

Prospecção de cavernas a partir da detecção semiautomática de depressões obtidas com Modelo Digital de Elevação (Mde), na região da APA Nascentes do Rio Vermelho - GO

Cristiano Fernandes Ferreira (1) & José Carlos Ribeiro Reino (2)

(1) Cecav/ICMBio, Parque Nacional de Brasília, Rodovia BR 450, km 8,5, via Epia, Brasília, Brasil, cristiano.ferreira@icmbio.gov.br

(2) Cecav/ICMBio, Parque Nacional de Brasília, Rodovia BR 450, km 8,5, via Epia, Brasília, Brasil, jose.reino@icmbio.gov.br

Resumo

O artigo aborda a prospecção de cavernas na região da Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APANRV), em Goiás, utilizando a detecção semiautomática de depressões a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE). A principal dificuldade enfrentada na região é a falta de informações sobre a localização de cavernas, especialmente em áreas remotas com acesso limitado e dados oficiais escassos. O estudo se concentra na província cárstica de Mambá, onde predominam rochas carbonáticas e um ambiente de carste coberto, com a presença de cerrado e matas galerias, que dificulta a identificação visual de feições como dolinas e cavernas. A metodologia envolve o uso de MDEs para gerar uma base de dados com depressões (polígonos), as quais são validadas em campo. Com base nos dados do satélite ALOS-PALSAR, foram selecionados alvos prioritários para inspeção in loco, resultando em 332 cavernas identificadas, sendo que cerca de 70% das cavernas estavam associadas a depressões previamente detectadas pelo sensoriamento remoto. A validação em campo também identificou novas depressões e cavernas fora dos polígonos prioritários. Os resultados indicam que a utilização de MDEs, embora eficaz, apresenta limitações, especialmente devido à escala dos dados e à dificuldade de representar adequadamente áreas com vegetação densa. A pesquisa conclui que o uso de MDEs pode ser uma ferramenta valiosa para a prospecção de cavernas em áreas de carste coberto, proporcionando uma alta taxa de sucesso (até 70%) na identificação de cavernas, e destacando a importância de combinar técnicas de sensoriamento remoto com validações em campo para aprimorar o mapeamento espeleológico e contribuir para a conservação dos recursos naturais da região.

Abstract

The article discusses the prospecting of caves in the Nascentes do Rio Vermelho Environmental Protection Area (APANRV) in Goiás, using the semi-automatic detection of depressions from Digital Elevation Models (DEMs). The main difficulty faced in the region is the lack of information about the location of caves, especially in remote areas with limited access and scarce official data. The study focuses on the karst province of Mambá, where carbonate rocks and a covered karst environment predominate, with the presence of cerrado and gallery forests, which hinders the visual identification of features such as sinkholes and caves. The methodology involves the use of DEMs to generate a database with depressions (polygons), which are validated in the field. Based on data from the ALOS-PALSAR satellite, priority targets for on-site inspection were selected, resulting in 332 identified caves, with about 70% of the caves associated with depressions previously detected by remote sensing. Field validation also identified new depressions and caves outside the priority polygons. The results indicate that the use of DEMs, although effective, has limitations, especially due to the scale of the data and the difficulty of adequately representing areas with dense vegetation. The research concludes that the use of DEMs can be a valuable tool for cave prospecting in covered karst areas, providing a high success rate (up to 70%) in cave identification, and highlighting the importance of combining remote sensing techniques with field validations to improve speleological mapping and contribute to the conservation of the region's natural resources.

1. Introdução

Um dos maiores desafios para a prospecção de cavernas reside na falta de informações sobre a sua localização em campo, especialmente em áreas remotas, com bases de informações oficiais deficitárias, mapas em escalas inadequadas e exíguos relatos da população local sobre existência de cavidades em áreas de difícil acesso. Essa é exatamente a condição da província cárstica de Mambá, nordeste do estado de Goiás, onde se insere a Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APANRV), uma unidade de conservação da natureza, gerida pelo ICMBio

e criada dentre outros motivos para conservar os recursos hídricos e as inúmeras cavernas presentes na região (Fig. 1). A área, com 1.776km², é caracterizada pela ocorrência de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí, formação Lagoa do Jacaré, que estão em processo de exumação com a remoção de sedimentos detríticos atribuídos à retração da escarpa arenítica da Serra Geral (Grupo Urucua). Essa região possui um clima do tipo tropical com estações secas e chuvosas bem definidas (CALDEIRA et al., 2021) e que apresenta uma vegetação típica do cerrado, ou seja,

savanas esparsas nas áreas planálticas e de vertentes com a inserção de matas galerias junto às drenagens. Essa geografia permitiu o desenvolvimento de um carste coberto em processo de exumação, em função de um reajuste dos níveis de base regionais com o aprofundamento da calha do Rio Vermelho e a formação de um canyon de mais de 80m de altura nesta drenagem. Essa e outras importantes calhas de escoamento funcionam como pontos principais de descarga dos sistemas cársticos adjacentes, apresentando surgências, ressurgências e janelas cársticas (CALDEIRA et al., 2021). Nos planaltos circundantes ocorrem campos de dolinas e outros tipos de depressões de difícil identificação visual em função da presença da vegetação nativa ou grandes dimensões (Fig. 2).

O estudo e mapeamento de dolinas é uma área das ciências do carste já há muitos anos desenvolvida (FERREIRA & UAGODA, 2020) e cujos propósito e técnicas atendem variados segmentos. Trabalhos pioneiros em geomorfologia cárstica se destacam desde o final do século passado, enfatizando principalmente aspectos morfométricos, distribuição e gênese (WILLIAMS, 1972; DAY, 1976; BONDESAN et al., 1992; KARMANN, 1994). Tais trabalhos se utilizaram principalmente de bases cartográficas antigas, com a interpretação de cartas topográficas, fotos aéreas e outros recursos para identificar dolinas. Mais recentemente outros trabalhos se utilizaram de Modelos Digitais de Elevação (MDE) para a identificação de dolinas por métodos automatizados (CARVALHO JÚNIOR et al., 2014; MIHEVC & MIHEVC, 2021; UTLU & ÖZTÜRK, 2023; TELBISZ et al., 2024). O mapeamento de dolinas atualmente visa sobretudo criar bases de dados

para análises em geomorfologia (LONČAR & GRČIĆ, 2022), gerenciamento de áreas de risco (Salles et al., 2018), uso e ocupação (GUTIÉRREZ et al., 2014), conservação dos recursos hídricos e análises de vulnerabilidade do carste (MORENO-GÓMEZ et al., 2019). Entretanto, poucos trabalhos se debruçaram sobre o potencial da detecção de dolinas servir também para prospecção de cavernas (FERREIRA et al., 2022) dada a sua intrínseca relação de gênese e desenvolvimento.

No Brasil as cavernas são protegidas pela legislação (BRASIL, 2008) e o seu mapeamento é fundamental para o ordenamento territorial e licenciamento de atividades potencialmente lesivas ao meio ambiente, especialmente em áreas cársticas (AULER, 2016). Para a área de estudo poucas cavernas foram mapeadas e cadastradas na base oficial do governo federal (BRASIL, 2022) se considerada toda a sua real potencialidade. Essa condição é altamente indesejável visto o avanço de atividades potencialmente lesivas aos sistemas espeleológicos locais, como a mineração, agronegócio ou obras de infraestrutura (rodovias e ferrovias). O objetivo deste trabalho, portanto, é apresentar os resultados referentes à identificação de cavernas a partir do mapeamento semiautomático de depressões realizados previamente (FERREIRA et al., 2022) e até então não devidamente checado in loco. As atividades de campo serviram para confirmar a presença de dolinas, cavernas e caracterizar outros aspectos do quadro natural, criando assim uma base mais apropriada para o planejamento da unidade de conservação e tomada de decisão por parte dos gestores.

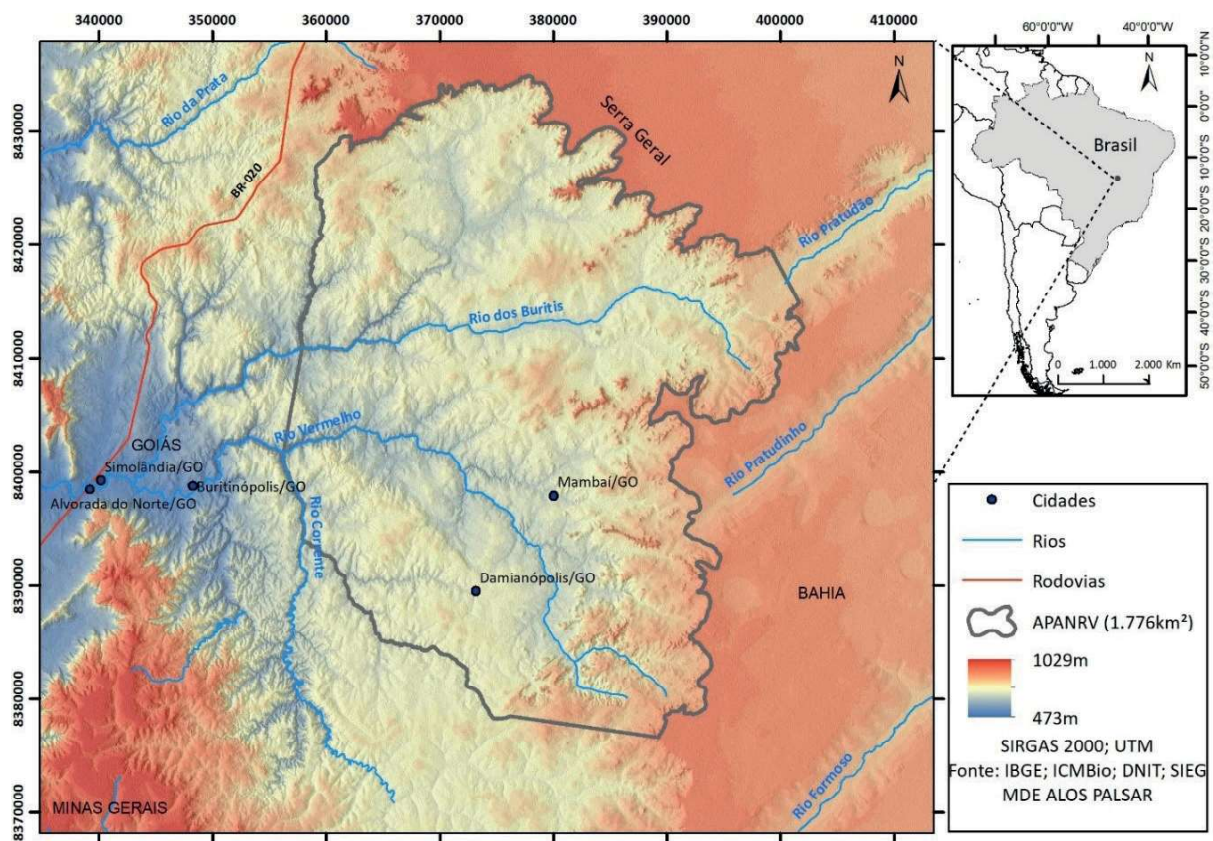


Figura 1: Localização da área.



Figura 2: Exemplo de dolinas encontradas na região. No lado esquerdo uma dolina colmatada com vegetação rasteira sem entrada de caverna. Ao centro um ponto de recarga sob mata com caverna. Na direita uma dolina de sufusão com acesso a uma caverna.

2. Materiais e Métodos

O uso de Modelos Digitais de Elevação para a detecção de depressões e dolinas em áreas cársticas está amplamente documentado na literatura (CARVALHO JÚNIOR et al., 2014; CAHALAN & MILEWSKI, 2018; FERREIRA & UAGODA, 2020) e consiste basicamente numa operação aritmética de soma e subtração. Ferramentas de restituição hidrológicas em rasters no geoprocessamento preenchem eventuais depressões, supostamente por serem defeitos do modelo (Hydrology>Fill). A subtração do modelo preenchido pelo modelo original gera uma base de depressões, que em uma área cárstica pode significar feições autênticas de ligação com o meio subterrâneo (FERREIRA e UAGODA, 2020). Polígonos são criados a partir desse processo e geralmente são inspecionados com o auxílio de imagens de satélites para um primeiro nível de validação. Entretanto, nem todos os trabalhos realizados neste tipo de abordagem avançam para uma etapa subsequente de validação, ou seja, a verificação em campo (WU et al., 2016; CAHALAN & MILEWSKI, 2018).

Neste trabalho optou-se por utilizar uma base de polígonos referentes a possíveis depressões já existente (FERREIRA et al., 2022) advindas

de dados do satélite ALOS-PALSAR (Advanced Land Observing Satellite Phased Arrayed type L-Band SAR) com 12,5m de resolução espacial. Desta feita, a área de estudo restringiu-se ao da APANRV (1776km²), de abrangência inferior ao trabalho original, mas ainda assim bastante extensa para o pleno recobrimento em campo. De um universo de milhares de polígonos gerados de forma automática, selecionou-se, na primeira etapa de validação por imagens de satélite (Google Earth e Imagery), um quantitativo inferior e exequível de alvos prioritários espalhados pela área para checagem in loco (Fig. 3). Os caminhamentos em campo buscaram também agregar outros polígonos, não considerados como prioritários, sempre que próximos do trajeto estabelecido para alcançar os alvos prioritários. Uma vez atingidos os alvos (pontos centroides) percorreu-se também os arredores, mesmo fora dos polígonos, buscando feições eventualmente ocultas pelas matas ou próximas das bordas, não atingidas pela delimitação automática que possui algumas limitações (linha de extravasamento e não bacia hidrológica, p.ex.).

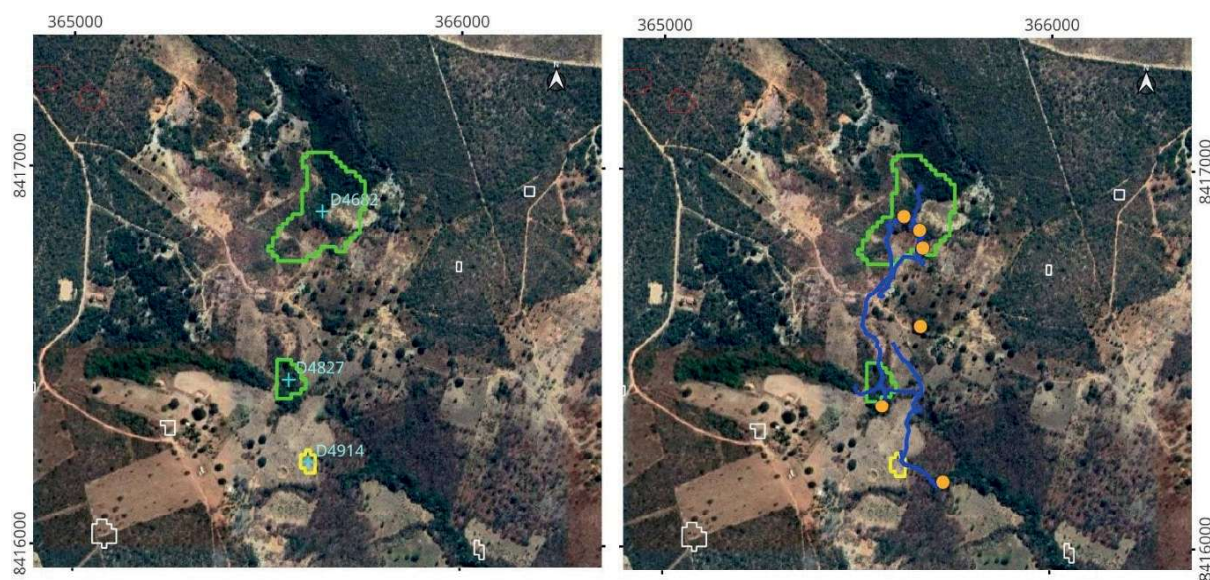


Figura 3: Exemplos de alvos prioritários estabelecidos e ranqueados em níveis de maior possibilidade de acerto. Em verde depressões consideradas de maior potencial que as marcadas em amarelo, além das bancas consideradas não prioritárias. A delimitação dos polígonos se deu de forma automática, até no nível de “extravasamento” teórico da depressão. Na direita as linhas de caminhada (azul) e as cavernas identificadas (laranja).

Fonte: Imagens Google Earth.

No ensejo das atividades de campo buscou-se não apenas validar as depressões do sensoriamento remoto (ainda em progresso) como mapear todo tipo de feição de importância do carste, seja dentro, nas proximidades ou nos trajetos dos alvos estabelecidos. Desta forma estabeleceu-se duas bases distintas, ou seja, uma do sensoriamento remoto prévio, constituída por polígonos de maior abrangência, com graus maiores e menores de possibilidade de serem depressões autênticas e outra, efetivamente de campo e numa escala de detalhe que se constitui de pontos referentes a dolinas, cavernas, sumidouros e surgências. Todas as feições foram fotografadas e sucintamente caracterizadas, com a descrição do uso e ocupação do local (matas, pasto, cerrado etc.), ocorrência de corpos hídricos (no caso das cavernas ou dolinas)

3. Resultados

Devido à dispersão dos alvos e grande abrangência territorial da área de estudo, foram percorridos cerca de 260km em trilhas de caminhada em inúmeras expedições. Praticamente todos os alvos foram atingidos, excetuando-se aqueles em áreas de grande dificuldade ou restrição de acesso (7), em geral associados ou próximos às escarpas da Serra Geral. Por outro lado, houve um acréscimo substancial de novos polígonos inspecionados (90), mesmo não considerados prioritários num primeiro momento (235), muitos inclusive contendo depressões autênticas (dolinas) e cavernas (Fig. 4).

Polígonos	Qtde	%
Alvos prioritários	235	73,89%
Alvos checados	228	71,69%
Outros polígonos checados	90	28,30%
Polígonos totais checados	318	

Figura 4: Quantidades totais de polígonos identificados por sensoriamento remoto checados em campo.

No total foram identificadas 332 cavernas na área conforme a metodologia de trabalho proposta (Fig. 5). Cerca de 27% das cavernas foram identificadas justamente no interior de depressões cársticas previamente selecionadas como prioritárias (MDE), confirmando-as, portanto, como verdadeiras. Entretanto, se for ampliado um buffer de 50m ao redor dos objetos alvo criados em laboratório, essa percentagem amplia-se até cerca de 70%. Baseado em experiência de campo, considera-se este limite discricionário como razoável para alcançar as feições que a metodologia de preenchimento até o nível de extravasamento em MDE's pode não ter abarcado, conforme relatado por FERREIRA & UAGODA (2020). As cavernas localizadas além deste limite de 50m e que compõem a amostra final representam, portanto, os possíveis erros de omissão, alcançando a métrica aproximada de 30%.

Cavernas	Qtde	%
Dentro dos polígonos	89	26,81%
50m dos polígonos	230	69,28%
Omissão (>50m polígonos)	102	30,72%
Total	332	100%

Figura 5: Potencial do uso de depressões identificadas por sensoriamento remoto para prospecção de cavernas.

4. Discussão

Considera-se que a proposta inicial de validação dos objetos prioritários foi exitosa e resultou numa taxa de positivos em relação a ocorrência de cavernas bastante significativa, especialmente se consi-

e observações referentes ao potencial das cavernas para maior desenvolvimento, presença de algum risco (abelhas, abismos etc.) ou danos (lixo, p.ex.). A atividade de campo foi facilitada pelo uso de geoaplicativos em celulares (Avenza, p.ex.) o que permitiu carregar as bases de dados (imagens, polígonos, alvos e percursos) e traçar as melhores estratégias para alcançar os pontos planejados. Deve-se ressaltar que nesta etapa as cavernas não foram topografadas, ou seja, foram apenas coletados os pontos de entrada, que certamente serão em maior número que o de cavernas propriamente dito. Outras atividades deste projeto ocorrem de forma paralela ou serão retomadas adiante, como a topografia de detalhe das cavernas com maior potencial.

É importante deixar claro que os objetos gerados automaticamente como depressões e estabelecidos como alvos de validação possuem em geral dimensões mais abrangentes que dolinas pontuais dispersas num campo ou planalto, muito em função da escala da base utilizada (ALOS-PALSAR, 12,5m). Os objetos advindos da análise dos MDE, grosso modo, funcionam como depressões compostas que podem conter inúmeras dolinas ou eventualmente apenas um ponto mais profundo (menos comum). Estes dados acerca da relação entre as dolinas identificadas em campo e sua contraparte identificadas em gabinete e de escala mais abrangente, ainda estão sendo tabulados. Mas é possível afirmar que para a área de estudo, cerca de metade das dolinas identificadas em campo (50%) apresentam entradas de cavernas em seu interior, normalmente no ponto mais profundo.

Quanto ao uso e ocupação das áreas onde estão as cavernas e suas dolinas (Fig. 6), identificou-se o predomínio de ocorrências em áreas de matas (78,5%). Praticamente todas as demais feições foram encontradas em áreas de pastagens (21%) e pouquíssimas em áreas degradadas ou regiões de veredas (< 1%). Nenhuma dolina contendo caverna foi identificada em área de cerrado preservado nas modalidades de campo aberto (e não mata galeria). Outro dado observado é que praticamente a metade das cavernas encontradas (154) possuem água em seu interior (cursos ou corpos d'água). Por fim, também foi observada baixa correlação das cavernas identificadas em campo com a base do CANIE para a área. Mesmo usando o buffer arbitrário de 50m a partir das 332 cavernas conferidas apenas 69 registros do CANIE foram convergentes. Mesmo que haja uma diminuição forte do número de entradas para de fato o número de cavernas cadastradas, não é de se esperar uma proporção de quase cinco para um nesta relação.

Uso do solo	Qtde	%
Mata	259	78,48%
Pasto	68	20,61%
Área Degradada	3	0,91%
Vereda	2	0,61%
Cerrado	0	0,00%

Figura 6: Uso do solo prioritário nas cavernas mapeadas.

derada a estratégia de caminhada nas cercanias dos objetos e não apenas até seu ponto centroide (buffer de 50m). Foram 332 entradas de cavernas localizadas, sendo que quase 70% atreladas intimamente

às depressões identificadas previamente por sensoriamento remoto. Obviamente que esses resultados são especialmente importantes para uma área caracterizada por pouca ou nenhuma representatividade de morros testemunhos ou muralhas aflorantes (feições positivas) se comparado por exemplo, ao carste de Lagoa Santa-MG ou especialmente de Pains-MG (AULER & PESSOA, 2020; PILÓ & CRUZ, 2022; TIMO, 2022) onde é comum ocorrerem cavernas nestas condições. Neste contexto da APANRV, aonde predominam superfícies em exumação (carste coberto), as depressões são os elementos do ambiente superficial mais marcantes do carste local e potencialmente mapeáveis por sensoriamento remoto. Apesar de feições positivas também serem potencialmente mapeáveis com a mesma metodologia de preenchimento e subtração com MDE's (LYEW-AYEE et al., 2007), a correlação genética destas feições com a ocorrência de cavernas é bem menos direta. A presença de depressões no terreno em áreas carbonáticas tem alto potencial de indicar processos de carstificação e espeleogênese, sendo um fator muito mais propício que superfícies isoladas ou resultantes da erosão diferencial. Além disso, a possibilidade da identificação de cavernas ativas e conectadas a sistemas mais abrangentes do ponto de vista hidrológico enaltece a representatividade e importância desses achados, especialmente para análises posteriores sobre o comportamento desses sistemas frente a eventos extremos de chuva (mudanças climáticas), sobre vulnerabilidade e risco em áreas cársticas (HOFIERKA et al., 2018). No caso da APANRV, as cavernas com função hidrológicas ativas serão consideradas com maior cuidado tendo em vista os objetivos primordiais de criação da unidade de conservação, ou seja, a conservação das cavernas e dos recursos hídricos locais.

Já a questão das omissões, ou seja, a não previsão pelo modelo da ocorrência de depressões aonde de fato ocorrem, pode-se interpretar especialmente em função da escala da base utilizada e da sua baixa

efetividade em representar o real nível do solo em ambiente de densa vegetação. O uso de MDE de alta resolução ou com sensores capazes de filtrar a vegetação (LiDAR, p.ex.) certamente geraria um número bem maior de alvos potenciais que representassem mais fidedignamente as dolinas (WU et al., 2016; UTLU & ÖZTÜRK, 2023; TELBISZ & SZÉKELY, 2024). Entretanto, essas bases são de difícil acesso ou com abrangência mais restrita que o necessário para a abordagem executada na área de estudo. Pelo conhecimento que se obteve neste projeto da geografia local, observou-se que as depressões cársticas mais importantes foram detectadas pelo modelo de elevação utilizado, estando muitas outras próximas ou sendo parte dos mesmos fenômenos representados (coalescência de objetos, normalmente).

Como visto, no geral, as cavernas identificadas neste projeto estão majoritariamente inseridas em áreas de mata e muito secundariamente em áreas de pastagens. A presença de água em quase metade da amostra ajuda a explicar melhor esse fenômeno na região. As vertentes e planaltos mais propícios à agricultura, originalmente associadas ao cerrado (campo aberto), foram sendo paulatinamente convertidos em pastagens, onde atualmente ainda se encontram algumas dolinas com cavernas. Outras provavelmente foram soterradas com o uso de maquinário agrícola. As áreas mais preservadas, normalmente com declividades maiores junto aos cursos de água, bordas de dolinas e exposição de rochas foram preteridas e abrigam a maior quantidade de cavernas, justamente onde há maior umidade que permite o desenvolvimento das matas galeria. Tudo isso também converge para a percepção de que a carstificação, mais acelerada nas franjas erosivas na interface entre os carbonatos do Grupo Bambuí e os sedimentos clásticos referentes ao desmonte do Grupo Urucua na região, vem capturando as águas superficiais para níveis inferiores por meio das dolinas (CALDEIRA et al., 2021).

5. Conclusão

O estudo baseado em dados de sensoriamento remoto relativos a possíveis depressões cársticas no terreno a partir de MDE se revelou bastante útil para delinear alvos de grande potencial de ocorrência de cavernas. Áreas de carste coberto com poucas e esparsas exposições de rocha, como muralhas ou morros testemunhos, mas com grande potencial para dolinamentos podem ser beneficiadas com uso da metodologia proposta, com até 70% de acerto. Além disso, apesar de desejáveis bases em escalas mais detalhadas ou o uso de sensores capazes de penetrar o dossel (LiDAR, p. ex.), o MDE utilizado teve custo zero e uma boa taxa de retorno positivo. A base ALOS-PALSAR utilizada indica naturalmente áreas mais carstificadas em que há a possibilidade de achados acessórios não necessariamente atrelados aos polígonos de depressão. Ela, porém, não esgota métodos clássicos da prospecção espeleológica, como análise de imagens, fotos aéreas, demais fontes bibliográficas e sobretudo entrevistas junto às comunidades locais e

pessoas com maior conhecimento do campo.

Como etapa subsequente ao trabalho aqui descrito almeja-se dar continuidade ao projeto de validação e tabulação dos dados referentes às demais depressões detectadas na metodologia que eventualmente não foram classificadas como alvos prioritários. Paralelamente as cavernas identificadas neste trabalho como de maior potencial espeleométrico, importância ambiental ou conveniência logística, serão listadas em níveis hierárquicos para priorização das atividades topográficas. Com isso espera-se também contribuir com a melhoria das informações presentes no CANIE, que terá os dados antigos ajustados ou incorporadas novas cavernas. O avanço do projeto também visa incrementar a base de informações qualificadas de campo relativo às demais feições do carste local, colaborando assim no resultado geral para um maior entendimento do quadro natural da APANRV e, possivelmente para subsidiar a elaboração do seu plano de manejo.

Agradecimentos

A todos os funcionários da APANRV/ICMBio que auxiliaram nas pesquisas; recursos obtidos por meio do Termo de Compromisso

de Compensação Espeleológica - TCCE nº 01/2022, assinado entre o ICMBio e Vale.

Referências

AULER A. S. (2016) Cave protection as a karst conservation tool in the environmentally sensitive Lagoa Santa karst, southeastern Brazil. *Acta Carsologica*, 45(2), 131–145. <https://doi.org/10.3986/ac.v45i2.4429>

AULER A. S., PESSOA P. (2020). Lagoa Santa Karst: Brazil's Iconic Karst Region. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-35940-9>

BRASIL. (2008) Decreto nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no território nacional e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 7 nov. 2008. Seção 1, p. 1

BRASIL. (2022) Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE).

Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cavernas/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>. Acesso em: 19 de dezembro de 2022.

CAHALAN M. D., MILEWSKI A. M. (2018) Sinkhole formation mechanisms and geostatistical-based prediction analysis in a mantled karst terrain. *Catena*, 165, 333–344. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.010>

CALDEIRA D., UAGODA R., NOGUEIRA A. M., GARNIER J., SAWAKUCHI A. O., HUSSAIN Y. (2021) Late Quaternary episodes of clastic sediment deposition in the Tarimba Cave, Central Brazil. *Quaternary International*, 580(January), 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.01.012>

CARVALHO JUNIOR, O. A., GUIMARÃES, R. F., MONTGOMERY, D. R., GILLESPIE, A. R., GOMES, R. A. T., MARTINS E. S., SILVA N. C. (2014) Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. *Remote Sensing*, 6, 330–351. <https://doi.org/10.3390/rs6010330>

FERREIRA C. F., UAGODA R. E. S. (2020) Mapeamento De Dolinas: Desafios E Possibilidades Do Uso De Modelos Digitais De Elevação. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 21(3). <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1645>

FERREIRA C. F., HUSSAIN Y., UAGODA R. (2022) A semi-automatic approach for doline mapping in Brazilian covered karst: the way forward to vulnerability assessment. *Acta Carsologica*, 51(1), 19–31. <https://doi.org/10.3986/ac.v51i1.10011>

GUTIERREZ F., PARISE M., DE WAELE J., JOURDE H. (2014) A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138, 61–88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>

HOFIERKA J., GALLAY M., BANDURA P., ŠASAK J. (2018) Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. *Geomorphology*, 308, 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.004>

LONCAR N., GRCIC I. (2022) Gis-based analysis of doline density on Miljevc karst plateau (Croatia). *Acta Carsologica*, 51(1), 5–17. <https://doi.org/10.3986/ac.v51i1.10465>

LYEW-AYEE P., VILES H. A., TUCKER G. E. (2007) The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 165–179. <https://doi.org/10.1002/esp>

MIHEVC A., MIHEVC R. (2021) Morphological characteristics and distribution of dolines in slovenia, a study of a lidar-based doline map of Slovenia. *Acta Carsologica*, 50(1), 11–36. <https://doi.org/10.3986/ac.v50i1.9462>

MORENO-GOMEZ M., MARTINEZ-SALVADOR C., MOULAHOUA W., LIEDL R., STEFAN C., PACHECO J. (2019) First steps into an integrated karst aquifer vulnerability approach (IKAV). *Intrinsic groundwater vulnerability analysis of the Yucatan karst, Mexico. Water (Switzerland)*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/w11081610>

PILÓ L. B., CRUZ J. B. (2022) A região cárstica de Pains. Brasília: ICMBio.

SALLES L. Q., GALVÃO P., LEAL L. R. B., PEREIRA R. G. F. A., PURIFICAÇÃO C. G. C., LAUREANO F. V. (2018) Evaluation of susceptibility for terrain collapse and subsidence in karst areas, municipality of Iraquara, Chapada Diamantina (BA), Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77(16), 593. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7769-8>

TELBISZ T., MARI L., SZEKELY B. (2024) LiDAR-Based Morphometry of Dolines in Aggtelek Karst (Hungary) and Slovak Karst (Slovakia). *Remote Sensing*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/rs16050737>

TIMO M. B. (2022) Caracterização geomorfológica da região cárstica Arcos-Pains e de seus sistemas cársticos. *Caderno de Geografia*, 32(68), 191. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2022v32n68p191>

UTLU M., ÖZTÜRK M. Z. (2023) Comparison of morphometric characteristics of dolines delineated from TOPO-Maps and UAV-DEMs. *Environmental Earth Sciences*, 82(7). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-10862-x>

WU Q., DENG C., CHEN Z. (2016) Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. *Geomorphology*, 266, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.006>