situada no extremo sul do campo, apresenta acúmulo permanente de água e foi classificada como dolina com lago.

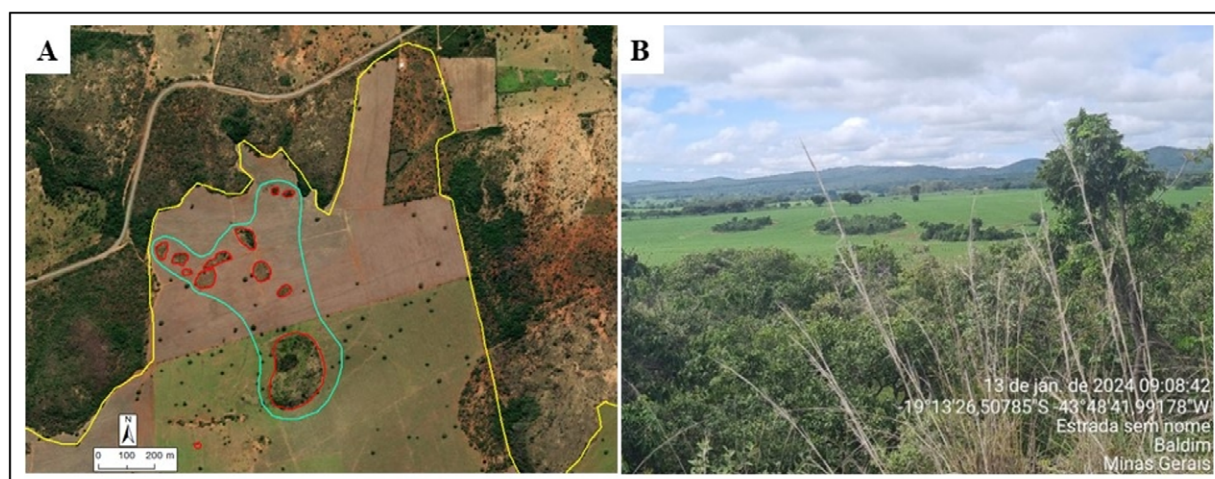


FIGURA 12: Campo de Dolinas. A) Destacado em amarelo a extremidade norte do polje, em verde a área caracterizada como campo de dolinas e, em vermelho, as dolinas. B) Dolinas observadas em campo sob uma perspectiva horizontal.

FONTE: Fotos de J.V.G. Mendonça (2024).



A lagoa cárstica principal localiza-se no quadrante 17 ($19^{\circ}14'59.69''S$ / $43^{\circ}48'50.89''W$), abrangendo uma área de aproximadamente 10 hectares e apresentando atividade hidrológica persistente ao longo das séries temporais de imagens, ainda que com oscilações sazonais no espelho d'água (Figura 13).

Conforme a interpretação de Berbert-Born (2016), as lagoas cársticas representam manifestações superficiais do lençol freático, resultantes do seu afloramento em depressões topográficas, ou formam-se pelo acúmulo de água em solos argilosos de baixa permeabilidade, ocupando os fundos das depressões cársticas.

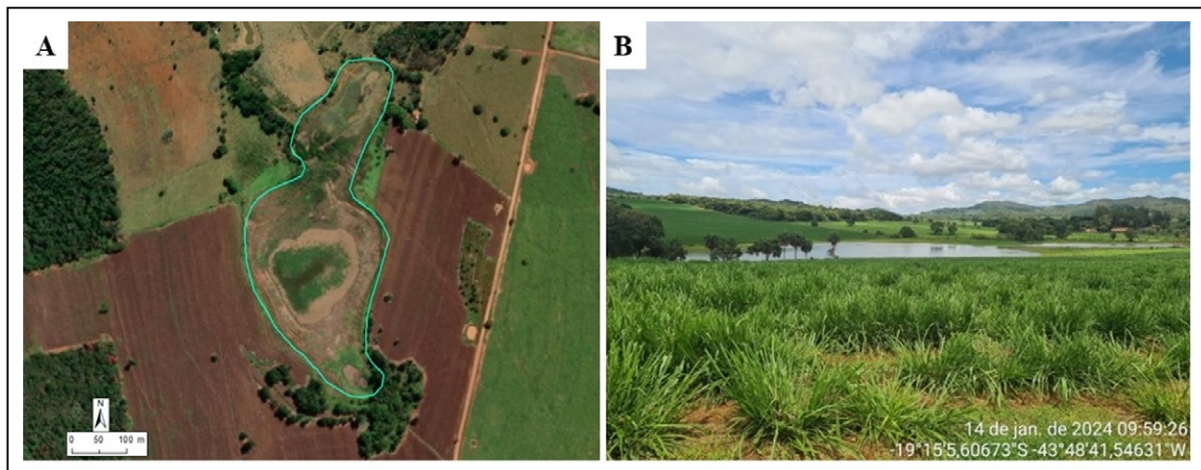


FIGURA 13: Lagoa cárstica principal. A) Destacado em verde o limite da Lagoa Cárstica, observada a partir de uma visão vertical. B) Lagoa cárstica observada em campo a partir de uma visão horizontal.

FONTE: Fotos de J.V.G. Mendonça (2024).

A partir de uma análise multitemporal das imagens de satélite, verificou-se que, apesar das oscilações no espelho d'água, a lagoa cárstica mantém atividade hidrológica persistente ao longo do tempo.

Na borda norte do polje ($19^{\circ}14'09.40''S$ / $43^{\circ}49'40.63''W$), ocorre um afloramento rochoso de cerca de 7 hectares, cuja fotografia obtida em campo ilustra com precisão as características típicas do carste local, recoberto por vegetação densa e por camadas superficiais de solo. Observa-se nas rochas expostas uma alta densidade de fissuras e fraturas, resultantes tanto da ação mecânica das raízes quanto do intemperismo físico-químico promovido pela água, processos que favorecem a ampliação das discontinuidades e a intensificação da dissolução cárstica (Figura 14).

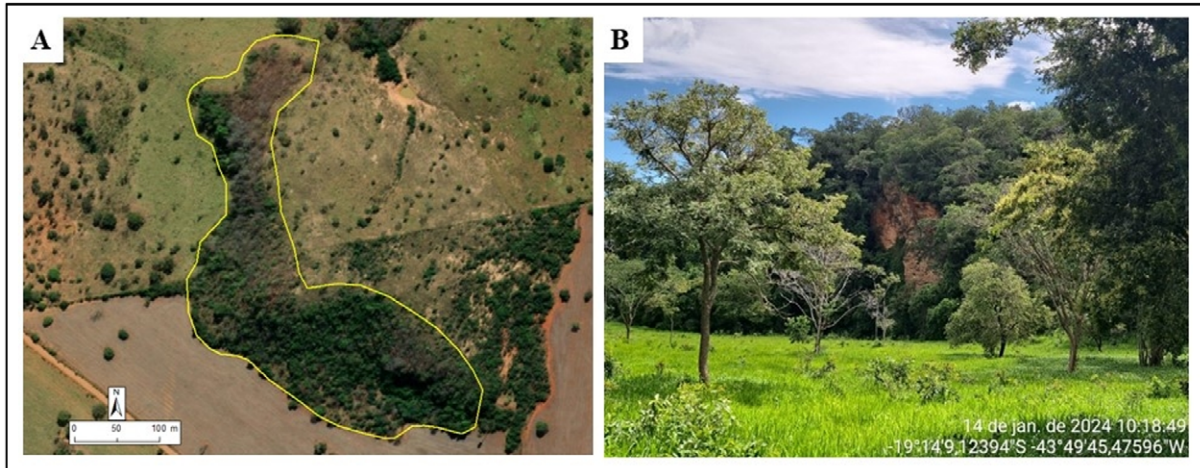


FIGURA 14: Afloramento. A) Destacado em amarelo a delimitação do afloramento rochoso observado a partir de uma visão vertical. B) Afloramento rochoso observado em campo a partir de uma visão horizontal.

FONTE: Fotos de J.V.G. Mendonça (2024).

A Lagoa Temporária, situada na porção central-leste do município de Baldim, delimitada pelo quadrante 24 e com coordenadas geográficas de referência $19^{\circ}16'11.27''\text{S} / 43^{\circ}48'23.12''\text{W}$, apresenta uma feição cárstica circunscrita no interior do polje, abrangendo uma área estimada de 5 hectares.

A lagoa temporária visitada em campo apresenta as características hidrológicas descritas por Figueira (2008). O surgimento de água na lagoa ocorre por meio de dolinas, indicando períodos em que o nível freático atinge sua elevação máxima, emergindo à superfície da depressão por meio de uma saída de água. No contexto da feição em análise, essa saída de água é classificada como uma ressurgência, evidenciando uma abertura com fluxo visível de água (Figura 15).

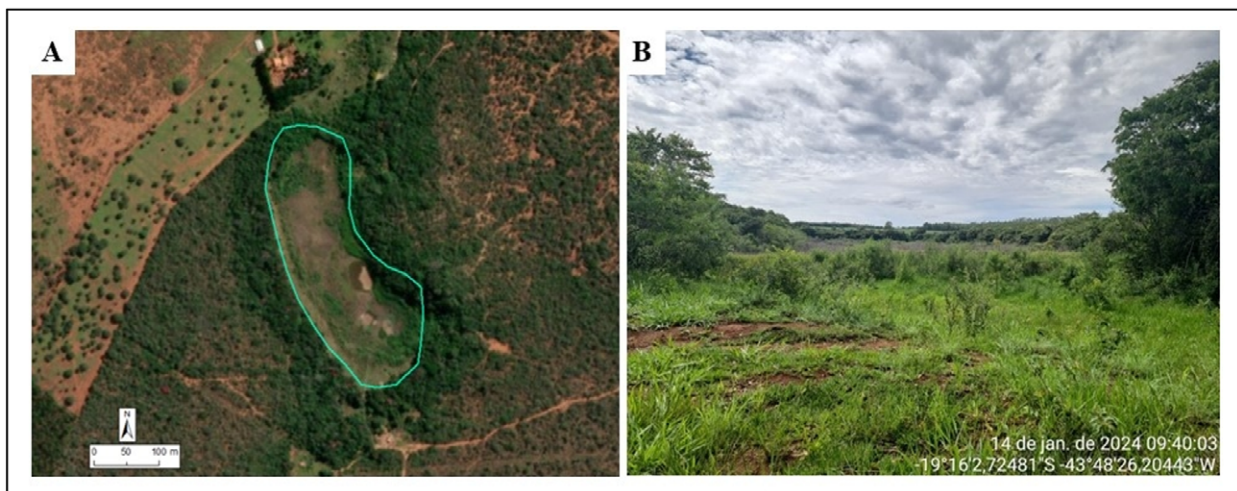


FIGURA 15: A lagoa temporária. A) Destacado em verde, o limite da Lagoa Temporária em visão vertical. B) Lagoa temporária observada em campo a partir de uma visão horizontal.

FONTE: Fotos de J.V.G. Mendonça (2024).



O afloramento em dolina (Figura 16) investigado em campo está situado na porção norte do município de Baldim, nos limites do quadrante 09, com coordenadas geográficas de referência $19^{\circ}08'36.43''S$ / $43^{\circ}48'57.41''W$. O afloramento em dolina abrange uma área estimada de 04 hectares. Trata-se, sem dúvida, de uma das dolinas mais complexas observadas em campo.

De acordo com Ford e Williams (2007), a feição apresenta características típicas de abatimento, evidenciadas pela exposição de rocha aflorante ao longo de toda a circunferência da dolina. A estrutura indica indícios de atividade hidrológica no nível de base e revela elevado potencial espeleológico, sugerindo possível conexão com condutos subterrâneos. Entretanto, não foi possível acessar o nível de base da dolina devido à densa cobertura vegetal e à acentuada declividade do terreno, que dificultaram a aproximação e a documentação direta.

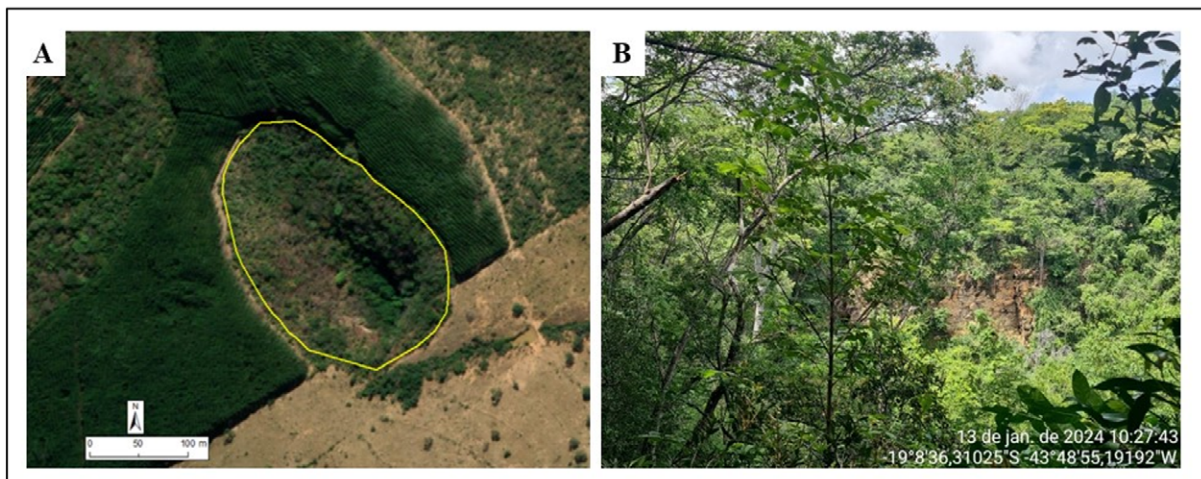


FIGURA 16: Afloramento em dolina. A) Destacado em amarelo o limite do afloramento em dolina a partir de uma visão vertical. B) Afloramento em Dolina observado em campo a partir de uma visão horizontal. **FONTE:** Fotos de J.V.G. Mendonça (2024).

O sumidouro observado em campo está situado no quadrante 13, mais precisamente no par de coordenadas central $19^{\circ}11'55.29''S$ / $43^{\circ}46'49.52''O$ pode ser visto na Figura 17. De acordo com a base de dados do IGAM (2019), o curso hídrico que verge para a feição cárstica observada em campo é denominado Córrego Sumidouro, afluente do Rio Cipó, um dos principais corpos hídricos da região. Observa-se intensa atividade hidrológica na área, que esculpiu a rocha, formando lapiás alvéolares, além de potencializar a abertura de condutos e o desenvolvimento de uma cavidade natural subterrânea, cadastrada na base de dados do CANIE/CECAV (2022).

As feições espeleológicas foram observadas em um afloramento rochoso (Figura 18) de 7 hectares situado no quadrante 13 ($19^{\circ}11'54.49''S$ / $43^{\circ}47'02.40''W$). No afloramento, foi constatada a presença de atividade hidrológica por meio de



gotejamento, resultando na formação de estalactites, além do empoçamento d'água na base do afloramento e de uma pequena cavidade natural subterrânea nessa mesma base.

As feições espeleológicas foram observadas em um afloramento rochoso (Figura 16) de 7 hectares situado no quadrante 13 ($19^{\circ}11'54.49''\text{S}/43^{\circ}47'02.40''\text{W}$). No afloramento, foi constatada a presença de atividade hidrológica por meio de gotejamento, resultando na formação de estalactites, além do empoçamento d'água na base do afloramento e de uma pequena cavidade natural subterrânea na mesma base.



FIGURA 17: O Sumidouro. A) O ponto amarelo indica a localização relativa do sumidouro a partir de uma visão vertical. B) Padrão de desenvolvimento do maciço rochoso. C) Presença de atividade hidrológica. D) Formas relacionadas à dissolução da rocha.

FONTE: Fotos de J.V.G. Mendonça (2024).

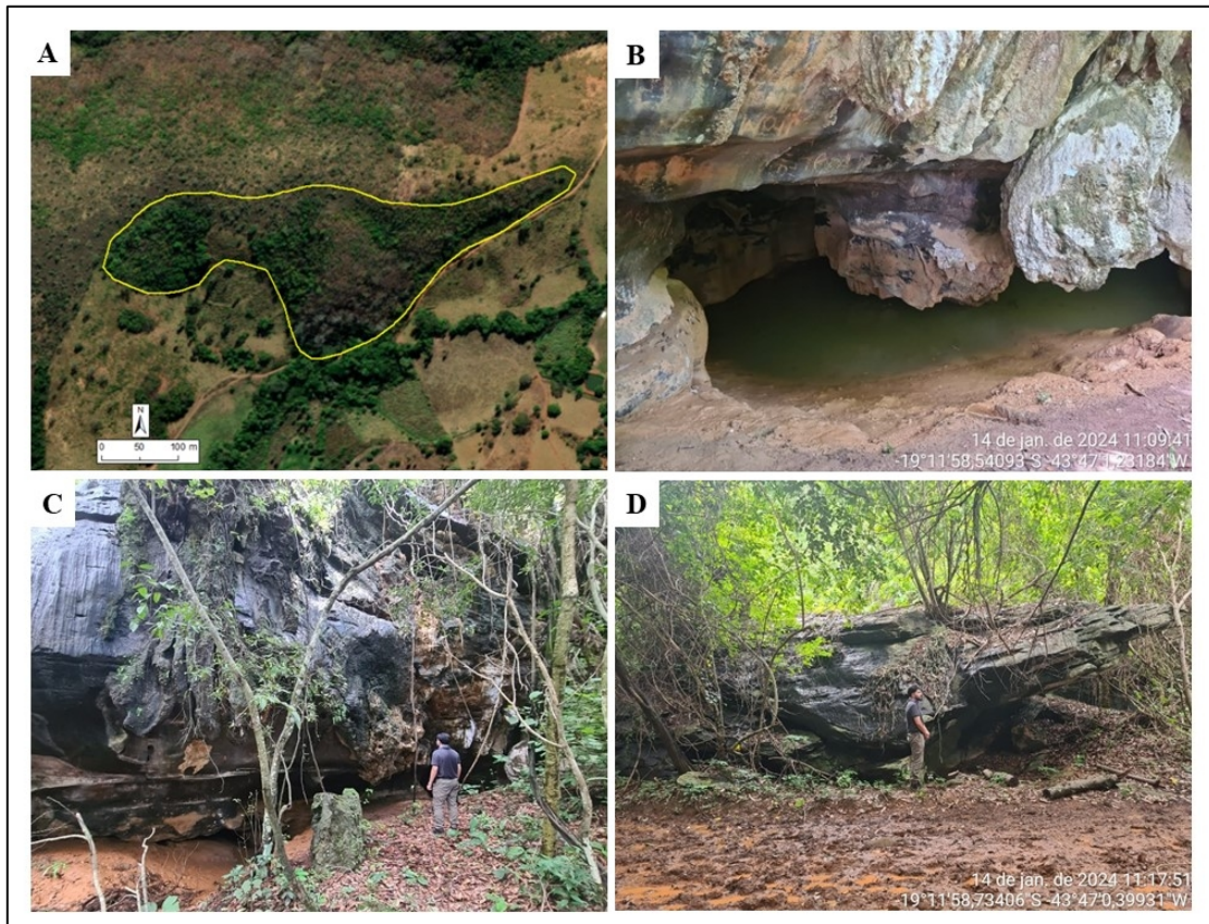


FIGURA 16: A) Destacado em amarelo o limite do afloramento em dolina a partir de uma visão vertical. B) Atividade hidrológica observada por gotejamento e empoçamento. C) Desenvolvimento de pequena cavidade na base do afloramento rochoso. D) Fragmento rochoso residual.

FONTE: Fotos de J.V.G. Mendonça (2024).

A transição da leitura regional (1:100.000) para o inventário de detalhe (1:25.000) mostrou-se decisiva para ampliar a sensibilidade na detecção das feições do exocarste. A comparação com a carta geomorfológica do CPRM evidencia uma diferença morfológica significativa: enquanto a base oficial delimitava áreas como “Tabuleiros”, a análise em maior escala identificou superfícies suavemente onduladas em depressão, coerentes com um nível de base rebaixado e com a inserção de planícies fluviais regionais (Rio das Velhas) e de vales fluviais locais (Rio Cipó).

Esse ajuste morfológico tem relevância fundamental, pois controla a acumulação de água, a eficiência dos processos de recarga e a distribuição preferencial de depressões fechadas, sumidouros e lagoas, reforçando o vínculo entre a estrutura, o relevo e a hidrodinâmica cárstica.

Padrões espaciais e controles litoestruturais. A concentração de feições na porção centro-norte reflete a interseção entre patamares topográficos favoráveis e setores carbonáticos onde a drenagem subterrânea é guiada por descontinuidades; esse padrão



aparece com nitidez na malha de 40 quadrantes (com feições em 12), nos quais a leitura de imagens de 2 m revelou alinhamentos de dolinas e zonas encharcáveis em contato com o polje. A presença de campo de dolinas no polje e de lagoas temporárias/cársticas em sua borda confirma a conectividade hidrogeomorfológica e sugere recarga focada com transferência rápida para condutos rasos, padrão típico em terrenos carbonáticos.

O polje de ~1.828 ha organiza a dinâmica superficial e subsuperficial, funcionando como sumidouro de energia e de massa em eventos de alta pluviosidade e como nível de base local em estiagem. O inventário demonstra feições de dissolução nos limites internos, lagoas temporárias no piso plano e um campo de dolinas com 11 depressões — um arranjo poligênico que reforça a leitura de que a drenagem é capturada e redistribuída por estruturas e fraturas a partir do polje. Na prática, esse conjunto de evidências sugere alta vulnerabilidade intrínseca à contaminação difusa e sensibilidade geomorfológica às flutuações de nível d'água.

Embora o CECAV (2012) classifique a região como potencial Muito Alto para a ocorrência de cavernas (com predominância de cavernas conhecidas em áreas Muito Alto/Alto no Brasil), o registro local do CANIE (2022) ainda é modesto, com apenas 7 cavernas. Essa dissonância, já levantada no estudo, reforça a hipótese de que a escala e o método de levantamento são determinantes para revelar o carste em nível municipal — e que inventários sistemáticos, como o aqui realizado, tendem a reduzir o sub-registro e a melhorar a gestão do patrimônio espeleológico.

A cartografia resultante oferece insumo operacional para: (i) ordenamento territorial, ao incorporar os oito compartimentos e o mapa-inventário aos planos e leis municipais; (ii) licenciamento ambiental, ao cruzar densidade de dolinas, presença de sumidouros, classes de potencial CECAV e contexto geomorfológico por quadrante; e (iii) geoconservação e espeleoturismo, ao priorizar áreas como o polje e o campo de dolinas para roteiros interpretativos e monitoramento de nível d'água e estabilidade de bordas.

Em termos científicos, os resultados validam a abordagem multiescalar ao demonstrar que a hierarquia geomorfológica (1:100.000 → 1:25.000) organiza o mosaico de formas e expõe estruturas funcionais, como o polje, que controlam a distribuição de dolinas, lagoas e sumidouros. Em termos aplicados, os produtos elevam a resolução do diagnóstico e reduzem as incertezas na tomada de decisão, sobretudo em áreas sensíveis do centro-norte de Baldim — hoje melhor conhecidas em sua extensão, tipologia e dinâmica.



CONCLUSÃO

A abordagem multiescalar adotada, do reconhecimento regional em 1:100.000 ao inventário de detalhe em 1:25.000, demonstrou elevada capacidade de revelar a organização funcional do carste de Baldim e de refinar a leitura morfológica previamente disponível. O cruzamento analítico entre geologia, relevo derivado, hidrografia e verificação em campo levou à definição de oito compartimentos geomorfológicos e à identificação de 45 feições em 12 dos 40 quadrantes analisados, com notável concentração na porção centro-norte do município. Entre as feições identificadas, destaca-se um polje de ~1.828 ha que estrutura a dinâmica de recarga/descarga superficial e subsuperficial, associado a campo de dolinas e lagoas cársticas/temporárias, indicando conectividade hidrogeomorfológica típica de terrenos carbonáticos. Esse arranjo explica, em escala local, a ocorrência de sumidouros e de áreas encharcáveis e confere ao sistema elevada vulnerabilidade intrínseca à contaminação difusa.

O contraste entre a cartografia oficial e os produtos aqui gerados é particularmente relevante: onde se mapeavam “tabuleiros”, a análise integrada apontou superfícies suaves onduladas em depressão, coerentes com níveis de base rebaixados e com a inserção de planícies/vales fluviais. Essa reinterpretação não é apenas semântica; ela condiciona a localização preferencial de dolinas, sumidouros e lagoas e, portanto, reorienta as prioridades de gestão territorial e de geoconservação. Ainda que o potencial espeleológico regional seja classificado como Muito Alto/Alto, o registro local no CANIE permanece modesto (7 cavernas), sugerindo subamostragem histórica e reforçando o papel de inventários sistemáticos em escala municipal para reduzir o sub-registro e qualificar as decisões.

Em termos aplicados, os mapas de compartimentação e o mapa-inventário oferecem base operacional imediata para: (i) zoneamentos municipais que incorporem faixas de proteção e critérios de ocupação em áreas com alta densidade de dolinas e em torno do polje; (ii) licenciamento ambiental com condicionantes explícitos para obras lineares, loteamentos e captações em setores cársticos (proteção de sumidouros, controle de efluentes, manejo de águas pluviais com soluções de infiltração controlada); e (iii) programas de geoconservação e espeleoturismo que priorizem monitoramento de nível d’água, estabilidade de bordas e educação ambiental, com roteiros interpretativos em áreas de maior valor científico e paisagístico.

Reconhecem-se limitações inerentes às resoluções empregadas (MDE de 30 m; imagens de ~2 m), ao recorte temporal dos dados e ao esforço amostral de campo, que não abrangeu todas as ocorrências. A ausência de séries piezométricas,



traçadores hidroquímicos/fluorescentes e levantamentos microtopográficos de alta resolução restringe a modelagem fina da conectividade e a discriminação genética de algumas feições (dissolução × abatimento × sufusão). Tais restrições, contudo, não comprometem as conclusões centrais e, sobretudo, apontam direções claras para avanços: aquisição de MDE LiDAR e fotogrametria de baixa altitude para detalhamento microgeomorfológico; instalação de piezômetros e monitoramento contínuo de nível/qualidade da água nas lagoas e sumidouros do polje; testes de traçadores para elucidar caminhos de fluxo; e atualização periódica do inventário com protocolos padronizados de campo e gabinete.

Em síntese, o estudo consolida um quadro geomorfológico e hidrogeológico coerente para Baldim, eleva a resolução diagnóstica do exocarste e fornece instrumentos práticos para o planejamento, o licenciamento e a conservação. A integração entre a compartimentação do relevo, o inventário de feições e a verificação em campo mostrou-se decisiva para traduzir o potencial espeleológico em diretrizes concretas de gestão. A continuidade do monitoramento e a incorporação de técnicas de maior resolução tendem a confirmar e ampliar os padrões aqui descritos, fortalecendo o uso sustentável do território e a proteção do patrimônio cárstico municipal.

REFERÊNCIAS

- AULER, A. A.; ZOGBI, L. **Espeleologia**: noções básicas. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005.
- AUDRA, P. H.; PALMER, A. Research frontiers in speleogenesis: dominant processes, hydrogeological conditions and resulting cave patterns. *Acta Carsologica*, v.44, n.3, p.315-348, 2015. <https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.1960>.
- BÖGLI, A. **Karst hydrology and physical speleology**. Berlin: Springer-Verlag, 1980. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67669-7>.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; DUCK, S.; CARVALHO, M. S. Análise espacial e geoprocessamento. In: DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (org.). **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>. Acesso em: 8 out. 2022.
- CECAV – CENTRO NACIONAL DE PESQUISA E CONSERVAÇÃO DE CAVERNAS. **Mapa brasileiro de potencialidade de ocorrência de cavernas** (esc. 1:2.500.000). Brasília: ICMBio, 2012.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1980.
- COBRAPE. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio das Velhas**: Diagnóstico. Belo Horizonte, 2014.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa Geológico do Brasil ao Milionésimo**. Brasília: CPRM, 2003.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta geológica de Baldim** (esc. 1:100.000). Belo Horizonte: CPRM, 2009.
- DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...** Recife: SBG, 1978. v. 2, p. 507-610.
- EMBRAPA. **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. 2.ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 576p.



IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Divisão regional do Brasil em bacias hidrográficas**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Pedologia**. 3.ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2022: Panorama Baldim. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Mapeamento da rede hidrográfica de Minas Gerais. Belo Horizonte: IGAM, 2009.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Dados históricos e climatológicos. Brasília: INMET, 2023. (Base de dados).

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Modelo Digital de Elevação (MDE) – 30 m. São José dos Campos: INPE, 2011. (Produto cartográfico).

INPE; EMBRAPA. Projeto TerraClass Cerrado. São José dos Campos/Campinas: INPE/Embrapa, 2018.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M.F.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W. **Geographic Information Systems and Science**. 2.ed. New York: John Wiley & Sons, 2005.

MARTINS, F. B. GONZAGA, G.; SANTOS, D.F. dos; REBOITA, M.S. Classificação climática de Minas Gerais utilizando o método de Köppen-Geiger. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 22, p. 250-264, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>.

PALMER, A. N. *Cave Geology*. New York: Cave Books, 2007. 454p.

PILÓ, L. B. Geomorfologia cárstica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.1, n.1, p.88-102, 2000. <https://doi.org/10.20502/rbg.v1i1.73>.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatores geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia (USP)*, n.6, p.17-29, 1992. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47108>. Acesso em: Acesso em 25 set. 2022.

TRAVASSOS, L.E.P. **Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica**. Brasília: ICMBio, 2019.

WHITE, W. B. **Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains**. New York: Oxford University Press, 1988.

UHLEIN, A.; PAIM, P. S. G. O Grupo Bambuí na Porção Sudeste da Bacia: Sistemas Depositionais e Relação Estrutural com a Faixa Araçuaí, MG. In: SIMPÓSIO GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 5, 1989, Belo Horizonte. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Geologia, 1989, v. 10, p. 277-280.



IMPACTOS DO CRESCIMENTO URBANO EM REGIÕES CÁRSTICAS: ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL NO CARSTE DE MINAS GERAIS

Lucas Diniz de Areda¹

Luiz Eduardo Panisset Travassos²

Jorge Batista de Souza³

PALAVRAS-CHAVE: Crescimento urbano; Carste; Sensoriamento remoto; Classificação supervisionada; Detecção automática de feições cársticas.

RESUMO

A urbanização acelerada em terrenos cársticos impõe desafios ao planejamento territorial e à gestão ambiental. Este estudo avaliou, entre 1984 e 2016, os impactos do crescimento urbano em áreas carbonáticas do Grupo Bambuí (MG) — Arcos, Curvelo, Montes Claros e Sete Lagoas. Utilizaram-se imagens Landsat 5/7/8 com correções radiométricas e geométricas, séries de NDVI e NDWI, classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança e detecção automática de feições cársticas em abordagem orientada a objetos. A acurácia média próxima de 85% foi estimada por meio de matriz de confusão, Kappa e F1-score. Em SIG, quantificaram-se a expansão das manchas urbanas, a redução de vegetação e a variação das lâminas d'água, com interseção espacial frente a dolinas, áreas de colapso e frentes minerárias. Os resultados indicam crescimento urbano expressivo (de 91,3% em Montes Claros a 143,4% em Arcos), acompanhado por decréscimo de ~20% na cobertura vegetal e retração média de ~30% das lâminas d'água em Sete Lagoas, coerente com o declínio do NDWI. Observou-se o avanço do perímetro construído sobre zonas de recarga e a aproximação de feições cársticas detectadas, o que eleva a vulnerabilidade hidrogeológica e o risco de subsidência. Em Arcos e Sete Lagoas, a mineração de calcário atuou como vetor adicional de pressão antrópica, ampliando as superfícies expostas e a fragmentação. Metodologicamente, o encadeamento Landsat–NDVI/NDWI–MLC–detecção automática mostrou robustez diagnóstica e custo operacional moderado, adequado a séries históricas e replicável em carstes tropicais. As limitações concentram-se na resolução de 30 m, na cobertura de nuvens e nas confusões espectrais sob dossel denso; recomenda-se integrar sensores de maior resolução (Sentinel-2, WorldView, PlanetScope), LiDAR e levantamentos por UAV para mapear microdepressões e fraturas sutis. Conclui-se que a urbanização não planejada sobre carbonatos, somada à mineração, intensifica os impactos cumulativos sobre aquíferos e a estabilidade geomorfológica. Propõem-se: zoneamento geotécnico/

¹ Doutor em Geografia pela PUC Minas, lucasareda@gmail.com

² Doutor em Carstologia pela University of Nova Gorica, Eslovênia; Professor permanente do curso de Geografia da PUC Minas; Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq, luizepanisset@gmail.com

³ Doutor em Geografia pela PUC Minas; Professor permanente do curso de Geografia da PUC Minas, profjbatista@gmail.com



hidrogeológico; perímetros de proteção a dolinas e à recarga; drenagem urbana baseada na natureza; condicionantes específicos para a mineração; e monitoramento contínuo por geotecnologias.

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização acelerada em regiões cársticas representa um dos maiores desafios contemporâneos para o planejamento territorial e a gestão ambiental sustentável, especialmente em regiões de carste tradicional. Essas áreas, formadas pela dissolução de rochas carbonáticas, caracterizam-se por uma rede complexa de feições subterrâneas e superficiais, incluindo depressões fechadas, sumidouros, surgências e cavernas. Assim, de acordo com Ravbar, Kogovšek e Pipan (2017), em razão de características intrínsecas do carste e das pressões crescentes, a exploração de recursos e a urbanização podem facilmente causar a deterioração dessa paisagem e de seus ecossistemas.

Em termos hidrogeomorfológicos, o carste constitui um sistema peculiar, com porosidade secundária dominante e escoamento turbulento em condutos, o que explica a conectividade rápida entre a superfície e os aquíferos e a sensibilidade a perturbações antrópicas (Ravbar; Kogovšek; Pipan, 2017; De Waele; Gutiérrez, 2022). Essa dinâmica confere aos terrenos cársticos alta permeabilidade e fragilidade ambiental, tornando-os especialmente suscetíveis à contaminação dos aquíferos, à subsidência e a colapsos estruturais (Travassos, 2019). De Waele e Gutiérrez (2022) estima que o carste em carbonatos ocupe cerca de 15% das terras emersas livres de gelo, concentrando recursos hídricos subterrâneos estratégicos e áreas relevantes de risco geotécnico. Em diversos contextos, aquíferos cársticos abastecem parte substancial da população e, muitas vezes, constituem as únicas reservas exploráveis (Ravbar; Kogovšek; Pipan, 2017).

Em contextos tropicais, como no Brasil, a urbanização sobre o carste tem se intensificado nas últimas décadas, impulsionada por atividades industriais, pela expansão da mineração de calcário e pelo crescimento populacional urbano. Assim sendo, esta pesquisa concentra-se em cidades do Grupo Bambuí, no estado de Minas Gerais.

No Brasil, a região do Grupo Bambuí destaca-se pela extensão de suas áreas cársticas e pela intensa pressão urbana, particularmente em cidades médias como Arcos, Curvelo, Montes Claros e Sete Lagoas. Entre 1984 e 2016, essas cidades apresentaram um crescimento expressivo das manchas urbanas, variando de 91,3% em Montes Claros a 143,4% em Arcos, conforme evidenciado pelas análises espaço-temporais baseadas em imagens de satélite Landsat. Esse processo foi acompanhado por uma redução



significativa da cobertura vegetal e pela expansão das áreas de mineração, intensificando os riscos de contaminação dos aquíferos cársticos, de subsidência do solo e de outros impactos ambientais. Silva *et al.* (2021) afirmam que, próximo ao Parque Estadual da Lapa Grande (Montes Claros-MG), conflitos de uso incluem a mineração de calcário em áreas urbanas próximas. Para Florea *et al.* (2002), a urbanização rápida em regiões cársticas tem sido associada a impactos ambientais relevantes, potencializados pelo crescimento populacional e pela industrialização.

A ocupação urbana de terrenos carbonáticos do Grupo Bambuí, associada à ausência de diretrizes específicas de ordenamento territorial no Carste, tem potencializado os processos de degradação ambiental, comprometendo a estabilidade geomorfológica e a disponibilidade hídrica subterrânea. Estudos recentes evidenciam que a urbanização em áreas cársticas acarreta impactos cumulativos e, muitas vezes, irreversíveis. A impermeabilização do solo reduz a recarga natural dos aquíferos e aumenta o escoamento superficial, enquanto a ocupação próxima a dolinas e sumidouros eleva o risco de colapsos (Daoxian, 1988; 2001; Lu, 2007; Guo *et al.*, 2013). A mineração, por sua vez, modifica a morfologia natural do relevo, gera vibrações mecânicas e favorece a contaminação dos sistemas subterrâneos por metais pesados e sedimentos finos. Embora economicamente relevante, a lavra em rochas carbonáticas impõe desafios ambientais e de restauração exigentes (Gunn; Bailey, 1993; Ravbar; Kogovšek; Pipan, 2017).

Por esses motivos, compreender a dinâmica espaço-temporal dessas transformações é fundamental para subsidiar políticas públicas de uso e ocupação do solo em regiões cársticas. Neste contexto, o sensoriamento remoto e os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) surgem como alternativas eficazes para o monitoramento dos impactos da urbanização em áreas cársticas, permitindo a análise integrada das mudanças no uso do solo, na cobertura vegetal e nos recursos hídricos (Florenzano, 2007; Szukalski, 2002). Experiências de gestão e inventário específicas para carste demonstram que SIG dedicados (CKIS) ampliam o suporte às decisões e a integração de dados subterrâneos e de superfície (Szukalski; Yocum, 1999). A combinação de séries históricas de imagens orbitais com algoritmos de classificação supervisionada e técnicas de detecção automática tem permitido avaliar com precisão a expansão urbana (Scaramuzza *et al.*, 2017; Maurano; Escada; Renno, 2019; Silva *et al.*, 2021) e, por conseguinte, suas correlações com feições cársticas e aquíferos subterrâneos. Essa abordagem insere-se em uma perspectiva da geografia física aplicada, na qual as geotecnologias são utilizadas como instrumentos de diagnóstico e de planejamento territorial sustentável. Como destacam De Waele e Gutiérrez (2024), esse panorama



converge com a literatura, que destaca o uso amplamente difundido de sensoriamento remoto e de técnicas geofísicas no estágio preliminar de estudos hidrogeológicos em carste, quando a informação sobre condutos e trajetórias de fluxo ainda é escassa.

A hipótese central desta pesquisa é que o processo de urbanização em regiões cársticas intensifica os riscos ambientais, comprometendo a sustentabilidade dos recursos naturais e exigindo a implementação de políticas públicas específicas. O objetivo central é analisar os impactos do crescimento urbano em áreas cársticas selecionadas do Grupo Bambuí com base em dados de sensoriamento remoto, discutindo as implicações ambientais e as estratégias de gestão voltadas à preservação dessas áreas vulneráveis.

Ao comparar diferentes cidades inseridas no mesmo domínio geológico, este estudo amplia a compreensão dos padrões e impactos da urbanização em terrenos cársticos, ressaltando o potencial das geotecnologias na análise espaço-temporal e no monitoramento das transformações ambientais em paisagens de alta fragilidade.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O impacto do processo de urbanização acelerada em áreas cársticas constitui um dos principais desafios para a gestão ambiental e para o ordenamento territorial contemporâneo. Essas áreas, constituídas predominantemente por rochas carbonáticas, caracterizam-se por elevada permeabilidade e pela presença de feições geomorfológicas singulares, como dolinas, cavernas, vales cegos, campos de lapiás e rios subterrâneos (Ford; Williams, 2007). A dissolução das rochas carbonáticas por águas levemente ácidas, ricas em dióxido de carbono, desencadeia o processo de carstificação, responsável pela gênese dessas formas e pela elevada vulnerabilidade hidrogeológica dos sistemas cársticos (Travassos, 2019). Note-se que classificações de carste consideram, entre outros, a litologia e o clima, e distinguem endocarste (subterrâneo) e exocarste (superficial) como domínios interdependentes do sistema (De Waele; Gutiérrez, 2022)

A vulnerabilidade ambiental das áreas cársticas decorre da interação entre fatores geológicos, hidrológicos e antrópicos. Em especial, a zona de epicarste e a zona de transmissão controlam a infiltração rápida, o armazenamento temporário e a transferência de água/solutos, condicionando a resposta hidrológica e a vulnerabilidade à contaminação (De Waele; Gutiérrez, 2022). Segundo Daoxian (1988; 2001), a estrutura porosa e fraturada das rochas carbonáticas favorece a rápida infiltração da água e, conseqüentemente, a transmissão direta de contaminantes para os aquíferos subterrâneos. Esse comportamento hidrológico torna os sistemas



cársticos particularmente sensíveis à poluição difusa proveniente de áreas urbanas, à disposição inadequada de resíduos e ao escoamento superficial contaminado (Lu, 2007; Goldscheider; Drew, 2007).

A ocupação urbana de terrenos cársticos, especialmente quando associada à mineração e à impermeabilização do solo, intensifica os riscos de contaminação dos aquíferos e de subsidência. Estudos de Guo *et al.* (2013) demonstram que a expansão urbana em Guilin (China) reduziu significativamente a recarga hídrica subterrânea, situação análoga à observada em cidades do Grupo Bambuí, como Sete Lagoas e Arcos. Além disso, as vibrações provocadas por atividades minerárias e o rebaixamento do lençol freático em pedreiras de calcário aumentam o risco de colapsos de solo e de instabilidade geomorfológica.

No contexto brasileiro, Neri e Sánchez (2012), Pereira (2018) e Travassos (2019) destacam que a combinação entre a exploração mineral e a urbanização desregulada compromete a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos e a integridade das feições cársticas. Esses processos demandam uma abordagem integrada entre geociências e planejamento urbano, fundamentada em instrumentos técnicos de mapeamento, monitoramento e modelagem ambiental.

Urbanização e riscos ambientais em áreas cársticas

A urbanização sobre terrenos carbonáticos apresenta particularidades que a distinguem significativamente de outros ambientes geomorfológicos. Do ponto de vista processual, a formação das dolinas de subsidência — sejam elas causadas por colapso, abatimento ou sufusão — resulta da ação conjunta de dois fatores essenciais: a dissolução na subsuperfície (o componente hidrogeológico) e a deformação e erosão interna dos materiais de cobertura (o componente mecânico). Contudo, é importante ressaltar que, nas próprias rochas carbonáticas, a contribuição da dissolução ativa para a formação dessas feições, em escala humana, geralmente é limitada (Beck, 2005; De Waele; Gutiérrez, 2022).

A expansão urbana nestas regiões frequentemente ocorre sobre zonas de recarga do aquífero, alterando o balanço hídrico e aumentando o risco de colapso de dolinas. Em muitos casos, a falta de zoneamento geotécnico e de estudos de vulnerabilidade hidrogeológica contribui para a ocupação de áreas de risco, expondo a população a subsidências e movimentos de massa associados à dissolução diferencial do substrato (Parise; Lollino, 2011; DeWaele *et al.*, 2011; Gutiérrez *et al.*, 2014; Szmigiel; Tajduś, 2025). Muitas ocorrências danosas de dolinas são induzidas por atividades humanas, com destaque para o rebaixamento do nível d'água por bombeamento



ou por drenagens associadas à mineração, que aumentam o gradiente hidráulico, alteram os regimes de fluxo e reduzem a sustentação por flutuabilidade (De Waele; Gutiérrez, 2022).

Essas transformações são agravadas em contextos tropicais úmidos, onde as taxas de intemperismo químico são elevadas. A pressão antrópica sobre os terrenos do Grupo Bambuí exemplifica essa situação: a mineração de calcário, a expansão urbana e a redução da cobertura vegetal criam um cenário de degradação ambiental e instabilidade geomorfológica que exige monitoramento permanente. Conforme destacam Scaramuzza *et al.* (2017), a urbanização em áreas de Cerrado e, conseqüentemente, em regiões cársticas mineiras ocorre de forma fragmentada e desarticulada do planejamento territorial, o que potencializa o comprometimento dos sistemas aquíferos e a perda da geodiversidade local. Por esses motivos, De Waele e Gutiérrez (2022) destacam que os inventários cartográficos de dolinas constituem a base para análises de morfometria, gênese, suscetibilidade, perigo, risco e vulnerabilidade em aquíferos cársticos, devendo integrar-se às políticas de planejamento territorial.

Do Sensoriamento Remoto à Detecção Automática de Feições Cársticas

O uso de técnicas de sensoriamento remoto e de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) tornou-se indispensável para a investigação e a gestão de áreas cársticas. Na prática, a combinação de fotointerpretação, imagens orbitais e o uso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) ampliam significativamente a capacidade de mapear contatos geológicos, lineamentos, sumidouros e nascentes, o que subsidia a seleção de áreas-alvo para investigações hidrogeológicas. Complementarmente, métodos geofísicos elétricos (como VES, perfis de resistividade e ERT/ERI) são eficazes para imagear o topo rochoso (*rockhead*), paleodolinas e cavidades de dimensões consideráveis, apoiando a validação das feições previamente detectadas. Além disso, imagens termais infravermelhas podem identificar descargas cársticas em períodos de forte contraste térmico entre a água subterrânea e a coluna d'água adjacente (De Waele; Gutiérrez, 2022). Tais ferramentas possibilitam a análise espaço-temporal das mudanças no uso e na cobertura do solo, a detecção de feições geomorfológicas e o mapeamento de zonas de vulnerabilidade ambiental (Florenzano, 2007; Szukalski, 2002; Chen *et al.*, 2021).

As imagens da série Landsat (sensores TM, ETM+ e OLI), com sua resolução espacial de 30 metros e ampla cobertura temporal, têm se mostrado particularmente adequadas



para estudos de longa duração (Landsat Science, 2016). Em abordagens de séries temporais, esses sensores permitem rastrear, com robustez estatística, tanto mudanças graduais quanto rápidas na cobertura e no uso da terra (Kuenzer; Dech; Wagner, 2015). A análise multitemporal de índices espectrais, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o NDWI (Normalized Difference Water Index), é importante para avaliar a degradação da vegetação, o aumento da impermeabilização e as variações dos corpos hídricos superficiais em ambientes cársticos (Silva *et al.*, 2021).

A abertura integral do acervo Landsat, juntamente com os avanços no pré-processamento de séries, viabilizou métodos baseados em trajetória e ajustes harmônicos no NDVI ou nas reflectâncias. Tais métodos são capazes de distinguir, com precisão, mudanças graduais (como degradação ou recuperação) de perturbações abruptas, reduzindo o ruído e permitindo análises anuais contínuas mesmo em regiões tropicais. Em síntese, as trajetórias anuais do Landsat são adequadas para detectar tanto perturbações rápidas quanto tendências lentas de longo prazo na cobertura vegetal (Kennedy *et al.*, 2010; Roy *et al.*, 2014).

Finalmente, técnicas mais recentes, incluindo a detecção automática de feições cársticas e a integração de modelos digitais de elevação (DEM), aprimoram a identificação de dolinas, áreas de colapso e superfícies expostas. A análise de lineamentos, por exemplo, é decisiva para determinar zonas de fraturas favoráveis ao desenvolvimento de cavernas (Hung *et al.*, 2002). O estágio preliminar de mapeamento, que utiliza fotointerpretação, imagens orbitais multiespectrais detalhadas e ARP para identificar contatos, lineamentos, sumidouros e nascentes, é complementado pelos métodos elétricos subsequentes (VES, perfis de resistividade e ERT/ERI), que validam as feições e proporcionam uma imagem detalhada do subsolo. A alta correspondência entre as cavernas mapeadas e as zonas fraturadas valida o uso da análise de lineamentos na predição da ocorrência de cavernas (Hung *et al.*, 2002).

Sampaio (2010) demonstrou que algoritmos de classificação espectral podem atingir acurácia superior a 85% na identificação dessas feições, especialmente quando combinados a dados de campo e de validação, com o índice Kappa. A literatura internacional reforça esse potencial (Florea *et al.*, 2002; Hung, 2002), apontando que a combinação de imagens multiespectrais, modelos de terreno e dados LiDAR proporciona maior precisão no mapeamento geomorfológico cárstico.

O uso de sensores orbitais de alta resolução (Sentinel-2, WorldView, PlanetScope) e de dados LiDAR tem permitido o avanço de análises tridimensionais detalhadas, identificando microdepressões e variações sutis na topografia que indicam processos de subsidência incipientes (Silva; Morais, 2016; Moreno-Gómez; Liedl; Stefan, 2019; Zhu



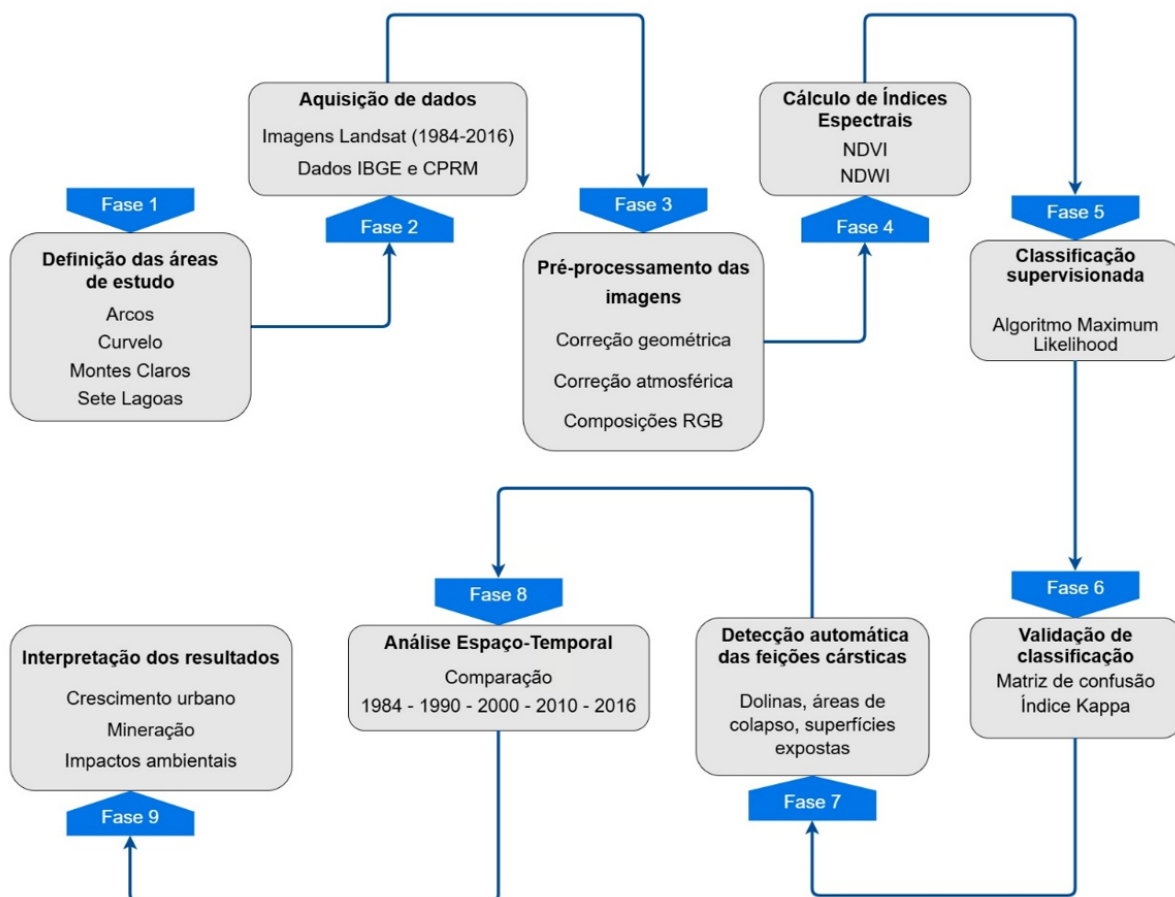
et al., 2020; Parise *et al.*, 2022). A integração desses dados em ambiente SIG permite o desenvolvimento de modelos preditivos de risco e de vulnerabilidade ambiental, fundamentais para o planejamento de uso do solo em contextos frágeis.

A fundamentação teórica deste estudo estabelece que a vulnerabilidade intrínseca das formações cársticas, associada à expansão urbana acelerada e à exploração mineral, intensifica os riscos ambientais e geomorfológicos nessas regiões. As geotecnologias, especialmente o sensoriamento remoto e os SIG, constituem instrumentos fundamentais para o diagnóstico, o monitoramento e a análise espaço-temporal dessas transformações, permitindo avançar na compreensão da dinâmica urbano-ambiental em áreas de elevada fragilidade ecológica.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia empregada neste estudo (Figura 1) foi estruturada para analisar os impactos do processo de urbanização acelerado e não planejado em áreas cársticas do Grupo Bambuí, no estado de Minas Gerais, integrando técnicas de sensoriamento remoto, análise espaço-temporal e detecção automática de feições cársticas em ambiente de SIG.

FIGURA 1: Fluxograma metodológico.



FONTE: Elaborado pelos autores.



O fluxo metodológico foi organizado em seis etapas principais: (i) definição e caracterização da área de estudo; (ii) aquisição e pré-processamento de imagens orbitais; (iii) cálculo de índices espectrais; (iv) classificação supervisionada do uso e da cobertura do solo; (v) detecção automática de feições cársticas; e (vi) análise comparativa espaço-temporal entre 1984 e 2016.

A etapa automática foi fortalecida por meio da avaliação prévia da qualidade dos modelos de elevação utilizados e da integração com métricas morfométricas (Kakavas *et al.*, 2018). Os passos de inventariar dolinas/colapsos e cruzar mapeamentos temáticos seguiram diretrizes consolidadas para o desenvolvimento de modelos de suscetibilidade ao perigo e de risco em ambientes cársticos, conforme De Waele e Gutiérrez (2022).

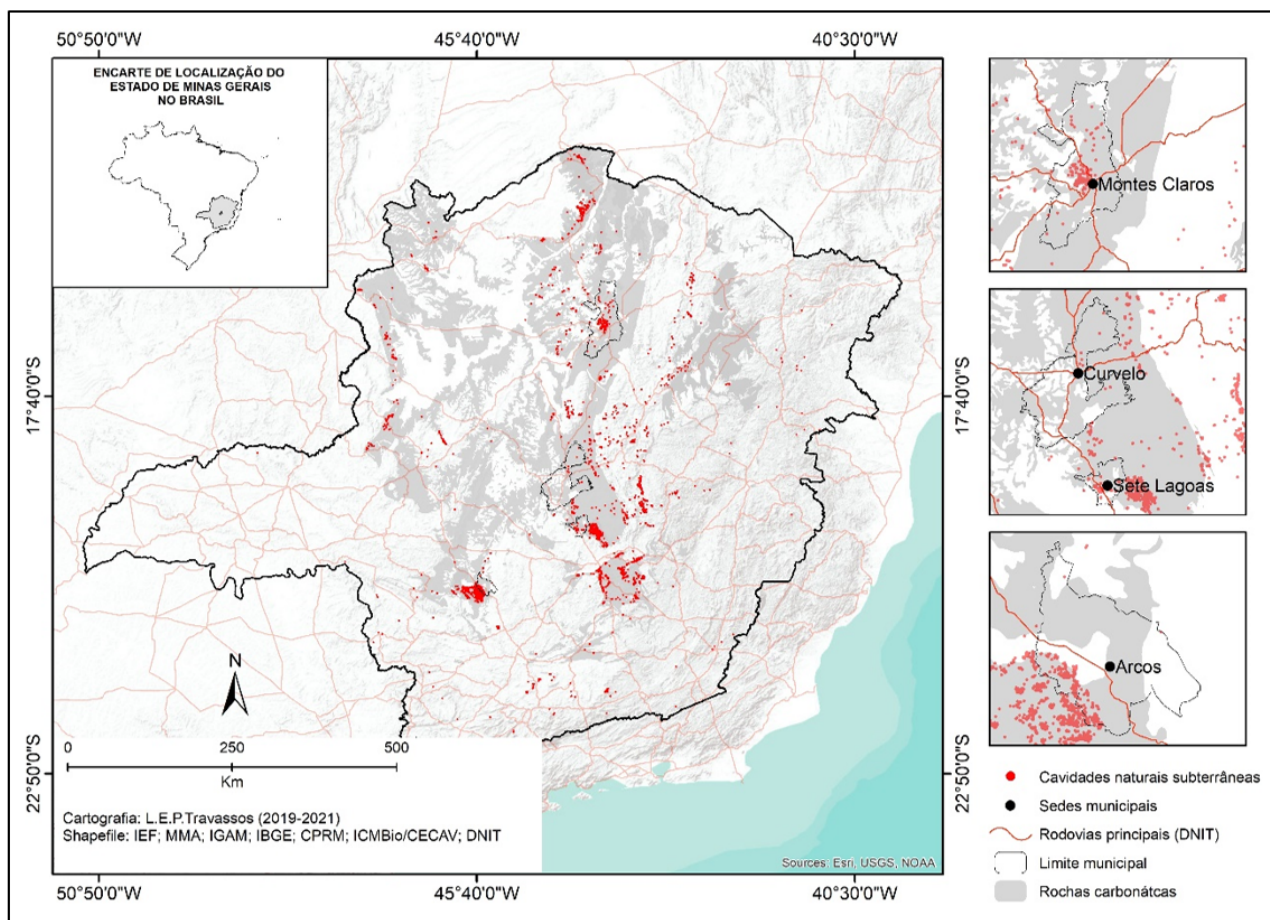
Área de Estudo

O estudo abrange quatro cidades médias inseridas na unidade geológica do Grupo Bambuí, em Minas Gerais — Arcos, Curvelo, Montes Claros e Sete Lagoas —, todas caracterizadas pela presença expressiva de rochas carbonáticas e de sistemas aquíferos cársticos de elevada vulnerabilidade. Essas localidades foram selecionadas por apresentarem tanto intensa urbanização quanto atividade minerária consolidada, o que configura diferentes padrões de pressão antrópica sobre terrenos frágeis. (Figura 2).

As formações do Grupo Bambuí consistem em calcários e dolomitos, associados a aquíferos subterrâneos interconectados, cuja dinâmica hídrica é fortemente influenciada por fraturas e condutos. Essas feições condicionam processos de subsidência e colapso em zonas urbanas e periurbanas, o que demanda monitoramento contínuo por meio de geotecnologias.



FIGURA 2 : Localização das áreas cársticas, das cidades objeto do estudo e da distribuição das cavidades naturais subterrâneas em Minas Gerais.



FONTE: Elaborado pelos autores.

Dados utilizados

Foram empregadas imagens de satélite Landsat 5 (TM), Landsat 7 (ETM+) e Landsat 8 (OLI), obtidas junto ao USGS e ao INPE, correspondentes aos anos de 1984, 1990, 2000, 2010 e 2016. Essa série temporal foi escolhida por sua continuidade, resolução espacial de 30 metros e consistência radiométrica que permitem o acompanhamento das transformações de uso e cobertura do solo ao longo de mais de três décadas (Tabela 1), pois, de acordo com Silva *et al.* (2021), com o advento das geotecnologias, tornou-se imprescindível obter dados em grandes extensões para avaliação e monitoramento ambiental.

Complementarmente, utilizaram-se dados topográficos e hidrológicos do IBGE, do CPRM e do IGAM, bem como mapas geológicos regionais (CPRM, 2009). Para validação dos resultados, foram consideradas imagens de alta resolução disponíveis nas plataformas Google Earth Pro e Esri Wayback Imagery, além de observações de campo realizadas entre 2014 e 2016.



TABELA 1: Fontes e características dos dados utilizados na análise espaço-temporal das áreas cársticas em Minas Gerais

TIPO DE DADO	FONTE	PERÍODO / RESOLUÇÃO
Imagens de Satélite (Landsat 5, 7 e 8)	INPE / USGS - Disponibilizadas gratuitamente	1984, 1990, 2000, 2010, 2016 / 30 m
Dados topográficos	IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Shuttle Radar Topography Mission - SRTM (NASA)	Escalas variadas (1:50.000 – 1:100.000)
Dados hidrológicos	CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais	Escalas regionais (1:100.000 – 1:250.000)
Mapas geológicos	CPRM e literatura científica	Escalas regionais e locais
Validação	Levantamentos de campo e imagens de alta resolução	Dados pontuais recentes (2010-2016)

FONTE: Elaborado pelos autores.

Pré-processamento e Correções Radiométricas

As imagens foram submetidas a correções geométricas e atmosféricas utilizando o método *Dark Object Subtraction* (DOS1), a fim de reduzir o efeito de dispersão atmosférica e garantir comparabilidade temporal. Posteriormente, as imagens foram convertidas em reflectância de superfície, assegurando uniformidade espectral entre sensores distintos.

As composições coloridas RGB (5-4-3) para imagens do Landsat 5 e 7 e RGB (6-5-4) para imagens do Landsat 8 foram utilizadas para realçar as diferenças entre vegetação, áreas urbanas e superfícies expostas. Essa etapa permitiu identificar preliminarmente zonas de carste aflorante, áreas de mineração e manchas urbanas.

Para quantificar a cobertura vegetal e os corpos hídricos, empregaram-se os índices espectrais NDVI e NDWI. O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é amplamente utilizado para detectar e monitorar vegetação e é calculado pela diferença entre o infravermelho próximo (NIR) e o vermelho (RED), normalizada pela soma dessas bandas: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$. Vegetação saudável reflete intensamente no NIR e absorve fortemente no vermelho devido à clorofila; por isso, valores altos (próximos de +1) indicam dossel denso e vigoroso, enquanto valores baixos ou negativos sugerem solo exposto, áreas urbanas, mineração ou água. Neste estudo, o NDVI foi essencial para avaliar a perda de cobertura vegetal nas



áreas cársticas do Grupo Bambuí, sobretudo em setores com urbanização e atividade minerária intensas, permitindo quantificar a degradação e correlacioná-la ao avanço das manchas urbanas e à expansão de superfícies expostas.

Já o *NDWI (Normalized Difference Water Index)* realça corpos d'água e áreas úmidas por meio do contraste entre o verde (GREEN) e o NIR, pois a água absorve no NIR e reflete parcialmente no verde. É calculado como $NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR)$; valores positivos tendem a indicar lâminas d'água superficiais, enquanto valores negativos indicam superfícies secas, vegetação ou áreas urbanas.

Ambos os índices foram integrados em ambiente SIG para gerar mapas de variação espaço-temporal, possibilitando relacionar a expansão urbana à perda de vegetação e às alterações na dinâmica hídrica local.

Classificação Supervisionada

A classificação supervisionada do uso e da cobertura da terra foi realizada pelo algoritmo de Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Classifier – MLC*), amplamente reconhecido na literatura por seu desempenho consistente na discriminação espectral de classes com comportamento radiométrico heterogêneo, como é o caso das áreas cársticas. O MLC foi escolhido por sua base estatística sólida e pela capacidade de considerar a variabilidade interna de cada classe durante o processo de classificação.

O algoritmo assume que as amostras de treinamento seguem uma distribuição normal multivariada (gaussiana) e calcula, para cada pixel, a probabilidade de pertencer a uma classe específica com base na média e na variância espectral das bandas utilizadas. O pixel é então atribuído à classe com maior probabilidade a posteriori, segundo a função discriminante de Bayes (Richards; Jia, 2006).

Essa abordagem apresenta vantagens expressivas para a pesquisa apresentada, pois as áreas cársticas analisadas apresentam forte heterogeneidade espectral — superfícies expostas, vegetação esparsa, áreas urbanas e manchas mineradas frequentemente exibem assinaturas sobrepostas. As classes definidas foram: Áreas urbanas; Vegetação; Superfícies expostas/mineradas e Corpos d'água. O desempenho da classificação foi avaliado por meio da Matriz de Confusão e do Índice Kappa.

Detecção Automática de Feições Cársticas

A etapa de detecção automática de feições cársticas constituiu o núcleo inovador da metodologia. O procedimento baseou-se na integração de análise espectral, morfometria e classificação orientada a objetos, com o objetivo de identificar dolinas, áreas de colapso e superfícies expostas associadas a rochas carbonáticas.



A detecção automática das feições foi realizada por meio de um fluxo integrado que combina realce estrutural, segmentação espectral e análise morfométrica, adaptando procedimentos de Litwin e Andreychouk (2008) e de Hamdani e Baali (2019).

As cenas multiespectrais passaram por correções radiométricas e geométricas e foram integradas a um Modelo Digital de Elevação (MDE). Sobre as bandas ópticas aplicaram-se razões espectrais e filtros direcionais para realce de discontinuidades, seguidos de detectores de borda e transformadas para reforço e vetorização de lineamentos; as orientações resultantes foram sintetizadas em diagramas de roseta para uso como condicionante estrutural. Em paralelo, índices como NDVI e NDWI e limiares automáticos foram usados para mascarar vegetação densa, áreas antrópicas e lâminas d'água, reduzindo falsos positivos.

No MDE, derivaram-se declividade, curvaturas e o índice de Posição Topográfica (Topographic Position Index – TPI) para isolar depressões fechadas e bordas côncavas, caracterizando dolinas e poljes por contraste hipsométrico e assinatura de concavidade, com controle do preenchimento de depressões espúrias e de filtros mínimos de área e de amplitude altimétrica. As camadas (lineamentos, máscaras espectrais e polígonos de depressão) foram integradas por meio de regras de decisão espacial que priorizaram a coincidência entre o controle estrutural, a resposta espectral compatível e a morfologia negativa do relevo, restringindo o resultado às litologias carbonáticas do Grupo Bambuí. O mapeamento foi refinado com base em critérios geométricos (circularidade, excentricidade e razão de eixos) e validado por meio de verificação em campo e de confronto com registros existentes.

O processo foi dividido em quatro subetapas principais:

- a. Extração de padrões espectrais:** As feições cársticas apresentam assinaturas espectrais específicas, caracterizadas por alta reflectância no SWIR e baixa resposta no NIR, devido à ausência de vegetação e à exposição de superfícies rochosas. Foram aplicados limiares automáticos às imagens para segmentar regiões de baixa vegetação e de alta exposição mineral.
- b. Análise morfométrica e topográfica:** A partir de modelos digitais de elevação (SRTM 30 m) foram extraídos parâmetros de declividade, curvatura e profundidade de depressão (Depth Index). As dolinas foram identificadas por meio da detecção de microdepressões circulares ou elípticas, com variação altimétrica relativa inferior a 15 metros e diâmetro entre 50 e 500 metros — intervalos calibrados conforme Silva *et al.*, 2021 e Florea *et al.* (2002) e Hung (2002).



c. Classificação orientada a objetos: Aplicou-se o algoritmo OBIA (Object-Based Image Analysis) implementado no software ENVI Feature Extraction, que segmenta a imagem em objetos homogêneos com base em textura, forma e tons espectrais. Cada objeto foi classificado em uma das categorias-alvo (feições cársticas, áreas urbanas, vegetação, mineração, corpos d'água), considerando métricas de compactação, circularidade e contraste radiométrico.

d. Validação e calibração: Os resultados foram validados com registros de cavidades naturais do CECAV/ICMBio e observações de campo.

Análise Espaço-Temporal

Os mapas classificados e as feições detectadas foram comparados entre as séries temporais de 1984, 1990, 2000, 2010 e 2016, permitindo quantificar o crescimento urbano e sua sobreposição às áreas cársticas. Essa análise foi realizada em ambientes do QGIS e do ArcGIS, utilizando métricas de variação de área, expansão urbana relativa e proximidade espacial com feições cársticas e zonas mineradas.

RESULTADOS

A aplicação integrada das técnicas de sensoriamento remoto, classificação supervisionada e detecção automática de feições cársticas permitiu caracterizar e quantificar as transformações ambientais ocorridas entre 1984 e 2016 nas quatro cidades analisadas — Arcos, Curvelo, Montes Claros e Sete Lagoas —, todas situadas no Grupo Bambuí, em Minas Gerais.

Os resultados revelam um processo de expansão urbana acelerado e espacialmente concentrado, acompanhado por uma redução expressiva da cobertura vegetal e pela ampliação das áreas de mineração e das superfícies expostas. Essa tendência é particularmente notável em Arcos e Sete Lagoas, municípios onde a mineração de calcário atua como vetor de crescimento urbano e de pressão ambiental.

Expansão urbana em áreas cársticas

A análise espaço-temporal foi realizada comparando os mapas temáticos gerados para os diferentes anos analisados. Essa abordagem permitiu quantificar o aumento das áreas urbanizadas e avaliar suas implicações para as feições cársticas. Os resultados indicaram um aumento significativo nas manchas urbanas, variando de 91,3% em Montes Claros a 143,4% em Arcos, evidenciando um crescimento acelerado e desordenado.

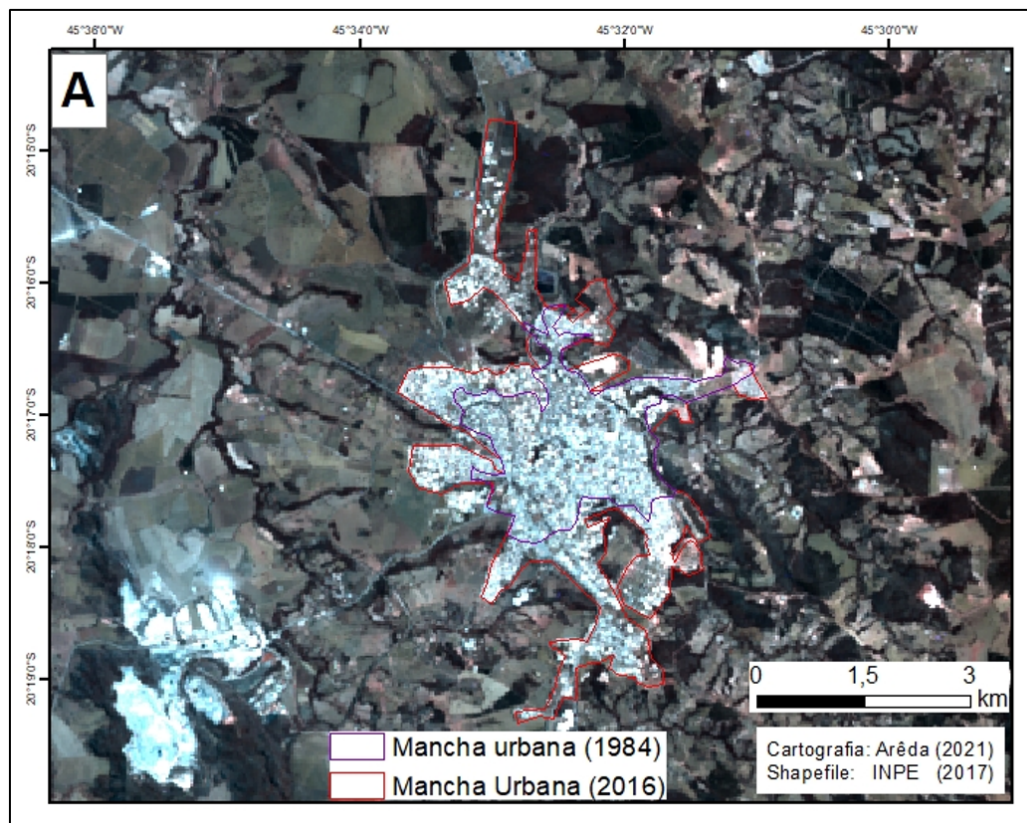


Esse avanço foi acompanhado por uma fragmentação progressiva da cobertura vegetal e pela expansão de áreas mineradas em setores próximos a dolinas e zonas de recarga do aquífero. Ressalte-se que dolinas pré-existentes tendem a ser os melhores preditores de novas ocorrências — especialmente quando apresentam padrões de aglomeração —, reforçando a importância do inventário multitemporal para a gestão urbana em carste (De Waele; Gutiérrez, 2022).

Expansão da mancha urbana de Arcos

Em Arcos, a área urbana quase se duplicou no período analisado. Observa-se a tendência de coalescência das manchas urbanas ao longo das vias de acesso e a aproximação com as áreas de extração mineral, indicando crescimento linear e direcionado por eixos de infraestrutura (Figura 3). As áreas destacadas (A e B) revelam sobreposição direta entre a expansão urbana e as zonas mineradas, o que evidencia o avanço do perímetro urbano sobre terrenos de alta vulnerabilidade cárstica.

FIGURA 3: Crescimento da mancha urbana de Arcos no intervalo temporal 1984-2016.



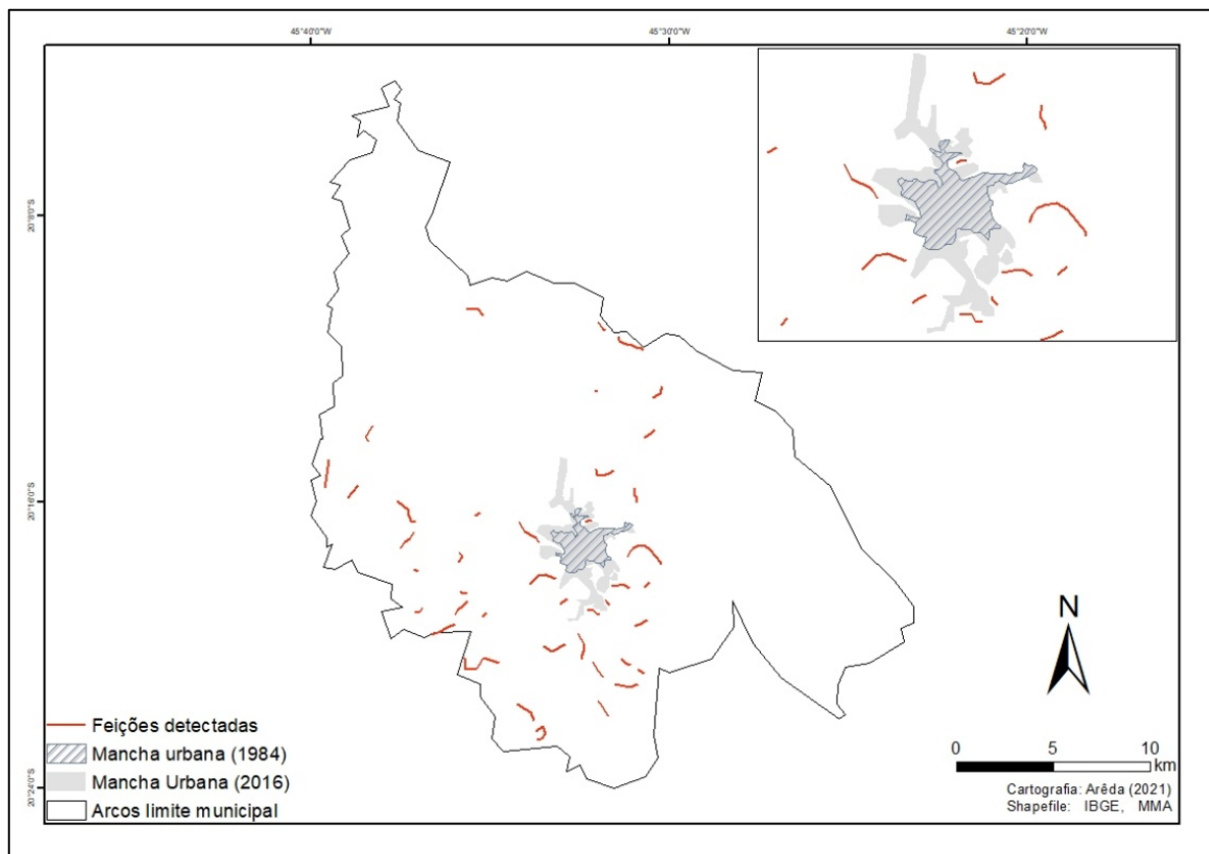
FONTE: Elaborado pelos autores.



A partir do processamento das imagens LandSat articuladas com a base vetorial, foi realizado o processo de detecção automática de feições cársticas (Figura 4). Foi identificada uma concentração de feições ao sul e sudoeste de Arcos, próximas às áreas onde também se concentram as atividades minerárias do município.

Foi observado um alinhamento de feições no sentido norte do município, ao norte da área urbana de Arcos. Embora não tenham sido constatadas feições suprimidas pelo crescimento urbano, identificaram-se feições próximas aos eixos de expansão da cidade.

FIGURA 4: Detecção automática de feições em Arcos.



FONTE: Elaborado pelos autores.

Expansão da mancha urbana de Curvelo

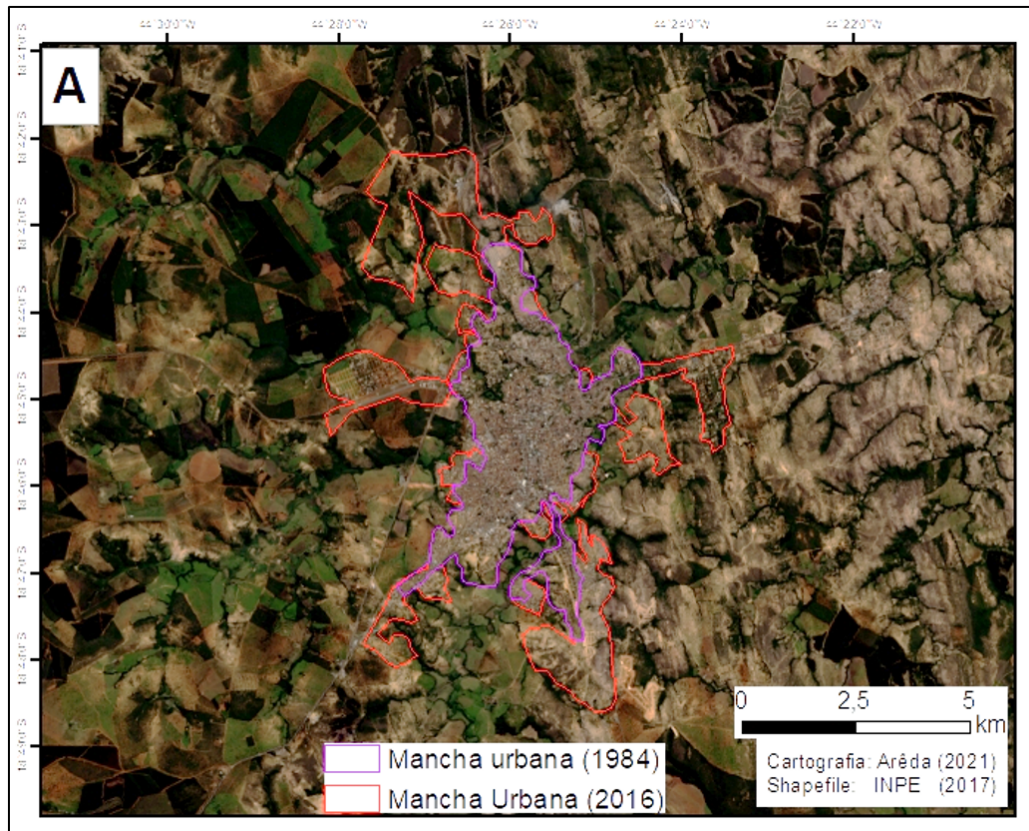
A partir da análise das manchas urbanas, verificou-se que Curvelo apresentou crescimento de 105,3% no período de 1984–2016, com um acréscimo de 16,7 km² na área urbana total. Observou-se exposição de solos, acompanhada de variações nas áreas agrícolas e silvícolas no entorno imediato da mancha urbana.

A classificação supervisionada das imagens de satélite resultou em manchas urbanas vetoriais, cuja diferença é apresentada na Figura 3. Curvelo possui dois vetores prioritários de crescimento, norte e sul, coerentes com a presença do carste na região e com a morfologia da planície sobre a qual se localiza a mancha urbana inicial de 1984.



Embora haja extração de calcário no município, não há evidências de que os vetores de crescimento acompanhem a localização da indústria — a extração não se situa em proximidade imediata da área urbana. A sucessão de imagens indica que os eixos viários exercem maior influência na expansão da mancha urbana. Outros vetores relevantes — leste, oeste e sudeste — também foram identificados, ainda que com incrementos menores em comparação aos eixos norte e sul.

FIGURA 5: Crescimento da mancha urbana de Curvelo (1984–2016).

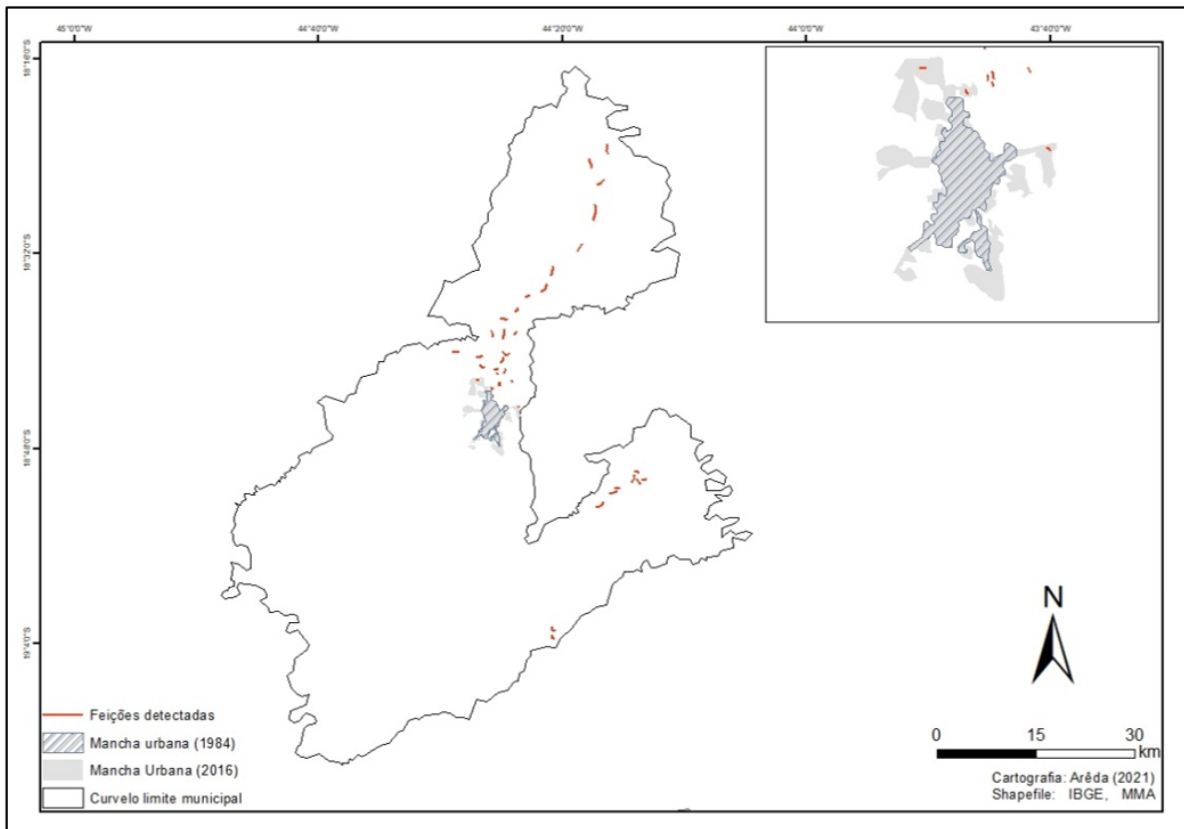


FONTE: Elaborado pelos autores.

Curvelo apresentou o menor número de feições identificadas pela detecção automática entre as demais cidades (Figura 6). Ainda assim, constatou-se supressão de feições associada ao crescimento da mancha urbana entre 1984 e 2016. Foram eliminadas feições a nordeste e a leste da área urbana, enquanto as demais se alinham preferencialmente em direção ao norte. Feições cársticas foram detectadas próximas ao vetor norte de crescimento, sugerindo possível supressão adicional decorrente do desenvolvimento urbano.



FIGURA 6: Detecção automática de feições em Curvelo.



FONTE: Elaborado pelos autores.

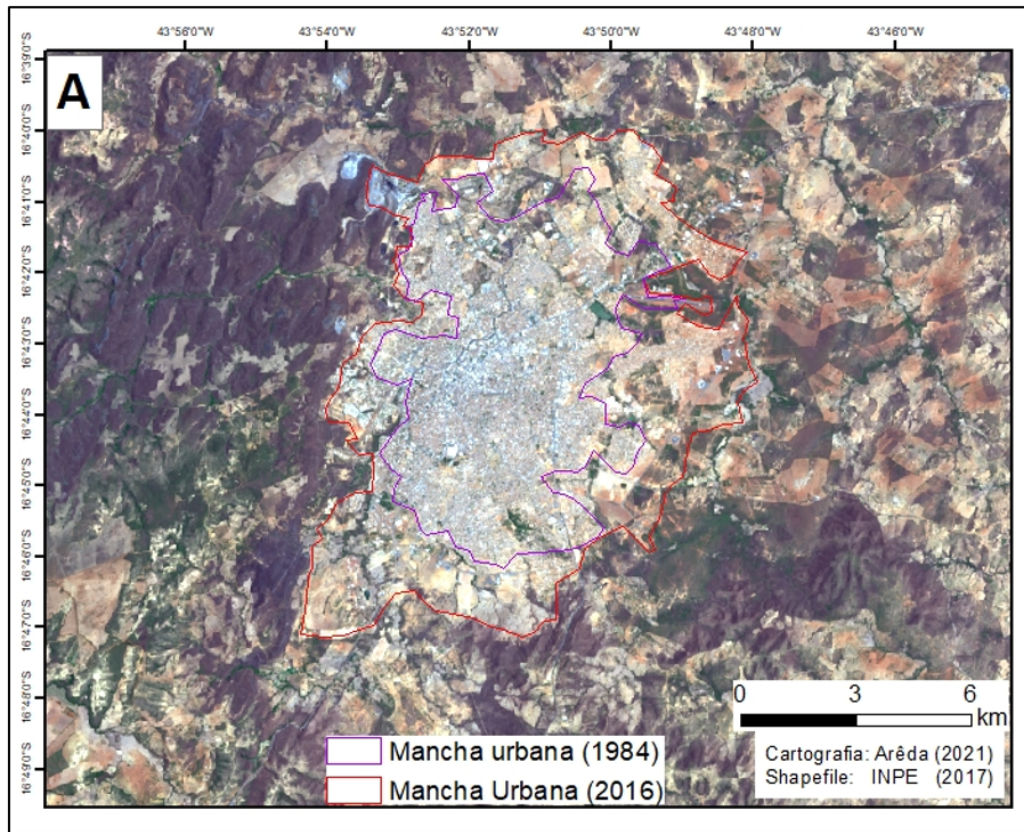
Expansão da mancha urbana de Montes Claros

Com base na classificação supervisionada da série temporal, a área urbana de Montes Claros aumentou 91,3%, o que corresponde a 38,5 km². O padrão predominante é de crescimento radial em todas as direções. Apesar da radialidade, destacam-se dois vetores principais (Figura 7): sul e leste. No sul, a expansão acompanha a ocorrência de carbonatos do Grupo Bambuí; no leste, o crescimento é associado ao aeroporto e à infraestrutura necessária à sua operação no período de 1984–2016.

Adicionalmente, identificou-se um novo vetor noroeste, com realce moderado. Nessa direção, situam-se empresas de extração de calcário; a implantação de infraestrutura minerária atua como fator de atração para a ocupação e a expansão urbanas.



FIGURA 7: Crescimento da mancha urbana de Montes Claros (1984–2016).

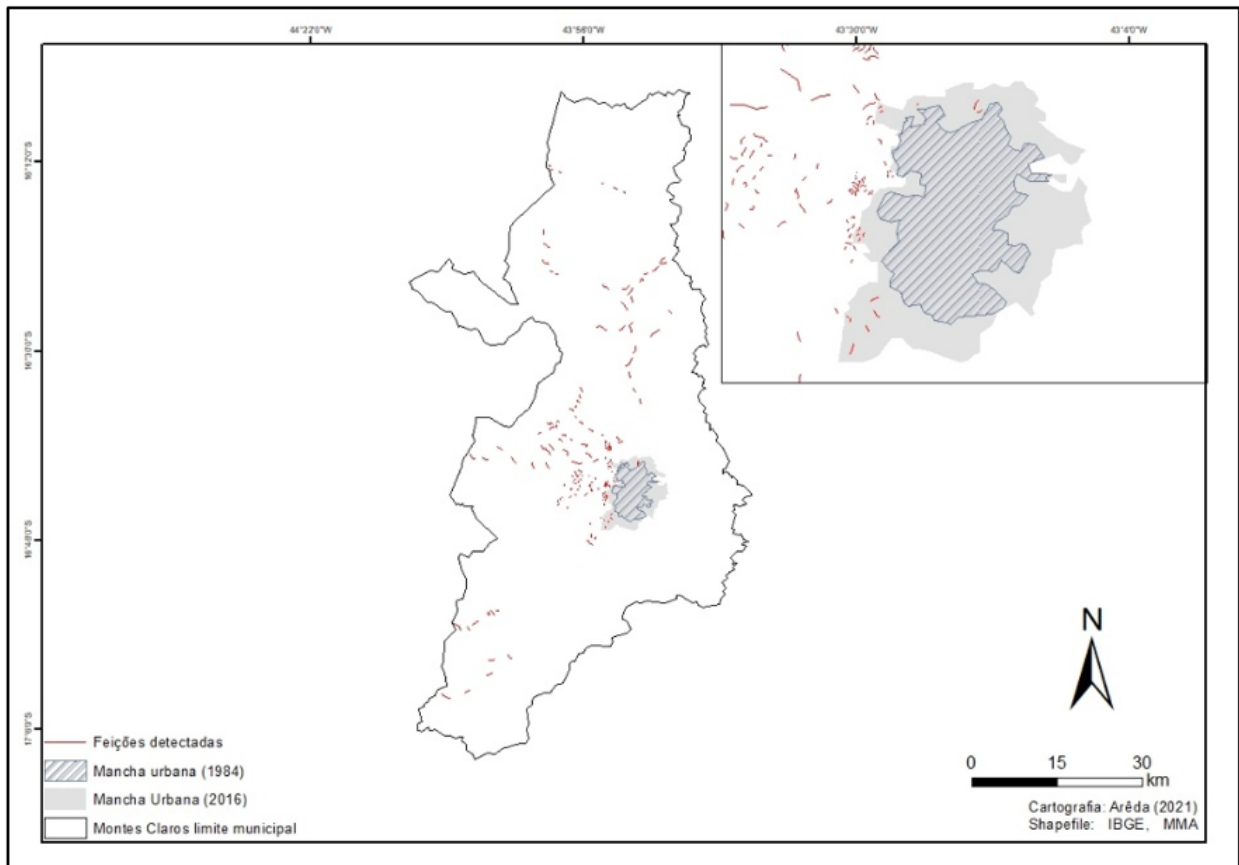


FONTE: Elaborado pelo autor.

A detecção automática (Figura 8) evidenciou três padrões: menor concentração de feições no setor sul do limite municipal, alinhamento marcante ao norte da mancha urbana e elevada concentração imediatamente a oeste da cidade. Ao longo do intervalo analisado, registraram-se supressões de feições nos setores sul e norte; embora o crescimento urbano seja radial, observa-se maior ênfase para leste, em sentido oposto à área de maior concentração de feições (oeste).



FIGURA 8: Detecção automática de feições em Montes Claros.



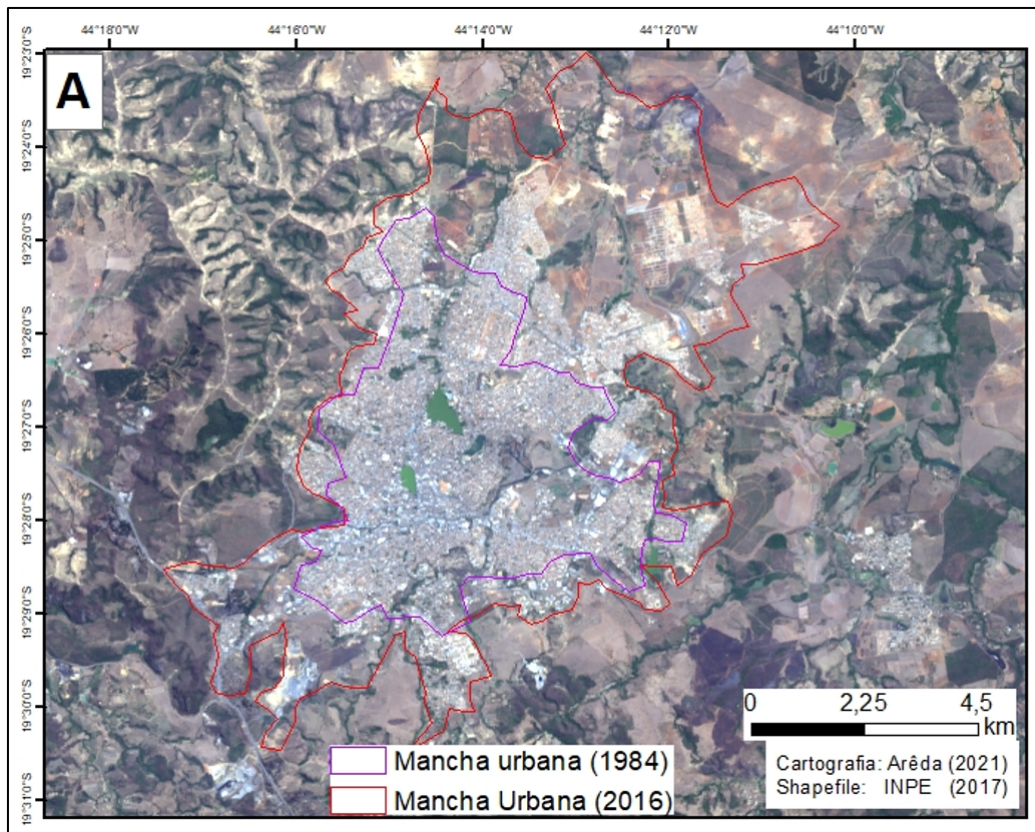
FONTE: Elaborado pelo autor.

Expansão da mancha urbana de Sete Lagoas

Sete Lagoas apresentou crescimento de 123% na série histórica, com um acréscimo de 39,3 km² na área urbana. A comparação entre 1984 e 2016 é apresentada na Figura 9. Foram identificados dois vetores prioritários, norte e sul, explicados pela infraestrutura viária e pela expansão das redes de água e esgoto, impulsionadas pela presença industrial na cidade. A série de imagens indica variação na lâmina d'água das lagoas, aspecto crítico diante da circulação hídrica subterrânea típica de sistemas cársticos — frágeis e suscetíveis a perturbações decorrentes de usos antrópicos, inclusive da exploração inadequada de água. A preocupação se acentua pela presença de indústrias alimentícias e de bebidas, pela mineração e pela demanda crescente de abastecimento público.



FIGURA 9: Crescimento da mancha urbana de Sete Lagoas (1984–2016)



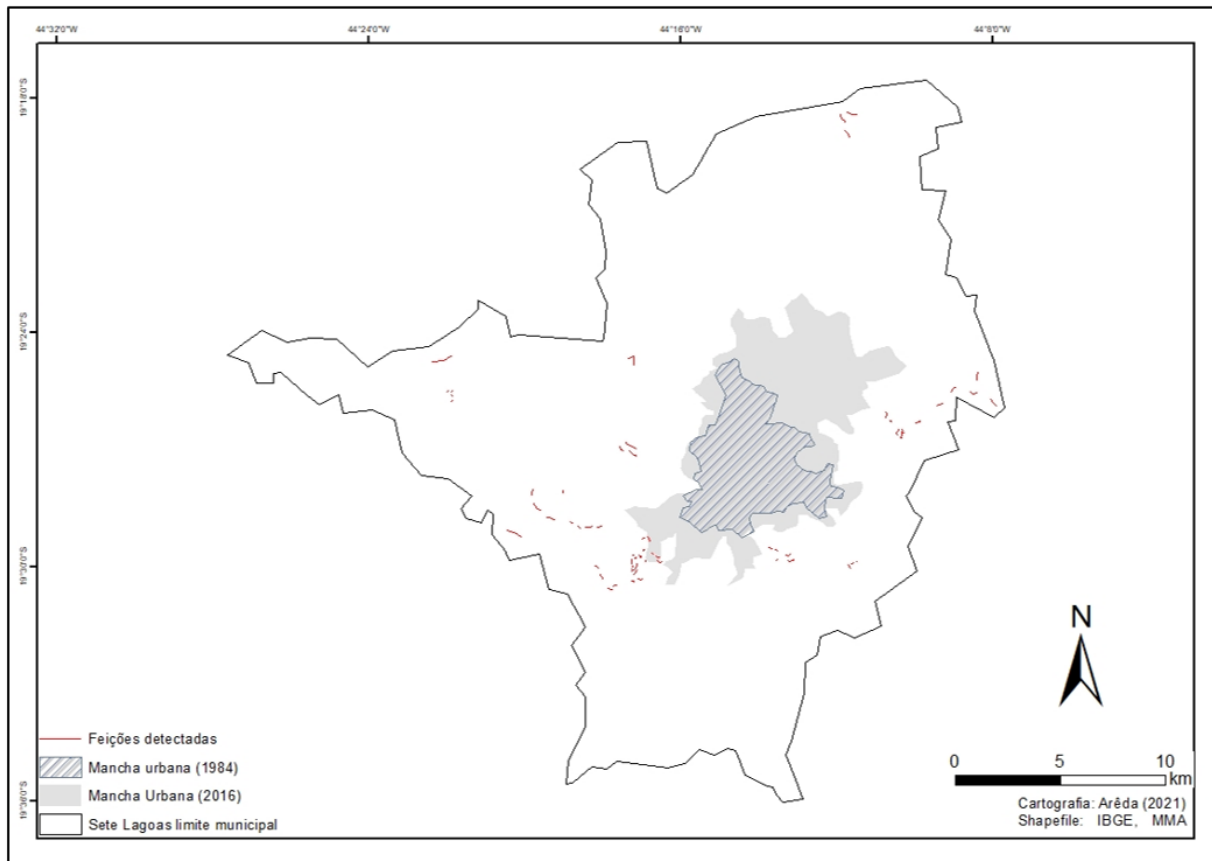
FONTE: Elaborado pelos autores.

Quanto à vegetação, verificou-se grande variação na cobertura do entorno imediato, o que pode indicar alterações na qualidade ambiental e na instabilidade do equilíbrio dinâmico do sistema no qual se insere a mancha urbana.

Em relação à detecção automática (Figura 10), as feições concentram-se preferencialmente ao sul e a leste da mancha urbana. Observa-se alinhamento oeste nas feições detectadas no setor sul. Em menor concentração, as feições ocorrem a oeste da cidade e no extremo norte do limite municipal. Identificou-se supressão de feições ao longo do vetor sul de crescimento nos anos finais do período analisado.



FIGURA 10: Detecção automática de feições em Sete Lagoas.



FONTE: Elaborado pelos autores.

A Figura 11 sintetiza o padrão de crescimento urbano nos quatro municípios. Em Arcos e Sete Lagoas, o avanço das áreas urbanas ocorreu em direção às zonas de maior densidade de feições cársticas, o que sugere aumento dos riscos de subsidência e de contaminação. Em Curvelo e Montes Claros, o crescimento foi mais difuso, porém igualmente concentrado em regiões de recarga do aquífero. A sobreposição entre os polígonos de expansão urbana e as feições detectadas reforça a hipótese de que o processo de urbanização está ocorrendo sobre setores geologicamente frágeis, especialmente nas margens de dolinas e nas zonas de colapso identificadas pela detecção automática.



A detecção automática de feições cársticas obteve acurácia média de 85%, com validação por matriz de confusão (Tabela 2). As maiores taxas de acerto foram observadas nas classes vegetação (0,92) e áreas urbanas (0,87), seguidas por dolinas (0,85) e áreas de colapso (0,83). As principais ambiguidades ocorreram entre *superfícies expostas e áreas urbanas* (7% de sobreposição) e entre dolinas e colapsos (10%), resultado esperado dada a semelhança espectral e geométrica dessas feições. Apesar dessas limitações, a metodologia demonstrou consistência espacial e temporal, sendo eficaz para o mapeamento automático de formações cársticas de escala média. A concordância espacial foi verificada por meio de sobreposição vetorial no SIG e do cálculo dos índices Kappa e F1-score. Resultados semelhantes são relatados quando a qualidade dos DSMs é analisada antes da segmentação, reduzindo a confusão entre depressões reais e artefatos (Kakavas et al., 2018).

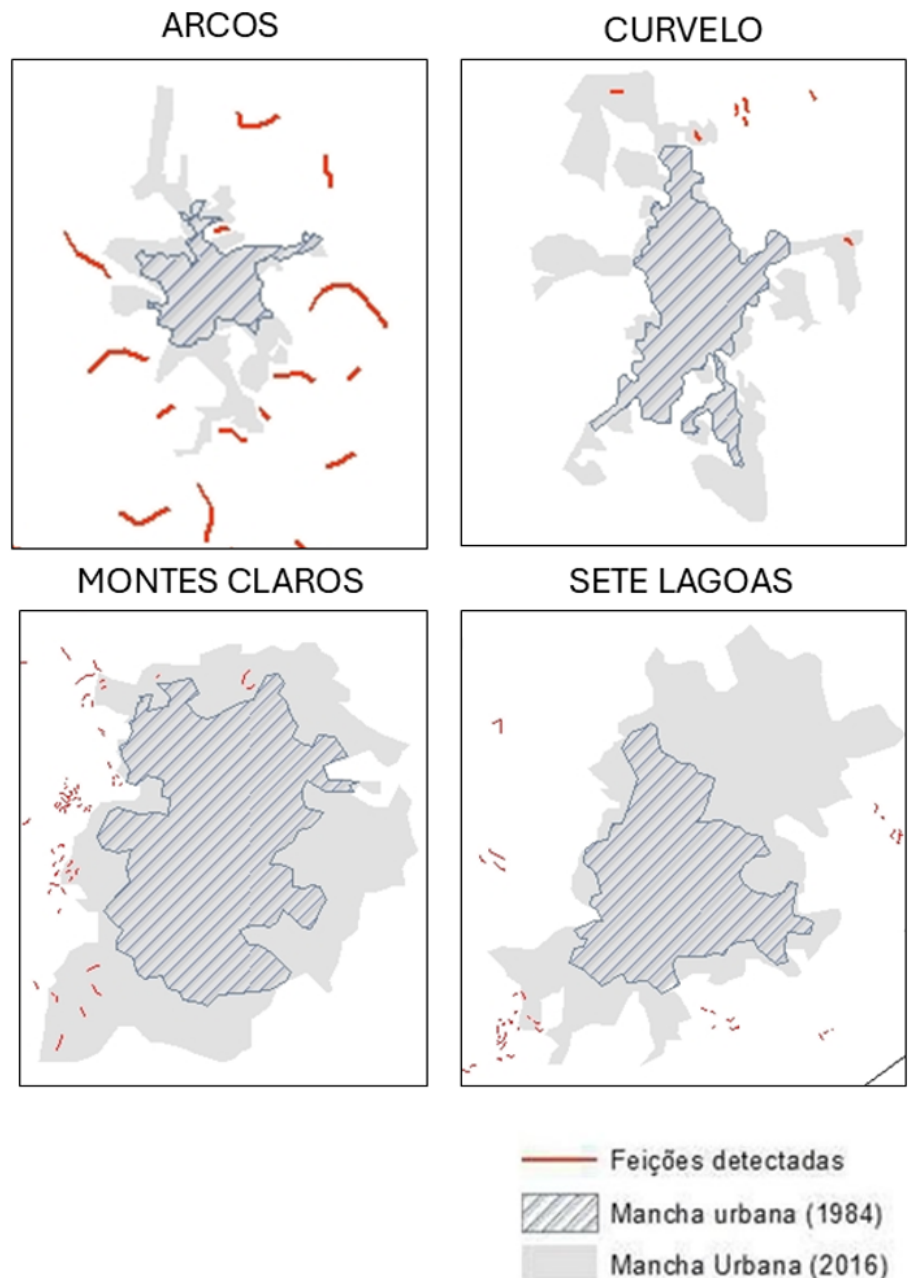


FIGURA 11: Expansão das manchas urbanas entre 1984 e 2016 nos municípios de Arcos, Curvelo, Montes Claros e Sete Lagoas (MG), em áreas cársticas do Grupo Bambuí. As áreas hachuradas representam a mancha urbana de 1984, enquanto as áreas em cinza correspondem à expansão até 2016. As linhas em vermelho indicam feições cársticas detectadas.

FONTE: Elaborado pelos autores.



TABELA 2: Matriz de confusão da classificação supervisionada aplicada às áreas cársticas de Minas Gerais.

	FEIÇÕES	ÁREAS DE COLAPSO	SUPERFÍCIES EXPOSTAS	ÁREAS URBANAS	VEGETAÇÃO	TOTAL
FEIÇÕES (DETECTADO)	0,85	0,1	0,05	0	0	1
ÁREAS DE COLAPSO (DETECTADO)	0,08	0,83	0,07	0,02	0	1
SUPERFÍCIES EXPOSTAS (DETECTADO)	0,06	0,08	0,81	0,05	0	1
ÁREAS URBANAS (DETECTADO)	0,01	0,02	0,07	0,87	0,03	1
VEGETAÇÃO (DETECTADO)	0	0,01	0,03	0,04	0,92	1

FONTE: Elaborado pelos autores.

A detecção automática de feições cársticas apresentou resultados promissores, com acurácia média de 85%, conforme validado pelas matrizes de confusão. As feições identificadas foram confrontadas com dados de campo e mapas geológicos, o que confirmou a precisão dos algoritmos aplicados.

Em Arcos e Montes Claros, a detecção automática identificou extensas áreas de dolinas e superfícies expostas, correlacionando-as diretamente com áreas de mineração e de expansão urbana. No entanto, em regiões com cobertura vegetal densa, a detecção apresentou limitações, o que indica a necessidade de calibrações adicionais para evitar falsos positivos e minimizar a confusão espectral entre afloramentos calcários e clareiras naturais.

A análise comparativa dos mapas temáticos revelou uma tendência geral de redução da vegetação e de aumento das superfícies impermeáveis. Em todas as cidades estudadas, o avanço urbano e a mineração provocaram a substituição da vegetação nativa por áreas pavimentadas ou expostas, comprometendo a infiltração hídrica e a recarga dos aquíferos cársticos.

Já as análises de NDWI mostraram um declínio contínuo do índice entre 1984 e 2016, indicando redução da umidade superficial e diminuição da recarga hídrica local. Esse tipo de tendência é típico de análises de séries temporais orbitais que capturam alterações hidrológicas e de cobertura (Kuenzer; Dech; Wagner, 2015). E essa



tendência é coerente com o que Guo *et al.* (2013) e Parise *et al.* (2022) observaram em áreas cársticas urbanizadas da China e da Itália, onde a expansão urbana sobre zonas de recarga compromete a disponibilidade de água subterrânea e altera a dinâmica dos fluxos subterrâneos.

A substituição da vegetação natural por pavimentação asfáltica e por solo exposto provocou aumento do escoamento superficial e da sedimentação nas lagoas, reduzindo a qualidade e o volume hídrico. Esse fenômeno, amplamente documentado em contextos tropicais (Daoxian, 1988; 2001; Lu, 2007; Goldscheider; Drew, 2007), evidencia o alto grau de vulnerabilidade das áreas cársticas diante da urbanização desregulada.

A análise multitemporal do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) evidenciou um declínio generalizado da vegetação nas quatro cidades, com valores médios reduzidos em até 20% entre 1984 e 2016.

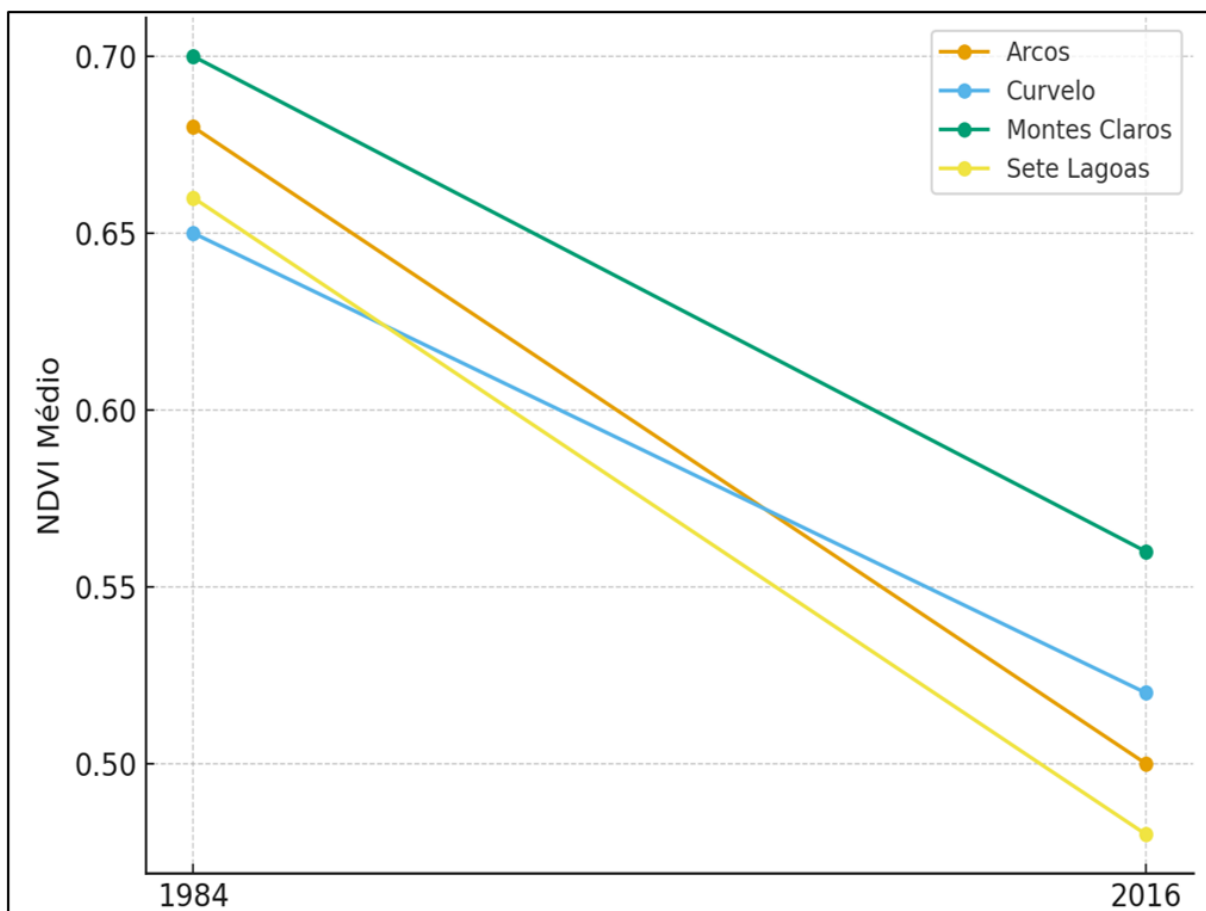
Na Figura 10, a tendência negativa do NDVI é mais pronunciada em Arcos e Sete Lagoas, onde a expansão urbana e a mineração se sobrepõem às áreas de vegetação remanescente. Montes Claros apresenta um declínio mais moderado, possivelmente em razão da presença de zonas periurbanas ainda cobertas por vegetação secundária.

Os valores negativos do NDVI coincidem espacialmente com áreas de superfícies expostas e colapsos detectados automaticamente, sugerindo correlação entre a perda de cobertura vegetal e a instabilidade geomorfológica. Em Arcos, por exemplo, a redução do NDVI médio de 23% no entorno imediato das áreas mineradas indica degradação ambiental associada à remoção de material carbonático e à deposição de rejeitos finos.

Esses resultados confirmam a relação direta entre urbanização, desmatamento e aumento da vulnerabilidade hídrico-geomorfológica, reforçando os efeitos sinérgicos entre a mineração e a expansão urbana em terrenos cársticos.



FIGURA 12: variação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) médio entre 1984 e 2016 nas cidades de Arcos, Curvelo, Montes Claros e Sete Lagoas, em áreas cársticas do Grupo Bambuí (MG). Observa-se tendência de declínio em todas as localidades, com reduções mais acentuadas em Arcos e em Sete Lagoas.



FONTE: Elaborado pelos autores.

Embora os resultados tenham demonstrado a eficácia das técnicas aplicadas, algumas limitações foram identificadas. A resolução espacial de 30 metros das imagens Landsat mostrou-se insuficiente para detectar feições cársticas menores, como pequenas dolinas ou microdepressões, que requerem sensores de alta resolução espacial. Além disso, a vegetação densa mascarou parcialmente as assinaturas espectrais das rochas carbonáticas, comprometendo a detecção automática em determinados setores do Grupo Bambuí.

Outra limitação refere-se à disponibilidade temporal das imagens Landsat, frequentemente afetada pela cobertura de nuvens — fator que reduziu a qualidade radiométrica em determinados períodos. Para contornar essa limitação, foram empregados processos de composição temporal e de filtragem espectral, que minimizaram interferências atmosféricas e aumentaram a consistência dos resultados.



Apesar dessas restrições, os resultados obtidos confirmam a hipótese de que o crescimento urbano acelerado em regiões cársticas intensifica os riscos ambientais, comprometendo a sustentabilidade dos recursos naturais e a integridade dos sistemas aquíferos. A utilização de técnicas avançadas de sensoriamento remoto e de detecção automática mostrou-se uma abordagem eficaz para o mapeamento detalhado das formações cársticas e para a compreensão espacial dos impactos ambientais associados à expansão urbana.

Os achados também sugerem a necessidade de uma gestão territorial orientada por evidências geoespaciais, que integre técnicas modernas de mapeamento e monitore continuamente as transformações do ambiente cárstico. A incorporação dessas metodologias ao planejamento urbano e ambiental pode auxiliar na mitigação de riscos e na conservação dos recursos hídricos e geomorfológicos em regiões de alta vulnerabilidade.

CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo confirmam que o processo de urbanização acelerado e não planejado nas áreas cársticas do Grupo Bambuí tem produzido impactos ambientais significativos e cumulativos, comprometendo a integridade geomorfológica e a sustentabilidade dos recursos hídricos subterrâneos. Entre 1984 e 2016, observou-se um aumento expressivo das manchas urbanas — de 91,3% em Montes Claros a 143,4% em Arcos —, acompanhado por redução da cobertura vegetal, ampliação das superfícies impermeáveis e expansão das áreas mineradas.

A análise espaço-temporal evidenciou a sobreposição entre a expansão urbana e as zonas de ocorrência de feições cársticas, como dolinas e áreas de colapso, revelando o avanço do uso antrópico em setores geologicamente frágeis. Essa configuração reforça a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos locais, cuja recarga depende da permeabilidade do solo e da cobertura vegetal. A redução de até 30% nas lâminas d'água observada em Sete Lagoas ilustra a escala dos impactos hidrológicos associados à impermeabilização e à mineração intensiva.

A detecção automática de feições cársticas demonstrou-se uma ferramenta eficaz para o mapeamento preliminar de áreas vulneráveis, alcançando acurácia média de 85% e correlação estreita com os registros do CECAV e os mapas geológicos da CPRM. Essa metodologia, baseada na combinação de critérios espectrais e morfométricos e na análise orientada a objetos, mostrou-se particularmente adequada para o monitoramento de ambientes complexos e de difícil acesso, permitindo identificar variações sutis na morfologia do terreno e na exposição das rochas carbonáticas.



Do ponto de vista metodológico, o estudo reforça a relevância das geotecnologias aplicadas à análise ambiental, sobretudo quando integradas a séries temporais de longo prazo. O uso combinado de imagens Landsat, índices espectrais (NDVI, NDWI), classificação supervisionada por Máxima Verossimilhança e detecção automática de feições permitiu compreender, de forma sistêmica, as dinâmicas urbano-ambientais em contextos cársticos tropicais. Essa abordagem, ao integrar diferentes escalas e dimensões de análise, amplia a capacidade de diagnóstico e monitoramento da degradação ambiental em regiões de elevada fragilidade ecológica. Leis eficazes em outros terrenos podem falhar no carste; são necessárias regulações específicas.

Os resultados obtidos indicam que a urbanização de terrenos carbonáticos, quando dissociada de critérios técnicos de adequação ambiental, gera efeitos cumulativos sobre a estrutura geomorfológica e a dinâmica hídrica subterrânea. A compreensão desses processos é fundamental não apenas para o campo da geografia física e da geomorfologia cárstica, mas também para o aprimoramento de instrumentos de planejamento territorial e de monitoramento ambiental baseados em evidências geoespaciais.

Em síntese, o estudo contribui para a consolidação de uma abordagem geotecnológica integrada à análise da vulnerabilidade cárstica em regiões urbanizadas, demonstrando que as ferramentas de sensoriamento remoto e SIG podem operar como sistemas contínuos de observação ambiental, capazes de identificar padrões espaciais, antecipar áreas críticas e orientar decisões técnicas em contextos de fragilidade geológica.

A continuidade das pesquisas deverá priorizar a aplicação de modelos preditivos de risco cárstico, integrando variáveis topográficas, espectrais e geotécnicas, bem como a criação de bases de dados geoespaciais contínuas para o acompanhamento das transformações urbano-ambientais no domínio do Grupo Bambuí e em outras regiões cársticas brasileiras.



REFERÊNCIAS

- DAOXIAN, Y. Environmental and engineering problems of karst geology in China. **Environmental Geology and Water Sciences**, v. 12, n. 2, p. 79-87, 1988. <https://doi.org/10.1007/BF02574792>
- DAOXIAN, Y. On the karst ecosystem. **Acta Geologica Sinica**, v. 75, n. 3, p. 336-338, 2001. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2001.tb00541.x>
- DE WAELE, J.; GUTIÉRREZ, F. **Karst Hydrogeology, Geomorphology and Caves**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2022.
- DE WAELE, J.; GUTIERREZ, F.; PARISE, M.; PLAN, L. Geomorphology and natural hazards in karst areas: a review. **Geomorphology**, v.134, n. 1-2, p.1-8, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.001>
- FLOREA, L. J.; PAYLOR, R. L.; SIMPSON, L.; GULLEY, J. Karst GIS advances in Kentucky. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.64, n.1, p.58-62, 2002.
- FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. Chichester: Wiley, 2007.
- GOLDSCHIEDER, N.; DREW, D. **Methods in Karst Hydrogeology**. London: CRC Press, 2007.
- GUO, F.; JIANG, G.; YUAN, D.; POLK, J. S. *Evolution of major environmental geological problems in karst areas of southwestern China*. **Environmental Earth Sciences**, v. 69, n. 7, p. 2427–2435, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-2070-8>
- GUTIÉRREZ, F.; PARISE, M.; DE WAELE, J.; JOURDE, H. A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. **Earth-Science Reviews**, v. 138, p.61-88, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>
- HUNG, L. Q.; DINH, N. Q.; BATELAAN, O.; TAM, V. T.; LAGROU, D. Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi Catchment (Son La – NW Vietnam). **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 23–33, 2002.
- KAKAVAS, M; NIKOLAKOPOULOS, K. G.; KYRIOU, A.; ZAGANA, H.; *et al.* Assessment of freely available DSMs for automatic karst feature detection. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 14, p. 388, 2018.
- KUENZER, C.; DECH, S.; WAGNER, W. Remote Sensing Time Series Revealing Land Surface Dynamics: Status Quo and the Pathway Ahead. *In: KUENZER, C.; DECH, S.; WAGNER, W. (org.). Remote Sensing Time Series: Revealing Land Surface Dynamics*. Cham: Springer, 2015. p.1-24.
- LANDSAT SCIENCE. **The Landsat Program: History and Overview**. 2016. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov>. Acesso em: 10 mar. 2025.
- LU, Y. Karst water resources and geo-ecology in typical regions of China. **Environmental Geology**, v. 51, n. 5, p. 695–699, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0381-3>
- MAURANO, L.E.P.; ESCADA, M.I.S.; RENNO, C.D. Padrões espaciais de desmatamento e a estimativa da exatidão dos mapas do PRODES para Amazônia Legal Brasileira. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1763-1775, 2019. <https://doi.org/10.5902/1980509834380>
- MORENO-GÓMEZ, M.; LIEDL, R.; STEFAN, C. A new GIS-Based model for karst dolines mapping using LiDAR; application of a multidepth threshold approach in the Yucatan karst, Mexico. **Remote Sensing**, v. 11, n. 10, p. 1147, 2019.
- NERI, A.; SÁNCHEZ, L.E. **Guia de boas práticas de recuperação ambiental em pedreiras e minas de calcário**. São Paulo: ABGE, 2012.
- PARISE, M.; LOLLINO, P. A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in Southern Italy. **Geomorphology**, v. 134, n. 1–2, p.132–143, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.008>
- PEREIRA, M.C. **O carste sob os olhares da superfície [manuscrito]: fragilidade, antropismo e planejamentos urbano e ambiental na região cárstica de Lagoa Santa – MG**. 2018. 229 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.



- RAVBAR, N.; KOGOVSĚK, J.; PIPAN, T. Environmental value and vulnerability of karst resources. In: ZUPAN HAJNA, N.; RAVBAR, N.; RUBINIĆ, J.; PETRIČ, M. (Org.). **Life and Water on Karst: Monitoring of transboundary water resources of Northern Istria**. Ljubljana: Založba ZRC, 2017. p. 23–35.
- RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 2006.
- SAMPAIO, J. L. **Inventário digital da APA (Área de proteção ambiental) carste Lagoa Santa e algumas implicações**. 2010. 223F. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- SCARAMUZZA, C.A. de M. *et al.* Land-use and land-cover mapping of the Brazilian Cerrado based mainly on Landsat-8 satellite images. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p.1041-1051, 2017. <https://doi.org/10.14393/rbcv69n6-44309>
- SILVA, F.F. da; MORAIS, F. de. Índice de perturbações ambientais em áreas cársticas do estado do Tocantins–primeira aplicação no Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 03, p. 766-777, 2016.
- SILVA, R. F. da; SANTOS, M. S.; SANTANA, F. D.; OLIVEIRA, Y. S. de; SOUZA, B. T. de. Sensoriamento Remoto aplicado à análise da regeneração da vegetação natural do Parque Estadual da Lapa Grande, Montes Claros, Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, v.31, n.65, p.304-304, 2021.
- SZMIGIEL, A.; TAJDUŚ, K. A Comprehensive Review of Sinkhole Modelling and Prediction Methods. **Archives of Mining Sciences**, p. 293-312-293-312, 2025.
- SZUKALSKI, B. W. Introduction to cave and karst GIS. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 3, 2002.
- SZUKALSKI, B.; YOCUM, M. CKIS - GIS in Cave and Karst Management. *In: NATIONAL CAVE AND KARST MANAGEMENT SYMPOSIUM, 14., 1999, Chattanooga, TN. Proceedings...* Chattanooga: Southwestern Cave Conservancy, 1999. p. 191-196.
- SZUKALSKI, B. W. Introduction to cave and karst GIS. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 64, n. 1, p. 3, 2002.
- TRAVASSOS, L.E.P. **Princípios de Carstologia e Geomorfologia Cárstica**. Brasília: ICMBio/CECAV, 2019.
- ZHU, J.; NOLTE, A. M.; JACOBS, N.; YE, M. Using machine learning to identify karst sinkholes from LiDAR-derived topographic depressions in the Bluegrass Region of Kentucky. **Journal of Hydrology**, v.588, p.125049, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125049>.



EVOLUÇÃO DAS CAVERNAS EM SERGIPE

Helena dos Santos Macedo¹

Hélio Mário de Araújo²

Luana Pereira Lima³

PALAVRAS-CHAVE: Carste tradicional, Cavernas, Morfogênese, Sergipe, Geodiversidade.

RESUMO

As feições cársticas de Sergipe apresentam desenvolvimento incipiente em comparação a outras províncias cársticas brasileiras, mas possuem características singulares que justificam investigações específicas. O presente trabalho analisa os processos morfogenéticos responsáveis pela formação das cavidades naturais do carste tradicional sergipano, contribuindo para o conhecimento geomorfológico e para a valorização do geopatrimônio regional. Para alcançar esse objetivo, foram adotados procedimentos metodológicos integrados, incluindo revisão bibliográfica, levantamento cartográfico, interpretação de imagens de satélite e trabalhos de campo. Durante as atividades in loco, realizaram-se registros fotográficos de todas as cavernas catalogadas no Cadastro Nacional de Cavernas (CNC) e na base de dados do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), além da identificação de 61 novas cavidades. As principais cavernas foram topografadas, visando facilitar prospecções e subsidiar estudos futuros. Os sistemas de cavernas encontram-se nas duas unidades do carste tradicional sergipano: a Bacia Sergipe e a Formação Olhos d'Água. Nessas áreas foram identificadas 133 cavidades naturais, distribuídas principalmente nos municípios de Poço Verde (34), Simão Dias (19), Laranjeiras (17) e Lagarto (13). No entanto, as cavernas apresentam dimensões horizontais e verticais pouco expressivas, baixa diversidade de espeleotemas — predominando formas pavimentares — e ausência de sistemas interconectados, com exceção do maciço Caraíba em Poço Verde. Essa configuração indica processos de formação localizados nos próprios maciços rochosos, sem evolução significativa de redes subterrâneas. As limitações morfogenéticas decorrem de fatores geológicos e hidrológicos. Entre eles destacam-se: a presença de materiais não carbonáticos intercalados aos maciços, a ausência de um epicarste desenvolvido, o baixo gradiente do relevo e a carência de drenagem subterrânea turbulenta. Na Bacia Sergipe, os carbonatos estão associados a arenitos, siltitos, folhelhos, conglomerados, brechas, argilitos e calcilutitos, reduzindo a dissolução. Já na área Olhos d'Água/Frei Paulo, metacarbonatos intercalam-se com filitos siltosos, metarenitos, metargilitos, quartzitos e metacherts, formando barreiras que restringem o endocarste. Outra característica notável das cavernas sergipanas é o “teto baixo”, explicado pelo pequeno volume dos maciços expostos, pela proximidade da zona vadosa ao nível freático, pela reduzida ação

1 Doutor pelo PPGEIO da Universidade Federal de Sergipe, helenosamac@gmail.com

2 Doutor, Universidade Federal de Sergipe, heliomarioaraujo@yahoo.com.br

3 Doutora pelo PPGEIO da Universidade Federal de Sergipe, luana.pl.lua@gmail.com



hidrogeológica e pela ausência de porosidade secundária. Tais fatores, em conjunto, explicam a baixa expressividade morfológica do carste sergipano, mas ressaltam sua singularidade dentro do contexto geomorfológico brasileiro.

INTRODUÇÃO

As paisagens cársticas figuram entre os sistemas naturais mais singulares e complexos do planeta, destacando-se tanto pela riqueza geomorfológica quanto pela relevância ecológica. Desenvolvidas sobre rochas carbonáticas, como calcários e dolomitos, essas paisagens abrigam amplos sistemas de águas subterrâneas, cavernas com registros paleoambientais e processos geomorfológicos que, diferentemente de outras paisagens, ocorrem majoritariamente no subsolo. São ambientes de grande sensibilidade, onde pequenas alterações podem desencadear impactos de longa duração.

As feições cársticas do estado de Sergipe apresentam um estágio incipiente de desenvolvimento quando comparadas a outras províncias cársticas brasileiras. No entanto, determinadas particularidades tornam o carste sergipano singular, justificando a necessidade de investigações que ampliem o conhecimento sobre sua morfogênese. Com base nessa demanda, o presente trabalho visa analisar os processos morfogenéticos responsáveis pela formação das cavidades naturais inseridas no carste tradicional do estado.

Para isso, foram adotados procedimentos metodológicos variados, incluindo revisão bibliográfica, levantamento cartográfico, interpretação de imagens de satélite e observações de campo, além do registro fotográfico das cavernas cadastradas no CNC (Cadastro Nacional de Cavernas) e no banco de dados do CECAV (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas).

Foram identificadas 61 novas cavidades e topografadas as principais, com vistas a subsidiar estudos posteriores. As cavernas estão distribuídas nas duas principais unidades do carste tradicional em Sergipe — a Bacia de Sergipe e a Formação Olhos d'Água/Frei Paulo — totalizando 133 cavidades naturais, com destaque para os municípios de Poço Verde, Simão Dias, Laranjeiras e Lagarto.

Área de estudo

O recorte espacial da pesquisa compreende as áreas em que se encontram paisagens desenvolvidas sobre rochas carbonáticas, associadas à morfologia cárstica tradicional, dentro do espaço territorial do estado de Sergipe (MACEDO, 2019).

Para delimitação desse tipo de morfologia, além da presença das rochas carbonáticas, que por sua natureza são solúveis e permeáveis, outros fatores foram levados em consideração como: a porosidade secundária da rocha (fissuradas e fraturadas); a topografia; a presença de drenagem vertical e subterrânea; percolação

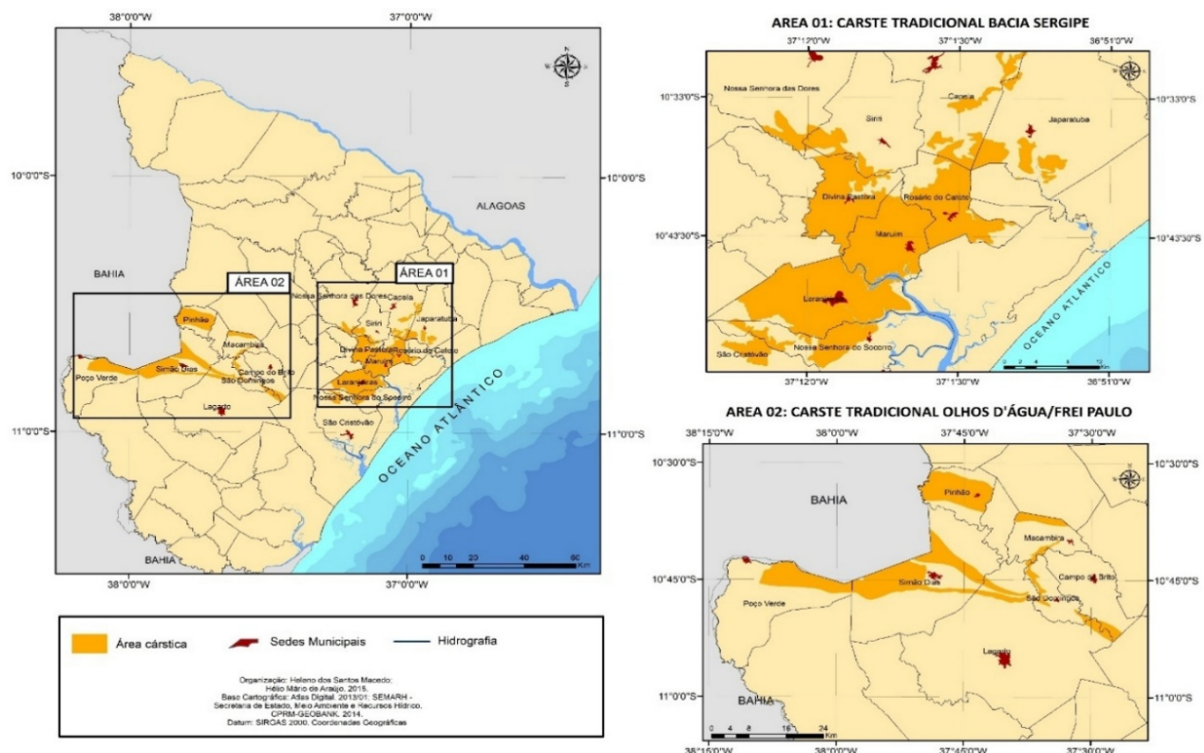


da água através das fissuras/fraturas ou condutos; dissolução de CaCO_2 (carbonato de Cálcio); carste subjacente; e a presença de feições sub/superficiais típicas desse ambiente, como, cavernas, dolinas, lapiás, entre outros.

O recorte espacial abrange 1.453,37 km², correspondendo a 6,63% da área total do estado, encontrando-se estabelecidos sobre esse tipo de morfologia (total ou parcialmente) dezessete municípios: Campo Brito, Capela, Divina Pastora, Japarutuba, Lagarto, Laranjeiras, Macambira, Maruim, N^a Senhora das Dores, Nossa Senhora do Socorro, Pinhão, Poço Verde, Rosário do Catete, São Cristóvão, São Domingos, Simão Dias e Siriri. Desses municípios, seis vão concentrar a maioria da paisagem cárstica tradicional: Divina Pastora, Laranjeiras, Nossa Senhora do Socorro, São Domingos, Simão Dias e Poço Verde (Macedo, 2019).

Para uma melhor caracterização, a área de estudo foi dividida em duas partes: área 01 compreendendo o Carste tradicional da Bacia Sergipe e área 02, o Carste Tradicional Olhos d'Água / Frei Paulo (Figura 1).

FIGURA 1: Localização da área de estudo.



FONTE: Elaborado pelos autores (2019).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A Teoria dos Sistemas e a Teoria dos Sistemas Dinâmicos não-lineares nortearam a construção desse trabalho, contribuindo para a compreensão da organização do espaço geográfico local, que no percurso da investigação requereu análises profundas de forma integrada sobre os diversos elementos da paisagem expressos na superfície cárstica atual.



O trabalho de campo mostrou-se eficaz, sendo etapa fundamental para o levantamento de dados primários e elucidação dos fatos, até então desconhecidos sobre a realidade subterrânea cárstica local e, associado a ele, o levantamento da literatura especializada para suporte teórico-metodológico de sustentação às bases empíricas, além do levantamento cartográfico para subsidiar na elaboração dos mapas temáticos.

A caracterização geológica e compartimentação Lito estrutural desses ambientes, baseou-se nos dados da CPRM, complementados com as atividades de campo, onde priorizou-se os seguintes parâmetros: constituição litológica (considerando as suas propriedades em face das manifestações da dinâmica externa e interna); grau de solubilidade; resistência mecânica; posição estratigráfica e hipsométricos em relação a outras sequencias rochosas; grau de litificação; porosidade; densidade; composição química; orientação, e direcionamento dos lineamentos estruturais que comandam as disposições do quadro morfoestrutural.

No mapeamento das feições cársticas fez-se uso de medições sucessivas de Global Positioning System (GPS) contendo altímetro digital embutido, com posterior geração de mapas. Esse levantamento in loco se mostrou necessário devido à dificuldade de visualização de feições em algumas imagens de satélite pela presença de nuvens, bem como à quantificação delas pelas fotografias aéreas, em função da escala cartográfica de representação que não permitia alcançar o nível de detalhamento desejado.

Os mapas temáticos foram elaborados com o apoio da cartografia digital e ferramenta computadorizada. Utilizou-se a mesma base cartográfica e escala, com o uso do sistema de projeção UTM e SIRGAS 2000 24S, através da base de dados disponibilizada no Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe (versão 2016) pela Superintendência de Recursos Hídricos (SRH). Para isso, alguns softwares foram fundamentais como o ArcGis 10.1 da ESRI®, disponibilizados no Laboratório de Representação da Terra do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Sergipe, com o uso do SIG.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas de cavernas encontram-se nas duas unidades do carste Tradicional em Sergipe. As duas áreas cársticas possuem 133 (cento e trinta e três) cavernas, sendo o município de Poço Verde o que se apresenta com o maior número de cavidades naturais (34), seguido pelos municípios de Simão Dias (19), Laranjeiras (17) e Lagarto (13).

As cavernas do carste tradicional em Sergipe, não possuem desenvolvimento horizontal e vertical expressivos, apresentam baixa diversidade de espeleotemas, principalmente, espeleotemas pavimentares, e, com exceção do maciço caraíba localizado em Poço Verde, não se encontra um sistema de cavernas conectadas, ou seja,



as cavidades se desenvolveram a partir de processos *in loco* em seus maciços rochosos. Este fato advém da presença de outros tipos de materiais entre os maciços de calcário, com a ausência de um epicarste desenvolvido; do baixo gradiente do relevo e da ausência de uma rede subterrânea de drenagem turbulenta (Macedo, 2019).

Os maciços carbonáticos nos setores cársticos encontram-se associados a outros tipos de pacotes litológicos, com graus de porosidade e permeabilidade diferentes. No carste da Bacia Sergipe, os carbonatos são cobertos ou estão intercalados por arenitos, siltitos, folhelhos, conglomerados, brechas, argilitos e calcilitos. Esse material intercalado acaba reduzindo os processos de carstificação, ou mesmo impedindo o processo de dissolução do maciço subjacente.

Na área cárstica Olhos D'Água/Frei Paulo, os carbonatos e metacarbonatos estão intercalados com filitos siltosos, metarenitos, metasiltitos micáceos com lentes subordinadas de metargilitos, metagrauvacas, metaconglomerados, metacherts, quartizito e filitos intercalados com metarenitos. Todos esses materiais associados aos carbonatos criam verdadeiras barreiras para o processo de dissolução dos carbonatos, impedindo um desenvolvimento mais expressivo do endocarste.

A ausência de um epicarste desenvolvido também se configura como um fator importante para a incipiência da espeleogênese no carste tradicional em Sergipe. O manto de alteração, os solos e os sedimentos são importantes para o processo de carstificação, pois se encontram em contato direto com as rochas carbonáticas, influenciando a circulação hídrica interna e a elaboração da morfologia rochosa coberta.

No carste da Bacia Sergipe, a pureza dos carbonatos impede que ocorra manto de alteração, pois os grãos dos minerais são totalmente dissolvidos, causando o desaparecimento das estruturas originais. Na área cárstica Olhos D'Água/Frei Paulo, a acumulação de resíduos insolúveis, normalmente encontrados em quantidades pequenas nos calcários em algumas das cavidades estudadas, como a sílica sob várias formas e os minerais de argila, retraem o processo de carstificação.

Ainda em relação ao papel do epicarste para o desenvolvimento das paisagens cársticas sergipanas, percebe-se a baixa espessura das camadas pedológicas sobre os maciços calcários. Segundo Yuan (1991), são necessários entre 250 e 850 mil anos para a produção de 1 metro de espessura de solo para o carste tradicional de áreas tropicais. Já Lamouroux (1972) afirma que para a formação de 30 cm de solo, são necessários 5 metros de rocha dura, contendo 2,2% de resíduo, sendo necessários de 50 a 100 mil anos para a formação dos solos. Percebe-se que os solos nas duas áreas cársticas não são espessos,



indicando que os processos de alteração das rochas não ocorreram de forma semelhante às principais áreas cársticas do Brasil, que possuem espessas coberturas pedológicas, como, por exemplo, o Grupo Bambuí e o Grupo Una.

A topografia também se configura como um fator que impediu um maior desenvolvimento das cavidades naturais em Sergipe. As rochas carbonáticas estão em porções de baixa altitude (no carste da Bacia, 60 metros em média e no carste Olhos d'Água/Frei Paulo, uma média de 200 metros em relação ao nível de base geral). Essa característica atua associada ao papel desempenhado pelo sistema de drenagem subterrânea, que, devido ao baixo gradiente do relevo, não atua de forma turbulenta nas zonas subcutâneas, reduzindo assim a aceleração dos processos de dissolução dos carbonatos.

Outra característica das cavernas sergipanas é possuírem “teto baixo”. Essa característica resulta do tamanho dos maciços carbonáticos expostos na superfície, da ausência de uma eficiente ação hidrogeológica devido à proximidade da zona vadosa com o nível freático e da ausência de porosidade secundária, além de outros que impediram um desenvolvimento mais expressivo dos condutos e salões dessas feições nos Domínios geológicos (Macedo, 2019).

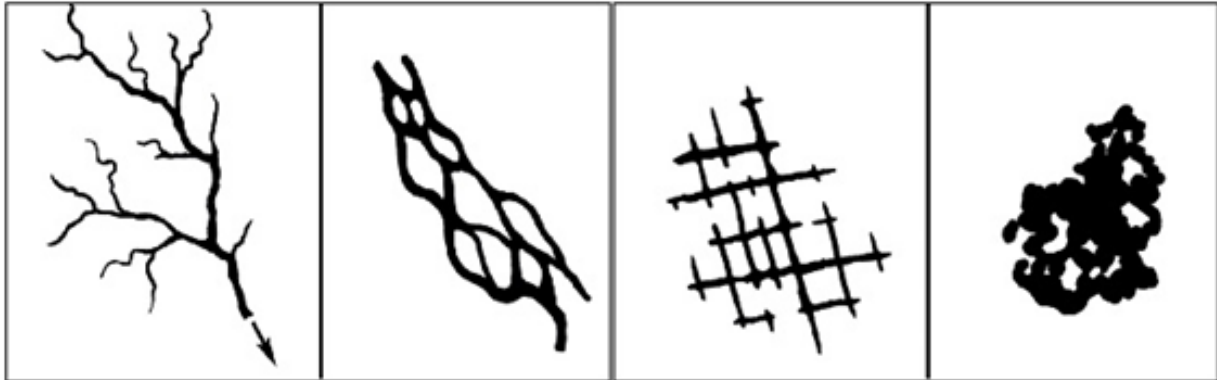
As cavernas do carste sergipano podem ser classificadas como epigênicas. Cavernas epigênicas são aquelas geradas pelo fluxo de água a partir de zonas de recarga na superfície, oriundas de águas meteóricas (de chuva ou de rios superficiais). Nas cavernas epigênicas, a água se infiltra no maciço rochoso a partir do exterior. A maneira como esta infiltração se dá é importante na definição do padrão das galerias. Não existem evidências, até o momento, para cavernas hipogênicas, que se formam devido à ação química de águas ascendentes em profundidade, ou acidificadas no interior do maciço rochoso.

As cavernas do carste tradicional de Sergipe se desenvolvem preferencialmente pelas linhas de fratura, com poucos exemplos de cavernas que se desenvolvem pelas linhas de acamamentos ou abatimentos dos materiais oriundos do maciço devido ao rebaixamento do nível freático e à formação de zonas vadosas.

As diversas formas de recarga da água, a estrutura da rocha, a direção de escoamento da água subterrânea, entre outros fatores, influenciaram o padrão das cavernas. Em planta, após o levantamento topográfico, pode-se observar que a configuração espacial das cavernas tende a seguir determinados padrões. Observando a classificação de Palmer (1991), identificam-se 3 padrões planimétricos principais de cavernas: dendríticos, reticulados e ramiformes (Figura 2).



FIGURA 2: Padrões planimétricos de cavernas.



FONTE: Travassos (2019, p.146)

Cavernas dendríticas constituem o tipo mais comum. Consistem em um conduto de um rio (pretérito, com alguns casos de rios efêmeros ou ativos, como a Gruta dos Aventureiros) com condutos laterais se unindo como tributários. As cavernas reticuladas possuem galerias condicionadas por fraturas, que se entrecruzam em ângulos determinados pela estrutura da rocha, como a Toca da Raposinha em Laranjeiras e as cavernas do maciço Caraíba em Poço Verde. O terceiro tipo é o de ramiforme, que possui condutos de perfil e seção irregular, se ramificando de forma errática, como, por exemplo, a caverna da Fumaça em Lagarto.

Ford e Ewers (1978) propuseram um modelo espeleogenético que pode ser aplicado para interpretação das cavidades das áreas cársticas de Sergipe. De acordo com esse modelo, a densidade das juntas na rocha irá definir o tipo de caverna gerado. Em carbonatos dobrados com pequena densidade de juntas, o fluxo tenderá a seguir as poucas zonas de descontinuidade disponíveis, adotando um perfil com “loops” profundos. À medida que a densidade de juntas aumenta, a água poderá escolher rotas de fluxo mais retilíneas, culminando no caso de cavernas essencialmente planas que seguem o contorno do lençol freático. A maioria das cavernas de Sergipe segue esse perfil.

No tocante aos depósitos de sedimentos nas cavernas sergipanas, encontram-se os depósitos alóctones (sedimentos clásticos) e os depósitos autóctones (sedimentos químicos). Os sedimentos alóctones são mais comuns e possuem origem fluvial e, principalmente, coluvial.

Os sedimentos clásticos presentes nessas feições podem ser classificadas, segundo Lladó (1970) como: caos de blocos (acumulação de material rudáceo de vários tamanhos com ou sem matriz argilosa) e, às vezes possuem matriz arenosa, como as cavernas de Rosário do Catete e Japarutuba; cones de dejeção, que ocorre a partir do acúmulo do material rudáceo com certa seleção gravitacional – os fenoclastos maiores estão na parte de baixo e os menores no alto, como acontece na caverna da Fumaça em Lagarto;



cones centrais, depósitos de morfologia cônica situados nas porções onde ocorreram abatimentos; e corridas de blocos derivados de processos de solifluxão, afetando os tipos anteriores.

Já os sedimentos de origem autóctones são, em geral, constituídos por cristais de calcita, quartzo, bem como por nódulos de sílex e outras partículas, como grãos de areia, silte, argila, liberados do calcário pela dissolução.

ESPELEOGÊNESE NO CARSTE TRADICIONAL DA BACIA SERGIPE E OLHOS D'ÁGUA/FREI PAULO

Os processos de espeleogênese do carste em Sergipe são distintos. O carste Olhos d'Água/Frei Paulo apresenta uma evolução mais expressiva das feições endocársticas em comparação com o endocarste da Bacia Sergipe (MACEDO, 2019).

O carste da Bacia Sergipe possui 55 cavidades naturais distribuídas nos municípios de Capela, Divina Pastora, Japaratuba, Laranjeiras, Maruim, Nossa Senhora das Dores, Nossa Senhora do Socorro, Rosário do Catete, São Cristóvão e Siriri (Figura 3). O carste olhos D'Água / Frei Paulo possui 78 cavernas distribuídas nos municípios de Campo do Brito, Lagarto, Macambira, Pinhão, Poço Verde, São Domingos e Simão Dias (Figura 4).

O estágio inicial de formação dessas cavernas ocorreu em profundidade abaixo do lençol freático. A partir de um canalículo de diâmetro milimétrico que se expandiu até atingir importante estágio de transição, denominado breakthrough, a partir do qual teve início o regime de um fluxo mais turbulento. No caso das cavernas do carste da Bacia Sergipe, esse processo pode ter iniciado no Neógeno na época do Pleistoceno médio e do carste Olhos d'Água/Frei Paulo no Neógeno no Plioceno, mas o desenvolvimento mais expressivo ocorreu na fase de Breakthrough durante o Quaternário. A partir da fase de *Breakthrough as cavernas se desenvolveram mais rapidamente, até que, devido ao contínuo rebaixamento do lençol freático, fossem expostas à zona vadosa.*

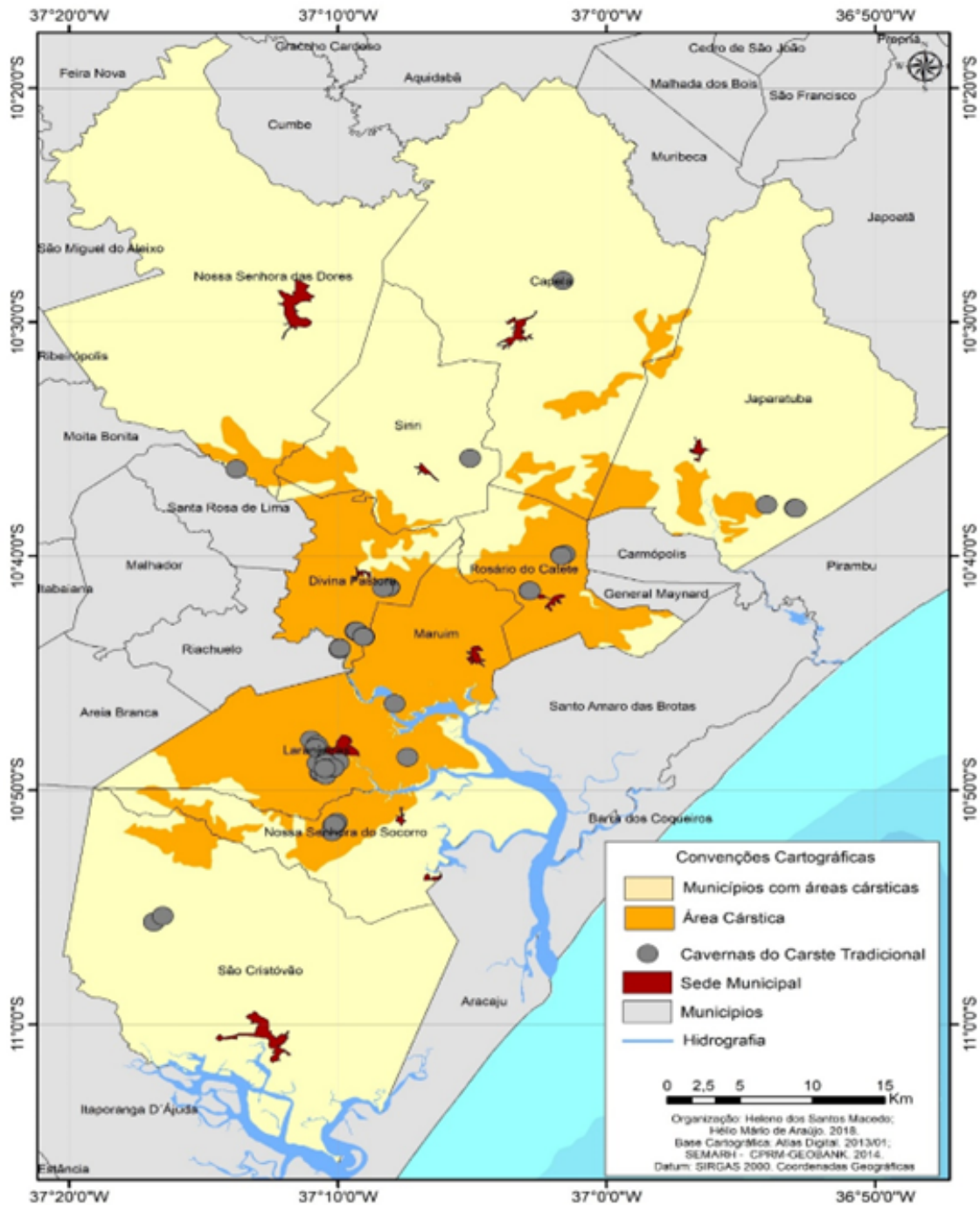
Após esta fase de ampliação horizontal das galerias e dos condutos subterrâneos, a dinâmica evolutiva dependerá do contexto geomorfológico. Em relevos estáveis ou associados a processos de soerguimento, como é o caso em Sergipe, o rebaixamento dos níveis de base local faz com que a expansão da caverna seja orientada por vetores gravitacionais (verticais) em ambiente vadoso (subaéreo). Este modelo evolutivo é denominado epigênese. Há evidências de que cerca de 90% das cavernas conhecidas no mundo têm essa origem (Palmer, 2011) e a maior parte das cavernas sergipanas também. A partir desse estágio ocorre o processo de formação dos espeleotemas.

Por outro lado, se o sistema cárstico desenvolver-se em relevo deprimido, os condutos das cavidades tenderão a ser preenchidos pelo acúmulo progressivo de



sedimentos, resultando em uma circulação de águas subterrâneas progressivamente ascendentes. Essa circulação resultará na escavação do teto das cavernas, que só cessará caso alguma mudança ambiental interrompa a dinâmica de acumulação, como eventos neotectônicos, por exemplo. Esse tipo de processo encontra-se em algumas cavidades do carste da Bacia Sergipe, como a caverna de Pedra Branca em Maruim, que apresenta a formação de cúpulas em todos os tetos da cavidade.

FIGURA 3: Cavernas do Carste Tradicional Bacia Sergipe.

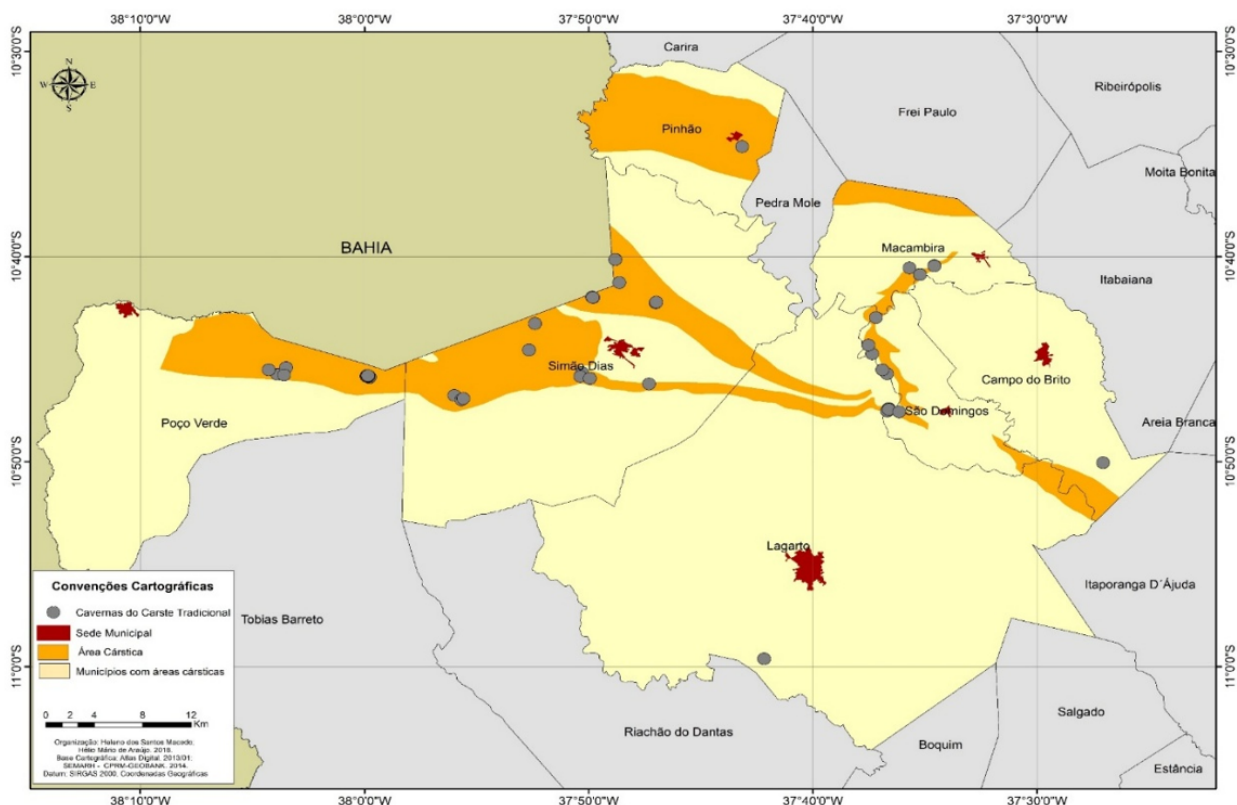


ELABORAÇÃO: Heleno dos Santos Macedo, 2019.



As cavernas da Bacia Sergipe possuem dimensões entre 6 e 204 metros de desenvolvimento horizontal, sendo a maior caverna dessa área cárstica a Gruta dos Aventureiros localizada no município de Laranjeiras com 204 metros e de menor extensão a Gruta Maria Passava com 6 metros. As cavidades da unidade Olhos d'Água/Frei Paulo são mais desenvolvidas em projeção horizontal (entre 8 e 305 metros), possuindo, inclusive, a maior caverna de Sergipe, a Toca da Raposa no município de Simão Dias, com 305 metros de desenvolvimento horizontal.

FIGURA 4: Cavernas do Carte Tradicional Olhos d'Água / Frei Paulo.



ELABORAÇÃO: Heleno dos Santos Macedo, 2019

No tocante à origem das cavernas, ou seja, quando elas começaram sua gênese, não é possível mensurar, já que o material que deu origem aos vazios já foi removido durante os processos de dissolução. O que é passível de datação são os sedimentos clásticos ou químicos que preenchem as galerias. Para a datação a partir de sedimentos químicos, as cavidades do carste sergipano apresentam uma quantidade de material incipiente e, na grande maioria, já passaram por processos de redeposição química, não guardando os sedimentos químicos originais.

Os materiais clásticos presentes nas cavidades também não são ideais para a datação no intuito da obtenção da idade do processo de entalhamento da caverna. Isso ocorre devido ao acúmulo constante de sedimentos dentro dos condutos das cavernas. Devido ao curto desenvolvimento horizontal e vertical das cavidades, os sedimentos são



removidos constantemente pela precipitação meteórica (chuvas ou riachos efêmeros), não permitindo a formação de camadas que descrevam um processo evolutivo. Além disso, novos sedimentos são depositados sobre o material subjacente, impossibilitando a obtenção de matérias mais antigas para uma datação precisa.

Este fato é comum nos setores cársticos, porém, no carste da Bacia Sergipe, é mais acentuado, já que as cavidades possuem dimensões menos expressivas no tocante às suas projeções horizontais e verticais.

As cavernas Toca da Raposa, Gruta da Miaba e as cavidades do Maciço Caraíba apresentam camadas mais expressivas de sedimentos clásticos e químicos. Isso ocorre devido ao maior tempo de desenvolvimento das cavidades e às condições de precipitação dessa área serem escassas. Como os eventos de precipitação não são comuns, os processos de carreamento de material detrítico não são constantes, fazendo com que as camadas de sedimentos permaneçam por mais tempo. Outro fator que permite as formações de camadas de sedimentos nessas feições cársticas é o desenvolvimento vertical das grutas, que possibilita o acúmulo de material ao longo do tempo, retardando o processo de substituição desse material por outros recém-depositados.

Os depósitos químicos, ou espeleotemas, são os que ornamentam e dão beleza cênica à caverna. Compreendem centenas de formas de variados tamanhos, cor, textura, estrutura e mineralogia geradas por meio de processos de dissolução e precipitação. Podem ser classificados de diversas maneiras, mas a comumente utilizada é aquela em que se considera o ambiente de formação. São três classes: 1) depósitos de águas circulantes/gotejantes; 2) depósitos de águas estagnadas; e 3) depósitos de exsudação. No entanto, a maioria dos espeleotemas é formada pela junção de mais de um destes tipos de processos, dificultando uma classificação exata. Os espeleotemas ocorrem tanto no teto (forma de cimeira), como nas paredes (forma parietal) e no piso da caverna (forma pavimentaria).

Nas cavernas do carste tradicional em Sergipe, os espeleotemas mais comuns são as estalactites, estalagmites, helictites, cortinas, colunas e concreções de piso em geral, que se formam a partir do gotejamento e/ou escorrimento e precipitação de solução rica em carbonato de cálcio (Figura 5).

Os minerais mais comuns são a calcita CaCO_3 e a aragonita, que é um polimorfo da calcita (apresenta a mesma fórmula química, mas hábito de cristalização distinto) – Figura 6. A coloração dominante é branca, com variações associadas à presença de outros minerais em solução. A presença de ferro resulta em espeleotemas alaranjados a avermelhados, manganês resulta em colorações variando do marrom ao preto-azulado, enquanto óxidos de cobre geram espeleotemas de coloração azulada.



FIGURA 5 : Teto da Toca da Raposinha com espeleotemas do tipo helectites e estalactites.



FOTO: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

FIGURA 6: Cristais de aragonita no espeleotema na Toca da Raposa em Simão Dias.



FOTO: Heleno dos Santos Macedo, 2019.



Os espeleotemas do carste da Bacia Sergipe e dos Olhos d'Água Frei Paulo podem ser classificados em função da velocidade, vazão da solução (f), saturação e pressão CO₂, ou através do processo deposicional.

Segundo a classificação de Montoriol e Thomas (1953) e Eraso (1963), há o predomínio do tipo fluxo (caudal), pois a maior parcela dos espeleotemas presentes nas cavidades são as estalactites. Quando há pouco fluxo, as gotas da solução permanecem muito tempo no teto da caverna, propiciando o desenvolvimento desse tipo de espeleotema (Figura 7). Isso evidencia que no pretérito as duas áreas cársticas foram influenciadas por condições climáticas diferentes do presente (períodos úmidos que possibilitaram a formação de estalagmites e períodos mais secos, que formaram as estalactites).

FIGURA 7: Espeleotemas (estalactites, estalagmites e cortinas) na toca da Raposinha em Laranjeiras.



FOTO: Heleno dos Santos Macedo, 2019.



Quanto ao processo deposicional, classificam-se as cavidades do carste sergipano a partir de depósitos de águas circulantes (o fluxo aquoso ocorre por gotejamento, escorrimento e turbilhonamento, formando as estalactites, estalagmites, cortinas) e a partir de águas de exsudação (formadas por capilaridade, solução percolando nos poros da rocha e vazios intersticiais (como as helictites)).

No Carste da Bacia Sergipe são mais comuns as estalactites, estalactites do tipo canudo de fresco, cortinas serrilhadas e do tipo bacon, coraloides e, em três cavernas (Toca da Raposinha, Caverna do Urubu e do Urubuzinho), foram identificadas estalagmites. Essa ausência de estalagmites está associada, também, à entrada frequente de fluxo meteórico nos condutos dessas cavidades, levando durante o escoamento as deposições do carbonato de cálcio que se encontram sobre o piso das cavernas.

Nessa área cárstica, os espeleotemas ainda se encontram em atividade, ou seja, o processo de gotejamento e escoamento do carbonato de cálcio continua ativo. Em algumas cavernas, foram observados processos de deposição química no piso, escoamento em paredes e processos de redeposição sobre estalagmites (Figura 8).

FIGURA 8: Estalagmites recobertas por carbonato de cálcio na Toca da Raposinha em Laranjeiras.



FONTE: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

Na paisagem cárstica Olhos d'Água / Frei Paulo, os espeleotemas são mais abundantes e possuem dimensões mais expressivas. São encontradas estalactites de vários tipos como os canudos de fresco e serrilhados, cortinas, estalagmites, colunas,



tufas calcárias (Figura 9). A presença desses espeleotemas, a partir das suas dimensões, denunciam dois fatos sobre essa área cárstica: que seu processo de desenvolvimento é mais antigo em relação ao carste da Bacia Sergipe, e que no pretérito as condições do clima na região eram opostas as condições atuais, com maior precipitação e conseqüentemente, maior escoamento fluvial, entalhando com incisão os condutos dessas cavidades.

FIGURA 9: Colunas na Gruta da Miaba em São Domingos.



FOTO: Heleno dos Santos Macedo, 2019.



Os processos de deposição continuam ativos, principalmente nas cavidades próximas às bordas do domo de Itabaiana, como a caverna Casa de Pedra, na Ribeira, no município de Campo do Brito, e a Gruta do Flecheiro, na Serra da Miaba, no município de São Domingos. Nessas duas cavidades, os processos de deposição química são bastante acentuados e ocorrem durante todos os meses do ano (Figura 10).

A quantidade acentuada de tipos de espeleotemas, bem como, os processos de deposição para formação de novos espeleotemas, podem ser explicados pela localização geográfica das cavidades e o grau de antropização das áreas em que se encontram ser bem menor que nas cavidades do carste da Bacia Sergipe, já que este localiza-se em áreas de maior concentração urbana e industrial, acentuando assim, os processos de antropização.

FIGURA 10: Escorrimento de CaCO_3 na Gruta da Miaba em São Domingos.



FOTO: Heleno dos Santos Macedo, 2019.



Nos setores cársticos, encontramos depósitos de origem biológica (biotemas). Esses biotemas são formados, principalmente, por depósitos oriundos de morcegos. O guano excretado pelos morcegos acaba sendo depositado sobre o piso ou sobre outros espeleotemas. À medida que esse material orgânico vai sendo depositado, carbonato de cálcio precipita sobre o material, criando uma crosta resistente formando novos espeleotemas. Esse tipo é comum, principalmente, nas cavidades de Divina Pastora, Laranjeiras e Maruim.

Além da formação de espeleotemas, a fauna interage também nos processos de corrosão do material litológico. É comum nos tetos das cavidades do carste da Bacia Sergipe encontrar cúpulas que possuem evidências da ação de atividades orgânicas (respiração e excreção desses animais) no processo de dissolução do material (Figura 11).

FIGURA 11: Cúpulas no teto da caverna de Pedra Branca em Maruim.



FOTO: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

No processo de espeleogênese dessas cavidades também se observa a ação da erosão diferencial, que ocorre quando o processo erosivo acaba atuando de forma diferente sobre os minerais ou rochas que possuem tipos distintos de grau de erosividade. Os materiais mais resistentes à erosão acabam permanecendo, enquanto o material de menor grau de resistência ao processo erosivo acaba sendo transportado pelos processos de dissolução.



Os principais fatores para a ocorrência e erosão diferencial são intrínsecos à própria rocha, como, por exemplo, o tipo e a intensidade de cimentação, a porosidade primária e secundária do material, bem como o tipo de entalhamento ao qual a cavidade foi submetida mais intensamente (ação meteórica da precipitação ou de canais fluviais subterrâneos). Em todas as cavernas do carste tradicional de Sergipe, é perceptível a ocorrência desse processo erosivo, como, por exemplo, na Toca da raposa em Simão Dias, que apresenta camadas de sílica intercaladas com os carbonatos da Formação Olhos d'Água (Figura 12).

FIGURA 12: Intercalações de sílica entre os carbonatos da Formação Olhos d'Água provocando processos de erosão diferencial na Toca da Raposa em Simão Dias.



FOTO: Heleno dos Santos Macedo, 2019.

Não são encontrados no carste tradicional em Sergipe espeleotemas dos tipos represas de travertinos, agulhas de aragonita e gipsita, flores de aragonita e gipsita, pérolas, vulcões, clavas, espigas, castiçais, bolhas de calcita, jangadas, cotonetes, cabelo de anjo, entre outros. Isso ocorre devido à ausência de fatores controladores do processo de carstificação, porém, os fatores primordiais estão atrelados ao pouco volume de água



durante o processo de dissolução, a ausência de um epicarste desenvolvido, e a baixa saturação e pressão de CO₂ que também se configuram como fatores preponderantes para a incipiência, ou mesmo, ausência de vários tipos de espeleotemas nessas áreas cársticas

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram identificados sessenta e uma novas cavernas, mais de cinquenta dolinas, campos de lapiás, sumidouros e ressurgências, polje e tipos diferentes de espeleotemas, tais como helectites, estalactites tradicionais e do tipo “canudinho de frescos”, estalagmites, cortinas do tipo bacon, entre outros.

A análise morfogenética das cavernas do carste tradicional sergipano revelou um sistema de cavidades predominantemente isoladas, com baixo desenvolvimento horizontal e vertical, espeleotemas escassos e ausência de conectividade significativa entre os sistemas subterrâneos, com exceção do maciço Caraíba em Poço Verde. Tal configuração decorre de condicionantes litológicos específicos, como a presença de materiais intercalados entre os carbonatos, baixa porosidade secundária, relevo com gradiente reduzido e ausência de redes subterrâneas de drenagem bem desenvolvidas.

Tanto na Bacia de Sergipe quanto na Formação Olhos d'Água/Frei Paulo, a litologia complexa e heterogênea funciona como barreira ao avanço dos processos de dissolução, limitando a expressividade do endocarste. Além disso, a recorrência de cavernas com teto baixo reforça a influência das restrições estruturais e hidrogeológicas sobre a morfoescultura subterrânea.

Os dados obtidos contribuem para o entendimento da dinâmica cárstica regional e reforçam a necessidade de ampliar os estudos espeleológicos em Sergipe, especialmente diante da baixa representatividade desses ambientes no contexto científico nacional.



REFERÊNCIAS

- CECAV. Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas. Brasília. 2009. Disponível em: www.icmbio.gov.br/cecav.
- CECAV. Províncias Espeleológicas do Brasil. Brasília. 2009. Disponível em: www.icmbio.gov.br/cecav.
- ERASO, A. Estudio morfométrico de cavidades kársticas. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 1963.
- FORD, D.C.; EWERS, R. O. The development of limestone cave systems in the dimensions of length and depth. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Ottawa, v.15, n.11, p. 1783–1798, 1978.
- LAMOUREUX, J. Évolution des paysages karstiques tropicaux: l'exemple du Haut-Atlas marocain et des régions tropicales humides. Paris: CNRS, 1972.
- LLADÓ, F.L. Sedimentación y morfología kárstica. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1970.
- MACEDO, H. S. Ambientes Cársticos em Sergipe: vulnerabilidade e instrumentos para sua gestão. São Cristóvão, 2019. Tese de doutorado (Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Sergipe.
- MONTORIOL, J.; THOMAS, R. Cours de spéléologie physique. Paris: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), 1953.
- PALMER, A.N. Distinction between epigenic and hypogenic cave origin. In: KANDEL, W.B. (Org.). *Karst geosystems*. New York: Springer, 2011. p. 13–26.
- PALMER, A. N. *Cave Geology*. Dayton: Cave Books, 1991. 445 p.
- YUAN, D. *Karst of China*. Beijing: Geological Publishing House, 1991.