



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**DETECÇÃO DE DOLINAS COM APOIO DE MODELOS
DIGITAIS DE ELEVAÇÃO E IMAGENS DE ALTA
RESOLUÇÃO: ESTUDO DE CASO NA APA NASCENTES DO
RIO VERMELHO-GO**

Cristiano Fernandes Ferreira

Dissertação de Mestrado

Brasília-DF: Fevereiro de 2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**DETECÇÃO DE DOLINAS COM APOIO DE MODELOS DIGITAIS DE
ELEVAÇÃO E IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO: ESTUDO DE CASO
NA APA NASCENTES DO RIO VERMELHO-GO**

Cristiano Fernandes Ferreira

Orientador: Rogério Elias Soares Uagoda

Dissertação de Mestrado

Brasília-DF: Fevereiro/2020

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

**DETECÇÃO DE DOLINAS COM APOIO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO
E IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO: ESTUDO DE CASO NA APA NASCENTES
DO RIO VERMELHO-GO**

Cristiano Fernandes Ferreira

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre Geografia, área de concentração Gestão Ambiental e Territorial, opção Acadêmica.

Aprovado por:

Rogério Elias Soares Uagoda, Doutor (Programa de Pós-graduação em Geografia, UnB)
(Orientador)

José Eloi Guimarães Campos, Doutor (Programa de Pós Graduação em Geologia, UnB)
(Examinador Externo)

Rejane Ennes Cicerelli, Doutora (Programa de Pós Graduação em Geociências, UnB)
(Examinador Externo)

Brasília-DF, 28 de Fevereiro de 2020

RELATÓRIO DE DEFESA DE PÓS-GRADUAÇÃO
GRADUATE PROGRAM DEFENSE REPORT

1. INFORMAÇÕES DO CURSO/ PROGRAM DATA

MESTRADO/ MASTER'S () DOUTORADO/ DOCTORAL ()

Cotutela/ Cotutelle:

() Não/ No

() Sim, instituição estrangeira/ Yes, partner institution:

2. IDENTIFICAÇÃO DO(A) ALUNO(A)/ STUDENT INFORMATION

Nome/ Name: CRISTIANO FERNANDES
FERREIRA

Curso/ Program: PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

Área de Concentração/
Field of Study:
GESTÃO AMBIENTAL E
TERRITORIAL

Código/
3620

Code:

Departamento/
GEOGRAFIA

Department:

3. SESSÃO DE DEFESA/ DEFENSE SESSION

() Dissertação/ Master's Dissertation

() Tese/ Doctoral Thesis

Título/ Title: "DETECÇÃO DE DOLINAS COM APOIO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVACÃO E IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO: ESTUDO DE CASO NA APA NASCENTES DO RIO VERMELHO-GO"

4. PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA/ CHAIR OF THE EXAMINING BOARD

Nome/ Name: ROGÉRIO ELIAS SOARES UAGODA

Titulação/ Education Level: DOUTOR

Unidade Acadêmica/ Academic Unity: DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

5. COMISSÃO EXAMINADORA/ EXAMINING BOARD

| Nome(Titulação)/ Name (Educational Level) | Função/Instituição - Role/Institution | Membro por videoconferência (sim/não) Video-conference member (yes/no) |
|---|---------------------------------------|--|
| JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS (Doutor) | MEMBRO EXTERNO / UNIV. DE BRASÍLIA | NAO |
| REJANE ENNES CICERELLI (Doutor) | MEMBRO EXTERNO / UNIV. DE BRASÍLIA | NÃO |
| ROBERTO ARNALDO TRANCOSO GOMES (Doutor) | MEMBRO INTERNO / UNB (Suplente) | NÃO |
| | | |

6. RESULTADO/ RESULT

A Comissão Examinadora, em 28/02/2020 após exame da Defesa e arguição do(a) candidato(a), decidiu / The Examining Board, on 28/02/2020, after examining the Defense and inquiry of the candidate has decided to:

() Pela aprovação do trabalho/ approve the work.

() Pela aprovação do trabalho, com revisão de forma, indicando o prazo de até 30 dias para apresentação definitiva do trabalho revisado/ approve the work, pending formal review, assigning up to 30 days for the final delivery of the reviewed work.

() Pela reformulação do trabalho, indicando o prazo de **XX** dias para nova versão/ request the reformulation of the work, assigning **XX** days for the new version.

() Pela reprovação do trabalho/ not approve the work.

Este relatório não é conclusivo e não tem efeitos legais sem a homologação do Decanato de Pós-Graduação da Universidade de Brasília/ This report is not conclusive and has no legal effects prior to validation by the Dean of Graduate Programs of the University of Brasilia.

Em caso de revisão de forma, a homologação ficará condicionada à entrega definitiva do trabalho revisado à Coordenação do Programa, devendo este Relatório de Defesa ser acompanhado pelo Despacho do(a) coordenador(a) do programa que informará um dos seguintes resultados/ In case of formal review, the validation will be conditioned to the final delivery of the reviewed work to the Coordination of the Program. In such cases, this Defense Report must be supplemented with a notice by the coordinator with one of the following indications:

() 1. O (A) discente apresentou a revisão de forma e o trabalho foi aprovado/ The student presented the formal review and the work has been approved.

() 2. O (A) discente apresentou a revisão de forma e o trabalho foi

reprovado/ The student presented the formal review and the work has not been approved.

() 3. O (A) discente não apresentou a revisão de forma/ The student did not present the formal review.

Declaro aceitação dos termos e condições que regem o acesso como usuário externo na Universidade de Brasília, conforme normas estabelecidas pela Universidade e demais normas aplicáveis, admitindo como válida a assinatura eletrônica por usuário e senha. É minha responsabilidade exclusiva o sigilo da senha de acesso ao sistema e o teor dos documentos e informações prestadas por mim. Comprometo-me a apresentar documentos originais inseridos por mim no sistema, que venham a ser solicitados pela Universidade de Brasília. Declaro estar ciente de que em caso de petições eletrônicas, essas, somente poderão ser realizadas entre 3 horas e 23 horas e 59 minutos e 59 segundos, horário de Brasília. Estou ciente de que o acompanhamento de solicitações poderá ser realizado no ambiente de usuário externo do SEI-UnB.

I hereby declare that I accept the terms and conditions established for access as an external user of the University of Brasilia, according to the rules set forth by the University and all other applicable rules. I also accept as valid the electronic signature by user and password. It is my sole responsibility the secrecy of the password for accessing the system and the content of the documents and information provided by me. I commit to present the original documents inserted into the system by me should they be requested by the University of Brasilia. I declare to be aware electronic demands can only be send between 3:00 and 23:59, Brasilia official time. I am aware I can track the status of requests via the External User environment of SEI-UnB.

Informações/ Attention:

Documento deverá ser assinado por/ This document must be signed by:

- Presidente da Comissão Examinadora/ The Chair of the Examining Board
- Membros participantes da Comissão Examinadora/ Members of the Examining Board
- Coordenador(a) do Curso/ Coordinator of the Program
- Discente/ Student



Documento assinado eletronicamente por **Rogério Elias Soares Uagoda, Professor(a) de Magistério Superior do Instituto de Ciências Humanas**, em 28/02/2020, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Rejane Ennes Cicerelli, Professor(a) de Magistério Superior do Instituto de Geociências**, em 28/02/2020, às 10:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Jose Eloi Guimaraes Campos, Diretor(a) do Instituto de Geociências**, em 28/02/2020, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Fernandes Ferreira, Usuário Externo**, em 28/02/2020, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento na Instrução da Reitoria 0003/2016 da Universidade de Brasília.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.unb.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4781960** e o código CRC **4215D786**.

Referência: Processo nº 23106.153191/2019-47

SEI nº 4781960

Campus Universitário Darcy Ribeiro - Gleba A, Campus Darcy Ribeiro - Bairro Asa Norte, Brasília/DF, CEP 70910-900

Telefone: e Fax: @fax_unidade@ - <http://www.unb.br>

FF383d Ferreira, Cristiano Fernandes
Detecção de dolinas com apoio de Modelos Digitais de
Elevação e imagens de alta resolução: Estudo de caso na APA
Nascentes do Rio Vermelho-GO / Cristiano Fernandes
Ferreira; orientador Rogério Elias Soares Uagoda. --
Brasília, 2020.
139 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geografia) --
Universidade de Brasília, 2020.

1. Carste. 2. Dolina. 3. MDE. I. Uagoda, Rogério Elias
Soares, orient. II. Título.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação (tese) e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado (tese de doutorado) pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Cristiano Fernandes Ferreira

Dedico ao meu pai Eurípedes Luiz Ferreira (1941-2018), que nos deixou no início deste projeto e ao meu filho Dante Senra Fernandes (2019), que nos presenteou com seu nascimento no decurso desta empreitada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, especialmente representado por Jocy Brandão Cruz, que se empenhou em viabilizar o projeto. Agradeço também aos demais colegas do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas, que foram compreensíveis nos meus momentos de maior concentração e tensão. Agradeço especialmente ao colega Tiago Castro Silva, pela grande ajuda com os programas e procedimentos em geoprocessamento, área em que até então eu era totalmente inexperiente. Por fim e não menos importante, agradeço à minha família, especialmente à minha esposa Mariana Senra de Oliveira, pela paciência em suportar, com dois filhos pequenos, meus momentos de estresse, sempre com muita compreensão.

APOIO FINANCEIRO

A pesquisa foi apoiada pelos recursos advindos do Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica Nº 01/2018/ICMBio.

RESUMO

Os sistemas cársticos escondem seus principais mecanismos de morfogênese na subsuperfície, onde a interação de águas levemente aciduladas com rochas solúveis permite a criação de vazios e a interconexão dos fluxos, acelerando processos erosivos nem sempre visíveis. Uma das expressões superficiais mais marcantes destes mecanismos ligados à espeleogênese são as dolinas, feições consideradas elementares destes ambientes. A presente pesquisa teve como objeto principal as depressões cársticas, a partir das quais revisitou-se conceitos, tipologias genéticas e principais morfologias em trabalhos realizados no Brasil e no mundo. O mapeamento dessas feições é realizado há muito tempo e permite uma série de interpretações de cunho geomorfológico e ambiental. Entretanto, a tarefa de detectar e delimitar dolinas esbarra na resolução das bases de dados disponíveis, dificuldades de estabelecer os limites em campo ou por meio de análises visuais em imagens, grande consumo de tempo e trabalho, além de carregar forte viés de subjetividade. Neste sentido, vários trabalhos mais recentes vêm empregando técnicas modernas e bases de dados de alta resolução para a detecção de dolinas, muitos realizados com certo nível de automação, sobretudo com o uso de Modelos Digitais de Elevação-MDE's. Baseado nessas experiências e tendo como meta identificar as dolinas da região do alto Rio Corrente e da Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho (APA-NRV), nordeste de Goiás, realizou-se o mapeamento dessas feições em três escalas diferentes. Numa primeira abordagem, identificou-se dolinas prioritariamente por meio de trabalhos de campo em uma pequena área próxima à Gruna da Tarimba, e comparou-se os resultados com a análise visual de MDE's gerados com dados ALOS-PALSAR e Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Também foram detectadas de forma semi-automática depressões cársticas para escala abrangente, em toda a bacia do alto Rio Corrente com dados SRTM e ALOS-PALSAR. Por fim realizou-se o mapeamento de uma área significativa com o auxílio do VANT e detectou-se dolinas de forma automatizada em área central da APA-NRV, com vários sistemas de cavernas. Os resultados mostraram a importância da escolha adequada da base de dados, resolução e tamanho da área de abrangência. A partir dos resultados foi possível estabelecer as áreas mais carstificadas, tipologias mais usuais de dolinas e os principais processos atuantes na configuração do relevo local, com importante papel dos materiais e da dupla dinâmica erosiva, superficial e subterrânea.

Palavras chave: Carste; Dolina; MDE

ABSTRACT

Karst systems hide their main mechanisms of morphogenesis in the subsurface, where the interaction of slightly acidified waters with soluble rocks allows the creation of voids and the interconnection of flows, accelerating erosive processes that are not always visible. One of the most important superficial expressions of these mechanisms linked to speleogenesis are dolines, features considered elementary in these environments. The present research had as its main object karst depressions, from which concepts, genetic typologies and main morphologies were revisited in works carried out in Brazil and in the world. The mapping of these features has been carried out for a long time and allows for a series of interpretations of a geomorphological and environmental nature. However, the job of detecting and delimiting dolines comes up against the resolution of the available databases, difficulties in establishing limits in the field or through visual analysis in images, great consumption of time and work, in addition to carrying a strong bias of subjectivity. In this sense, several more recent works have been using modern techniques and high-resolution databases for the detection of dolines, many carried out with a certain level of automation, especially with the use of Digital Elevation Models-MDE's. Based on these experiences and aiming to identify the dolinas in the upper Rio Corrente region and the Environmental Protection Area of the Rio Vermelho Springs (APA-NRV), northeast of Goiás, the mapping of these features was carried out at three different scales. In a first approach, dolines were identified primarily through fieldwork in a small area close to Tarimba Cave, and the results were compared with the visual analysis of MDE's generated with ALOS-PALSAR data and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) . Karst depressions for a comprehensive scale were also semi-automatically detected throughout the upper Corrente river basin with SRTM and ALOS-PALSAR data. Finally, a mapping of a significant area was carried out with the aid of the UAV and dolines were automatically detected in the central area of the APA-NRV, with several cave systems. The results showed the importance of choosing the appropriate database, resolution and size of the coverage area. Based on the results, it was possible to establish the most karstified areas, the most common types of dolines and the main processes acting in the configuration of the local relief, with an important role of the materials and the double erosive, superficial and underground dynamics.

Keywords: Karst; Sinkhole; DEM

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE FIGURAS | |
| LISTA DE TABELAS | |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | |
| 1 INTRODUÇÃO | 01 |
| 1.1 ÁREA DE ESTUDO..... | 02 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 07 |
| 1.3 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 08 |
| 2 EMBASAMENTO TEÓRICO | |
| 2.1 TIPOLOGIAS DO CARSTE E CLASSIFICAÇÃO DE DOLINAS: UMA REVISÃO..... | 11 |
| 2.2 UM PANORAMA SOBRE MAPEAMENTOS DE DOLINAS NO BRASIL, FEIÇÕES ELEMENTARES DO CARSTE..... | 31 |
| 2.3 DESAFIOS NO MAPEAMENTO DE DOLINAS E AS POSSIBILIDADES DO USO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO – MDE’S: UMA REVISÃO MEDOLÓGICA..... | 51 |
| 3 TESTE DE APLICAÇÃO | |
| 3.1 O USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO-VANT PARA CONSTRUÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO-MDT, E IDENTIFICAÇÃO DE DOLINAS NA ÁREA DA GRUNA DA TARIMBA-GO..... | 77 |
| 4 RESULTADOS | |
| 4.1 DETECÇÃO DE DOLINAS COM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO - MDE’S E IMAGENS DE SATÉLITE NA REGIÃO DA APA NASCENTES DO RIO VERMELHO E BACIA DO RIO CORRENTE-GO..... | 89 |
| 4.2 APLICAÇÃO DE DADOS OBTIDOS POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO-VANT COM SENSOR VISÍVEL PARA DETECÇÃO DE DOLINAS NA ÁREA CÁRSTICA DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DAS NASCENTES DO RIO VERMELHO-GO..... | 107 |
| 5 CONCLUSÃO GERAL | 137 |
| REFERÊNCIAS | 139 |

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

| | |
|---|----|
| FIGURA 1 - Localização da área de estudo..... | 03 |
| FIGURA 2 - Unidades geológicas (A) e a configuração do relevo (B) com a inserção das cavernas conhecidas na região e o limite da APA-NRV..... | 03 |
| FIGURA 3 - A cidade de Mambai-GO (A) destacando relevos residuais e, ao fundo, parte da Serra Geral de Goiás. Na sequência (B) a descida da serra em direção a oeste, com cerrado mais preservado e morros residuais. Por fim o cânion do Rio Vermelho (C), com mais de 80m de escarpas na região da ressurgência da Lapa do Penhasco..... | 04 |
| FIGURA 4 - Alguns tipos de dolinas na região, como as de sufusão (A), pequeno colapso sob mata seca (B) e colmatada (C)..... | 05 |
| FIGURA 5 - Grande depressão associada a Lapa do Penhasco (A) com pastagens e áreas degradadas. Ao lado (B), parte desmatada com epicarste aparente na depressão poligonal da Gruna da Tarimba..... | 06 |
| FIGURA 6 - Capturas de drenagem (A) na lapa do Funil e entulhamento de galerias subterrâneas por sedimentos superficiais (B) na caverna do Borá..... | 06 |
| FIGURA 7 - Na região do povoado de Machado, um exemplo de dolina que dá acesso a um sistema ativo de caverna. A primeira foto (A) mostra a borda da dolina a esquerda e uma pocilga a direita. Nas fotos seguintes (B e C) mostram a captação de água nessa depressão para abastecimento do povoado no período de seca, quando córregos superficiais param de correr..... | 06 |
| FIGURA 8 - Fluxograma da pesquisa..... | 10 |

SUB-CAPÍTULO 2.1

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 - Tipologias do carste segundo Klimchouk (2015). Esta figura foi atualizada desde Klimchouk e Ford (2000), com a adição da separação entre carste epigênico e hipogênico..... | 15 |
| FIGURA 2 - O epicarste e uma dolina soterrada, ou criptodolina, representadas em uma mineração em Bacaetava-PR..... | 18 |
| FIGURA 3 - Tipologia de dolinas adaptada de Waltham e Fookes (2005)..... | 19 |
| FIGURA 4 - O epicarste, ou zona subcutânea, representado por Williams (1983), mostrando a importância intrínseca desta zona morfogenética na evolução de dolinas de dissolução..... | 21 |
| FIGURA 5 - Tipos de dolina simplificado. Em cinza os processos dominantes..... | 25 |

FIGURA 6 - Tipologia morfológica de dolinas apresentada por Kholer (1995), adaptada de Nicod (1972) e classificação morfológica de Angel et al. (2004) em planta.. 26

SUB-CAPÍTULO 2.2

FIGURA 1 - Mapa com distribuição dos trabalhos pelo Brasil..... 36

FIGURA 2 - Gradientes altimétricos destacados na região alto vale do Rio Ribeira, onde ocorrem grandes depressões cársticas em meio a mata atlântica..... 37

FIGURA 3 - Colapsos associados a grandes cavernas (Lapa Doce) geram depressões com bordas acentuadas e profundas, quebrando a monotonia do relevo circundante..... 39

FIGURA 4 - Dolina alagada na base de paredão, em região de carste coberto na região de Pedro Leopoldo-MG..... 41

FIGURA 5 - A) parâmetros morfométricos mais utilizados nos estudos analisados; B) forma de detecção de dolinas; C) escala na detecção por fotos aéreas; D) densidade de dolinas por trabalho analisado..... 44

FIGURA 6 - Comparação entre as classes de densidades nos trabalhos internacionais versus nacionais..... 45

SUB-CAPÍTULO 2.3

FIGURA 1 - Representação de uma dolina em planta no mapa topográfico e correspondente perfil num relevo inclinado..... 54

FIGURA 2 - Diferenças de perímetro entre o conceito de contorno fechado e quebra de relevo..... 55

FIGURA 3 - Processo de preenchimento de pontos depressivos (pit) num raster. Adaptado de Guimarães et al. (2005)..... 57

FIGURA 4 - Sequência de falsas dolinas associadas a rodovia indicadas por setas azuis (sistema contra enchentes)..... 57

FIGURA 5 - Corte em modelo digital com dados LIDAR mostrando: A) nuvem de pontos com vegetação e solo, com dolina ao centro; B) nuvem de pontos filtrada, com apenas os dados do solo, ressaltando melhor a dolina. Adaptado de Silva et al. (2017).... 59

FIGURA 6 - Perfil simulando uma dolina mostrando: pontilhado em azul correspondente à curva fechada mais externa em mapa topográfico (altitude 30m), com abrangência espacial inferior; e pontilhado vermelho no ponto de extravasamento (aproximadamente 36m altitude) passível de ser detectada em MDE, com maior abrangência..... 60

| | |
|--|----|
| FIGURA 7 - Discrepâncias espaciais conforme metodologia de detecção/delimitação de dolinas. Adaptado de Telbisz et al. (2009)..... | 60 |
| FIGURA 8 - Esquema de ordenamento de dolinas em situação de depressão composta. Adaptado de Obu e Podobnikar (2013)..... | 62 |
| FIGURA 9 - A seta vermelha aponta artefatos numa área mais plana (borda de planalto). Na parte sudeste da imagem ocorre um vale seco com a inserção de algumas dolinas (seis ao todo) marcadas em vermelho. As curvas fechadas entre tais dolinas são artefatos associados a drenagem ou áreas planas, pois toda a área foi checada em campo. Notar também que o modelo não foi suavizado, por este motivo as linhas de contorno (intervalo de um metro) estão bastante irregulares. Modelo digital de terreno construído a partir de imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado, e projetadas em transparência no Google Earth..... | 64 |
| FIGURA 10 - Evolução de estudos sobre detecção de dolinas com MDE (A) e bases de dados mais utilizadas (B)..... | 67 |
| FIGURA 11 - Métodos de detecção entre abordagens automáticos e manuais (A), e tipos de validação nos estudos (B)..... | 68 |
| FIGURA 12 - Métodos por mapeamentos manuais realizados (A) e filtros mais utilizados nas abordagens automatizadas (B)..... | 69 |
| FIGURA 13 - Abrangências de projeção superficial simuladas por método de delimitação em diferentes contextos..... | 71 |
| SUB-CAPÍTULO 3.1 | |
| FIGURA 1 - Localização da Gruna da Tarimba, na parte central da APAN-NRV (polígono em vermelho), nas proximidades de Mambaí-GO..... | 80 |
| FIGURA 2 – Ortofotomosaico..... | 80 |
| FIGURA 3 - MDS..... | 81 |
| FIGURA 4 - MDT VANT..... | 81 |
| FIGURA 5 - MDT ALOS-PALSAR..... | 81 |
| FIGURA 6 - Dolinas identificadas em campo na sobreposição de imagens em perspectiva do Google Earth e MDT VANT..... | 82 |
| FIGURA 7 - Dolinas identificadas em campo na sobreposição de imagens em perspectiva do Google Earth e MDT ALOS-PALSAR..... | 82 |
| FIGURA 8 - Localização das dolinas em relação a projeção da Gruna da Tarimba em superfície no MDT VANT..... | 83 |

| | |
|---|-----|
| FIGURA 9 - Círculos fechados em azul e pontos escuros de menor tamanho representam artefatos gerados no MDT VANT (128), muitos dos quais imperceptíveis nesta imagem..... | 85 |
| FIGURA 10 - Dolina de sufusão (T16) bastante representativa das feições que ocorrem no interior da depressão poligonal da Gruna da Tarimba..... | 86 |
| SUB-CAPÍTULO 4.1 | |
| FIGURA 1 - Localização da área de estudo..... | 90 |
| FIGURA 2 - Comparação entre as unidades geológicas (A) e a configuração do relevo (B) com a inserção das cavernas conhecidas na região e o limite da APA-NRV..... | 91 |
| FIGURA 3 - Processo de preenchimento dos pontos depressivos (sink) em um raster, até possibilitar a retomada da drenagem a jusante (extravasamento)..... | 92 |
| FIGURA 4 - Corte representando o procedimento de preenchimento e subtração do MDE original e filtragem por profundidade..... | 93 |
| FIGURA 5 - processo de retificação do MDE nos pontos de estrangulamento da drenagem por meio da ferramenta Serval (Qgis)..... | 94 |
| FIGURA 6 - Decréscimo de objetos com a aplicação do limite de profundidade zero (Z0) para dez (Z10) com os dados ALOS-PALSAR..... | 95 |
| FIGURA 7 - Identificação manual de feições no Google Earth entre dolinas prováveis (verde), suspeitas (amarelo) e não dolinas (vermelho). Objetos em branco ainda não avaliados..... | 97 |
| FIGURA 8 - Fluxograma da metodologia..... | 98 |
| FIGURA 9 - Densidade de dolinas versus densidade de cavernas..... | 100 |
| FIGURA 10 - Grupos adensados de possíveis dolinas em relação às unidades geológicas da área..... | 101 |
| FIGURA 11 - Padrão de carste poligonal (em azul) delimitadas visualmente na região equivalente ao G-3..... | 102 |
| FIGURA 12 - Localização das possíveis dolinas identificadas no levantamento e a APA Nascentes do Rio Vermelho (sem o limite da Bacia do rio Corrente), mostrando que diversas feições importantes se encontram fora ou nos limites da unidade de conservação..... | 103 |
| SUB-CAPÍTULO 4.2 | |
| FIGURA 1 - Localização da área de estudo..... | 110 |

| | |
|--|-----|
| FIGURA 2 - Em A observa-se o MDT construído a partir de imagens VANT, permitindo uma avaliação geral do relevo e a inserção de sistemas de caverna. Em B observa-se as áreas sobrevoadas (1 e 2) com suas respectivas sobreposições, bem como os pontos de controle, caminhamentos realizados e dolinas mapeadas em campo..... | 111 |
| FIGURA 3 - Fluxograma do processamento dos dados com o programa Agisoft Photoscan..... | 112 |
| FIGURA 4 - No topo da figura é possível observar o que aparentam ser pequenas dolinas de colapso no mapa sombreado, delimitadas em vermelho no processo de diferença por preenchimento. Ao centro realizou-se o perfil topográfico da linha verde tracejada na imagem acima (A-B). Por fim, abaixo, verifica-se a mesma cena no ortofotomosaico, em que os objetos em vermelho estão sobre as copas das árvores..... | 115 |
| FIGURA 5 - Centroides dos objetos da Área-1 agrupados em três classes (A) e seis classes (B) considerando altimetria mínima, altimetria média, área, amplitude e desvio padrão. A variação das classes aproxima-se da variação do relevo com os parâmetros utilizados..... | 116 |
| FIGURA 6 - Número ótimo de agrupamentos elaborado no pacote “factoextra” do programa R, indicando uma quebra na curva entre 4 e 5 grupos..... | 117 |
| FIGURA 7 - Diferença de formato entre objetos gerados no MDS considerados a partir da verificação em campo como dolina (azul) e os demais considerados como espúrios (vermelho)..... | 120 |
| FIGURA 8 - Exemplo de pequena barragem identificada no processo de preenchimento diferencial como uma possível dolina (vista em planta). Notar no perfil correlato (Arcmap-3d analyst-profile) o ponto proeminente marcado com seta vermelha, indicando ser uma feição de origem antrópica..... | 121 |
| FIGURA 9 - Objetos associados a drenagens (A), geralmente alongados em que é possível observar claramente o canal; objetos associados a bordas da vegetação mais alta no contato com mais baixa (B), comum na junção pasto/mata e; objetos chamados de baixios (C), que não é possível visualizar o ponto mais fundo e decidir de forma inequívoca por uma dolina ou não. Neste caso o baixio tem 10m de profundidade..... | 122 |
| FIGURA 10 - Sequência típica de dolinas encontradas na área, muitas vezes associadas a cavernas. Nos pontos onde os depósitos siliciclásticos ou solos sobre os carbonatos estão pouco espessos, ocorrem dolinas..... | 123 |

FIGURA 11 - Em A, distribuição dos objetos e sua respectiva classificação, em que é possível perceber uma maior ocorrência junto às incisões da drenagem. Em B, a densidade de todos os objetos possíveis (point density), considerando peso ligeiramente inferior para os baixios..... 127

FIGURA 12 - Em A observa-se a densidade gerada sem os baixios, considerando, portanto, somente as dolinas de campo e os objetos mais prováveis e suspeitos. Ao lado, em B, retirou-se as dolinas da análise, mantendo baixios (peso 1) suspeitas (peso 2) e prováveis (peso 3). Representa, portanto, a potencialidade para prospecção..... 128

LISTA DE TABELAS

SUB-CAPÍTULO 2.1

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - Tipologias de carste propostas por autores ao longo do tempo..... | 16 |
| TABELA 2 - Zonas hidrológicas do carste..... | 17 |
| TABELA 3 - Tipologia de dolinas e processos por autores..... | 20 |

SUB-CAPÍTULO 2.2

| | |
|---|----|
| TABELA 1 - densidade de dolinas (n°/km^2) em diversos trabalhos, adaptados de Ford e Williams (1989) e Day (1976)..... | 34 |
| TABELA 2 - Densidade de dolinas (n°/km^2) em diversos trabalhos a partir de 1992..... | 35 |
| TABELA 3 - Trabalhos de mapeamento de dolinas no Brasil..... | 43 |

SUB-CAPÍTULO 2.3

| | |
|---|----|
| TABELA 1 - Matriz qualitativa de avaliação dos métodos manuais de delimitação de dolinas (prós e contras)..... | 56 |
| TABELA 2 - Trabalhos com levantamento de dolinas/depressões via MDE ordenados por ano, destacando-se as fontes de dados, os métodos de identificação, os filtros utilizados e a acurácia calculada..... | 65 |
| TABELA 3 - Prós e contras da detecção automatizada de dolinas por MDE's..... | 70 |

SUB-CAPÍTULO 3.1

| | |
|--|----|
| TABELA 1 - Relação das dolinas identificadas nos dois trabalhos de campo..... | 83 |
| TABELA 2 - Acurácia dos modelos VANT e ALOS-PALSAR para identificar dolinas verdadeiras, falsos positivos e negativos..... | 84 |

SUB-CAPÍTULO 4.1

| | |
|---|-----|
| TABELA 1 - Critérios para classificação visual dos objetos nas imagens do Google Earth..... | 96 |
| TABELA 2 - quantidade de objetos conforme procedimentos de filtragem e classificação..... | 98 |
| TABELA 3 - Parâmetros morfométricos das depressões identificadas..... | 99 |
| TABELA 4 - Quantitativos de dolinas mapeadas em campo por área e tipologia predominante identificada..... | 104 |

SUB-CAPÍTULO 4.2

| | |
|---|-----|
| TABELA 1 - Dados do planejamento de voo..... | 112 |
| TABELA 2 - Síntese de dados do levantamento aéreo realizado e pontos de controle..... | 113 |

| | |
|---|-----|
| TABELA 3 - Quantitativos de objetos resultantes da diferença por preenchimento do MDT após cada procedimento realizado..... | 114 |
| TABELA 4 - Os pontos de dolinas de campo permitiram associar 44 polígonos Z-1 MDT como reais..... | 117 |
| TABELA 5 - Distribuição dos objetos por classes (grupos) conforme testes com três ou quatro parâmetros e quatro ou cinco classes, com respectivos quantitativos de objetos (no total 11.592)..... | 118 |
| TABELA 6 - Matriz de confusão a partir dos dados de campo para as análises de agrupamento e análises morfológicas..... | 119 |
| TABELA 7 - Quantidades de objetos remanescentes da junção das bases K3x5-MDS e da razão Perímetro/Área, para posterior análise visual..... | 120 |
| TABELA 8 - Quantidades de objetos remanescentes dos procedimentos de preenchimento do MDS e aplicação de filtro (perímetro/área), para posterior análise visual..... | 121 |
| TABELA 9 - Tipologias de dolinas observadas em campo..... | 122 |
| TABELA 10 - Usos do solo nas dolinas de campo..... | 124 |
| TABELA 11 - Resultados da análise visual dos objetos oriundos do MDT e MDS..... | 125 |
| TABELA 12 - Quantidades de positivos da base MDT e a quantidade acrescida pela análise do MDS..... | 125 |
| TABELA 13 - Densidades de dolinas e bases de dados em trabalhos de mapeamento no mundo..... | 129 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| APA-NRV | Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho |
| CANIE | Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas |
| CECAV | Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas |
| CPRM | Serviço Geológico do Brasil |
| GNSS | Global Navigation Satellite System |
| GPS | Global Posicional System |
| GSD | Ground Sample Distance |
| ICMBIO | Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade |
| LAGEF | Laboratório de Geografia Física (UnB) |
| LiDAR | Light Detection and Ranging |
| MDE | Modelo Digital de Elevação |
| MDS | Modelo Digital de Superfície |
| MDT | Modelo Digital de Terreno |
| PETAR | Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira |
| RTK | Real Time Kinematic |
| SIG | Sistema de Informações Geográficas |
| SIRGAS | Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas |
| SRTM | Shuttle Radar Topography Mission |
| TCCE | Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica |
| UTM | Universal Transversa de Mercator |
| VANT | Veículo Aéreo Não Tripulado |

1 INTRODUÇÃO

O carste e suas feições peculiares é definido principalmente pelos processos de dissolução que ocorrem em subsuperfície, na interação de rochas (carbonáticas sobretudo) e águas levemente aciduladas. Ou como defende Klimchouk (2015), o elemento primário para a quase totalidade das feições do carste é a espeleogênese, que pode ser vista como: “*um processo hidrogeológico dinâmico de auto-organização da estrutura de permeabilidade em rochas solúveis, mecanismo da evolução específica do sistema de escoamento subterrâneo*” (tradução nossa). Decorrentes da espeleogênese se manifestam as feições do carste subterrâneo, notadamente as cavernas, bem como feições superficiais, entre elas as dolinas. Este intrincado processo interdependente responde também pela complexidade e anisotropia dos sistemas aquíferos nestes ambientes (FERRARI e KARMANN, 2008). Compreender o papel das feições superficiais e sua relação com as estruturas subterrâneas, ou seja, as feições funcionais e hidrodinâmicas do carste, permite uma primeira aproximação do dimensionamento, delimitação e zoneamento de tais aquíferos (ANGEL et al., 2004).

A região foco da presente pesquisa, na Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho (APA-NRV) apresenta não apenas as questões complexas relacionadas ao carste, expostas acima, como também características complicadoras próprias. Trata-se de uma frente de exposição do carste subjacente, com grandes quantidades de materiais móveis de cobertura, especialmente arenosos, que escondem sistemas de cavernas ativas, o que potencializa os processos de erosão superficial. Em meio a este aparato dinâmico, se inserem atividades agropecuárias rudimentares, arcaicas, responsáveis pela substituição paulatina do cerrado por pastagens em um meio altamente frágil à remoção das coberturas vegetais. A gestão ambiental em um cenário deste tipo, a cargo do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), é ainda mais dificultada pela falta de instrumentos administrativos/legais para ordenamento, como é o caso do plano de manejo de unidade de conservação. Por fim, a região é relativamente remota, com poucos estudos científicos e baixa disponibilidade de bases cartográficas, em escalas pouco precisas, fatores que tornam a gestão ainda mais difícil.

Nesse sentido o projeto “Susceptibilidade, Hidrologia e Geomorfologia Cárstica Aplicadas à Conservação do Patrimônio Espeleológico da Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho” (Termo de Compromisso de Compensação Espeleológica- TCCE nº 01/2018/ICMBIO) visa criar bases e realizar experimentos na região com o intuito final de subsidiar a elaboração do plano de manejo dessa unidade de conservação. Dentre os vários

eixos de desenvolvimento do projeto, um em especial dá o motivo da presente pesquisa, denominado originalmente de “Reconhecimento e classificação do sistema cárstico e zoneamento de áreas vulneráveis (correlações entre estrutura e formas endocársticas, epicársticas e exocársticas e seu funcionamento frente ao sistema hidrológico)”. Assim, considerando as complexas estruturas de captação e condução das águas superficiais para o meio subterrâneo na área da APA-NRV e alto vale do Rio Corrente, o foco principal dessa pesquisa são as depressões cársticas (dolinas) e a relação dessas feições com o desenvolvimento da paisagem. O estudo destas feições e sistemas associados são fundamentais para o melhor entendimento dos processos atuantes na região, permitindo assim gerar dados e interpretações de cunho ambiental, úteis ao planejamento e gestão desta porção territorial.

1.1 ÁREA DE ESTUDO¹

A área estudada, na parte alta da bacia do Rio Corrente, junto a Serra Geral de Goiás (Figura 1), engloba rochas sedimentares, especialmente clásticas, correspondentes aos divisores Serra da Saudade, Formação Três Marias, aos Grupos Urucuia e Areado, bem como materiais residuais inconsolidados associados (SGM/SIC e CPRM, 2008). Nas porções intermediárias e baixas da área de estudo ocorrem sedimentos clasto-químicos da Formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí), especialmente rochas carbonáticas, potencialmente mais propícias à carstificação. Ao sul, fora da APA-NRV, ocorrem coberturas detrítico lateríticas ferruginosas correspondentes às superfícies mais altas da região (Figura 2).

Quanto ao relevo destaca-se a presença da cuesta da Serra Geral de Goiás (Figura 3), que impõe um escalonamento altimétrico gradual descendente de leste para oeste, sendo acompanhado pela mudança nos materiais e litotipos (CHEREM e VARAJÃO, 2014). Basicamente o reverso e front é caracterizado pelas rochas do Grupo Urucuia (patamar mais elevado), seguidos pelos sedimentos residuais colúvio-eluvionares do desmonte da cuesta (patamar intermediário) e por fim, nos setores mais rebaixados a oeste-noroeste, afloram rochas da Formação Lagoa do Jacaré. Além disso, morros residuais, associados ao Grupo Urucuia, despontam em meio aos sedimentos do patamar intermediário (Figura 3). Cabe ressaltar que sotoposto aos sedimentos do Grupo Urucuia, estão mapeadas rochas pelítico-carbonáticas do Grupo Bambuí (GASPAR e CAMPOS, 2007).

¹ Parte do texto e figuras foram retiradas da proposta de artigo apresentado no subcapítulo 4.1, página 112.

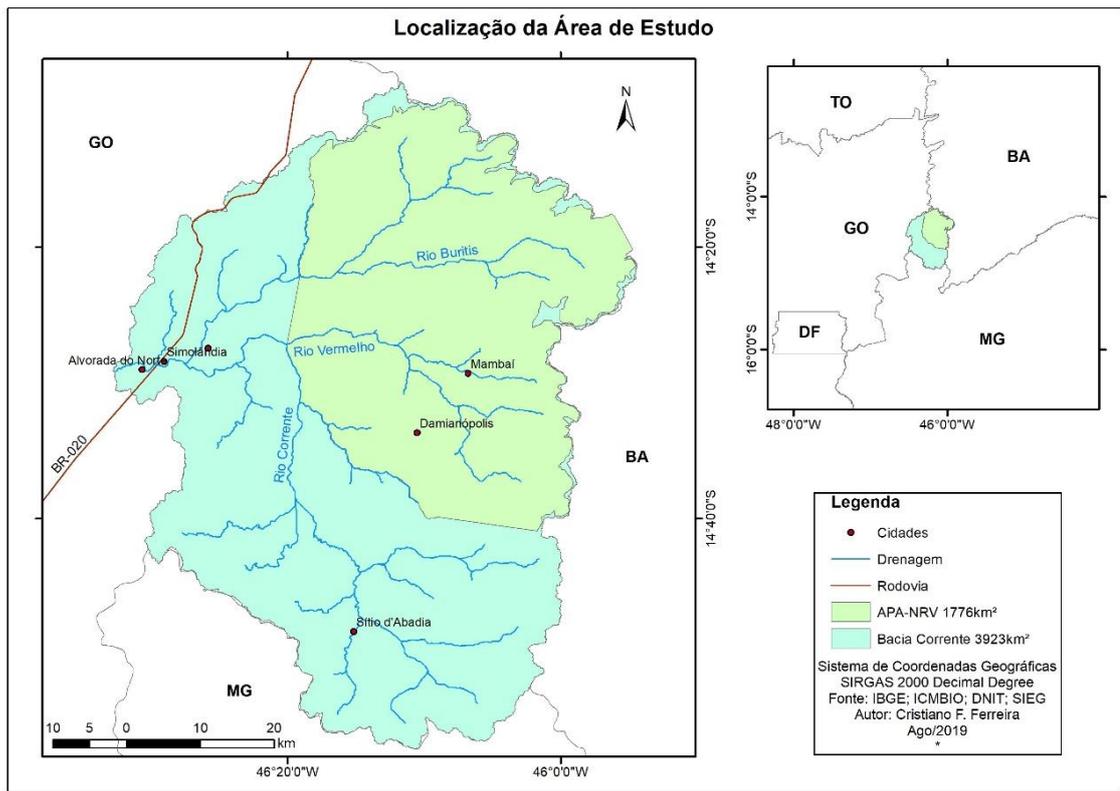


Figura 1: Localização da área de estudo.

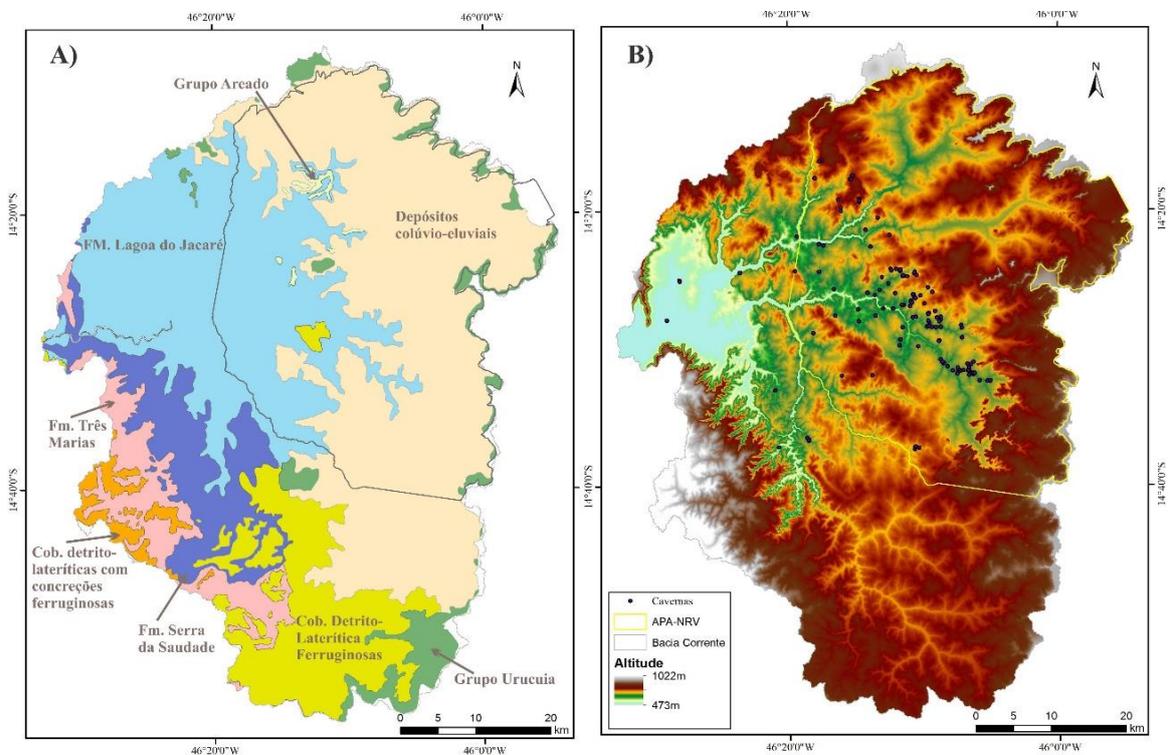


Figura 2: Unidades geológicas (A) e a configuração do relevo (B) com a inserção das cavernas conhecidas na região e o limite da APA-NRV. Fonte: geologia CPRM (<http://geosgb.cprm.gov.br/downloads/#>); altimetria ALOS-PALSAR; Cavernas CANIE/CECAV-ICMBio (<http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>). Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.



Figura 3: A cidade de Mambai-GO (A) destacando relevos residuais e, ao fundo, parte da Serra Geral de Goiás. Na sequência (B) a descida da serra em direção a oeste, com cerrado mais preservado e morros residuais. Por fim o cânion do Rio Vermelho (C), com mais de 80m de escarpas na região da ressurgência da Lapa do Penhasco. Fotos do autor.

Esse importante divisor topográfico entre o oeste da Bahia e nordeste de Goiás, caracterizada por espessa camada de sedimentos siliciclásticos, armazena grandes volumes de água subterrânea. O sistema aquífero Urucuia, que abrange parte significativa da área de estudo, alimenta tributários da margem direita do Rio Tocantins (GASPAR e CAMPOS, 2007), representado na região pelo Rio Corrente e seus afluentes, o Rio Vermelho e Buritis. Conforme se observa nas figuras apresentadas (Figuras 1 e 2) a presença de rochas mais solúveis como os carbonatos (Formação Lagoa do Jacaré) na parte centro-norte da área, onde se inserem os rios Vermelho e Buritis, parece ter dinamizado a dissecação regional se comparado com o setor sul, onde superfícies lateríticas suportaram o relevo frente a erosão regressiva promovida pelo Rio Corrente. A área da APA-NRV, com a ocorrência de inúmeros sistemas de cavernas, demonstra a interconectividade da superfície com os sistemas subterrâneos, facilitando e criando um aparato dual para a maior dissecação regional, exemplificado pela instalação de grandes cânions (Rio Vermelho, p.ex), onde ocorrem ressurgências cársticas (Figura 3-C).

Do ponto de vista do uso e ocupação a região como um todo se caracteriza pela contínua substituição dos cerrados nativos para a formação de pastagens, especialmente nas áreas mais rebaixadas se comparado às áreas mais altas próximas da Serra Geral. Isso deve possivelmente pela ocorrência de solos mais favoráveis e maior disponibilidade hídrica. Nas partes próximas à serra a densidade da drenagem é relativamente reduzida e ocorrem ainda veredas preservadas e cerrado esparso. Nas regiões mais baixas, onde afloram os carbonatos, a substituição do cerrado para pastagens é intensa, e predomina vegetação nativa apenas nas matas galeria e locais de exposição do epicarste superficial (matas secas), porque afloramentos inviabilizam a mecanização.

Na região dos carbonatos, e especialmente na interseção com os sedimentos siliciclásticos, ocorrem depressões cársticas dos mais variados tipos e tamanhos, muitas com acelerados processos de erosão devido ao desmatamento e pisoteio por gado (Figuras 4 e 5). Os processos de captura para o subterrâneo são atestados pela formação de colapsos, as vezes significativos, e pelo entulhamento de sedimentos em galerias de cavernas (Figura 6). Muitas das depressões cársticas e cavernas são utilizadas inadequadamente para criação de animais ou captação de água para abastecimento público em épocas secas (respectivamente), ensejando um quadro crítico do ponto de vista ambiental e de gestão do aquífero (Figura 7).



Figura 4: Alguns tipos de dolinas na região, como as de sufusão (A), pequeno colapso sob mata seca (B) e colmatada (C). Fotos do autor.

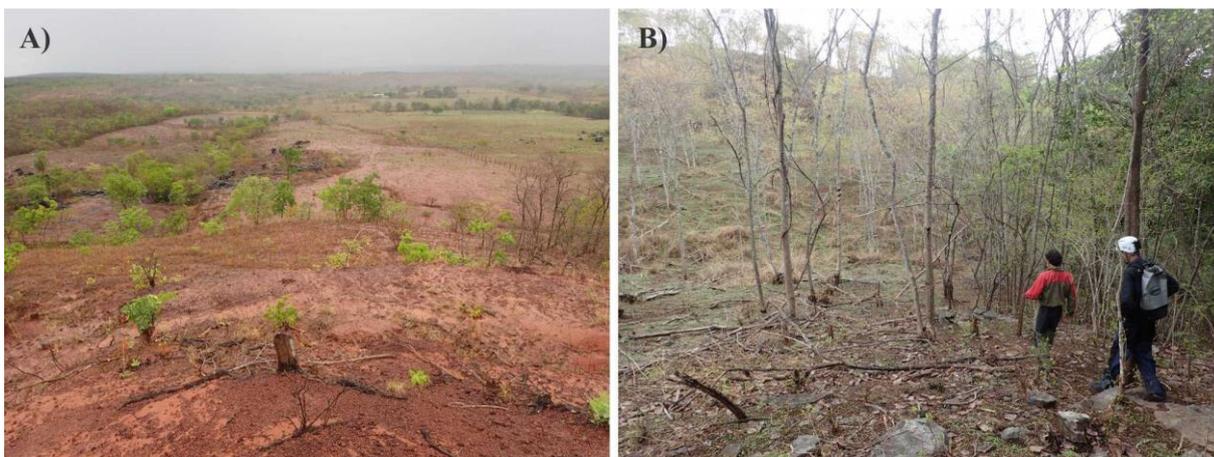


Figura 5: Grande depressão associada a Lapa do Penhasco (A) com pastagens e áreas degradadas. Ao lado (B), parte desmatada com epicarste aparente na depressão poligonal da Gruna da Tarimba. Fotos do autor.



Figura 6: Capturas de drenagem (A) na lapa do Funil e entulhamento de galerias subterrâneas por sedimentos superficiais (B) na caverna do Borá. Fotos do autor.



Figura 7: Na região do povoado de Machado, um exemplo de dolina que dá acesso a um sistema ativo de caverna. A primeira foto (A) mostra a borda da dolina a esquerda e uma pocilga a direita. Nas fotos seguintes (B e C) mostram a captação de água nessa depressão para abastecimento do povoado no período de seca, quando córregos superficiais param de correr. Fotos do autor.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é o mapeamento de dolinas na área de estudo por meio de dados obtidos por diversas fontes, mas especialmente originados a partir de modelos digitais de elevação (MDE²) e imagens de alta resolução. Neste sentido, configura dentre os objetivos avaliar métodos de mapeamento tradicionais, geralmente com o uso de imagens aéreas e trabalho de campo, frente a novas possibilidades, inclusive com a inserção de técnicas automatizadas e uso de novas tecnologias para aquisição de dados, como o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) por exemplo. Isso permite avaliar as alternativas frente a disponibilidade de bases de maior ou menor resolução, que geralmente implicam em maior ou menor custo de aquisição e certamente podem gerar resultados diferentes. Quais seriam as possibilidades de detecção de dolinas com os dados disponíveis? Seria possível detectar pequenas feições? Quais são as possibilidades das técnicas de sensoriamento remoto para o uso em grandes áreas, onde a utilização de MDE's de alta resolução se mostra inviável pelo maior custo financeiro? O uso de VANT's de formato comercial se mostram como opção válida, com boa relação custo/benefício?

Portanto, são objetivos específicos deste trabalho: revisar as tipologias dos sistemas cársticos e em especial os processos principais envolvidos na morfogênese desses ambientes; revisar as classificações genéticas e morfológicas das dolinas, feições típicas destes sistemas; identificar os trabalhos de mapeamento de dolinas no Brasil e no mundo, dando ênfase aos aspectos de densidade, morfometria, distribuição e bases de dados utilizadas; diferenciar os métodos de detecção e delimitação de dolinas; identificar os trabalhos e técnicas utilizadas no mapeamento de dolinas por meio de MDE's em suas abordagens manuais e automatizadas; realizar testes comparativos no uso de diferentes tipos de MDE's para detecção manual, incluindo-se bases em diferentes resoluções; avaliar a detecção automatizada por meio das bases SRTM e ALOS-PALSAR em conjunção com a análise de imagens de satélite para confirmação visual; avaliar os produtos cartográficos gerados por VANT e estratégias que permitam detectar dolinas de forma mais precisa se comparada a técnicas tradicionais; realizar uma caracterização

² Modelo Digital de Elevação-MDE é uma representação numérica das cotas altimétricas (Z) distribuídas entre os eixos cartográficos (X e Y). Arquivos digitais desta natureza possuem valor de Z para cada pixel e podem gerar imagens conforme a variação desses valores. O termo MDE é uma representação genérica de dois tipos específicos, como o Modelo Digital de Superfície-MDS, que considera os cumes da detecção (copa das árvores, topo de edifícios) e o Modelo Digital de Terreno-MDT, que representa o nível do solo, ou seja, detecta a base (pavimento) abaixo das interferências superficiais, representando melhor a superfície terrestre.

geomorfológica da área de estudo a partir da identificação das dolinas de modo a permitir seu enquadramento tipológico; identificar as áreas de maior carstificação e vulnerabilidade prévia frente aos processos hidrogeológicos.

1.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como já salientado, a região de estudo carece de boas bases cartográficas oficiais que permitam a identificação de feições cársticas na escala desejável para caracterização da área e planejamento. Um exemplo disso é a carta topográfica oficial disponível, na escala de 1:250.000, gerada no projeto RADAMBRASIL. As fotos aéreas são na escala de 1:60.000 (USAF/Exército) e datam de meados da década de 1960. O projeto estabeleceu o contato com o 5º Centro de Geoinformação (5ª DL-Exército) para obtenção das imagens da área e após longo período, com reiteradas solicitações, obteve-se algumas cenas (29), que além de não recobrirem a maior parte da área de estudo também, em muitos casos, não continham a sobreposição necessária à estereoscopia. Apesar do foto-índice sinalizar a existência de imagens para toda a área, acredita-se que parte tenha se perdido.

Como opções à falta de dados nacionais foram adotadas como bases de escala abrangente os MDE's SRTM (USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>) e ALOS-PALSAR (Vertex, ASF, NASA, <https://search.asf.alaska.edu/#/>). Para análises visuais, em apoio aos procedimentos utilizados com os referidos MDE's, foram utilizadas imagens do Google Earth, que permitem consultas em séries históricas recentes (2008 em diante). Nas abordagens em escala de detalhe foi utilizado um VANT comercial da marca DJI, modelo Phantom 4 Pro, com câmera nativa (visível), para a aquisição de imagens aéreas e posterior processamento e geração de produtos cartográficos (MDE's, ortofotomosaico). O trabalho de aerolevantamento, aquisição de pontos de controle e construção dos produtos cartográficos foi realizado por meio de parceria com a empresa "360Geo", tendo todas as etapas acompanhadas tecnicamente pelo ICMBio e Laboratório de Geografia Física, LAGEF-UNB. Por fim, também serviu como fonte de dados as inúmeras campanhas de campo à área de estudo, entre 2017 e 2019, que totalizaram 37 dias e permitiram a identificação e caracterização de 152 Dolinas.

A presente dissertação foi concebida a partir da sucessão de artigos científicos complementares, que discorressem sobre a revisão teórica, metodológica, testes e resultados. Apesar da recorrência dos assuntos como introdução, caracterização das áreas e metodologias empregadas tornar a leitura repetitiva, optou-se por esse modelo tendo em vista a necessidade e facilidade de divulgação do projeto. Assim, as descrições metodológicas, quando necessárias, estão

contidas em cada proposta de artigo preparado, que foram construindo os capítulos desta dissertação. O primeiro artigo preparado, já publicado pela Revista Caminhos de Geografia, apresenta uma revisão teórica das principais tipologias cársticas e classificações de dolinas (subcapítulo 2.1). A segunda proposta de artigo (subcapítulo 2.2) faz uma revisão de mapeamentos de dolinas internacionais e localiza os principais trabalhos no Brasil, ressaltando as bases de dados e análises morfométricas utilizadas, tendo sido aceito para a Revista Brasileira de Geografia Física (ainda não publicado). O terceiro artigo (subcapítulo 2.3), de caráter metodológico, revisita os trabalhos desenvolvidos na identificação de depressões cársticas, sobretudo com o auxílio de Modelos Digitais de Elevação-MDE, mas geralmente apoiadas por demais fontes de dados (imagens, campo, cartas topográficas etc.). Este último artigo foi submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia em abril de 2019 e ainda está sob revisão.

Realizada a revisão bibliográfica, apresenta-se um teste comparativo na detecção visual de dolinas com o apoio de MDE ALOS-PALSAR versus MDE gerado pelo VANT do projeto, para uma pequena área prospectada em campo. Este trabalho foi publicado como resumo expandido do 35º Congresso Brasileiro de Espeleologia e apresenta alguns resultados preliminares (subcapítulo 3.1). Por fim são apresentados os resultados em duas propostas de artigos, ainda não submetidos a revistas, com possibilidade de tradução e submissão em periódicos internacionais. A primeira proposta descreve a detecção de depressões em toda a área de estudos (3.923km²) com o uso de dados ALOS-PALSAR e SRTM (subcapítulo 4.1) e a segunda proposta de artigo foca nos dados obtidos por meio do VANT para uma área de 50km² (subcapítulo 4.2) na área central da APA-NRV, onde ocorrem grandes sistemas de cavernas.

De uma forma geral e resumida a pesquisa foi estruturada conforme as etapas representadas no fluxograma apresentado a seguir (Figura 8). A revisão bibliográfica permitiu identificar, sobretudo, as principais técnicas de mapeamento de dolinas. A partir dessa importante etapa, partiu-se para atividades práticas de identificação das feições por meio de geoprocessamento e visitas a campo. Os procedimentos realizados em escalas diferentes resultaram em grandes quantidades de objetos, necessitando a adoção de estratégias de filtragem variadas. Porém, a identificação das feições consideradas positivas permitiu alcançar alguns resultados, como a tipologia do carste local, os padrões de dolinas existentes, zonas de maior carstificação e vulnerabilidade, assim como pesar os prós e contras das metodologias utilizadas.

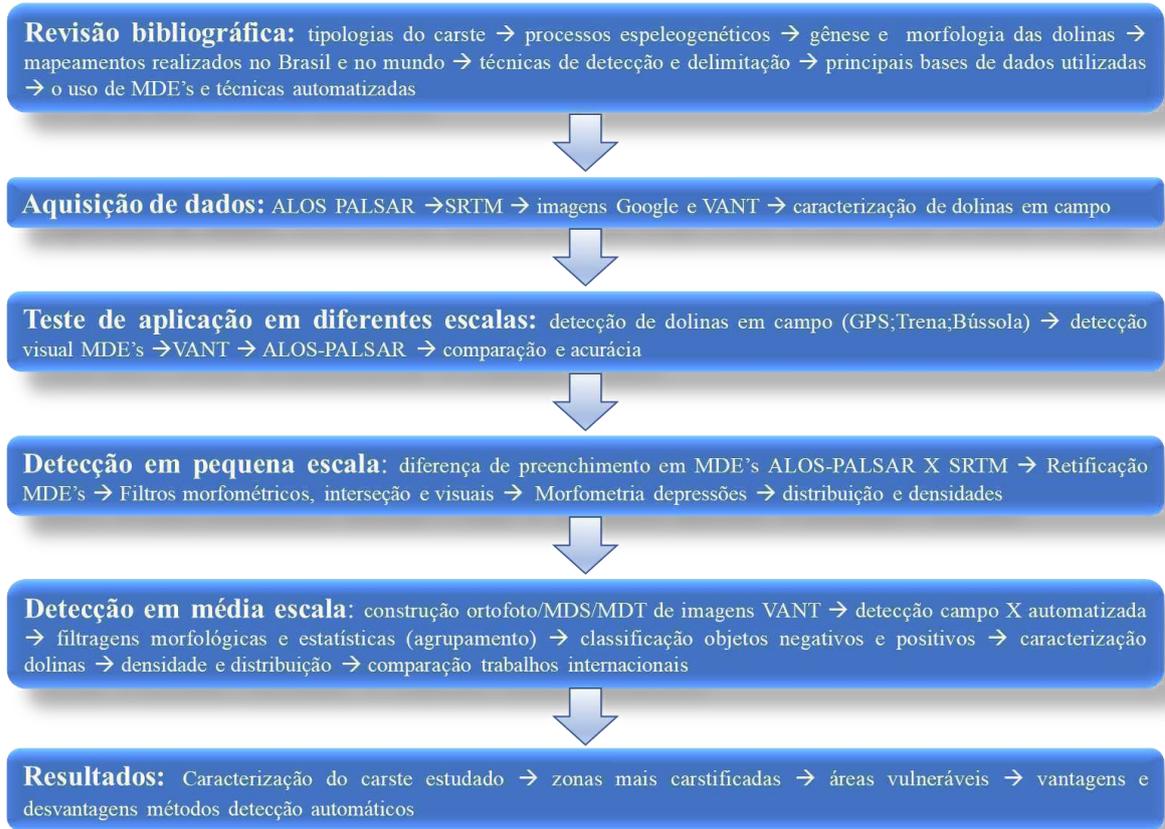


Figura 8: Fluxograma da pesquisa.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO-METODOLÓGICO

2.1 TIPOLOGIAS DO CARSTE E CLASSIFICAÇÕES DE DOLINAS: UMA REVISÃO

TIPOLOGIAS DO CARSTE E CLASSIFICAÇÕES DE DOLINAS: UMA REVISÃO

Cristiano Fernandes Ferreira

Universidade de Brasília – UnB
Programa de Pós-Graduação em Geografia
cristiano.ferreira@icmbio.gov.br

Rogério Elias Soares Uagoda

Universidade de Brasília – UnB
Programa de Pós-Graduação em Geografia
rogeriouagoda@unb.br

RESUMO

O carste apresenta processos característicos e complexos ligados à dissolução que podem resultar em feições típicas destes ambientes, como as dolinas. A ocorrência de ambientes cársticos diferenciados motivou diversas propostas tipológicas ou de classificação dessas paisagens. O presente trabalho revisa as principais formas de se categorizar o carste ao longo do tempo no mundo e algumas propostas que tiveram maior aplicação no Brasil. A evolução da discussão sobre o tema resultou cada vez mais no entendimento dos processos espeleogenéticos que ocorrem preferencialmente em subsuperfície. Esses mecanismos subjacentes são os responsáveis principais pela origem e desenvolvimento das depressões cársticas, como as dolinas. Devido à dificuldade de se classificar estas feições e falta de convergência na denominação dos tipos de dolina, buscou-se reunir as diversas propostas que foram sendo elaboradas na literatura internacional. A partir da revisão destas propostas realizou-se uma síntese de classificação genéticas de dolinas para uniformizar a aplicação em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Carste. Dolina. Depressão fechada.

KARST TYPOLOGIES AND DOLINES CLASSIFICATIONS: A REVIEW

ABSTRACT

The karst presents characteristic and complex processes related to the dissolution that can result in features typical of these environments, like the dolines. The occurrence of different karst environments motivated several typological proposals or classification of these landscapes. This paper reviews the main ways to categorize karst over time in the world and some proposals that have been most widely applied in Brazil. The evolution of the discussion on the subject has resulted more and more in the understanding of the speleogenetic processes that occur preferentially in subsurface. These underlying mechanisms are primarily responsible for the origin and development of karst depressions, such as dolines. Due to the difficulty of classifying these features and lack of convergence in the denomination of doline types, it was sought to bring together the various proposals that have been elaborated in the international literature. From the review of these proposals a synthesis of genetic classification of dolines was made to standardize the application in future works.

Keywords: Karst. Sinkholes. Closed depression.

INTRODUÇÃO – O QUE É CARSTE?

O carste pode ser considerado um tipo de terreno com formas e sistemas de drenagens diferenciados pela combinação de alta solubilidade da rocha e porosidade secundária bem desenvolvida, através de alargamento de fraturas e descontinuidades (FORD e WILLIAMS, 2007). Esta solubilidade é encontrada preferencialmente em rochas carbonáticas, como calcários, dolomitos e mármore, que são atacados por água naturalmente acidulada, representada principalmente através da seguinte reação reversível: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. O intemperismo químico é o processo dominante

se comparado ao transporte mecânico, resultando num conjunto único de paisagens (JONES e WHITE, 2012). Tais terrenos são caracterizados pela ocorrência de depressões fechadas (dolinas), captura de drenagens superficiais para sistemas subterrâneos e ocorrência de cavernas (GILLIESON, 1996; FORD e WILLIAMS, 2007). A dissolução pela água, através dos interstícios da rocha, é o processo chave e mesmo que não seja predominante, é o mecanismo inicial que permite outros ocorrerem, como erosão mecânica e colapsos (FORD, 2004; PALMER, 2007). O carste pode ser entendido como um conjunto de características morfológicas e hidrológicas, superficiais e subterrâneas, relacionadas ao mecanismo dominante sobre elas, a dissolução de rochas solúveis, notadamente carbonatos e evaporitos, dando origem a “feições endêmicas” deste tipo de ambiente (GUTIERREZ et al., 2014). É importante ressaltar que nos trópicos úmidos os processos de carstificação são ainda mais pronunciados, seja pela alta disponibilidade de ácidos carbônicos oriundos da interação ar, solo e vegetação, seja pela maior quantidade de água disponível (WALTHAM et al., 2005).

Dada a especificidade processual e o desenvolvimento de formas tão peculiares nestes ambientes, o objetivo principal deste trabalho é revisitar as principais contribuições relacionadas ao carste, focando inicialmente nas formas de classificação destas paisagens. Numa segunda parte e considerando a grande importância das dolinas como uma das principais e mais típicas expressões morfológicas do carste, além de seu relevante papel hidrológico e ambiental, será tratada a questão das formas de seu desenvolvimento genético e morfológico assim como as classificações destas feições. Ressalta-se que são poucas as revisões sobre geomorfologia cárstica no Brasil, especialmente após meados da década de 1990 e início dos anos 2000, embora discussões e avanços sobre o assunto tenham tido continuidade em nível mundial. Além disso identificou-se uma certa variedade de nomes e processos aplicados ao conceito de dolina, o que motivou a realização desta revisão sobre o tema, em busca de maior uniformização.

CLASSIFICAÇÕES DO CARSTE E ASPECTOS MORFOGENÉTICOS

Uma das primeiras classificações foi proposta pelo próprio Jovan Cvijić, considerado o pai da geomorfologia e hidrologia cárstica, em seus trabalhos entre 1893 e 1925, que estabeleceram a diferenciação entre o “holocarste” e o “merocarste” (FORD e WILLIAMS, 2007; FORD, 2007). O holocarste, seria constituído pelo carste completo, em espessas camadas de calcário puro, sem a interferência de outras rochas menos solúveis, onde se desenvolve toda a gama de feições cársticas. Já o merocarste, seria incompleto, constituído pela intercalação de outras rochas menos ou totalmente insolúveis que levam ao desenvolvimento misto da paisagem entre componentes subterrâneo e fluvial. Estes termos caíram naturalmente em desuso, visto que o carste autêntico previsto por Cvijić na verdade era a exceção no âmbito mundial, muito além dos Alpes Dináricos carbonáticos onde o autor se inspirou. Conforme Ford (2007) o termo merocarste foi alternado para outra classificação atualmente muito usada para diferenciar áreas cársticas, o fluviocarste. O fluviocarste se desenvolve tanto pela ação da dissolução como por forças mecânicas de remoção, transporte e deposição de materiais, criando paisagens fluviais ora superficiais, ora subterrâneas, com a instalação de vales cegos e janelas cársticas, que podem ser consideradas um tipo de dolina de colapso. Jennings (1985) relata que foi Roglic (1960) quem propôs o termo para diferenciar as áreas que apesar de ocorrerem em calcários puros, por uma série de razões, a ação mecânica da água na superfície impede a expressão completa da dissolução.

Uma das formas mais utilizadas no Brasil para classificação do carste parte da divisão entre exocarste e endocarste, difundida na Europa, através principalmente da publicação de Bögli (1980). Segundo o mesmo, o exocarste pode ser definido como o conjunto de formas superficiais geradas a partir da corrosão em rochas solúveis pela água de chuva, compreendendo desde lapíás, pequenas depressões fechadas como dolinas, uvalas, cenotes e *cockpits*, além das planícies de corrosão, vales cársticos, vales secos e as grandes depressões, os poljés. Já o endocarste, segundo Bögli, é caracterizado pelos processos cársticos que ocorrem no subterrâneo, com a gradual captura da água superficial pela rede de drenagem formada através de juntas e planos de acamamento da rocha, que aos poucos vão se alargando até formarem cavernas. Essa classificação, por ser bem didática, foi posteriormente muito utilizada no meio acadêmico brasileiro, sendo adotada por autores e publicações de grande difusão, como Bigarella et al. (1994) e Kohler (1995). Posteriormente Piló (1998; 2000) reforça essa classificação adicionando, ainda, o conceito de epicarste, entendido como um domínio de intersecção entre o exo e endocarste.

Pouco depois de Bögli (1980), publicações em língua inglesa como as de White (1988) e Jennings (1985) se utilizam dos termos “formas superficiais e subterrâneas do carste”, prevalecendo na literatura internacional em contraposição aos termos “exo e endocarste”. A partir de então contribuições são feitas no sentido de valorizar mais os aspectos genéticos, especialmente hidrológicos, nas classificações do carste em detrimento de apenas aspectos descritivos, relacionados as formas visíveis decorrentes dos processos de dissolução no subterrâneo.

Neste sentido, num dos primeiros trabalhos de síntese de Palmer (1984) o autor propõe outra classificação para o que ele chama de ambientes genéticos do carste, destacando: as formas superficiais em rochas aflorantes (lapiás, cânions); as feições de carste de subsolo que é condicionado pelo fluxo em meio poroso; as formas características de zona vadosa em que o fluxo é livre e gravitacional; feições de zona freática, com fluxos confinados e; as formas criadas pela alternância entre os dois últimos. Nesta publicação o autor reforça a importância dos aspectos hidrológicos no carste, identificando as interrelações entre as formas de recarga hídrica (autogênica, alogênica, difusa) e sua repercussão em formas superficiais e subterrâneas, como no padrão planimétrico de cavernas (dendrítico ou em rede, por exemplo). Também define as zonas hidrológicas vadosas, freáticas e de variação do nível do lençol, defendendo a evolução simultânea de tais setores com possíveis repercussões em superfície através de colapsos de rocha e solo.

Uma outra tipologia processual do carste foi identificada para áreas tropicais úmidas inicialmente na Nova Guiné, por Williams (1972), e posteriormente aplicada em outras partes do mundo, inclusive no Brasil. Neste trabalho o autor conseguiu detectar alguns padrões morfológicos superficiais nos oito distritos analisados, que diferiam entre a ocorrência de pináculos de cumes acentuados, torres com encostas escarpadas, cones de perfil mais arredondados e sequência de dolinas tipo *cockpits*. A partir de análises mais acuradas, com apoio de interpretações morfométricas, foi observado que estas feições se organizavam e desenvolviam como fruto da ação morfogenética de depressões intramontanas, que capturavam o escoamento hídrico superficial. Se estas depressões fechadas evoluem e escavam completamente as paisagens, se justapondo umas às outras lateralmente, podem formar um mosaico de depressões de contornos topográficos (pentagonais ou hexagonais) sob a forma de uma rede celular denominada poligonal. O crescimento das depressões poligonais é limitado pela permeabilidade da rocha e a manutenção das bordas se dá pela competição entre depressões adjacentes. Desta forma, uma vez estabilizada uma depressão poligonal, ela tende a manter seu formato, desde que não haja mudanças ambientais significativas. Apesar disso, a drenagem interna para os sumidouros (pode haver mais de um), de natureza efêmera e centrípeta, pode sofrer aumento da assimetria com o crescimento da depressão. No carste poligonal, as depressões representam o centro dinâmico do sistema, condicionando a forma das feições superficiais residuais (torres, cones, pináculos), que primeiramente podem chamar mais atenção. De acordo com Ford e Williams (2007), o carste poligonal é uma das formas de drenagem natural mais eficientes que existem.

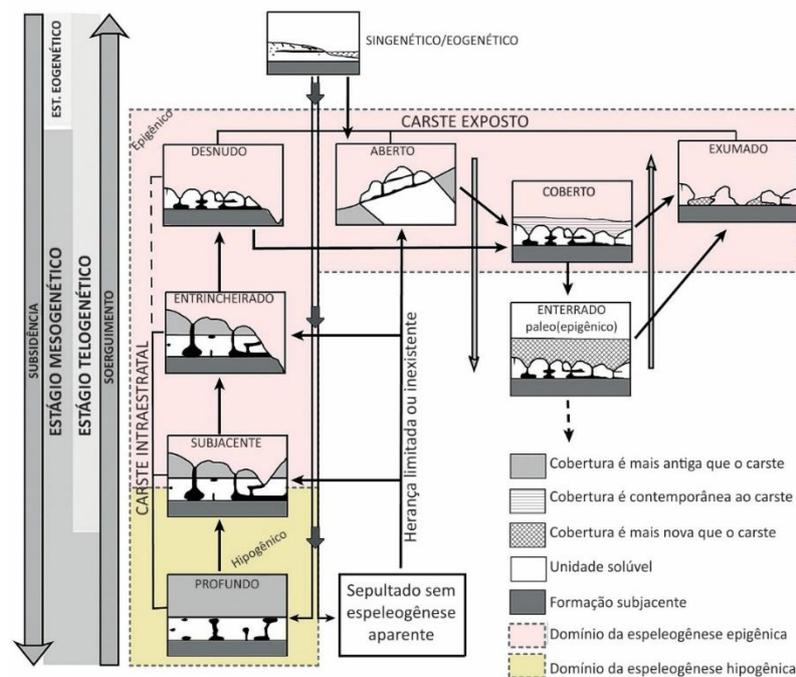
Essa classificação de carste poligonal influenciou um importante trabalho realizado no Brasil por Karmann (1994), na região cárstica do Vale do Rio Ribeira-SP. Neste trabalho o autor realizou uma classificação transicional das áreas estudadas entre zona fluvial (sobre os carbonatos), zona de contato (capturas de águas alogênicas), zona fluviocarstica, zona de transição e por fim, zona de carste poligonal (águas autogênicas). Desta forma ficou demonstrado o desmembramento da rede de drenagem superficial em bacias poligonais fechadas, o que é convergente com a ideia de uma fase fluvial e superficial anterior à carstificação, postulada por diversos autores desde 1900, conforme Ford e Williams (2007).

Utilizando também de critérios genéticos, funcionais e evolutivos para distinguir os diferentes tipos de carste, Klimchouk e Ford (2000), apresentam uma classificação adaptada do trabalho de Klimchouk (1996), baseada na condição de cobertura, profundidade da carstificação e remoção de materiais, dentre outros aspectos (Figura 1). O carste singenético se refere a feições criadas por dissolução durante a deposição do mineral (calcita ou gipsita) em eventos de exposição subaérea (regressão marinha). O carste intraestratal pode ser dividido em profundo, subjacente e entrincheirado. Carste profundo não é evidente em superfície, com rochas solúveis não expostas, mas em processo de carstificação por águas acidificadas ou termais – equivalente ou muito próximo ao conceito posteriormente consolidado de carste hipogênico. O carste subjacente ocorre onde as rochas solúveis são cortadas pela erosão em pontos de menor espessamento da camada superior insolúvel, causando alguns colapsos e surgências pontuais. O carste entrincheirado ocorre quando toda a

massa de rocha solúvel é recortada por vales, mas permanecem capas de rochas insolúveis nos interflúvios. Numa transição de carste intraestratal para carste exposto figura um tipo resultante da evolução dos três subtipos descritos anteriormente, o carste desnudo, que se forma quando toda a massa de rocha sobrejacente antecedente foi removida, o que implica que necessariamente já foi em algum momento capeado por outra rocha insolúvel.

Já quanto aos subtipos de carste exposto, observa-se uma sequência de carste aberto para carste coberto, que pode ser profundamente enterrado e ambos posteriormente formarem o carste exumado. Neste sentido carste aberto corresponde aquele que nunca foi coberto ou, se foi, a remoção da cobertura se deu antes de qualquer carstificação e, portanto, não há heranças morfológicas de estágios cobertos. Carste coberto é caracterizado pela cobertura de uma significativa camada de sedimentos inconsolidados acumulados concomitantemente durante a evolução cárstica, seja por solos de descalcificação (autóctone) ou por materiais de fora do carste (alóctone). Carste enterrado ocorre quando as rochas já anteriormente carstificadas são completamente soterradas por outra rocha, normalmente por transgressão marinha, interrompendo os processos de dissolução. Neste caso observa-se uma forte relação e ambiguidade com o conceito de paleocarste e fossilização. Por fim, o carste exumado é um tipo derivado dos dois anteriores cujos sedimentos que os recobriam posteriormente voltaram a ser removidos.

Figura 1 – Tipologias do carste segundo Klimchouk (2015). Esta figura foi atualizada desde Klimchouk e Ford (2000), com a adição da separação entre carste epigênico e hipogênico.



Fonte – adaptado de KLIMCHOUK (2015).

Uma classificação simples, mas bastante funcional é proposta por Ford e Williams em vários trabalhos (mas originalmente em FORD e WILLIAMS, 1989), e estabelece a diferenciação básica entre formas de recarga hídrica (*input landforms*) e formas de descarga/residuais (*outputs e residual landforms*). Na primeira categoria entrariam todo tipo de depressões, como dolinas, poljés, vales cegos, sumidouros, bem como campos de lapiás e epicarste, entre pequenas, médias e grandes feições. Já na segunda categoria observa-se a descarga, a saída da água do sistema, especialmente através das surgências, onde ocorreriam feições como planícies com relevos residuais, e feições de acumulação como represas de travertino e tufas, por exemplo. Apesar desta forma resumida de classificar as feições cársticas, os autores também citam inúmeras outras maneiras de classificar o carste: paleocarste, exumado, relicto, interestratal; intraestratal; exocarste, endocarste, criptocarste, hipocarste, carste *barré*, carste de contato; pseudocarste; termocarste; vulcanocarste; fluvio-carste (FORD e WILLIAMS, 2007).

Por fim, em síntese relativamente recente ao tratar do verbete “*karst*”, Jones e White (2012), revisam diversos termos associados a tipologias específicas do carste. Ambientes dominados por dolinas são chamados de “carste de dolinas”. De forma parecida ocorre o “carste de cones e torres” onde tais formas residuais predominam, as vezes sendo também chamados de carste de *cockpit*. Em paisagens de origem mista, ocorrem o fluviocarste, carste alpino e o glaciocarste. São citados ainda o carste costeiro, afetado pelas marés, ondas e tempestades, além da ação biogênica; o carste de zona de mistura, caracterizado pelo maior poder dissolutivo gerado na junção entre águas doces interiores e águas marinhas, mesmo ambas saturadas; o carste telogenético, que ocorre em rochas compactas continentais de baixa permeabilidade (fraturas e acamamento) e se opõe ao carste eogenético, caracterizado por calcários jovens, sem significativa ação diagenética, portanto de alta permeabilidade primária, encontrado em regiões litorâneas. O carste hipogênico se caracteriza pela dissolução ascendente por águas profundas, estimulada pela condição hidrotermal (carste hidrotermal) ou de acidez pela presença de sulfetos na composição das rochas (carste por ácido sulfúrico), dando origem a grandes sistemas de cavernas, como a Carlsbad e Lechuguila no Novo México.

Este tipo de carste, hipogênico, vem sendo foco de muitos estudos recentes, sobretudo em função da sua capacidade de formar grandes cavernas sem manifestações morfológicas em superfície, não sofrer interferências epigênicas em seu desenvolvimento e por ser um importante potencial armazenador de hidrocarbonetos (vide revisão de KLIMCHOUK, 2018). O maior sistema de cavernas da América do Sul, com 145km de galerias mapeados, entre a Toca da Boa Vista e a Toca da Barriguda (Campo Formoso, BA) é considerada uma feição hipogênica, possivelmente desenvolvida por hidrotermalismo muito antigo (AULER et al., 2017). A consistente diferenciação espeleogenética observada entre os processos hipogênicos (profundos; confinados) e epigênicos (mais superficial; não confinado hidráulicamente) juntamente com o entendimento de que estes processos morfogenéticos são os principais na configuração do carste, levou Klimchouk (2015) a propor esta forma inicial de classificação, em convergência e sem se opor ao já proposto anteriormente em parceria com Ford (KLIMCHOUK e FORD, 2000, vide Figura 1). Esta visão mais recente do autor se opõe a classificações mais antigas que segundo o mesmo estabeleceram um paradigma calcado sobretudo nas formas superficiais, epigênicas (exocarste e endocarste) e não em processos espeleogenéticos, considerado o principal fenômeno causador das formas típicas do carste, que podem inclusive ocorrerem em grande profundidade, sem ação de águas meteóricas, ou manifestações morfológicas na superfície, por exemplo. As principais tipologias do carste aqui descritas estão resumidas a seguir (Tabela 1), onde se observa a evolução das terminologias e conceitos ao longo do tempo.

Tabela 1 – Tipologias de carste propostas por autores ao longo do tempo.

| Publicações | Tipologias de Carste |
|------------------------------|--|
| Cvijić (1893) | Holocarste X Merocarste |
| Roglić (1960) | Fluviocarste |
| Williams (1972) | Poligonal (pináculos, torres, cones, cockpit, fluviocarste) |
| Bögli (1980) | Exocarste X Endocarste |
| Jennings (1985) | Desnudo X Coberto; Fluviocarste; Livre X Aprisionado; Subjacente (ou interestratal); Soterrado (fóssil) X Exumado; Relicto; Paleocarste; Biocarste |
| Karmann (1994) | Poligonal (fluvial, contato, fluviocarstica, transição, poligonal) |
| Piló (1998) | Exocarste X Epicarste X Endocarste |
| Klimchouk e Ford (2000) | Intraestratal (profundo, subjacente e entrincheirado); Desnudo; Exposto (aberto, coberto, enterrado, exumado); Singenético |
| Ford e Williams (1989; 2007) | Formas de Recarga X Descarga; Outros tipos citados: paleocarste, exumado, relicto, interestratal; intraestratal; exocarste, endocarste, criptocarste, hipocarste, hipocarste, carste barré, carste de contato; pseudocarste; termocarste; vulcanocarste; fluviocarste |
| Jones e White (2012) | Carste de Dolina; Carste de Cones e Torres; Carste de Origens Mistas (fluviocarste; carste alpino; glaciocarste); Carste Costeiro; Carste de Zona de Mistura; Carste Eogenético; Carste Telogenético; Carste Hipogênico (carste hidrotermal; carste por ácido sulfúrico) |
| Klimchouk (2015) | Carste Epigênico X Hipogênico |

EPICARSTE, IMPORTANTE ZONA MORFOGENÉTICA

Algumas destas classificações cársticas incluem e consideram fortemente os processos morfogênéticos, especialmente a espeleogênese como o elemento impulsionador das formas que se manifestam em última análise em superfície. A compreensão da dinâmica de circulação hídrica no carste através das zonas hidrológicas (vadosa, oscilação do lençol e freática) e os produtos diferenciados da interação destes fluidos com a rocha, aumentando gradativamente a permeabilidade e o transporte de materiais é que permitem, eventualmente, a manifestação superficial dos fenômenos cársticos. Conforme Klimchouk e Ford (2000), se determinados tipos de feições cársticas são fundamentalmente superficiais, como lapiás em rochas expostas (*rillenkarren*), a essência deste sistema é a circulação subterrânea, criando vazios e cavernas na rocha solúvel. Depressões como dolinas e poljés, quando existentes, contribuem para suprir água ao sistema, mas não são essenciais para a circulação subterrânea. Ou como os autores definem assertivamente, “*Se o carste está expresso na superfície, isso não é relevante. Um sistema cárstico pode operar no subsolo sem qualquer relação com a superfície, sendo representado exclusivamente por formas subterrâneas(...)*” (KLIMCHOUK e FORD, 2000, p.46). Diante disso os autores ressaltam a importância no carste das zonas morfogênéticas subsuperficiais em detrimento unicamente da análise das expressões morfológicas superficiais para sua classificação.

Neste sentido, considerando o objetivo de se discutir e entender a formação de depressões cársticas, é necessário voltar a atenção a uma importante zona morfogênética destas paisagens, situada um pouco abaixo da superfície, o epicarste, responsável por até 80% da denudação química do sistema (FORD e WILLIAMS, 2007). Conforme Bakalowicz (2013), a inclusão do conceito de epicarste como importante zona morfogênética do carste é decorrente das discussões sobre o tema em âmbito mundial, entre as décadas de 1960/1970 através de trabalhos como o de Rouch (1964, *apud* BAKALOWICZ, 2013) e Mangin (1975, *apud* BAKALOWICZ, 2013), especialmente em função da sua importância hidrológica, biológica e ambiental. Neste sentido, o epicarste (KLIMCHOUK, 2000; FORD e WILLIAMS 2007), ou zona subcutânea (WILLIAMS, 1983) pode ser definido como a camada superficial de material mais intemperizado entre a rocha subjacente e o solo, que está particularmente exposta a ação dissolutiva e difusa das águas meteóricas e ao alargamento de discontinuidades, possuindo importante função de armazenamento e concentração de fluxos para a zona vadosa (Figura 2). O epicarste, juntamente com o solo (se existente) comporiam do ponto de vista hidrológico a zona vadosa, insaturada, que ainda possui uma zona de transmissão gravitacional lenta através do maciço rochoso para a zona freática, saturada (FORD e WILLIAMS, 2007; WILLIAMS, 2008; ver Tabela 2).

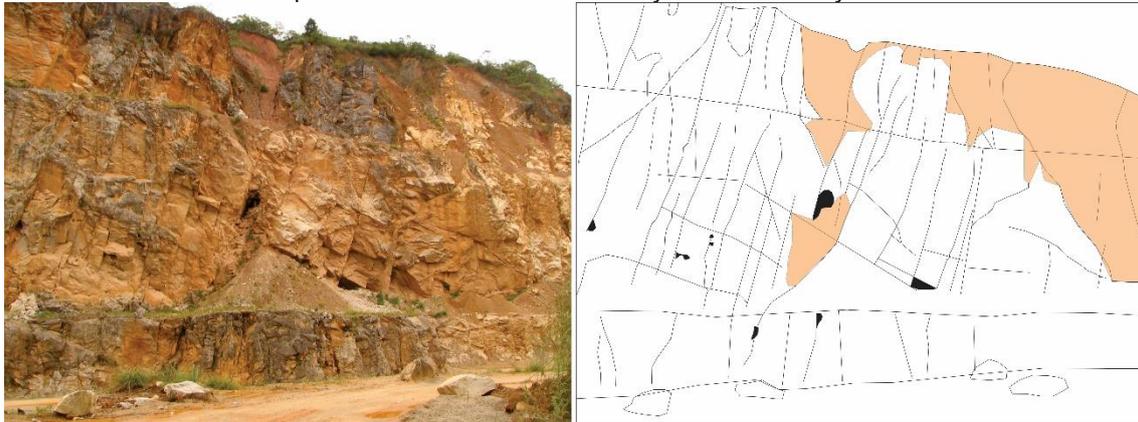
Tabela 2 – Zonas hidrológicas do carste.

| | |
|---------------------------------|---|
| Zona Insaturada (vadosa) | Solo Zona Epicárstica (ou subcutânea) Zona de Percolação Livre (transmissão) |
| Zona Intermitentemente Saturada | Zona Epifreática (zona de flutuação do nível do aquífero) |
| Zona Saturada (freática) | Zona Freática Superficial Zona Freática Profunda (batifreática) Zona Freática Estagnada |

Fonte – Adaptado de FORD e WILLIAMS (2007, p. 107).

Segundo Palmer (2007), o epicarste seria essencialmente a extensão subsuperficial dos lapiás. Para Bakalowicz (2012) o epicarste é o setor chave para a dissolução dos carbonatos, por sua relação tão próxima à principal fonte de CO₂, o solo. Consequentemente, segundo o mesmo autor, o carste se desenvolve e evolui como resultado do epicarste, criando feições superficiais como lapiás e dolinas, bem como subsuperficiais, como condutos e cavernas. Pode ser, portanto, entendido como a mola propulsora das feições cársticas, dentre elas as depressões. Para Zwahlen (2004), que considerou fortemente a questão da vulnerabilidade dos aquíferos nestes ambientes, feições cársticas superficiais são apenas a expressão do desenvolvimento do epicarste e podem nem sempre se apresentarem visíveis através de formas como dolinas ou campos de lapiás, apesar destas feições serem indicadores geomorfológicos da sua operação.

Figura 2 – O epicarste e uma dolina soterrada, ou criptodolina, representadas em uma mineração em Bacaetava-PR. Sistema interligado à semidestruída Gruta dos Cinco Níveis. Manchas alaranjadas representando zonas de maior alteração ou sedimentação.



Fonte – Foto (2006) e esquema do autor.

DOLINA – A DEPRESSÃO CÁRSTICA ELEMENTAR

Esta revisão dará maior destaque aos processos e formas correspondentes das dolinas, por serem consideradas feições elementares do carste, comparáveis a bacias de primeira ordem (SAURO, 2012) ou até mesmo formas diagnósticas (CVIJIĆ, 1890, *apud* FORD, 2007). Bondesan et al. (1992) consideram que cada dolina corresponde a uma unidade hidromorfológica funcional. Para outros autores as dolinas são consideradas feições indicadoras (FORD e WILLIAMS, 2007), pois este tipo de sistema se desenvolve mesmo sem a ocorrência de depressões em superfície (WILLIAMS, 2004). Ou seja, se há dolina, há carste, sendo o contrário nem sempre verdadeiro. As demais depressões cársticas como dolinas compostas (uvalas), poljés e as microformas (*kamenitzas*, p.ex.), apesar de circunstancialmente comungarem de processos equivalentes, não serão tratadas pormenorizadamente nesta oportunidade. Importante ressaltar, porém, que dolinas podem ocorrer inclusive no interior de grandes depressões compostas, poligonais ou mesmo poljés, demonstrando seu caráter elementar no desenvolvimento destas paisagens.

Se a natureza do sistema cárstico é o fluxo subterrâneo, incluindo o transporte de materiais em dissolução ou desagregação mecânica, é natural que então surjam na superfície depressões fechadas, sem conexão superficial com a rede de drenagem (PALMER, 2007). Como coloca Williams (2004), o desenvolvimento de qualquer tipo de dolina depende da capacidade da água infiltrar e fluir através de rochas cársticas até as ressurgências. No Brasil distingue-se estas depressões cársticas normalmente entre dolinas – de menor tamanho; uvalas – quando duas ou mais dolinas se coalescem; e poljés – grandes depressões aplainadas de drenagem fechada. Apesar da relativa e aparente facilidade de diferenciação teórica entre estes tipos, inúmeros processos e às vezes complexos mecanismos se inter-relacionam de tal forma a resultar na expressão superficial deprimida, nem sempre perfeita e de fácil distinção. Um pouco desta complexidade está manifestada na definição de dolina de Beck (2012):

“As dolinas (*sinkholes*) são as expressões superficiais (e quase superficiais) do processo interno de drenagem e erosão em terrenos cársticos, geralmente caracterizados por depressões na superfície terrestre. Os processos formativos incluem a dissolução de camadas de rocha, o transporte descendente do excesso de sedimentos e/ou o colapso do leito rochoso. A maioria das grandes dolinas maduras tem uma origem complexa envolvendo todos os três processos. Em alguns estágios no desenvolvimento de dolinas, uma depressão de superfície pode não estar presente” (BECK, 2012, p. 723).

Percebe-se nesta definição, em convergência ao que postularam Klimchouk e Ford (2000) que nem sempre as depressões estão expressas na superfície, apesar dos processos cársticos operarem em subsuperfície (Figura 2). Ou conforme Sauro (2012), a estrutura de uma dolina começa a se desenvolver antes mesmo do início da depressão superficial. Outro fator importante desta definição, sobretudo no contexto tropical brasileiro de grande quantidade de material superficial (solo, regolito),

processos biogeomórficos e pluviosidade, é a questão da poligenia das dolinas. Apesar de existirem mecanismos iniciais de desenvolvimento e formas típicas resultantes, estes sinais podem ser completamente apagados ou eclipsados por processos posteriores.

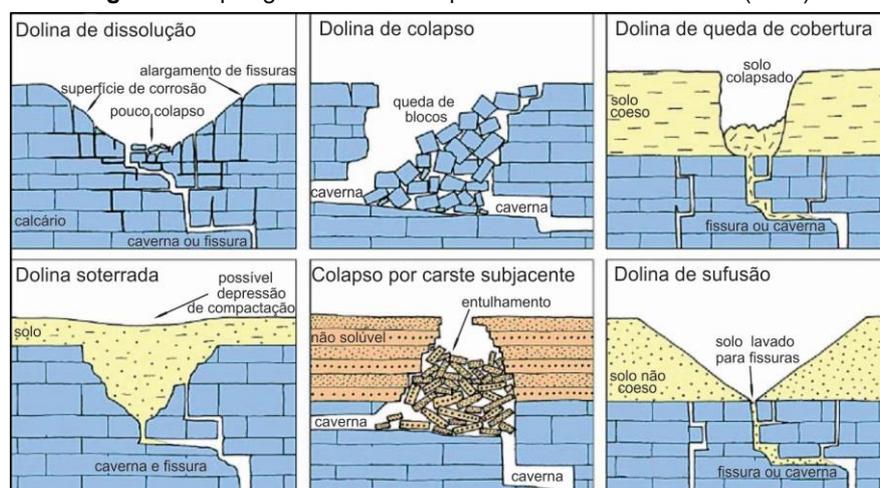
Ford e Williams (2007) apresentam uma revisão importante sobre poljés, caracterizados por serem grandes depressões fechadas aplainadas pela atividade de migração lateral fluvial, geralmente com um dos lados da bacia proeminente (escarpado), drenagem subterrânea em alguns pontos e uma característica proximidade do nível do aquífero com a superfície. Sauro (2012) faz uma curta revisão sobre poljés e também sobre depressões compostas, termo que o autor utiliza em substituição a uvala, considerado por ele e outros autores (PALMER, 2007, GUTIERREZ et. al. 2014), um termo em desuso que merece melhor definição, ou que se aplicaria a casos mais restritos, como sistemas de falhas locais acelerando a dissolução (ver ČALÍČ, 2011). Apesar da indefinição internacional acerca do termo, em virtude da crítica à teoria dos ciclos davisiana na qual Cvijić deixou a entender que dolinas evoluiriam para uvalas e estas para poljés (ver esta discussão em KRANJC, 2013), o termo uvala continua sendo muito usado no Brasil.

PROCESSOS DE FORMAÇÃO

Os processos de formação de dolinas envolvem diferentes aspectos, tanto relacionados aos mecanismos erosivos (dissolução ou ação mecânica), tempos diferenciados (geológico, histórico ou repentino) como materiais distintos (coberturas móveis, rocha carstificável ou não). A dinâmica dos processos de formação e desenvolvimento de dolinas é caracterizada por diversos autores principalmente entre, dissolução, colapsos e subsidências (JENNINGS, 1985; FORD e WILLIAMS, 2007; BECK, 2012; ver Figura 3). Entretanto observa-se na literatura entendimentos diferentes para aplicações destes termos, como subsidência, e algumas inclusões de conceitos similares ou adicionais. Em virtude destas diferentes abordagens entre autores ao longo dos anos para classificação genética das dolinas, algumas sínteses das propostas foram realizadas, destacando-se a de Williams (2004) e Waltham et al. (2005).

Buscando atualizar tais sínteses com publicações mais recentes é apresentada aqui as propostas internacionais de classificação (Tabela 3). Adiante serão detalhados os mecanismos de formação de dolinas e suas especificidades, sem considerar os aspectos morfológicos, que serão tratados no tópico subsequente. Vale ressaltar, entretanto, o caráter poligenético e simultâneo de processos em boa parte das depressões encontradas na natureza, especialmente em ambientes tropicais, o que torna o esforço de simplificação uma aproximação, sobretudo, teórica. Ou como pontuam Cahalan e Milewski (2018), as dolinas se formam em função da interação complexa de fatores como os hidrológicos (inundações, p.ex.), geológicos (espessura das camadas, p.ex.), geomorfológicos (elevação, p.ex.), antropogênicos (uso do solo, p.ex.), climáticos (regime de precipitação, p.ex.), hidrogeológicos (flutuação do aquífero, p.ex.), ou outros fatores (resistência geotécnica do solo, p.ex.) que agem em magnitudes variáveis e escalas de tempo/espço distintas.

Figura 3 – Tipologia de dolinas adaptada de Waltham e Fookes (2005).



Fonte: WALTHAM e FOOKES (2005).

Tabela 3 – Tipologia de dolinas e processos por autores. Separação de subgrupos identificados pelos próprios autores: ¹ tempo permanente na paisagem; ² tempo humano na paisagem; ³ grupo colapso; ⁴ grupo subsidência; ⁵ grupo dissolução; ⁶ outros tipos.

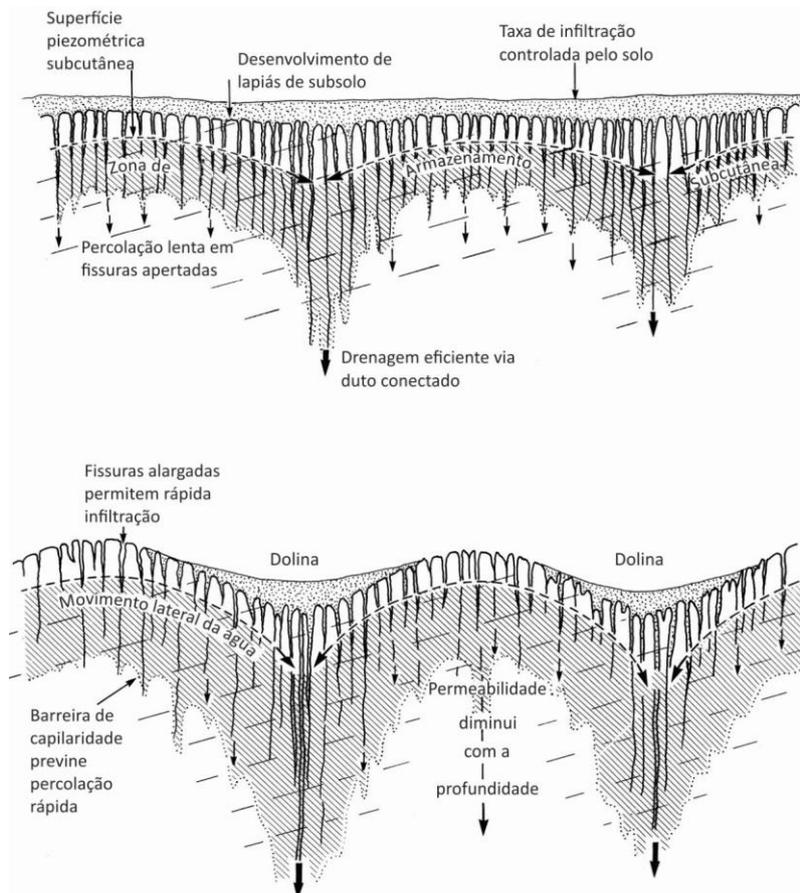
| Tipologia de dolinas por autores | Sweeting (1972) | Bögl (1980) | Jennings (1985) | White (1988) | Williams (2004) | Whaltham et al. (2005) | Ford & Williams (2007) | Beck (2012) | Sauro (2012) | Gutiérrez et al. (2014) | |
|--|--|-------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------|--|---|---|---|
| | Dissolução | Dissolução | Dissolução | Dissolução ¹ | Dissolução | Dissolução | Rebaixamento | Dissolução | Rebaixamento ⁵ | Dissolução ⁵ | |
| Dolinas de dissolução | | | | | | | Ponto de recarga | Ponto de recarga ⁵ | | | |
| Dolinas de colapso em rocha | Solúvel | Colapso | Colapso (rápido) | Colapso | Colapso ¹ | Colapso ² | Colapso | Colapso ³ | Colapso de camada de rocha | Colapso ⁴ | |
| | Não solúvel | Subsidência | Subsidência (lenta) | Colapso por carste subjacente | | Colapso de rocha sobrejacente ³ | Colapso de rocha sobrejacente | Colapso de rocha sobrejacente ² | | Colapso de rocha sobrejacente ⁴ | |
| Dolina de subsidência de cobertura | Colapso | | | | Colapso de cobertura ² | Queda de cobertura ³ | Queda de cobertura ⁴ | Queda de cobertura ² | Colapso de cobertura ⁴ | Colapso de cobertura ⁴ | |
| | Sufusão | Aluvial | Aluvial | Subsidência | Subsidência de cobertura ² | Sufusão e subsidência de cobertura | Sufusão ⁴ | Subsidência e sufusão | Subsidência de cobertura ⁴ | Cobertura ⁶ | Sufusão de cobertura ⁴ |
| Depressão de subsidência (cobertura/rocha) | | | | | | Soterrada | Soterrada | Soterrada | Embrionária | | |
| | Acomodamento (evaporitos principalmente) | | | | | Depressão regional de subsidência | | | Subsidência (acomodamento) ⁶ | Acomodamento de rocha sobrejacente ⁴ | Acomodamento de rocha sobrejacente ⁴ |
| Outros tipos | | | | | Dolina de sumidouro aluvial | | | | Interseção (paleocarste) ⁶ | Acomodamento cobertura ⁴ | Acomodamento na própria rocha ⁴ |

A DISSOLUÇÃO ABRINDO CAMINHO

As depressões cársticas possuem íntima relação com os processos hidrológicos e dissolutivos que ocorrem em subsuperfície desencadeando outros processos erosivos. Segundo Klimchouk (1995), o desenvolvimento de dolinas na superfície se deve principalmente aos mecanismos de morfogênese do epicarste, desde que a recarga autogênica e difusa prevaleça em detrimento à corrosão por concentração de fluxos em superfície através dos pontos de recarga. Conforme a figura elaborada por Williams (1983), observa-se a fundamental importância da zona epicárstica neste processo (Figura 4). À medida que a água enriquecida com ácidos carbônicos da atmosfera e do solo percola pelo pacote rochoso fraturado, a dissolução vai então alargando gradativamente as descontinuidades. Este processo epicárstico é especialmente mais importante entre os 3 e 10 metros de profundidade, visto que a solução antes acidulada vai entrando em equilíbrio e perdendo seu poder corrosivo (WILLIAMS, 1983; 2008; KLIMCHOUK, 1995; KLIMCHOUK et al., 1996; FORD e WILLIAMS, 2007; JONES e WHITE, 2012). A maior parte da água não pode escoar livremente para baixo em virtude do afinilamento destas aberturas verticais, criando o que Williams (1983) chamou de barreira de capilaridade, responsável pela manutenção de um aquífero suspenso cujo excedente hídrico passa então a movimentar-se lateralmente. A presença de setores mais fraturados ou alargados em subsuperfície criam zonas preferenciais de escoamento vertical, aumentando a permeabilidade e a partir disso, num processo de *feedback* positivo, há um aumento da dissolução e consequente perda de material para setores mais profundos da zona vadosa, criando assim um ponto preferencial de desenvolvimento de uma dolina a partir do rebaixamento do aquífero epicárstico. Tais depressões seriam formadas por fluxos centrípetos em pontos focados de grande permeabilidade no epicarste, explicando assim o padrão preferencialmente circular destas feições. Em convergência a este modelo, Klimchouk et al. (1996) enfatizam o desenvolvimento oculto de condutos verticais, ou *hidden shafts* do inglês, que ocorrem na base da zona epicárstica normalmente sem conexão direta com a superfície, mas de grande importância para a concentração dos fluxos, direcionamento da espeleogênese e formação de depressões.

Outro processo importante de desenvolvimento por dissolução, descrito por Ford e Williams (2007) e Sauro (2012), ocorre pela iniciação de dolinas por pontos de recarga, quando há a captura da drenagem superficial em camadas não solúveis (água alogênica) por sistemas de proto cavernas subjacentes em camadas carstificáveis, como calcários. O entalhe fluvial pode criar uma janela de exposição para a rocha solúvel, a partir da qual passa a ocorrer a infiltração pontual em determinadas estruturas favoráveis e alargamento de um proto conduto. O avanço vigoroso do entalhe nos calcários por cursos principais adjacentes estabelece diferenciações altimétricas entre a recarga e descarga, e se a dissolução nas estruturas da rocha permite a conexão entre ambas as áreas, a maior permeabilidade leva ao aumento da remoção dos materiais químicos e clásticos. A partir do momento que se estabelece a interconexão entre este ponto de recarga alogênica para a descarga, se origina então gradativamente uma dolina de drenagem centrípeta, logo, circular.

Figura 4 – O epicarste, ou zona subcutânea, representado por Williams (1983), mostrando a importância intrínseca desta zona morfogenética na evolução de dolinas de dissolução.



Fonte – adaptado da figura apresentada por WILLIAMS (2008).

Com base nestes processos espeleogenéticos que ocorrem no epicarste e pontos de recarga, outros processos passam a operar em contribuição à diferenciação morfológica das depressões que se manifestam na superfície. Segundo Beck (2012), as diversas formas de dolinas em carbonatos são determinadas por apenas dois mecanismos principais, sendo o primeiro o transporte de material superficial através de canais alargados pela dissolução e o segundo o colapso de camadas acima (teto) de grandes cavidades. A evolução e interconexão dos aparatos subterrâneos de drenagem com a superfície favorecem o fluxo livre da água e o transporte de materiais. O primeiro e mais importante deles é o próprio mineral solúvel (CaCo_3 nos carbonatos), dando origem às depressões mais puras no carste, as dolinas de dissolução, em geral com pouca ou nenhuma cobertura sobre as rochas, que se apresentam preferencialmente desnudas. A dissolução alarga as discontinuidades, desmonta e separa os blocos de rocha, podendo levar à instabilidade de camadas superiores ou vazios subsuperficiais. Por outro lado, coberturas superficiais como solo e sedimentos, quando existentes, passam a ser capturados para o subterrâneo de formas diferenciadas, a depender da coesão dos materiais, como será tratado a seguir.

SUBSIDÊNCIAS LENTAS DE MATERIAL

A presença de coberturas móveis sobre rochas carstificadas pode levar ao processo de erosão vertical através de juntas alargadas ou condutos de dissolução subjacentes, como já demonstrado na discussão sobre epicarste, num processo misto entre dissolução e erosão mecânica. Tal processo ocorre de forma gradual, lenta, através da infiltração da água nestas estruturas e é chamada de subsidência (BECK, 2012). Alguns autores chamam tais dolinas de aluviais (CVIJIĆ 1890 apud FORD 2007; BÖGLI, 1980) ou dolinas de “sufusão” (FORD e WILLIAMS, 2007). Este processo é especialmente importante em áreas de espessas camadas de material que recobre as rochas

cársticas. Tais materiais podem ser solos residuais (argila de descalcificação p. ex.), sedimentos (colúvios, alúvios, etc.) ou mesmo material intemperizado *in situ* de outras rochas que recobrem a área. Dolinas de subsidência lenta de cobertura são mais comuns quando o material apresenta uma menor coesão (silto-arenosos, por exemplo), permitindo o transporte gradual e não repentino.

Vários autores relacionam este processo de subsidência que ocorre em materiais inconsolidados através da infiltração gradual de água e a lavagem de sedimentos finos por condutos presentes na base das depressões como “dolina de sufusão”, ou “*suffosion dolines*” (WILLIAMS, 2004; WHALTHAM et al. 2005; FORD e WILLIAMS, 2007; GUTIERREZ et al. 2014). Possivelmente pela falta de uma tradução mais adequada para o português, no Brasil convencionou-se a adotar o termo dolina de subsidência ou dolina aluvial (p. ex. PILÓ, 2000; BIGARELA et al., 1994) para este mesmo processo descrito para as dolinas de sufusão. Conforme a síntese dos termos aqui apresentada (Tabela3) verifica-se que não há de fato uma uniformização da terminologia utilizada para classificar esta tipologia de dolina em que processos mecânicos de erosão auxiliam a conformação da depressão além da dissolução. Utilizar apenas o termo subsidência para este processo pode causar confusão uma vez que o conceito é mais amplo e utilizado como um descritor inicial para outros processos. Gutierrez et al. (2014) utilizam o termo subsidência coletivamente para todos os demais tipos específicos de dolinas, à exceção das dolinas de dissolução.

Ford e Williams (2007), por exemplo, consideram que dolinas de subsidência ideais seriam aquelas que se formam pelo acomodamento gradual da superfície causado pela dissolução das camadas subjacentes sem rupturas ou fraturamentos significativos, apesar de que na prática haja uma continuidade natural com ocorrências de eventuais quebras e deformações a depender da coesão da rocha/solo. Williams (2004) chama estas feições de depressões regionais de subsidência, mais suaves e ligadas em geral aos evaporitos, grandes demais para serem denominadas de dolinas. De forma parecida Gutierrez et al. (2014) defendem que diferentemente de outras rochas mais rúpteis, como os calcários, os evaporitos apresentam um caráter mais dúctil, de flexionamento das camadas acima dos vazios, processo chamado em inglês de “*sagging*”, podendo formar grandes depressões na casa das centenas de metros de diâmetro. Sauro (2012) também propõe um tipo similar deste processo de acomodamento de rocha por subsidência através da dissolução de camadas inferiores solúveis recobertas por rochas insolúveis (arenitos p.ex.), gerando grandes depressões, as vezes com lagos. Entretanto este tipo de processo de subsidência ideal é mais relacionado a rochas evaporíticas e pouco comum no mundo, sobretudo no Brasil, apesar que em algumas regiões de carste recoberto por arenitos, como no Grupo Uruçua no oeste da Bahia, se notem grandes e suaves depressões, aparentemente deste tipo.

O desenvolvimento de uma proto dolina, com o alargamento das estruturas da rocha de forma a permitir o transporte de sedimentos clásticos forma um cone ou bacia que impõe um gradiente local e a captura preferencial de material para este ponto. Isso define a grosso modo a dolina de subsidência por sufusão já comentada. Entretanto, conforme descreve Beck (2012), quando as estruturas carstificadas da rocha são menos efetivas na condução dos sedimentos para o subterrâneo que a produção superficial dos mesmos, a dolina é paulatinamente preenchida, formando primeiramente depressões rasas, pântanos, pequenos lagos e acúmulo de material orgânico. O completo preenchimento da depressão define o que é chamado por alguns autores como dolina soterrada, sendo no Brasil também conhecidas por dolinas colmatadas. Sauro (2012), ao utilizar-se dos termos “criptodolina embrionária” ou “dolina de subsolo”, propostos por Nicod (1975, *apud* SAURO, 2012), ressalta que tais feições podem armazenar paleosolos funcionando como armadilhas de sedimentos desde o início de sua formação, podendo nunca ter formado depressão superficial significativa (Figura 2). De toda maneira, tais dolinas soterradas/colmatadas, de difícil identificação, podem continuar operando de forma invisível em subsuperfície, como um mecanismo erosivo típico do carste, que denota sua maior fragilidade e risco.

OS COLAPSOS (SOLO E ROCHA)

Os colapsos ocorrem por conta da presença e migração vertical de vazios subterrâneos até a superfície, seja na própria rocha solúvel, subjacente em rochas não solúveis ou no solo. Alguns processos podem desencadear os colapsos na rocha, como por exemplo: o contínuo alargamento freático e aumento da cavidade até que o suporte mecânico das camadas superiores se perca; a drenagem de câmaras anteriormente alagadas e consequente perda de flutuabilidade da rocha, ou;

a dissolução preferencial em zonas vadasas acima do teto de cavernas, através de fissuras, acamamento e condutos verticais, fragilizando o pacote rochoso (WHITE e WHITE, 2000; FORD e WILLIAMS, 2007). Palmer (2007) concorda que a drenagem de passagens subterrâneas antes alagadas e a eliminação do fator fluatibilidade leva ao acréscimo de peso efetivo no teto das cavernas, lembrando que o calcário possui densidade de $2,7\text{g/cm}^3$, mas em condições freáticas esta densidade equivaleria a apenas a $1,7\text{gr/cm}^3$. Segundo o mesmo, a progradação do colapso de camadas de teto em cavernas pode alcançar centenas de metros para cima, ultrapassando inclusive camadas de rocha não solúveis e por fim atingindo a superfície. Estas seriam as dolinas de colapso por carste subjacente (JENNINGS, 1985) ou dolinas de colapso de rocha sobrejacente (não solúvel), do inglês, *caprock* (WILLIAMS, 2004; WALTHAM et al., 2005; FORD e WILLIAMS, 2007). Beck (2012) ressalta o componente misto nestas rupturas, ou seja, o alargamento cada vez maior da caverna e ao mesmo tempo a dissolução superficial diminuindo a espessura da camada superior até que ocorra a convergência deste processo, gerando o colapso.

Processos por colapso também atingem materiais inconsolidados presentes na superfície de rochas carstificadas, especialmente solo, sedimentos ou material intemperizado (regolito). Segundo Beck (2012), quando o material de cobertura se apresenta mais coeso (silto-argiloso, p.ex.), o vazio criado pela drenagem e erosão subsuperficial pode propagar para cima na forma de um arco através de conduto vertical (*shaft*). Com o tempo este mecanismo leva ao aumento do vazio e o material que colapsa neste processo pode se acumular na base ou ser transportado pelo sistema de drenagem oculta. A migração vertical deste processo pode atingir uma camada ainda mais coesa (argila p. ex.) e causar uma temporária resistência, levando por outro lado ao alargamento do vazio em detrimento da verticalização. Se este processo ocorre até próximo à superfície, uma camada fina e pouco resistente pode não suportar mais o seu próprio peso e colapsar abruptamente, formando então uma dolina de colapso em cobertura. Se o processo de colapso no meio rochoso raramente é abrupto e catastrófico (PALMER, 2007), no solo este processo pode ser bem dinâmico e causar danos consideráveis em estruturas como estradas e edificações (BECK, 2012). Por este motivo White (1988) considera as dolinas de colapso em rocha e de dissolução feições permanentes da paisagem na escala de tempo humano por sua lenta evolução, ao passo que as de subsidência e colapso de cobertura seriam feições dinâmicas, que podem se formar instantaneamente, em horas ou dias.

Estes processos de colapso descritos acima podem ocorrer, tanto na rocha como especialmente em materiais inconsolidados em função da variação do nível do aquífero local. Segundo Ford e Williams (2007), a variação sazonal do aquífero entre períodos úmidos e secos além das inundações temporárias pelo sifonamento de condutos em eventos de fortes chuvas podem causar mudanças repentinas no padrão de estresse de maciços carstificados ou no solo. Variações do nível do aquífero, segundo os autores citados, podem alcançar em algumas regiões até 100 metros verticais. Quando materiais inconsolidados são afetados por essa variação, especialmente quando do rebaixamento do aquífero, uma compressão pode ocorrer e levar tanto à subsidência como ao colapso, a depender da coesão dos materiais, como já mencionado. Um exemplo deste fenômeno é descrito por Hyatt e Jacobs (1996), quando 312 dolinas de colapso se formaram em decorrência de uma única inundação que se aproximou do intervalo de recorrência de 500 anos na bacia do rio Flint, Geórgia (EUA). Considerando que tais fenômenos ocorrem frequentemente influenciados por processos antrópicos, como bombeamento de água subterrânea ou alterações na configuração hídrica superficial, e considerando também o risco para áreas edificadas, infraestruturas e perda de vidas humanas, vários trabalhos se dedicam a estes processos em áreas cársticas (VENI et al., 2001; LOLCAMA et al., 2002; DELLE ROSE et al., 2004; WALTHAM e FOOKES, 2005; CARAMANNA et al., 2008; GUTIERREZ et al., 2008; 2014; DEL PRETE et al., 2010; COOPER et al., 2011; HEIDARI et al., 2011; SISKI et al., 2016).

OUTROS PROCESSOS GERADORES DE DEPRESSÕES FECHADAS

No trabalho de Ford e Williams (2007) observa-se uma parte dedicada a discussão de feições cársticas em outras tipologias de rocha, sobretudo as siliciclásticas, nas quais também ocorrem

feições correspondentes ao carste carbonático, como drenagens subterrâneas, cavernas, lapíás, formas residuais e, em especial, depressões fechadas. Entretanto, os processos são um pouco diferentes, por isso aqui enquadradas em outras tipologias. Muito da discussão neste âmbito paira entre a preponderância de processos dissolutivos versus a ação mecânica de remoção de materiais, como *piping*. Embora minerais como a sílica ou os feldspatos sejam menos solúveis do ponto de vista geoquímico, em condições tropicais úmidas estes processos podem ocorrer de forma mais acentuada, sobretudo através de grandes sistemas de descontinuidades, como a intercessão entre fraturas e acamamento da rocha. Desta maneira podem se instalar processos epicársticos incipientes contribuidores na formação de um carste pouco evoluído se comparado ao carbonático, com decisiva contribuição de fatores mecânicos de erosão. Como exemplo, o intemperismo através dos interstícios promove a transformação de quartzitos em arenitos neoformados (“*neosandstone*”, MARTINI, 2004), com a liberação dos grãos para o transporte físico. A menor propensão à dissolução e infiltração para o subterrâneo leva por consequência a ambientes predominantemente fluviais em transição ao fluvio-carste. O intemperismo prévio e prolongado juntamente com a inserção de drenagens com grande gradiente (borda de planaltos p.ex.) favorecem a configuração de tais ambientes.

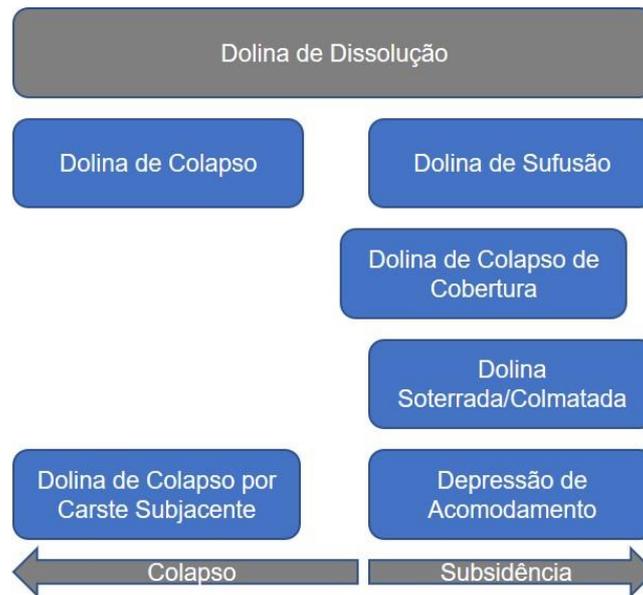
Igualmente, dolinas em ambientes siliciclásticos por consequência são muito observadas em áreas de relevo mais acentuado, como bordas de planaltos. Podem ocorrer dolinas de subsidência (sufusão) e colapsos relacionados a cavernas próximas a superfície. Segundo Ford e Williams (2007), a ocorrência de dolinas de dissolução em tais ambientes parece ser inexistente, visto que não há o desenvolvimento completo de um epicarste, conforme já demonstrado para dolinas carbonáticas, embora os processos dissolutivos ocorram e tomem parte importante neste processo.

Em alguns trabalhos são citados outros processos de formação de dolinas, desde as induzidas pelo homem já relatadas ou até mesmo dolinas desenvolvidas por processos de *piping* profundo, como as descritas para a Itália por Caramanna et al. (2008), em que a propagação de vazios em grande profundidade em espessos depósitos fluviais parece ser induzida por eventos sísmicos e vulcanismo.

CLASSIFICAÇÃO AJUSTADA

Após realizar a revisão detalhada das classificações de dolinas entre os vários autores arrolados (Tabela 3), foi possível ajustar uma síntese que será descrita a seguir. Algumas tipologias de dolinas são citadas por todos, como as de dissolução e colapso em rocha solúvel. Outras terminologias apresentam aplicações mais complexas, sobretudo as que envolvem o termo subsidência. Desta forma foi necessário resumir esta interpretação da literatura, sobretudo com base na diferenciação dos mecanismos e produtos resultantes.

O primeiro tipo, as “dolinas de dissolução”, caracterizam-se por pouca ou nenhuma cobertura, normalmente encontrada nas partes altas do relevo cárstico, como planaltos ou morrotes desnudos e lapiazados, nas quais a remoção dos materiais inconsolidados é mais acentuada pelo epicarste raso. Um segundo tipo de dolina ocorreria decorrente dos colapsos de rocha no teto de grandes cavernas no subterrâneo, seja na própria litologia solúvel ou outra sobrejacente, insolúvel, resultando em dois subtipos: “dolina de colapso em rocha solúvel” e “dolina de colapso por carste subjacente”. Já as dolinas de subsidência de cobertura podem se subdividir entre: “dolina de subsidência de cobertura por colapso”; “dolina de subsidência de cobertura por sufusão” e; “dolina de subsidência de cobertura por soterramento”. Entre as duas primeiras de subsidência de cobertura observa-se um corte temporal abrupto ou gradual, respectivamente, em função da coesão dos materiais móveis. O tipo “soterrada” (ou colmatada) pode ter uma taxa de transferência de materiais para o subterrâneo inferior a seu preenchimento superficial, mas ainda assim ativa, embora nem sempre visível na superfície. Um tipo final, pouco recorrente no Brasil, mais atribuídas a rochas evaporíticas, seria a “depressão de subsidência por acomodamento”, que geram grandes e suaves dolinas e ocorrem por dissolução interestratal podendo afetar rochas ou coberturas. Dolinas mais específicas são temporariamente acomodadas no grupo “outros tipos”. Uma simplificação desta interpretação pode ser observada na figura a seguir (Figura 5).

Figura 5 – Tipos de dolina simplificado. Em cinza os processos dominantes.

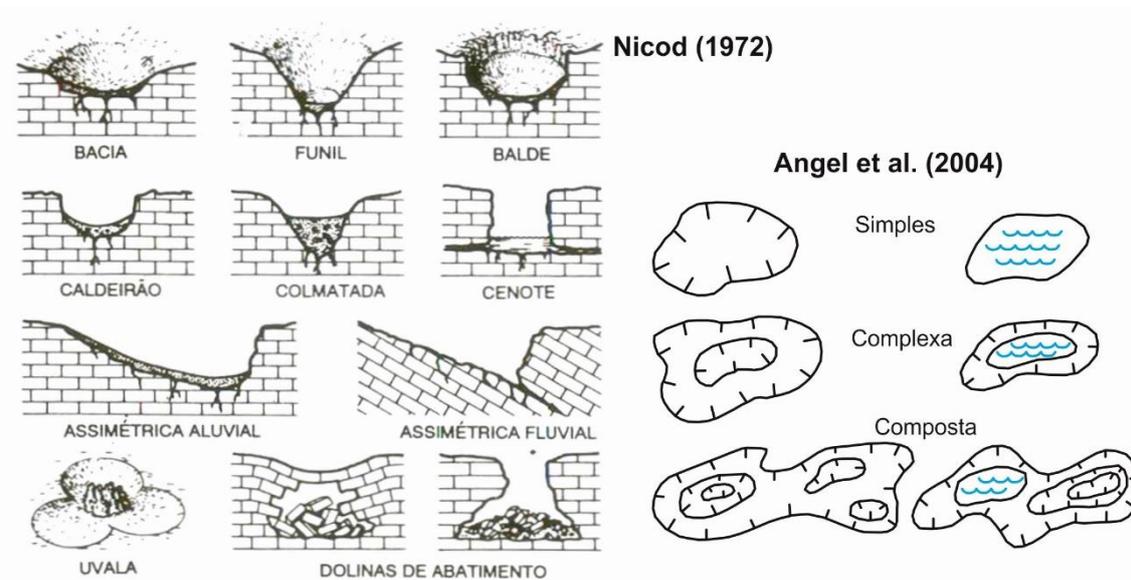
MORFOLOGIA DAS DEPRESSÕES E ANÁLISES MORFOMÉTRICAS/ESPACIAIS

Apesar das dolinas terem a tendência de possuir formas circulares a semicirculares quando vistas em planta e formatos de funil, bacia ou balde quando vistas em perspectiva, na natureza podem ser encontradas feições dos mais variados formatos e tamanhos, algumas medindo poucos metros de diâmetro ou profundidade, outras contabilizando medidas superiores a várias centenas de metros. A forma e tamanho das depressões observadas em superfície é função dos processos de gênese e evolução. Conforme Kranjc (2013), alguns autores classificam dolinas em função da sua origem, outros em função da forma. Por este motivo a terminologia eslovena para dolinas envolve 14 tipos diferentes, sendo que outras tentativas de classificação alcançam dezenas de tipologias adicionais. Quanto mais elementos são postos em análise, como estágio de evolução, tipo de sedimentos de recobrimento e fatores climáticos, mais tipologias ou subtipologias de dolinas podem ser criadas.

Segundo Sauro (2012), apesar do processo de dissolução ser o mais importante na formação de uma dolina, outros processos operam em conjunto no sentido de modelar a depressão, tais como o intemperismo e formação de solo, a captura de sedimentos, o escoamento superficial, processos de encosta e de evacuação dos materiais acumulados em seu interior. Apesar dos formatos tridimensionais mais comuns se apresentarem entre tigela/bacia (aproximadamente hemisférico), funil (aproximadamente cônico) e de poços (aproximadamente cilíndrico), ocorrem feições truncadas, de fundo chato, estrelares ou irregulares e de contornos acentuados, como aquelas desenvolvidas em rocha exposta. As tipologias morfológicas mais essenciais geralmente são associadas a processos de gênese e evolução: tigela/bacia e funil por dissolução e subsidência lenta de materiais (sufusão); poços/balde de formato cilíndrico por colapsos de rocha ou solo; estrelares, poligonal ou *cockpit* remodeladas por canais superficiais de escoamento; e irregulares de feições acentuadas por dissolução em rocha nua.

São observadas algumas classificações de dolinas baseadas puramente no aspecto morfológico, seja em planta ou seção. Angel et al. (2004) identificaram três tipos principais quando observadas em planta, dividindo-se entre simples, complexa (com uma sub dolina mais profunda) e composta (dolinas coalescidas) que podem ou não conter água em seu interior. O esquema adaptado por Kholer (1995) a partir do desenho apresentado originalmente por Nicod (1972, *apud* KHOLERr, 1995) se sustenta basicamente na configuração morfológica em secção (Figura 6).

Figura 6 – Tipologia morfológica de dolinas apresentada por Kholer (1995), adaptada de Nicod (1972) e classificação morfológica de Angel et al. (2004) em planta.



Alguns tipos de dolinas com formatos de poços cilíndricos apresentam água em seu interior são chamadas de cenotes e têm seus melhores exemplares na Península de Yucatán, no México. Sauro (2012) descreve sua formação como por colapsos de sistemas de cavernas submersas que sofrem variações do nível do aquífero em associação à eficiente dissolução por mistura de águas salobras (marinhas). Entretanto, essa tipologia de formato também é empregada para descrever dolinas circulares de bordas escarpadas em rocha com lagos internos, usualmente correspondente ao nível do aquífero (PALMER, 2007), que ocorrem mesmo em regiões interiores.

Em zonas tropicais úmidas, onde o excesso de pluviosidade leva ao escoamento superficial, uma vez que a permeabilidade subterrânea não consegue dar vazão ao grande aporte de água, ocorre a instalação de canais superficiais efêmeros que obliteram os formatos dissolutivos iniciais, geralmente circulares. Estes canais centrípetos dão formas estelares as dolinas, sendo chamados originalmente de “cockpits” na Jamaica. Este tipo de feição pode ocorrer disseminadamente na paisagem dando forma ao carste poligonal, já descrito anteriormente. Karmann e Ferrari (2002) descrevem uma das mais importantes áreas de carste poligonal do Brasil, na região do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira- PETAR/SP, onde depressões com amplitudes altimétricas de até 300 metros se contrastam com outras das demais áreas cársticas do país.

Em áreas de rocha densamente fraturadas tendem a ocorrer mais dolinas e de tamanhos menores que em maciços menos fraturados, onde ocorrem feições maiores e com menor frequência (WILLIAMS, 2004). A distribuição de dolinas, portanto, é altamente dependente da estrutura geológica. Sauro (2012) cita que dolinas podem ocorrer individualmente ou em populações de tamanhos variados, com até 200/ km². A inclinação da superfície condiciona a maior ou menor densidade de ocorrências, sendo que em superfícies inclinadas a possibilidade é menor que em superfícies planares. Ele argumenta que dois tipos principais de planaltos cársticos ocorrem em função da distribuição de dolinas, o individual (mais comum) e o chamado sistema favo de mel (*honeycomb*), havendo, entretanto, situações intermediárias entre os tipos. Também existe forte relação entre a ocorrência e alinhamentos de dolinas com as estruturas do pacote rochoso como linhas de falha, ou a intersecção entre duas ou mais fraturas, condicionando muitas vezes o centro da depressão. Para Ford e Williams (2007) a questão da distribuição difere entre densidade de feições por área (nº/km²) e sua organização espacial (isoladas, agrupadas, uniformemente distribuídas e randômicas na área). Quando ocorrem de forma contínua e justapostas na superfície cárstica, como no carste poligonal, o padrão é chamado de “caixa de ovos” pelos autores.

Análises morfométricas e de distribuição de dolinas são ferramentas utilizadas há bastante tempo para interpretações evolutivas do carste, comparações entre regiões diferentes sem fatores subjetivos e para subsidiar análises ambientais ligadas ao complexo sistema hidrológico. Conforme

Ford e Williams (2007), o grande valor de análises morfométricas minuciosas no carste é que ressaltam, através de dados quantitativos, aspectos inesperados e propiciam novas hipóteses. Trabalhos detalhados sobre o tema são desenvolvidos há bastante tempo, destacando-se estudos como o de Williams (1972) que identificou padrões morfológicos antes considerados caóticos no carste de Nova Guiné; Day (1976) que estudou depressões pouco profundas no carste tropical da Jamaica e realizou analogias com feições similares em clima temperado; Bondesan et al. (1992) que sumarizaram os vários parâmetros utilizáveis para análises morfométricas de dolinas e discutiram a questão do processamento destes dados e a significância de análises estatísticas correlatas ao tema; e Denizman (2003) que identificou uma grande quantidade de dolinas em uma área igualmente extensa na Flórida e foi um dos primeiros trabalhos realizados com o auxílio sistemas de informação geográfica (SIG), que acelerou as análises e reduziu potenciais erros humanos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde Cvijić, no final do século XIX, inúmeras denominações foram sendo criadas e atribuídas a tipologias específicas do carste, numa tentativa de encontrar padrões relacionáveis a este complexo sistema. A dificuldade de classificação de paisagens cársticas de evolução complexa, com influência de inúmeros fatores externos e a impossibilidade de uma tipologia genética universal favoreceu a adoção no Brasil de classificações mais descritivas, entre feições superficiais (exo) e subterrâneas (endo). Entretanto, algumas abordagens internacionais mais recentes, pós ano 2000, vêm ressaltando especialmente os processos, nem sempre visíveis, que podem ou não resultar em feições típicas, como as dolinas. Tais abordagens destacam os processos espeleogenéticos, muito associados a dinâmica hidrológica e subterrânea do carste. Nesta presente revisão foi possível reunir algumas propostas de classificação do carste e rever mecanismos importantes, responsáveis pela diferenciação entre tais tipos de paisagens. Futuros trabalhos de caracterização regional/local do carste poderiam, assim, qualificar mais detalhadamente as diferenciações encontradas em suas respectivas áreas de estudo.

Por fim, em relação às dolinas, também se observa a dualidade entre classificações genéticas e morfológicas. Entretanto, na natureza ocorrem fatores intervenientes que dificultam a classificação objetiva, por haver uma mistura tanto de formas como processos. As classificações genéticas analisadas mostram certo descompasso de terminologias, utilizadas de formas diferentes por determinados autores. Por este motivo esta revisão buscou realizar uma síntese ajustada das propostas já elaboradas por diversos trabalhos de forma que se possa uniformizar a aplicação da nomenclatura. A distinção entre depressões cársticas apenas pelo formato, apesar de mais objetiva, pode implicar em perdas de informações acerca da evolução ambiental. Neste sentido, em próximos trabalhos pretende-se adotar as tipologias genéticas aqui resumidas em associação com análises morfológicas para melhor caracterização dos ambientes cársticos sob análise.

REFERÊNCIAS

- ANGEL, J. C.; NELSON, D. O.; PANNO, S. V. Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 66, n. 1, p. 9–17, 2004.
- AULER, A. S.; KLIMCHOUK, A.; BEZERRA, F. H. R. B.; CAZARIN, C. L.; ENES-SILVA, R.; BALSAMO, F. Origin and evolution of Toca da Boa Vista and Toca da Barriguda cave system in north-eastern Brasil. In: KLIMCHOUK, A.; PALMER, A.; WAELE, J. D.; AULER, A. S.; AUDRA, P. (Eds.). **Hypogene karst regions and caves of the world**. [s.l.] Springer, 2017. p. 827–840. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53348-3_56
- BAKALOWICZ, M. Epikarst. In: WHITE, W. B.; CULVER, D.C. (Eds.), **Encyclopedia of Caves**. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. pp. 284-288. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383832-2.00038-4>
- BAKALOWICZ, M. Epikarst processes. In SHRODER, J. (EDITOR IN CHIEF), FRUMKIN, A. (Ed.) (Org.). **Treatise on Geomorphology**. San Diego, CA: Elsevier Inc, 2013, v. 6, p. 164–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00100-7>
- BECK, B. Soil piping and sinkholes failures. In: WHITE, W. B.; CULVER, D.C. (Eds.), **Encyclopedia of Caves**. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. pp.718-723

- BIGARELLA, J. J.; BECKER, R. D.; PASSOS, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**: Fundamentos geológico-geográficos. 1ª. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1994. 425 p. v. 1.
- BÖGLI, A. **Karst hydrology and physical speleology**. Berlin: Springer, 1980. 284p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-67669-7>
- BONDESAN, A.; MENEGHEL, M.; SAURO, U. Morphometric analysis of dolines. **International Journal of Speleology**, v. 21, p. 1–55, 1992. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.21.1.1>
- CAHALAN, M. D.; MILEWSKI, A. M. Sinkhole formation mechanisms and geostatistical-based prediction analysis in a mantled karst terrain. **Catena**, v. 165, p. 333–344, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.010>
- ĆALIĆ, J. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. **Geomorphology**, v. 134, p. 32–42, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.029>
- CARAMANNA, G; CIOTOLI, G; NISIO, S. A review of natural sinkhole phenomena in Italian plain areas. **Nat Hazards**, v. 45, n. 2, p. 145–172, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9165-7>
- COOPER, A. H.; FARRANT, A. R.; PRICE, S. J. The use of karst geomorphology for planning, hazard avoidance and development in Great Britain. **Geomorphology**, v. 134, n. 1–2, p. 118–131, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.004>
- DAY, M. The morphology and hydrology of some Jamaican karst depressions. **Earth Surface Processes**, v. 1, p. 111–129, 1976. <https://doi.org/10.1002/esp.3290010203>
- DELLE ROSE, M; FEDERICO, A; PARISE, M. Sinkhole genesis and evolution in Apulia, and their interrelations with the anthropogenic environment. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 4, p. 747–755, 2004. <https://doi.org/10.5194/nhess-4-747-2004>
- DEL PRETE, S.; IOVINE, G.; PARISE, M.; SANTO, A. Origin and distribution of different types of sinkholes in the plain areas of Southern Italy Sossio. **Geodinamica Acta**, v. 23, n. 1–3, p. 113–127, 2010. <https://doi.org/10.3166/ga.23.113-127>
- DENIZMAN, C. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwanee River basin, Florida. **Journal of cave and karst studies**, v. 65, n. 1, p. 29–35, 2003.
- FORD, D. Karst. In: Gunn, J. (Ed.) **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 1017–1020.
- FORD, D. Jovan Cvijić and the founding of karst geomorphology. **Environmental Geology**, v. 51, p. 675–684, 2007. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0379-x>
- FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. **Karst Geomorphology and Hydrology**. London: Unwin Hyman, 1989. 601 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-7778-8>
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Second ed. Chichester: Wiley, 2007. 562p. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- GILLIESON, D. **Caves. Processes, Development, Management**. Oxford, England: Blackwell. 1996. 324p. <https://doi.org/10.1002/9781444313680>
- GUTIÉRREZ, F.; GUERRERO, J.; LUCHA, P. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. **Environmental Geology**, v. 53, p. 993–1006, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0727-5>
- 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. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>
- HEIDARI, M.; KHANLARI, G. R.; TALEB BEYDOKHTI, A. R.; Momeni, A. A. The formation of cover collapse sinkholes in North of Hamedan, Iran. **Geomorphology**, v. 132, n. 3–4, p. 76–86, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.025>

- HYATT, J. A.; JACOBS, P. M. Distribution and morphology of sinkholes triggered by flooding following Tropical Storm Alberto at Albany, Georgia, USA. **Geomorphology**, v. 17, p. 305–316, 1996. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(96\)00014-1](https://doi.org/10.1016/0169-555X(96)00014-1)
- JENNINGS, J.N. **Karst Geomorphology**. Oxford: Basil Blackwell, 1985. 293p.
- JONES, W. K.; WHITE, W. B. Karst. In: WHITE, W. B.; CULVER, D.C. (Eds.), **Encyclopedia of Caves**. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. pp.430-438. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-383832-2.00061-X>
- KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 274p. <https://doi.org/10.11606/T.44.1994.tde-22042013-163755>
- KARMANN I.; FERRARI J. A. Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP - Sistemas de cavernas com paisagens subterrâneas únicas. In Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M.L.C. (eds.), **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. 1ª ed., vol. 1. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002 p. 401-413
- KLIMCHOUK, A. Karst morphogenesis in the epikarstic zone. **Cave and Karst Science**, v. 21, n. 2, p. 45–50, 1995.
- KLIMCHOUK, A. The typology of gypsum karst according to its geological and geomorphological evolution. **International Journal of Speleology**, v. 25, n. 3–4, p. 49–60, 1996. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.25.3.4>
- KLIMCHOUK, A.B. The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis. In: KLIMCHOUK, A.B.; FORD, D.C.; PALMER, A.N.; DREYBRODT, W. (editors) **Speleogenesis: evolution of karst aquifers**. Huntsville, Alabama: National Speleological Society, 2000. p. 91-99
- KLIMCHOUK, A. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. **Acta Carsologica**, v. 44/3, p. 289–313, 2015. <https://doi.org/10.3986/ac.v44i3.2996>
- KLIMCHOUK, A. B. Advances in understanding hypogene karst. In: STAFFORD, K. W.; VENI, G. (Eds.). **Hypogene Karst of Texas**. Austin: Texas Speleological Survey, 2018. p. 3–15.
- KLIMCHOUK, A. B.; SAURO, U.; LAZZAROTTO, M. “Hidden” shafts at the base of the epikarstic zone: a case study from the Sette Comuni plateau, Venetian Pre-Alps, Italy. **Cave and Karst Science**, v. 23, n. 3, p. 101–107, 1996.
- KLIMCHOUK, A.B.; FORD, D.C. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. In: KLIMCHOUK, A.B.; FORD, D.C.; PALMER, A.N.; DREYBRODT, W. (editors) **Speleogenesis: evolution of karst aquifers**. Huntsville, Alabama: National Speleological Society, 2000. p. 45–53
- KOHLER, H. C. Geomorfologia Cárstica. In: GERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 1995. p. 309-334.
- KRANJC, A. Classification of closed depressions in carbonate karst. In: SHRODER, J. (EDITOR IN CHIEF), FRUMKIN, A. (Ed.) (Org.). **Treatise on Geomorphology**. San Diego, CA: Elsevier Inc, 2013, v. 6, p. 104–111. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00125-1>
- LOLCAMA, J. L.; COHEN, H. A.; TONKIN, M. J. Deep karst conduits, flooding, and sinkholes: lessons for the aggregates industry. **Engineering Geology**, v. 65, p. 151–157, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00122-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00122-3)
- MARTINI, J. Silicate karst. In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 1385–1393
- PALMER, A. N. Geomorphic interpretation of karst features. In: LAFLEUR, R.G. **Groundwater as a Geomorphic Agent**. Boston: Allen & Unwin, 1984. p.173-209.
- PALMER, A.N. **Cave Geology**. Dayton: Cave Books, 2007. 454 p.

- PILÓ, L. B. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú - carste de Lagoa Santa, MG**. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998. 268p.
- 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>
- SAURO, U. Closed depressions in karst areas. In: WHITE, W. B.; CULVER, D.C. (Eds.), **Encyclopedia of Caves**. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. p.140-155
- SISKA, P. P.; GOOVAERTS, P.; HUNG, I. K. Evaluating susceptibility of karst dolines (sinkholes) for collapse in Sango, Tennessee, USA. **Progress in Physical Geography**, v. 40, n. 4, p. 579–597, 2016. <https://doi.org/10.1177/0309133316638816>
- VENI, G.; DUCHENE, H.; CRAWFORD, N. C.; GROVES, C. G.; HUPPERT, G. N.; KASTNING, E. H.; OLSON, R.; WHEELER, B. J. **Living with karst: a fragile foundation**. Environmental Awareness Series 4. American Geological Institute, 2001. 64p.
- WALTHAM, A. C.; BELL, F.; CULSHAW, M. **Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction**. Chichester: Praxis Publishing, 2005. 382 pp.
- WALTHAM, A C; FOOKES, P G. Engineering classification of karst ground conditions. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 3, n. 1, p. 2, 2005.
- WHITE, E. L.; WHITE, W.B. Breakdown morphology. In: KLIMCHOUK, A.B.; FORD, D.C.; PALMER, A.N.; DREYBRODT, W. (editors) **Speleogenesis: evolution of karst aquifers**. Huntsville, Alabama: National Speleological Society, 2000. p.427-429.
- WHITE, W. B. **Geomorphology and hydrology of karst terrains**. Oxford: Oxford University Press, 1988. 464p.
- WILLIAMS, P.W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. **Geological Society of America Bulletin**, v. 83, n. 3, p. 761–796, 1972. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83\[761:MAOPK\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83[761:MAOPK]2.0.CO;2)
- WILLIAMS, P. W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 61, p. 45–67, 1983. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(83\)90234-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(83)90234-2)
- WILLIAMS, P. Dolines In: GUNN, J. (Ed.) **Encyclopedia of Caves and Karst Science**. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 628–642.
- WILLIAMS, P. W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. **International Journal of Speleology**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2008. <https://doi.org/10.5038/1827-806X.37.1.1>
- ZWAHLEN, F. **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers: final report (COST action 620)**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 297p.

Recebido em: 27/08/2018

Aceito para publicação em: 23/11/2018

2.2 UM PANORAMA SOBRE MAPEAMENTOS DE DOLINAS NO BRASIL, FEIÇÕES ELEMENTARES DO CARSTE



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Um Panorama Sobre Mapeamentos de Dolinas no Brasil, Feições Elementares do Carste

Cristiano Fernandes Ferreira¹, Rogério Elias Soares Uagoda²

¹ Mestrando no programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília-UnB e Analista Ambiental do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, ICMBio/CECAV, Rodovia BR 450, km 8,5, via Epia, CEP: 70635-800, Brasília, Distrito Federal. (61) 2028-9792. cristiano.ferreira@icmbio.gov.br (autor correspondente). ² Dr. Pesquisador no programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília-UnB, Campus Universitário, Asa Norte, CEP: 70910-900, Brasília, Distrito Federal. (61) 3107-7264. rogeriouagoda@unb.br.

Artigo recebido em 29/05/2019 e aceito em 05/12/2019

RESUMO

O carste se desenvolve sobretudo pela ação da dissolução em subsuperfície, na interação da água com rochas solúveis, especialmente as carbonáticas. Apesar do processo de carstificação nem sempre se apresentar em superfície, a ocorrência de dolinas, feições consideradas características, indica maior proeminência desse fenômeno. Muitos trabalhos internacionais se dedicaram ao mapeamento de dolinas com objetivos diversos, como comparar o nível de carstificação e evolução dos ambientes onde estão inseridas, relacionar o desenvolvimento destas feições com estruturas geológicas ou realizar análises hidrológicas de caráter ambiental. Por outro lado, são poucos os trabalhos com esta temática realizados no Brasil, parte concentrada em regiões cársticas tradicionais, como o Vale do Ribeira-SP, Chapada Diamantina-BA e nos carbonatos de Minas Gerais, e os demais dispersos pelo país, muitos em rochas não carbonáticas. Neste sentido o objetivo deste artigo é realizar uma revisão dos trabalhos sobre mapeamento de dolinas, com enfoque nos aspectos morfométricos e quantificação, visando especialmente elaborar um primeiro panorama sobre como o tema é abordado no Brasil. Observou-se que a maior parte dos estudos nacionais alcançou resultados de frequência (n°/km^2) bastante inferiores aos identificados em estudos internacionais. Essa discrepância foi atribuída a alguns aspectos, como a adoção de fontes de dados inadequadas em escala abrangente, a escolha de áreas muito extensas para a análise ou de fato a investigação em áreas pouco propícias a ocorrência de dolinas.

Palavras chave: carste; dolina; densidade.

An Overview of Doline Mappings in Brazil, Karst's Elemental Features

ABSTRACT

Karst develops mainly by the action of dissolution in subsurface, in the interaction of water with soluble rocks, especially carbonates. Although the karstification process does not always appear on the surface, the occurrence of dolines, features considered characteristic, indicates a greater prominence of this phenomenon. Many international works have been devoted to the mapping of dolines with different objectives, such as comparing the level of karstification and evolution of the environments in which they are inserted, to relate the development of these features to geological structures or to perform environmental hydrological analyzes. On the other hand, there are few studies on this subject in Brazil, concentrated part in traditional karst regions such as Vale do Ribeira-SP, Chapada Diamantina-BA and carbonates of Minas Gerais, and the others scattered around the country, many in non-carbonate rocks. In this respect, the objective of this article is to review the work on doline mapping, with a focus on morphometric aspects and quantification, aiming in particular to elaborate a first overview about how the theme is approached in Brazil. It was observed that most of the national studies reached frequency results (n°/km^2) much lower than those identified in international studies. This discrepancy was attributed to some aspects, such as the adoption of inadequate data sources in a wide scale, the choice of very extensive areas for analysis or indeed the investigation in areas less favorable to the occurrence of dolines.

Keywords: karst; doline; density.

Introdução

O carste é caracterizado essencialmente pelos processos dissolutivos na interação da água com rochas propícias a esse processo, sobretudo os carbonatos. A dissolução ocorre

predominantemente em subsuperfície, notadamente relacionada à espeleogênese epigênica e hipogênica (Klimchouk, 2015) e pode ou não resultar em formas superficiais como

dolinas, lapíás, torres, vales cegos, entre outras feições notáveis e particulares. Processos cársticos podem operar no subterrâneo sem que sejam observados seus efeitos em superfície (Klimchouk e Ford, 2000; Ford e Williams, 2007; Klimchouk, 2015), especialmente em regiões de carste coberto, interestratal ou profundo. Entretanto, quando manifestado em superfície, os processos de carstificação configuram paisagens peculiares, consideradas endêmicas (Gutiérrez et al., 2014) ou únicas (Jones e White, 2012), fruto de complexas interações e processos, especialmente relacionados a dissolução.

O desenvolvimento característico do carste produz formas superficiais consideradas elementares e diagnósticas desses ambientes, como as dolinas. A importância hidrológica de concentração e conexão de fluxos entre a superfície e os sistemas cársticos subterrâneos confere às dolinas destacado significado em análises ambientais e de vulnerabilidade de aquíferos (Zwahlen, 2004). Alguns autores relacionam o desenvolvimento de dolinas de dissolução a processos eminentemente subterrâneos, especialmente ligados a uma importante zona morfogenética, o epicarste (Williams, 1983; Klimchouk, 1995), responsável pelo armazenamento e concentração de fluxos hídricos em pontos de discontinuidades verticais no maciço rochoso. Uma revisão recente sobre o desenvolvimento genético e morfológico de dolinas e suas classificações tipológicas foi realizado por Ferreira e Uagoda (2019).

Além da importância hidrológica e ambiental mencionadas, as dolinas representam feições indicadoras da espeleogênese mais acelerada nos locais onde ocorrem, denotando também destacado significado geomorfológico. Considerando esses relevantes aspectos o objetivo deste artigo é identificar e discutir os trabalhos desenvolvidos com essa temática no Brasil, especialmente aqueles que se dedicaram a quantificação de feições, análises morfométricas e de distribuição. A determinação de alguns parâmetros, especialmente a frequência, pode permitir a comparação entre áreas distintas, inclusive com diferentes regiões do mundo onde trabalhos similares são feitos há décadas. Neste artigo de revisão são apresentados os resultados da densidade de dolinas alcançados em diversos trabalhos, de forma a subsidiar análises comparativas sob este aspecto em estudos futuros. Além disso são trazidos à baila algumas estratégias de detecção, parâmetros morfométricos mais utilizados e os principais desafios encontrados na tarefa de mapeamento de dolinas, servindo, portanto, como uma baliza para trabalho futuro.

Análises morfométricas de depressões cársticas

As dolinas têm formatos e tamanhos muito variados e podem ocorrer de forma disseminada na paisagem, o que torna a sua detecção muitas vezes um desafio, especialmente feições suaves, pequenas ou sob a densa vegetação (Ferreira e Uagoda, 2020, no prelo). A partir da identificação e delimitação destas depressões é possível realizar uma série de análises morfométricas e de distribuição que podem subsidiar discussões a respeito da evolução da paisagem, principais condicionadores (climáticos, estruturais, litológicos, entre outros) e relacionar a aspectos ambientais, sobretudo hidrológicos ou de risco. Esse tipo de análise quantitativa retira o fator subjetividade nas análises comparativas entre regiões cársticas (Ferrari et al., 1998) e permite revelar dados e informações anteriormente não observadas, possibilitando novas hipóteses (Ford e Williams, 2007). Nesse sentido diversos trabalhos internacionais tratam sobre as formas clássicas ou uso de novas tecnologias de mapeamento de dolinas, análises morfométricas e interpretações ambientais correlatas (Denizman, 2003; Seale et al., 2008; Siart et al., 2009; Faulkner et al., 2013; Kovačić e Ravbar, 2013; Pardo-Igúzquiza et al., 2013; Zhu et al., 2014; Kobal et al., 2015; Aguilar et al., 2016; Gessert, 2016; Keskin e Yılmaz, 2016; Lee et al., 2016; Pardo-Igúzquiza et al., 2016; Telbisz et al., 2016; Wu et al., 2016; Zhu e Pierskalla, 2016; Čeru et al., 2017; Wall et al., 2017; Cahalan e Milewski, 2018; Chen et al., 2018; Harris et al., 2018; Hofierka et al., 2018; Öztürk et al., 2018).

No trabalho de Day (1976) que analisou com dados morfométricos depressões cársticas na Jamaica, o autor compara a densidade alcançada em sua área de estudo (2,85/km²) com outros trabalhos semelhantes em regiões diferentes do mundo, realizados desde 1941 (Tabela 1). O autor adverte que a densidade de dolinas não é um indicador útil para análise de desenvolvimento do carste se analisado isoladamente, ou seja, avalia apenas a frequência e não a intensidade da carstificação. Por isso análises morfométricas adicionais são muito importantes, como medidas planimétricas e verticais, além de dados detalhados colhidos em campo. Entretanto, esse índice (depressões/km²) pode ser usado como um primeiro parâmetro de comparação entre regiões diferentes, tendo sido usado na maior parte dos trabalhos pesquisados, inclusive com apresentação de variações internas às áreas de estudos (Bondesan et al., 1992; Karmann, 1994; Gao et al., 2005; Kovačić e Ravbar, 2013; Pepe e Parise,

2014). Os parâmetros morfométricos básicos mais colecionados em dolinas são: área; extensão dos eixos maiores e menores; alinhamento; profundidade; declividade; perímetro; circularidade; posição do sumidouro; e densidade de distribuição. Em locais onde predominam depressões com interferências de canais superficiais, como no carste tropical, pode ser

realizada a hierarquização de canais e demais medidas correlatas (comprimento e densidade da drenagem). Interpretações estatísticas posteriores são realizadas, destacando-se as análises de vizinhança próxima, relacionadas a distribuição espacial, assim como análises de lineamento, ligadas à inter-relação com a litoestrutura (Gao et al., 2005).

Tabela 1: densidade de dolinas (nº/km²) em diversos trabalhos, adaptados de Ford e Williams (1989) e Day (1976).

| FORD & WILLIAMS, 1989 | nº/km² | Autoria |
|---------------------------------------|--------------------------|---|
| Sierra de Segura (Espanha) | 18-80 | Lopez Lima (1986) |
| Guangxi (China, 3 áreas) | 1,96-6,51 | Fang (1984) |
| Yucatán, Carrillo Puerto Fm, (México) | 3,52 | |
| Yucatán, Chichen Itza Fm (México) | 3,15 | |
| Barbados | 3,5-13,9 | |
| Antígua | 0,39 | |
| Guatemala | 13,1 | Day (1978) |
| Belize | 9,7 | |
| Guadalupe | 11,2 | |
| Browns Town-Walderston Fm (Jamaica) | 12,5 | |
| Lares Fm (Porto Rico) | 15,3 | |
| Aguada Fm (Porto Rico) | 8,7 | |
| Waitomo (Nova Zelândia) | 55,3 | Pringle (1973) |
| Papua Nova Guiné (8 áreas) | 10-22,1 | Williams (1972) |
| DAY, 1976 | | |
| Jamaica | 2,85 | Day (1976) |
| Puddletown Heath, Dorset (Inglaterra) | 157,33 | |
| Southover Heath, Dorset (Inglaterra) | 99 | Sperling, Goudie, Stoddart and Poole (1975) |
| Malham, Yorkshire (Inglaterra) | 166 | |
| Breckland, Norfolk (Inglaterra) | 5,52 | |
| Artfjallet, Lapland (Suécia) | 57 | Hellden (1973) |
| Nova Guiné | 13,05-13,50 | Williams (1971) |
| Mendip (Inglaterra) | 70 | Ford (1963) |
| Shenandoah Valley, Virginia (EUA) | 0,58-1,64 | Hack (1960) |
| Gunung Sewu, Java (Indonésia) | 4,9 | |
| St. Louis, Missouri (EUA) | 2,21 | |
| Standingstone, Tennessee (EUA) | 0,65 | |
| Flórida (EUA) | 0,42-2,09 | Cramer (1941) |
| Bristol, Virginia (EUA) | 0,57 | |
| Besancon (França) | 31,6 | |
| Sudoeste da África | 1,04 | |

Tanto Day (1976) como Ford e Williams (1989) apresentaram revisões de trabalhos sobre morfometria de dolinas realizados em diferentes partes do mundo, contendo especialmente dados sobre densidade (reunidos na Tabela 1). Já os trabalhos mais recentes ligados ao tema (Tabela 2), vale ressaltar, se beneficiaram de técnicas modernas de sensoriamento remoto ou geoprocessamento, o que pode em teoria alterar as bases de comparação. Nos estudos mais antigos predominam a fotointerpretação estereoscópica, uso de mapas topográficos e muito trabalho de

campo. Parte significativa dos estudos mais recentes adicionaram outras bases de dados, em análises combinadas. Nesse sentido têm sido utilizados modelos digitais de elevação (MDE), imagens de satélite de alta resolução e dados obtidos através do escaneamento das superfícies a laser. O LIDAR (*Light Detection and Ranging*) é capaz de obter informações do terreno mesmo através do dossel, característica útil na aquisição de dados morfométricos de dolinas. Recentemente alguns esforços vêm sendo empregados no sentido da automatização para detecção de depressões,

através da comparação de resultados entre as várias bases cartográficas digitais e sistemas “manuais” de mapeamento (Siart et al., 2009; Pardo-Igúzquiza et al., 2013; Carvalho Júnior et al., 2014; Hiruma e Ferrari, 2014; Bauer, 2015; Jeanpert et al., 2016; Wu et al., 2016; Wall et al., 2017; Chen et al., 2018). Tal iniciativa tem como objetivo diminuir o tempo de aquisição e tratamento dos dados, geralmente baseados em fotointerpretação de

grandes coleções de imagens, além de reduzir o fator subjetividade inerente ao fotointérprete. Conforme Wu et al. (2016), uma vantagem desses métodos automáticos é a possibilidade de repetibilidade das operações ao longo do tempo, permitindo análises multitemporais mais adensadas e confiáveis, capazes de identificar regularmente possíveis alterações antrópicas nas dolinas (mecanização na agricultura, p.ex.).

Tabela 2: Densidade de dolinas (nº/km²) em diversos trabalhos a partir de 1992. *Dados calculados a partir de outras informações contidas no trabalho.

| Região | Densidade | Fonte |
|--|------------------|-------------------------------|
| Montanhas Taurus (Turquia) | 10,62 | Öztürk et al. (2018) |
| Cárpatos ocidentais (Eslováquia) | 9,91 | Hofierka et al. (2018) |
| Oólitos na região de Miami (EUA) | 2,97 | Harris et al. (2018) |
| Condado de Zhijin, província de Guizhou (China) | 4,03-5,06 | Chen et al. (2018) |
| Poljsica, bacia do Ljubljana (Eslovênia) | 235,98 | |
| Podbrezje, bacia do Ljubljana (Eslovênia) | 54,96 | Ceru et al. (2018) |
| Dobrava, bacia do Ljubljana (Eslovênia) | 238,54 | |
| Rio Flint, região de Dougherty, Geórgia (EUA) 183km ² | 18,644 | Cahalan e Milewski (2018) |
| Mammoth Cave National Park, Kentucky (EUA) | 5,1 | Wall et al. (2017) |
| Apalachicola National Forest, Flórida (EUA) | 14,85 | |
| Condado de Oldham, Kentucky (EUA) | 8,06 | Zhu e Pierskalla (2016) |
| Costa oeste do Mar Morto (Israel), evaporitos | 66,66 | Yechieli et al. (2016) |
| Fillmore, sudeste de Minnesota (EUA) | 2,373 | Wu et al. (2016) |
| Carste de Aggtelek (Hungria) | 13,6-15,5 | Telbisz et al. (2016) |
| Sierra Gorda, Granada e Málaga (Espanha) | 12,301 | Pardo-Igúzquiza et al. (2016) |
| Bacia do Sivas (Turquia); evaporitos | 10,217 | Keskin e Yilmaz (2016) |
| Maciço do Sul (Nova Caledônia); lateritas/ultramáficas | 58,114 | Jeanpert et al. (2016) |
| Planaltos Jasov e Zádiel (Eslováquia) | 6 | Gessert (2016) |
| Yucatán (México) | 12,324 | Aguilar et al. (2016) |
| Leskova dolina (Eslovênia) | 40,2 | Kobal et al. (2015) |
| Pequeno morro isolado, bacia do Styrian (Áustria) | 109,23 | Bauer (2015) |
| Bacia do Floyds Fork, Kentucky (EUA) | 2,69 | Zhu et al. (2014) |
| Barbarano del Capo, península de Salento (Itália) | 8,1-11,87 | Pepe e Parise (2014) |
| Sierra de las Nieves, Málaga (Espanha) | 2,548* | Pardo-Igúzquiza et al. (2013) |
| Vale do Raša, Komen (Eslovênia) | 11,83-39,96 | Obu e Podobinikar (2013) |
| Nixa, Missouri (EUA) | 7,38 | Miao et al. (2013) |
| Hrpelje-Kozina e Divača, Kras Plateau (Eslovênia) | 42 - 59 | Kovačič e Ravbar (2013) |
| Montanhas Owl, leste do Texas (EUA) | 14,65 | Faulkner et al. (2013) |
| Norte do Vale de Shenandoah, Virgínia (EUA) | 24,21 | Doctor e Young (2013) |
| Montanhas Biokovo (Croácia) | 44 | Telbisz et al. (2009) |
| Montanhas Ida, Creta (Grécia) | 1,781 | Siart et al. (2009) |
| Condado de Pinellas, Flórida (EUA) | 2,09 | Seale et al. (2008) |
| Maciço Hochschwab (Áustria) | 122 | Plan e Decker (2006) |
| Minnesota, 5 condados (EUA) | 0,15-4,82 | Gao et al. (2005) |
| Kentucky (EUA) *55% do estado | 1,757* | Florea (2005) |
| Baixo Rio Suwannee, Flórida (EUA) | 6,07 | Denizman (2003) |
| Rio Flint, região de Dougherty, Geórgia (EUA) 71km ² | 4,394 | Hyatt e Jacobs (1996) |
| Montello (Itália) | 31 | |
| Candaglia Plateau (Itália) | 51 | Bondezan et al. (1992) |
| Borgo Grotta Gigante (Itália) | 40 | |

Mapeamento de dolinas no Brasil

São relativamente poucos os trabalhos sobre dolinas no Brasil, especialmente se considerado o tamanho continental de seu território, a variedade e extensão de ambientes cársticos ou propensos a dolinamentos (Figura 1). Tais ambientes se encontram em estágios evolutivos ou de classificações bem distintas em função de vários fatores, tanto morfoclimáticos como lito-estruturais. Se por um lado ocorrem áreas cársticas carbonáticas bem evoluídas como a de Lagoa Santa-MG (Piló, 1998), ou em transição e ajuste evolutivo como no Vale do Alto Rio

Ribeira-SP (Karmann, 1994), por outro lado, a centenas de quilômetros a nordeste, ocorrem carstes incipientes, pouco desenvolvidos, em calcários expostos, como na árida região dos Lajedos do Rio Grande do Norte (Silva et al., 2017). Na região da Chapada Diamantina predominam feições notáveis do carste subterrâneo, como grandes sistemas de cavernas, ao passo que as feições superficiais, especialmente dolinas de colapso, são muito menos profundas, indicando possivelmente processos combinados de carstificação, com determinante influência da hipogenia (Salles et al., 2018a).

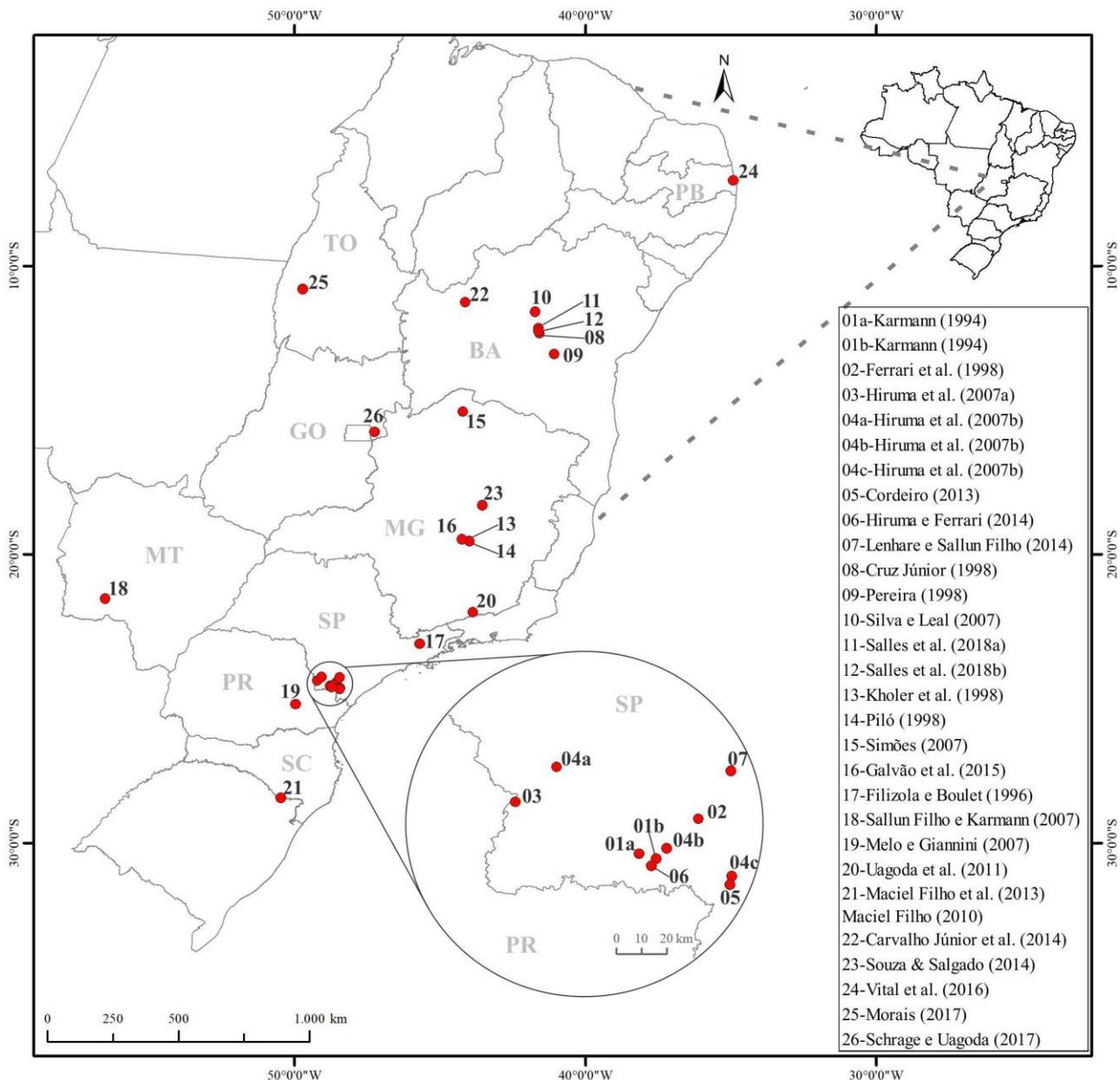


Figura 01: Mapa com distribuição dos trabalhos pelo Brasil (Sistema de projeção SIRGAS 2000).

Além disso, feições cársticas como depressões fechadas e cavernas também ocorrem associadas a outros tipos litológicos, especialmente recorrente em rochas siliciclásticas (Hardt e Pinto, Ferreira, C. F.; Uagoda, R. E. S.

2009; Fabri et al., 2014). Outros trabalhos relatam dolinas em formações ferríferas, como na região de Carajás-PA, pelo colapso de crostas ferruginosas (canga) decorrentes de cavernas subjacentes

(Campos e Castilho, 2012, Piló et al., 2015, Maurity e Kotschoubey, 1995). Inúmeras depressões fechadas foram registradas na bacia do Rio Pelotas (SC-RS), associadas a rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (Maciel Filho et al., 2013), o que reforça a grande diversidade de cenários potenciais à ocorrência de dolinas no Brasil. Em virtude dessa característica distinta, subdividiu-se a análise dos trabalhos nas regiões cársticas carbonáticas onde foram repetidamente realizados, agregando-se também um grupo mais amplo, entre diferentes regiões e litotipos. Uma tabela síntese com a análise desses trabalhos pode ser observada adiante, em resultados (Tabela 3).

Sudeste de São Paulo – Alto Vale do Rio Ribeira de Iguape e cercanias

Na região carbonática compreendida pelas cabeceiras do Vale do Rio Ribeira em São Paulo, divisa com o Paraná, ocorrem rochas do Grupo Açungui e Itaiacoca cuja carstificação foi acentuada, dentre outros, pela alta disponibilidade hídrica (especialmente alogênica), inserção de florestas e maior atuação de ácidos húmicos, além do elevado gradiente altimétrico imposto pela serra do mar (Figura 2). Vários trabalhos relacionados a geomorfologia e espeleologia foram desenvolvidos nessa região, considerada uma província cárstica bastante diferenciada das demais no país. Dada a situação ambiental em que se insere, esta província guarda grandes cavernas e abismos, além de depressões cársticas com amplitudes da ordem de centenas de metros de profundidade (Karmann e Ferrari, 2002).

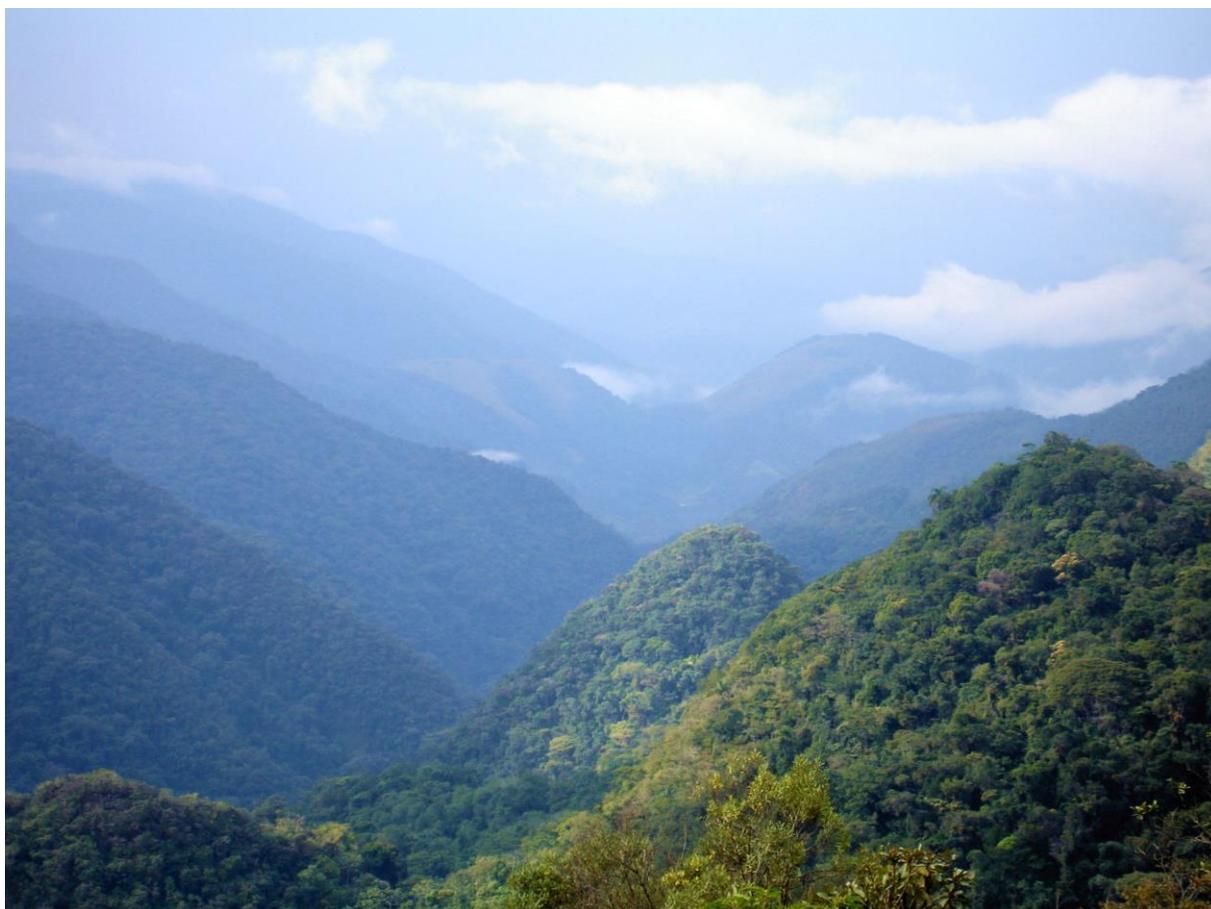


Figura 2: Gradientes altimétricos destacados na região alto vale do Rio Ribeira, onde ocorrem grandes depressões cársticas em meio a mata atlântica. Foto do autor.

Karmann (1994) foi pioneiro no estudo dessa região e comparou duas subáreas distintas, Furnas-Santana e Lajeado-Bombas, no Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira-PETAR (SP). Em seu estudo conseguiu identificar uma sequência evolutiva regional, iniciando de paisagem fluvial superficial, segmentação da drenagem para o subterrâneo e a formação de um carste poligonal. O autor comparou a densidade das depressões

poligonais de sua área de estudo, entre 7,7 a 13/km², ao carste da Jamaica (6,8/km²) e Nova Guiné (13,6/km²), estudado por Day (1976) e Williams (1972), respectivamente. Apesar das diferenças climáticas entre as regiões, o processo de desenvolvimento das grandes depressões poligonais parece ser similar, através da competição e coalescência entre feições adjacentes. É sabido, entretanto, que pela grandeza das feições

Ferreira, C. F.; Uagoda, R. E. S.

46

poligonais na região do Ribeira, elas possuem inúmeras dolinas internas, nem sempre detectáveis sob a espessa cobertura de mata atlântica. Karmann alerta que a utilização de fotos aéreas em escala mais detalhada que 1:25.000 implicaria em melhor detecção de depressões.

Em continuidade à caracterização geomorfológica da região, Ferrari et al. (1998) realizaram estudos morfométricos no núcleo Caboclos, também no PETAR. Nesse trabalho foram obtidos dados sobre amplitude do relevo, rugosidade, densidade da drenagem, índice de circularidade, entre outros parâmetros relativos a 98 depressões identificadas ($2/\text{km}^2$, em média) principalmente através da fotointerpretação. Com base nos dados identificou-se feições menores, mais circulares e de menor desenvolvimento da drenagem (24 ocorrências) em diferenciação às maiores, em que a drenagem mais desenvolvida colaborou para formatos irregulares, sugerindo uma herança fluvial superficial (74 ocorrências). Essas interpretações confirmam a tese de uma fase fluvial anterior a carstificação para área, sugerida por Karmann (1994).

Baseados nas metodologias dos dois trabalhos anteriores citados, Hiruma et al. (2007a; 2007b) realizaram análises morfométricas em depressões cársticas em áreas complementares na região do Vale do Ribeira, especialmente na faixa carbonática Itaiacoca (SP/PR) mas adicionalmente em Lajeado e André Lopes. Os dados de área para efeitos de cálculo de densidade apresentado em Hiruma (2007b) são mais adequados por não incorporarem porções de drenagem superficial desconectada ao carste, considerando somente as recargas autóctones e alóctones ligadas às depressões. Com isso foi possível calcular as frequências de depressões nas áreas Itaiacoca ($3,77/\text{km}^2$), Lajeado ($2,6/\text{km}^2$) e André Lopes ($2,59/\text{km}^2$). A densidade calculada para a faixa Itaiacoca nas regiões de Nova Campina e Bom Sucesso no trabalho de Hiruma et al. (2007a) foi muito reduzida ($0,12/\text{km}^2$) pela adoção de uma área extensa (baseadas nas figuras 3 e 4, indicadas pela publicação). A comparação dos resultados díspares de densidade com o trabalho de Karmann (1994) poderia sugerir uma diferenciação regional na carstificação, possivelmente em decorrência de fatores locais (distinções litológicas, de gradiente hidrológico, etc.). Apesar da repetição da análise para a região do Lajeado, o tamanho das áreas analisadas é significativamente diferente de Karmann ($47,1-26,83 \text{ km}^2$) para Hiruma et al. ($386,69 \text{ km}^2$).

Em trabalho mais recente e com técnicas mais modernas de geoprocessamento, Hiruma e Ferrari (2014) realizaram testes para extração

automatizada de dolinas em uma pequena área do PETAR, inserida na área estudada por Karmann (1994) na região de Lajeado-Bombas. Foram gerados modelos digitais de terreno (MDT) a partir de fotos aéreas digitalizadas 1:25.000 (resolução de 10 metros, programa “Geomática”) e SRTM (30 e 90 metros) dos quais se extraíram automaticamente as dolinas. Também identificaram dolinas a partir de mapas topográficos (1:50.000 e 1:10.000) e fotointerpretação manual, que serviram como mapeamento referência. Os resultados mostraram que quanto maior a resolução dos modelos digitais ou dados disponíveis, maior a sensibilidade para identificação das feições. Nesse sentido o MDT gerado a partir das fotos aéreas (125 dolinas) é muito próximo ao da interpretação visual de referência (141 dolinas), possuindo também alta correlação espacial e de perímetro. Apesar dos autores considerarem a fotointerpretação como a melhor ferramenta para obtenção de feições geomorfológicas do carste, mesmo com um certo nível de subjetividade, eles recomendam a identificação automática via MDTs de maior resolução como indicador prévio para checagens de campo. A densidade máxima alcançada por extração manual das dolinas ($9,5/\text{km}^2$), é convergente ao que Karmann identificou em 1994 para uma área bem maior ($7,7-13/\text{km}^2$).

Outros trabalhos de caracterização geomorfológica na região do Alto Rio Ribeira também coletaram dados referentes a depressões cársticas, não alcançando, entretanto, resultados expressivos. Cordeiro (2013) revisou para a Serra de André Lopes a ocorrência de depressões, obtendo, contudo, índices máximos inferiores aos obtidos por Hiruma et al. (2007b), de $1,56/\text{km}^2$ contra $2,59/\text{km}^2$, respectivamente. Lenhare e Sallum Filho (2014) mapearam depressões na região dos corpos carbonáticos do Planalto de Guapiara e na Serra de Paranapiacaba (São Paulo) numa análise comparativa entre tais áreas, obtendo uma frequência de $0,37/\text{km}^2$, sinalizando um carste pouco desenvolvido se comparado, especialmente, ao do PETAR.

Região da Chapada Diamantina, Bahia

Na região da Chapada Diamantina-BA ocorrem grandes sistemas de cavernas associadas às rochas carbonáticas do Grupo Una, alcançando mais de 68km de galerias subterrâneas mapeadas (Rubbioli et al., 2019). Entretanto as dolinas, normalmente de colapso, parecem ser bem menos difundidas na região. Os planaltos cársticos encontram-se rebaixados e circundantes em relação às serras siliciclásticas que se destacam na paisagem. Sistemas interligados de cavernas com

dezenas de quilômetros e grandes salões se notabilizam frente às feições do carste superficial, geralmente de aspecto uniforme, marcado pela monótona vegetação de caatinga (Figura 3).

Entretanto foram identificados alguns trabalhos relacionados à geomorfologia desta província, que contabilizaram dolinas e realizaram análises morfométricas.



Figura 3: Colapsos associados a grandes cavernas (Lapa Doce) geram depressões com bordas acentuadas e profundas, quebrando a monotonia do relevo circundante. Foto do Autor.

Cruz Júnior (1998) trabalhou na região de Iraquara-BA e identificou três tipos de dolinas: de subsidência lenta, com perfis suaves; de colapso com bordas acentuadas, mais profundas; e dolinas aluvionares, que apresentam pequenos ramos de drenagem. Considerando dolinas de perfil suave e escarpado, e subdividindo a área de estudo entre setor sul e norte, o autor realizou diversas análises morfométricas a partir de dados de perímetro, área e eixo principal. Uma vez que a superfície ocupada pelas dolinas é baixa se comparada a área total de estudo (índice de dolinamento 35,08) concluiu não se tratar de um carste poligonal, e sim um carste de dolinas. Essa análise explica a baixa densidade geral de dolinas para a área, calculada em 1,68/km², bastante diferente de algumas regiões do Alto Vale do Rio Ribeira, onde as fotografias aéreas utilizadas são de mesma escala (1:25.000).

No lado oposto da Chapada Diamantina, a leste, Pereira (1998) realizou a caracterização e mapeamento do carste de Itaetê-BA, onde ocorrem grandes sistemas de cavernas, como o Poço Encantado e Lapa do Bode. Foram realizadas algumas análises morfométricas e os resultados indicaram uma baixa incidência de dolinas em relação a superfície cárstica (0,08 dolinas/km²), bem inferior ao já reduzido índice encontrado na região próxima de Iraquara-BA. O autor, entretanto, ressalta que a adoção de base de dados de melhor escala que as fotos aéreas 1:60.000 utilizadas certamente aumentaria o número de dolinas. De fato, o trabalho de Cruz Júnior (1998) utilizou-se de fotos na escala de 1:25.000, numa área consideravelmente menor.

Mais ao norte, Silva e Leal (2007) correlacionaram lineamentos estruturais ao desenvolvimento de dolinas numa grande área na região de Irecê-BA. O estudo alcançou uma grande quantidade de dolinas, a maior dentre todos os

analisados, que resultou numa densidade condizente com outros trabalhos na região (2/km²). Os autores ressaltam o fator subjetividade na interpretação das fotos aéreas em escala muito abrangente (1:60.000), que pode ter impactado negativamente na detecção de feições.

O trabalho realizado por Salles et al. (2018a) entre Iraquara e Souto Soares-BA, faz uma relação entre o aquífero cárstico e o desenvolvimento de importantes feições morfológicas na região, como cavernas e dolinas, associadas tanto a espeleogênese epigênica como hipogênica. Através da densidade de dolinas e da capacidade específica de poços tubulares, que atingem profundidades distintas no pacote rochoso, puderam comprovar a relação entre a produção de água e a ocorrência dessas feições cársticas superficiais. Com o apoio de análises isotópicas da água conseguiram propor uma espeleogênese dupla para a região, sendo que as feições epigênicas obliteraram as feições hipogênicas primitivas. No entanto, consideraram a hipogenia o processo dominante para a evolução cárstica local. O estudo resultou numa baixa densidade de dolinas, com 1,03/km² (dados obtidos via comunicação pessoal), mas ainda compatível com o obtido por Cruz Júnior (1998) que estudou menos que a metade da área e utilizou uma escala mais apropriada que 1:60.000. A menor ocorrência de dolinas e o maior desenvolvimento do carste subterrâneo (cavernas) parece corroborar a tese de evolução previamente hipogênica para a região.

Em artigo mais recente, Salles et al. (2018b) buscaram avaliar o grau de susceptibilidade a colapsos e subsidência na mesma região, porém restrita ao município de Iraquara-BA. Foram definidos três parâmetros qualitativos para elaboração do mapa de risco, baseado na litologia, densidade de lineamento e de dolinas. Considerando o índice máximo na combinação de carbonatos expostos, alta densidade de lineamentos e alta densidade de dolinas (até 2,62/km²) foi possível estabelecer as zonas centro norte (periferia da cidade) e centro sul do município como mais susceptíveis. Foi identificado que a contribuição hídrica é essencialmente autogênica nessas áreas e que em associação ao alto grau de discontinuidades estruturais a situação favorece a maior permeabilidade e conseqüentemente a migração de materiais para o subterrâneo. Além da densidade máxima nas áreas mais susceptíveis de até 2,62/km², o estudo indica que de forma mais uniforme para a área dos carbonatos a densidade seria de 1,13/km², compatível com o estudo anterior dos mesmos autores, abrangendo uma área bem mais abrangente ao norte de Iraquara.

Carbonatos do Grupo Bambuí, Minas Gerais

As rochas carbonáticas neoproterozóicas do Grupo Bambuí em Minas Gerais, especialmente da formação Sete Lagoas, abrigam grande parte dos relevos cársticos numa região bastante ampla e de fisiografia variada, conforme especificidades locais. Uma das áreas mais estudadas situa-se nos arredores da cidade de Lagoa Santa-MG, onde os afloramentos são mais localizados e menos destacados, normalmente cobertos com materiais argilosos residuais. Caracteriza-se por um carste mais evoluído, recortado ora por sistemas fluvio cársticos, ora por campos de dolinas alagáveis sazonalmente (Figura 4). Entretanto, outras áreas cársticas mineiras também se destacam, como a região do vale do Rio Peruaçu no norte de Minas Gerais, com vales cegos encaixados e grandes cavernas, ou a província de Arcos-Pains, com seus paredões aflorantes bem carstificados separados por vales aplainados. Apesar da ocorrência de diversas regiões cársticas em Minas Gerais, somente alguns trabalhos tratam sobre dolinas.

Um projeto interdisciplinar envolvendo inúmeros pesquisadores foi realizado na Área de Proteção Ambiental Carste de Lagoa Santa-MG para a elaboração do zoneamento dessa unidade de conservação, cujo mapa geomorfológico foi realizado por Kohler et al. (1998). Esse mapa apresenta as feições superficiais positivas (torres, *hume*, paredão, cones) e negativas (dolinas, dolinas com paredões, “*ouvulas*”, “*poliés*”) além dos aspectos hídricos como cursos de água perene/intermitentes, sumidouros, ressurgências, curso subterrâneos prováveis e direções de fluxo geral inferidas. Considerando as dolinas representadas no mapa e a área da unidade de conservação obteve-se uma densidade de 1,55/km², número ainda baixo se comparado o potencial da região, provavelmente devido à escala abrangente de representação do mapa (1:50.000).

Exemplo disso está expresso no trabalho de Piló (1998), que alcançou uma taxa bem superior ao trabalhar com apenas uma depressão poligonal inserida na mesma área mapeada por Kohler et al. (1998). O estudo realiza diversos tipos de análises com o objetivo de desvendar os processos principais de evolução e desenvolvimento do carste local, destacando o papel das coberturas sobre o carste, especialmente os solos, na morfodinâmica notadamente epicárstica do modelado geral. A depressão poligonal Macacos-Baú guarda quase uma centena de dolinas, que foram devidamente mapeadas e analisadas sob o enfoque morfométrico. A alta densidade alcançada, de

18,9/km², é justificada por Piló como fruto, dentre outros, da utilização de imagens aéreas em maior

resolução que as utilizadas por Karmann (1994), ou seja, 1:10.000 contra 1:25.000 respectivamente.



Figura 4: Dolina alagada na base de paredão, em região de carste coberto na região de Pedro Leopoldo-MG. Foto do Autor.

Um pouco mais ao norte de Lagoa Santa, na região de Sete Lagoas-MG, Galvão et al. (2015) realizaram uma investigação sobre o desenvolvimento de colapsos e subsidência na área. Apesar de apenas 17 dolinas mapeadas, o estudo focou a relação das mesmas tanto com atividades de bombeamento de água (poços com 500 a 2000m³/dia), como com a predisposição natural da área para a manifestação dessas feições. A existência de duas camadas subjacentes bem carstificadas, identificadas por registros óticos nos poços perfurados, assim como a ocorrência de *piping* e erosão de materiais inconsolidados mais superficiais permitiu o desenvolvimento dessas dolinas. A densidade de dolinas foi calculada neste trabalho a partir do georreferenciamento da área de estudo e resultou numa baixa frequência (0,38km²). No entanto o trabalho de Galvão et al. (2015) não teve como objetivo levantamento de todas as dolinas e análises morfométricas, mas discutir as feições potencialmente induzidas por atividades antrópicas.

Trabalhos em diferentes regiões brasileiras

Parte significativa dos trabalhos pesquisados nesta revisão ocorreram em regiões dispersas pelo país, nem sempre em áreas cársticas bem reconhecidas ou mesmo em rochas carbonáticas. Se destacam nesse conjunto de trabalhos os realizados em áreas de rochas siliciclásticas, consideradas menos solúveis, mas que em alguns casos podem abrigar grande quantidade e diversidade de feições cársticas, como depressões, vales cegos, sumidouros e cavernas.

Num dos primeiros trabalhos específicos sobre o desenvolvimento de dolinas em terrenos siliciclásticos, Filizola e Boulet (1996) mapearam essas feições e fizeram uma reconstituição evolutiva da paisagem em sua área de estudo (Caçapava, no Vale do Paraíba) a partir das datações de turfeiras encontradas no fundo das depressões. Os trabalhos de Sallun Filho e Karmann (2007) e Melo e Giannini (2007) se dedicaram ao entendimento dos mecanismos morfogenéticos que promoveram a formação de dolinas em arenitos em suas áreas de estudo (Jardim-MS e Ponta Grossa-PR respectivamente), tendo sido realizado o mapeamento das feições. Ainda sobre o mapeamento de dolinas em rochas

siliciclásticas, o trabalho de Uagoda et al. (2011) se destaca pela densidade de feições em sua área de estudo (4,19/Km²), num afluente do Rio Paraíba do Sul-MG, fruto de inúmeras campanhas de campo e disponibilidade de fotos aéreas em escala mais apropriada à investigação (1:10.000). Por outro lado, o trabalho de Souza e Salgado (2014) identificou apenas uma depressão nos quartzitos da Serra do Espinhaço, Diamantina-MG, alcançando uma densidade pouco expressiva (0,04/km²) considerada pelos próprios autores como baixa, aquém da potencialidade da região.

Ainda fora do domínio dos carbonatos, Maciel Filho et al. (2013) mapearam uma grande amostra de depressões em rochas vulcânicas ácidas, entre Lages-SC e Vacaria-RS. A ocorrência dessas feições é associada à dissolução da sílica presente no vidro vulcânico, permitindo processos gravitacionais posteriores de colapso. A contabilização dessa quantidade de dolinas (1733) e da área de estudo foi possível através do mapa “Geomorfologia Área de Influência Direta” apresentado no processo de licenciamento ambiental do Aproveitamento Hidroelétrico Pai Querê (Maciel Filho, 2010), indicado pelo autor como um trabalho homólogo que deu subsídios ao artigo subsequente (por comunicação pessoal).

Outros trabalhos mapearam dolinas associadas a rochas carbonáticas em regiões bem dispersas do Brasil. O trabalho de Carvalho Júnior et al. (2014) se destaca por ter realizados testes de mapeamento semi-automatizado de depressões com uso de modelos digitais de elevação na região de Barreiras-BA. Vital et al. (2016) realizaram o mapeamento e análises morfométricas em depressões presentes na região de João Pessoa-PB e arredores. Na região da Lagoa da Confusão-TO, planície do médio Rio Araguaia, Morais (2017) mapeou centenas de depressões cársticas suaves, frequentemente alagadas, localmente chamadas de “ipucas”. Por fim Schrage e Uagoda (2017) mapearam algumas depressões numa grande área planáltica entre o Distrito Federal, Goiás e Minas Gerais, não tendo sido identificado, entretanto, grande adensamento de feições se considerada a área total de estudo.

Análise dos trabalhos

A revisão dos trabalhos nacionais permitiu na maior parte dos casos tabular dados relacionados a quantidades de dolinas, tamanho da área de estudo, densidade, escala de detecção, material de ocorrência, região, tipologia de dolinas e análises morfométricas realizadas (Tabela 3). Em geral tais dados são apresentados nos estudos, seja no texto ou por mapas. Entretanto, em alguns casos

a quantidade de dolinas foi obtida pela análise de mapas ou comunicação pessoal. Em outras situações foi realizado o georreferenciamento de mapas, através da ferramenta sobreposição de imagens no Google Earth Pro, para obter o dado de área de estudo. Essas situações são destacadas na tabela por asteriscos. Vale ressaltar que dois estudos trabalharam com mais de uma área (Karmann, 1994; Hiruma et al., 2007b), tendo sido individualizadas tais áreas na tabela por se tratar de ambientes distintos.

Desta forma foram identificadas 29 áreas referentes a 26 trabalhos relacionado com dolinas. Apenas quatro trabalhos (4) não realizaram nenhum tipo de análise morfométrica ou de distribuição. Considerando apenas os demais trabalhos (22) observou-se que os parâmetros mais utilizados foram (Figura 5A): lineamento do eixo principal (16); área (11); distribuição espacial (9); perímetro (7); índice de circularidade (6); amplitude (6); declividade (5) e; profundidade (4). A predominância do parâmetro referente à direção dos eixos principais das dolinas chama atenção e provavelmente se deve à tentativa de correlação com outras estruturas geológicas nas áreas de estudo e o estabelecimento de rotas de maior carstificação e inserção da drenagem subterrânea. Tamanho e distribuição também foram muito frequentes, indicando intenção do mapeamento de áreas mais propícias ao processo de dolinamento. A despeito do parâmetro profundidade ser considerado um dos mais importantes por atestar a intensidade da carstificação (Day, 1976; Ford e Williams, 2007) este atributo foi pouco utilizado, possivelmente por requisitar de bases de dados com precisão altimétrica ou trabalhos de campo.

Na análise dos trabalhos foi dedicado uma coluna para identificar a tipologia de dolinas adotadas pelos respectivos autores, para averiguar o nível de convergência de terminologias e processos. Em trabalho recente, Ferreira e Uagoda (2019) sistematizaram as principais tipologias presentes em trabalhos internacionais de síntese, e o propósito aqui é verificar se há correspondência entre os termos utilizados no Brasil e no mundo. Dos 26 trabalhos analisados 17 apresentaram alguma classificação de dolinas, principalmente entre colapso (9), dissolução (8) e subsidência (7). Outros termos foram anotados sem grande repetição nos trabalhos, como “difusa/concentrada”, “alóctone/autóctone”, aluvial, abatimento e sufusão. Observou-se que o termo dissolução empregado no Brasil se refere na maior parte das vezes a dolinas de compleição suave, com a presença de coberturas como o solo, sendo internacionalmente mais associadas ao processo de sufusão. No geral os trabalhos não

apresentam unicidade terminológica, havendo aparentemente uma utilização diferenciada e particular de termos e conceitos.

Tabela 3: Trabalhos de mapeamento de dolinas no Brasil. Tipologia de dolinas: D: dissolução; C: colapso; S: subsidência. Morfometria: A: Área; L: Lineamento; P: Profundidade; Di: Diâmetro; Pe: Perímetro; Dc: Declividade; Amp: Amplitude; Alt: Altitude média; Cd: Comprimento drenagem; Dd: Densidade drenagem; Ds: Densidade sumidouros; Dist: Análise de distribuição; Ic: Índice circularidade; R: Rugosidade.* Dados calculados neste trabalho. ** Dados obtidos por comunicação com autor.

| Autor | Região | Nº dolinas | Área (km²) | dolina/km² | Forma de detecção | Escala de detecção | Material rocha/solo | Tipologia | Morfometria |
|---|--------------------------------------|------------|-------------|-------------|---|--------------------|--|------------------------------------|---|
| SÃO PAULO- VALE DO RIBEIRA | | | | | | | | | |
| 01a-Karmann (1994) | Furnas-Santana, Vale Ribeira-SP | 80 | 27,45-10,36 | 2,9-7,72 | Fotointerpretação; campo | 1:25.000 | carbonatos | C; D: difusa; concentrada | A; P; Pe; Ds; L |
| 01b-Karmann (1994) | Lajeado-Bombas, Vale Ribeira-SP | 351 | 47,1-26,83 | 7,45-13,08 | Fotointerpretação; campo | 1:25.000 | carbonatos | C; D: difusa; concentrada | A; P; Pe; Ds; L |
| 02-Ferrari et al. (1998) | Núcleo Caboclos, Vale do Ribeira-SP | 98 | 48,64 | 2,014 | Fotointerpretação; carta topográfica | 1:25.000 | mármore | D | A; Dc; Pe; Amp; Alt; Cd; Dd; Ic; R; L; Dist |
| 03-Hiruma et al. (2007a) | Faixa carbonática Itaiacoca-SP/PR | 149 | 1242,65* | 0,12 | Fotointerpretação; campo | 1:25.000 | metacarbonatos | D: alóctone, autóctone; S: L; Dist | A; Amp; Ds; Ic; Dc; L; Dist |
| 04a-Hiruma et al. (2007b) | Faixa carbonática Itaiacoca-SP/PR | 127 | 33,657 | 3,77 | Fotointerpretação; campo | 1:25.000 | carbonatos | Alóctones; autóctones | A; Amp; Ds; Ic; Dc |
| 04b-Hiruma et al. (2007b) | Lajeado, Vale Ribeira-SP | 1006 | 386,69 | 2,6 | Fotointerpretação; campo | 1:25.000 | carbonatos | Alóctones; autóctones | A; Amp; Ds; Ic; Dc |
| 04c-Hiruma et al. (2007b) | André Lopes, Vale Ribeira-SP | 182 | 70,15 | 2,59 | Fotointerpretação; campo | 1:25.000 | carbonatos | Alóctones; autóctones | A; Amp; Ds; Ic; Dc |
| 05-Cordeiro (2013) | Serra André Lopes, Vale Ribeira-SP | 53 | 34,04 | 0,78-1,56 | Fotointerpretação; campo, sobrevôo | 1:25.000 | mármore | D | A; Pe; Amp; Dc; L |
| 06-Hiruma e Ferrari (2014) | Rio Betari, Vale do Ribeira-SP | 125-141 | 14,82* | 8,44-9,52 | Automatizada: MDT (fotos aéreas, 1m); SRTM (30 e 90m). Manual: fotointerpretação; cartas topográficas; campo. | 1:25.000 | carbonatos | | A; Pe; Amp; Dc |
| 07-Lenhare e Sallun Filho (2014) | Vale do Ribeira - Paranapanema-SP | 24 | 65,21 | 0,37 | Fotointerpretação; imagens LANDSAT 7 +ETM e Google Earth; campo | 1:25.000 | carbonatos | | |
| CHAPADA DIAMANTINA | | | | | | | | | |
| 08-Cruz Júnior (1998) | Iraquara-BA | 827 | 492,14 | 1,68 | Fotointerpretação | 1:25.000 | calcário | C; S; aluvial | A; Pe; Ic; L |
| 09-Pereira (1998) | Itaetê-BA | 72 | 899,92 | 0,08 | Fotointerpretação; campo | 1:60.000 | calcário | C; S | Ds; R; L |
| 10-Silva e Leal (2007) | Irecê-BA | 13912 | 6926* | 2,008 | Fotointerpretação | 1:60.000 | calcário | D; abatimento | L; Dist |
| 11-Salles et al. (2018a) | Iraquara/Souto Soares-BA | 1262** | 1225** | 1,03 | Fotointerpretação | 1:60.000 | carbonatos | C; sufusão | A; L |
| 12-Salles et al. (2018b) | Iraquara-BA | ND | | 1,13 - 2,62 | Fotointerpretação | 1:60.000 | carbonatos | C; sufusão | L |
| MINAS GERAIS - GRUPO BAMBUÍ | | | | | | | | | |
| 13-Kholer et al. (1998) | Lagoa Santa-MG e região | 586* | 377,3 | 1,55 | Ortofoto; campo | 1:10.000 | calcário | | |
| 14-Piló (1998) | Baú-Macacos, Lagoa Santa-MG | 97 | 5,13 | 18,9 | Fotointerpretação; Ortofoto; campo | 1:10.000 | calcário | D; S; abatimento | A; P; L; Dist |
| 15-Simões (2007) | Peruaçu, Itacarambi e Januária-MG | 204 | 1991,29 | 0,1 | Interpretação visual de imagens Landsat-7/ETM+ | não disponível | calcário | C; S | Dist |
| 16-Galvão et al. (2015) | Sete Lagoas-MG | 17 | 44,55* | 0,38 | Fotointerpretação | 1:40.000 | coberturas e carbonatos | C; S | |
| OUTRAS REGIÕES | | | | | | | | | |
| 17-Filizola e Boulet (1996) | Vale do Paraíba, Caçapava-SP | 37 | 17,57* | 2,1 | não disponível | não disponível | rochas sedimentares quartzo cauliniticas arenito; carbonato subjacente | | L |
| 18-Sallun Filho e Karmann (2007) | Jardim-MS | 25 | 25,65* | 0,97 | Fotointerpretação; imagens de satélite (Landsat 7 +ETM); campo. | 1:60.000 | arenito; carbonato subjacente | | P; Di; L |
| 19-Melo e Giannini (2007) | Ponta Grossa-PR | 30 | 217,55* | 0,14 | não disponível | não disponível | arenito | C | L |
| 20-Uagoda et al. (2011) | Rio Santana, Médio Paraíba do Sul-MG | 232 | 56,3 | 4,19 | Fotointerpretação; campo | 1:10.000 | gnaises; quartzitos | D; C | Dist |
| 21-Maciel Filho et al. (2013)/Maciel Filho (2010) | Lages-SC; Vacaria-RS | 1733* | 1285,8* | 1,35 | Fotointerpretação; imagens Google Earth; campo | 1:60.000 | rochas vulcânicas ácidas | | L |
| 22-Carvalho Júnior et al. (2014) | Barreiras-BA | 271 | 852,11* | 0,32 | Semi automática: MDE ALOS PRISM. Manual: ALOS PRISM 2,5m; Google Earth; campo | 5 metros | calcário | | Ic; L; Dist |
| 23-Souza & Salgado (2014) | Diamantina-MG | 1 | 22,71 | 0,04 | Imagens Rapid Eye; campo | não disponível | quartzitos | D | |
| 24-Vital et al. (2016) | João Pessoa-PB e região | 7 | 657,51* | 0,01 | MDE SRTM | não disponível | coberturas e carbonatos | S | A; P; Di; Pe; Amp |
| 25-Morais (2017) | Lagoa da Confusão - TO | 889 | 759,08 | 1,17 | Imagens RapidEye; Google Earth; BingMaps; campo | 5 metros | calcário | | Dist |
| 26-Schrage e Uagoda (2017) | Divisa DF/GO/MG | 64 | 3.470 | 0,02 | Mapa topográfico; MDT SRTM (90m); imagens ESRI World Imagery (2,5m); campo | 1:25.000 | coberturas e carbonatos | | A; Pe; Ic; L; Dist |

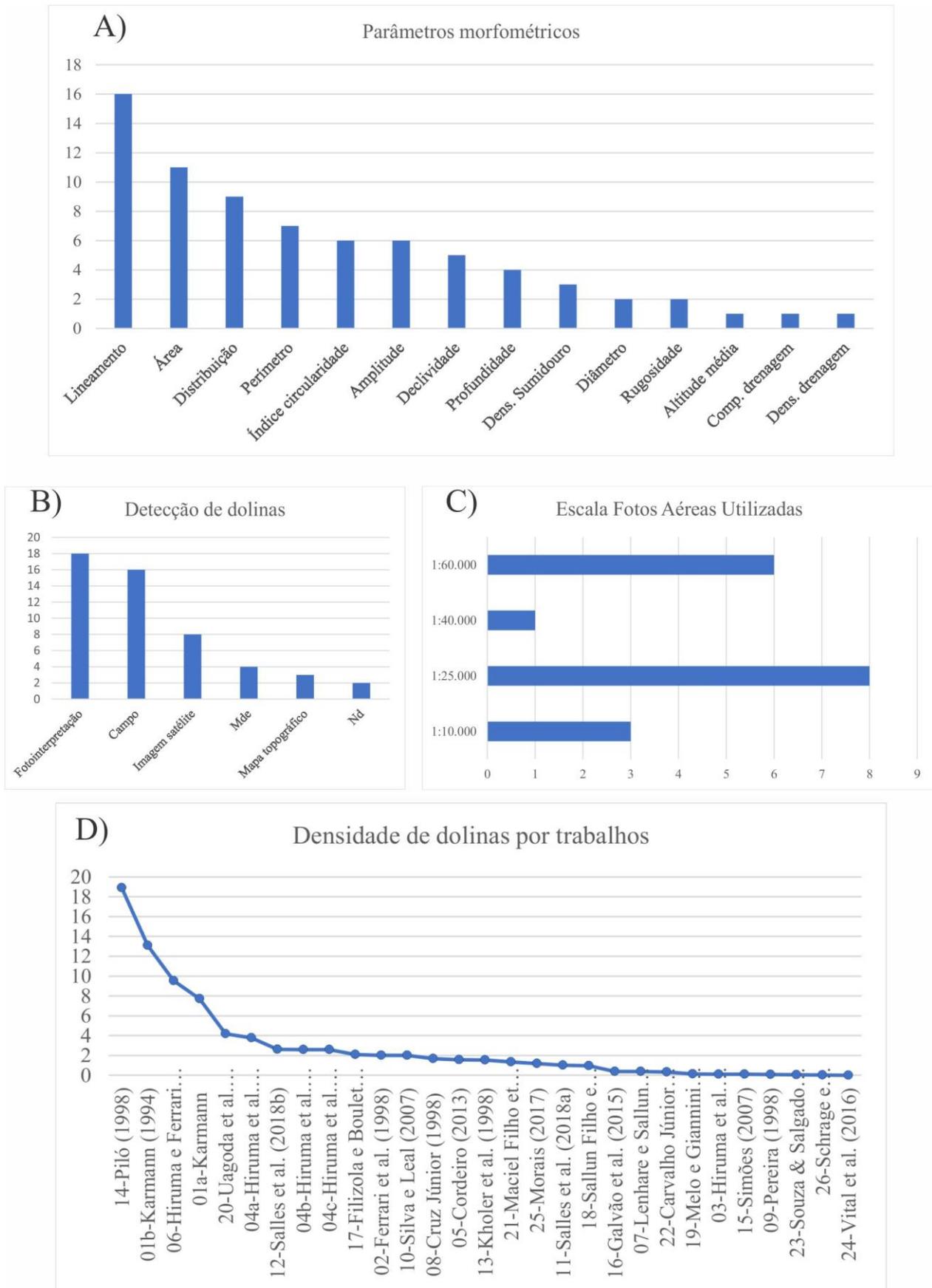


Figura 5: A) parâmetros morfométricos mais utilizados nos estudos analisados; B) forma de detecção de dolinas; C) escala na detecção por fotos aéreas; D) densidade de dolinas por trabalho analisado.

Quanto às formas de detecção observou-se a predominância da fotointerpretação e das
 Ferreira, C. F.; Uagoda, R. E. S.

verificações em campo para o mapeamento de dolinas, com mais que o dobro de repetições se
 53

comparado com a terceira base mais utilizada, imagens de satélite (Figura 5B). Ressalta-se que foram contabilizadas individualmente cada procedimento de detecção, havendo, portanto, trabalhos que se utilizaram de mais de um método. Considerando a fotografia aérea como base mais utilizada (Figura 5C), observa-se a predominância no uso de imagens com escala de 1:25.000 (em oito estudos), especialmente comuns para os trabalhos executados no estado de São Paulo. Em seguida foram contabilizados seis trabalhos com fotos na escala de 1:60.000, em regiões mais carentes de bases de maior detalhe. Somente em três trabalhos foi utilizada base de 1:10.000, coincidentemente em Minas Gerais, consideradas escalas mais compatíveis com a difícil tarefa de identificação de dolinas por estereoscopia, conforme recomendam Bondesan et al. (1992).

A questão da escala, base de dados para detecção e tamanho das áreas de estudo pode influenciar na quantidade e precisão da identificação de dolinas. Na análise dos trabalhos observou-se grande variedade de tamanhos de áreas de estudo, bases de dados, escalas, resultando em detecções diferenciadas na quantidade de dolinas. Para efeito de comparação, utilizou-se os maiores valores de densidade de feições (n°/km^2) calculada para cada área/trabalho (conforme Tabela 3) e observou-se uma grande diferença desse parâmetro entre todos os analisados (Figura 5D). Apenas os trabalhos de Piló (1998) na depressão poligonal de Baú-Macacos em Lagoa Santa e de Karmann (1994), em Lageado-Bombas no Vale do Ribeira alcançaram densidades superiores a $10/\text{km}^2$. As 10 áreas subsequentes obtiveram densidades entre 2 e $10/\text{km}^2$, sendo todo o restante (17 áreas), abaixo de $2/\text{km}^2$.

Ao utilizar estes intervalos de densidades citados para classificar os números alcançados em trabalhos internacionais (conforme dados das Tabelas 1 e 2 somadas), e confrontar com os dados alcançados nos estudos nacionais, observa-se forte discrepância nos resultados (Figura 6). Esses intervalos, apesar de aleatoriamente estabelecidos, permitem distinguir áreas com densidades verdadeiramente altas de outras com densidades pouco significativas, onde provavelmente as dolinas ocorrem de forma bem dispersa na paisagem, ou concentradas em pequenas porções das áreas de estudo. Como comentado anteriormente, essas diferenças nos resultados de densidade entre estudos nacionais e internacionais podem estar relacionadas a diversos fatores, lembrando que parte dos trabalhos estrangeiros se beneficiou de bases de dados mais adequadas, como o LIDAR por exemplo.

Nos trabalhos nacionais observou-se que a maior parte (58,6%) alcançou resultados modestos no quesito densidade (menos que $2/\text{km}^2$) e este fator pode provavelmente ser atribuído aos seguintes aspectos: 1A- escalas e métodos de detecção inapropriados; 1B- indisponibilidade de bases cartográficas de detalhe; 1C- não detecção das dolinas internas a grandes depressões; 2- adoção de grandes áreas de análise; 3 - número de dolinas realmente baixos na área. Por outro lado, os seis trabalhos nacionais que obtiveram as maiores densidades, que marcam o ponto de inflexão no gráfico apresentado (Figura 5D), foram realizadas em áreas de até $56,3\text{km}^2$, demonstrando a forte influência deste aspecto para a melhor detecção de dolinas. Essa questão é convergente ao que afirma Bauer (2015), que em áreas reduzidas a densidade tende a aumentar.



Figura 6: Comparação entre as classes de densidades nos trabalhos internacionais versus nacionais.

Conclusão

São poucos os trabalhos que se dedicaram ao mapeamento de dolinas no Brasil e a maior parte dos que foram analisados apresentou resultados modestos na detecção dessas feições do carste superficial. Mas no geral foi possível traçar um panorama dos mapeamentos de dolinas realizados, dos parâmetros morfométricos mais adotados, das bases de dados utilizadas e da distribuição destes estudos pelo país. Foi observada especial concentração de levantamentos desta natureza em regiões cársticas carbonáticas como a do alto vale do Rio Ribeira em São Paulo, seguido por estudos mais frequentes na Chapada Diamantina e Minas Gerais. Muitos trabalhos em regiões dispersas estão associados a rochas siliciclásticas ou não carbonáticas. A comparação dos trabalhos nacionais com estudos desenvolvidos em várias partes do mundo mostrou que há grande discrepância na detecção de dolinas por área, fato possivelmente atribuível à falta de base de dados de

maior resolução no Brasil. Acredita-se que a falta de áreas bem carstificadas e com profusão de dolinas não seja a questão para determinar o menor desempenho para os trabalhos realizados no país. Ressalta-se que alguns dos trabalhos analisados optaram por grandes áreas de estudo, o que tende a diluir o número de ocorrências por área. Em alguns casos os locais investigados eram de fato pouco favoráveis, como áreas de carste hipogênico ou com ocorrência de rochas menos propícias à carstificação.

Em próximas etapas da pesquisa pretende-se testar o uso de novas tecnologias, que podem gerar bases mais precisas para detecção e mapeamento de dolinas, considerando corriqueira falta de levantamentos de precisão no interior do país. Neste sentido e considerando que a maior parte dos trabalhos investigados neste estudo se baseou em fotointerpretação, com material antigo e escala inapropriada, pretende-se testar a utilização de modelos digitais de elevação a partir de dados orbitais ou adquiridos via veículos aéreos não tripulados (VANT). O uso de mosaicos tridimensionais também pode ser adotado para checar as feições dúbias, considerando que atualmente são mais facilmente construídos com o apoio de novos aplicativos geoinformacionais. A realização destes testes em uma extensa área protegida brasileira visa gerar, de forma mais rápida e precisa, material para análises morfométricas e ambientais a partir dessas importantes feições funcionais do carste superficial, as dolinas.

Referências

- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M. E., Frausto, O., Ihl, T., 2016. Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 78(2), 51–60. Disponível: <https://doi.org/10.4311/2015ES0124>
- Bauer, C., 2015. *Geomorphology Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data*. *Geomorphology*, 250, 78–88. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.08.015>
- Bondesan, A., Meneghel, M., Sauro, U., 1992. Morphometric analysis of dolines. *International Journal of Speleology*, 21, 1–55.
- Cahalan, M. D., & Milewski, A. M., 2018. Sinkhole formation mechanisms and geostatistical-based prediction analysis in a mantled karst terrain. *Catena*, 165, 333–344. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.010>
- Campos, J., Castilho, A. F., 2012. Uma visão geográfica da Região de Carajás, in: Martins, F.D., Castilho, A.F., Campos, J., Hatano, F.M., Rolim, S.G (Org.), *Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres*. Nitro Imagens, São Paulo, p.p. 28-63
- Carvalho Júnior, 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. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs6010330>
- Čeru, T., Šegina, E., Gosar, A., 2017. Geomorphological dating of pleistocene conglomerates in central Slovenia based on spatial analyses of dolines using LiDAR and Ground Penetrating Radar. *Remote Sensing*, 9, 1213. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs9121213>
- Chen, H., Oguchi, T., Wu, P., 2018. Morphometric analysis of sinkholes using a semi-automatic approach in Zhijin County, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(15). Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3764-3>
- Cordeiro, B. M., 2013. *Planalto carbonático do André Lopes (SP): geomorfologia cárstica e geoespeleologia da Gruta da Tapagem (Caverna do Diabo)*. Dissertação (Mestrado). São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Cruz Junior, F. W., 1998. *Aspectos geomorfológicos e geoespeleologia do carste da região de Iraquara, centro-norte da Chapada Diamantina, Estado da Bahia*. Tese (Doutorado). São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Day, M., 1976. The morphology and hydrology of some Jamaican karst depressions. *Earth Surface Processes*, 1, 111–129. Disponível: <https://doi.org/10.1002/esp.3290010203>
- Denizman, C. A. N., 2003. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, Lower Suwannee River Basin, Florida. *Journal of Cave and Karst Studies*, 65(1), 29–35.
- Doctor, D. H., Young, J. A., 2013. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital elevation data, in: L. Land, D. H. Doctor, J. B. Stephenson (Eds.), *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference*. National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, New Mexico, pp. 449–458.

- Fabri, F. P., Augustin, C. H. R. R., Auler, A. S., 2014. Relevo cárstico em rochas siliclásticas: uma revisão com base na literatura. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 3, 339–351.
- Faulkner, M. G. S., Stafford, K. W., Bryant, A. W., 2013. Delineation and classification of karst depressions Using LIDAR: Fort Hood Military Installation, Texas, in L. Land, D. H. Doctor, J. B. Stephenson (Eds.), *Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference*. National Cave and Karst Research Institute, Carlsbad, New Mexico, pp 459–467.
- Ferrari, J. A., Hiruma, S. T., Karmann, I., 1998. Caracterização morfométrica de uma superfície cárstica do Vale do Ribeira, São Paulo (Núcleo Caboclos - PETAR). *Revista Do Instituto Geológico*, 19(1/2), 9–17.
- Ferreira, C. F., Uagoda, R. E. S., 2019. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. *Revista Caminhos de Geografia*, 20 (70), 519-537.
- Ferreira, C. F., Uagoda, R. E. S., 2020. Desafios no mapeamento de dolinas e as possibilidades do uso de modelos digitais de elevação – MDE's: uma revisão metodológica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. “No prelo”
- Filizola, H. F., Boulet, R., 1996. Evolution and opening of closed depressions developed in a quartz-kaolinitic sedimentary substratum at Taubaté basin (São Paulo, Brazil), and analogy to the slope evolution. *Geomorphology*, 16, 77–86. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(95\)00086-K](https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00086-K)
- Florea, L. J., 2005. Using State-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structure. *Journal of Cave and Karst Studies*, 67(2), 120–124.
- Ford, D.C.; Williams, P.W., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*. Unwin Hyman, London.
- Ford, D.C.; Williams, P.W., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*, 2 ed. Wiley, Chichester.
- Galvão, P., Halihan, T., Hirata, R., 2015. Evaluating karst geotechnical risk in the urbanized area of Sete Lagoas, Minas Gerais, Brazil. *Hydrogeology Journal*, 23, 1499–1513. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1266-x>
- Gao, Y., Alexander Jr, E. C., Barnes, R. J., 2005. Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. *Environmental Geology*, 47, 1083–1098. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00254-005-1241-2>
- Gessert, A., 2016. Geomorphology of the Slovak Karst (Eastern Part). *Journal of Maps*, 12(1), 285–288. Disponível: <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1202874>
- Gutiérrez, F., Guerrero, J., Lucha, P., 2008. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. *Environmental Geology*, 53, 993–1006. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0727-5>
- Hardt, R., Pinto, S. A. F., 2009. Carste em litologias não carbonáticas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 10(2), 99–105.
- Harris, P. M., Purkis, S., Reyes, B., 2018. Statistical pattern analysis of surficial karst in the Pleistocene Miami oolite of South Florida. *Sedimentary Geology*, 367, 84–95. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.02.002>
- Hiruma, S. T., Ferrari, J. A., Amaral, R., Honório, R. F., 2007a. Mapeamento e caracterização de feições cársticas de superfície na faixa Itaiacoca nas regiões de Nova Campina e Bom Sucesso de Itararé, SP/PR. *Revista Do Instituto Geológico*, 27–28(1/2), 1–12.
- Hiruma, S. T., Ferrari, J. A., Amaral, R., Honório, R. F. 2007b. Caracterização morfométrica dos terrenos cársticos das bacias dos rios Ribeira de Iguape e Paranapanema, in: *II Encontro brasileiro de estudos do carste*. Anais... Redespeleo, São Paulo, pp. 47-51.
- Hiruma, S. T., Ferrari, J. A., 2014. Análise comparativa da extração automatizada de dolinas a partir de modelos digitais de terreno. *Revista Do Instituto Geológico*, 34(2), 1–11. Disponível: <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20140006>
- Hofierka, J., Gallay, M., Bandura, P., Šašák, J., 2018. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. *Geomorphology*, 308, 265–277. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.004>
- Hyatt, J. A., Jacobs, P. M., 1996. Distribution and morphology of sinkholes triggered by flooding following Tropical Storm Alberto at Albany, Georgia, USA. *Geomorphology*, 17, 305–316.
- Jeanpert, J., Genthon, P., Maurizot, P., Folio, J., Vendé-leclerc, M., Sérino, J., Join, J., Iseppi, M., 2016. Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific). *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 1854–1868. Disponível: <https://doi.org/10.1002/esp.3952>

- Jones, W. K., White, W. B., 2012. Karst, in: White, W. B.; Culver, D.C. (Eds.), *Encyclopedia of Caves*, 2 Ed. Elsevier, New York, pp.430-438.
- Karmann, I., 1994. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Karmann, I, Ferrari, J. A., 2002. Carste e Cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP: Sistemas de cavernas com paisagens subterrâneas únicas, in: Schobbenhaus, C., Campos, D. A. Queiroz, E. T., Berbet-Born, M. (Orgs.). *Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil*. DNPM/CPRM, Brasília, pp. 401–413.
- Keskin, I., Yilmaz, I., 2016. Morphometric and geological features of karstic depressions in gypsum (Sivas, Turkey). *Environmental Earth Science*, 75(1040), 1–14. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5845-5>
- Klimchouk, A., 1995. Karst morphogenesis in the epikarstic zone. *Cave and Karst Science*, 21(2), 45–50.
- Klimchouk, A., 2015. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta Carsologica*, 44/3, 289–313.
- Klimchouk, A.B., Ford, D.C., 2000. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings, in: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (editors). *Speleogenesis: evolution of karst aquifers*. National Speleological Society, Huntsville, Alabama, pp. 45–53
- Kobal, M., Bertoneclj, I., Pirotti, F., Dakskobler, I., Kutnar, L., 2015. Using Lidar Data to Analyse Sinkhole Characteristics Relevant for Understory Vegetation under Forest Cover — Case Study of a High Karst Area in the Dinaric Mountains. *Plos One*, 10(3), 1–19. Disponível: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122070>
- Kohler, H. C, Parizzi, M.G., Souza, J. B., Castro, V. H. C., 1998. Mapa geomorfológico, in IBAMA/CPRM. *Meio Físico – APA Carste de Lagoa Santa*. IBAMA/CPRM, Belo Horizonte.
- Kovačič, G., Ravbar, N., 2013. Analysis of human induced changes in a karst landscape — the filling of dolines in the Kras plateau, Slovenia. *Science of the Total Environment Journal*, 447, 143–151.
Disponível:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.002>
- Lee, E. J., Shin, S. Y., Ko, B. C., Chang, C., 2016. Early sinkhole detection using a drone-based thermal camera and image processing. *Infrared Physics and Technology*, 78, 223–232.
- Disponível:
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.08.009>
- Lenhare, B. D., Sallun Filho, W., 2014. O carste nas cabeceiras dos rios das Almas, São José de Guapiara (Planalto de Guapiara) e do rio Pilões (Serra de Paranapiacaba), SP. *Geociências*, 33(4), 686–700.
- Maciel Filho, C. L., 2010. Mapa 14: Geomorfologia área de influência direta, in: Consórcio empresarial Pai Querê – CEPAQ AHE Pai Querê, *Estudo de impacto ambiental do aproveitamento hidrelétrico Pai Querê – 292 MW*.
- Maciel Filho, C. L., Nummer, A. V., Silva, J. L. S., Sangoi, D. S., Descovi Filho, L., 2013. Feições de carste sobre a formação Serra Geral na região de Vacaria, RS, e Lages, SC. *Caminhos de Geografia*, 14(48), 197–208.
- Maurity, C. W., Kotschoubey, B., 2005. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 Serra dos Carajás - PA. *Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas*. *O Carste*, 17, 78–91.
- Melo, M. S. De, Giannini, P. C. F., 2007. Sandstone dissolution landforms in the Furnas Formation, Southern Brazil. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 2149–2164. Disponível: <https://doi.org/10.1002/esp>
- Miao, X., Qiu, X., Wu, S., Luo, J., Gouzie, D. R., Xie, H., 2013. Developing efficient procedures for automated sinkhole extraction from lidar DEMs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 79(6), 545–554.
- Morais, F., 2017. Classificação morfológica das dolinas da região de Lagoa da Confusão – TO, in: 34o Congresso Brasileiro de Espeleologia. *Anais... SBE, Ouro Preto*, pp. 283–287.
- Obu, J., Podobnikar, T., 2013. Algoritem za prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela reliefa. *Geodetski Vestnik*, 57(2), 260–270. Disponível: <https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2013.02.260-270>
- Öztürk, M. Z., Şimşek, M., Şener, M. F., Utlu, M., 2018. GIS based analysis of doline density on Taurus Mountains, Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 77, 536. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7717-7>
- Pardo-Igúzquiza, E., Durán, J. J., Dowd, P. A., 2013. Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. *Acta Carsologica*, 42/1, 17–24.
- Pardo-Igúzquiza, E., Pulido-Bosch, A., López-Chicano, M., Durán, J. J., 2016. Morphometric analysis of karst depressions on a Mediterranean karst massif. *Geografiska*

- Annaler: Series A, Physical Geography, 98(3), 247–263. Disponível: <https://doi.org/10.1111/geoa.12135>
- Pepe, M., Parise, M., 2014. Structural control on development of karst landscape in the Salento Peninsula (Apulia, SE Italy). *Acta Carsologica*, 43(1), 101–114.
- Pereira, R. G. F. de A., 1998. Caracterização geomorfológica e geoespeleológica do carste da bacia do rio Una, borda leste da Chapada Diamantina (município de Itaetê, Estado da Bahia). Dissertação (Mestrado). São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Piló, L. B., 1998. Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG. Tese (Doutorado em Geografia). São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Piló, L. B., Auler, A. S., Martins, F., 2015. Carajás National Forest: Iron ore plateaus and caves in southeastern Amazon, in: Vieira, B. C.; Salgado, A.A.R.; Santos, L. J. C. (Orgs.), *Landscapes and Landforms of Brazil*. Springer, pp. 273–283. Disponível: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0>
- Plan, L., Decker, K., 2006. Quantitative karst morphology of the Hochschwab plateau, Eastern Alps, Austria. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 147, 29–54.
- Rubbioli, E., Auler, A., Menin, D., Brandi, R., 2019. Cavernas – Atlas do Brasil Subterrâneo. ICMBio, Brasília.
- Salles, L. Q., Leal, L. R. B., Pereira, R. G. F. de A., Laureano, F. V., Gonçalves, T. S., 2018a. Influência dos aspectos hidrológicos de aquíferos cársticos na evolução do relevo: porção central da Chapada Diamantina, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 19(1), 93–106.
- Salles, L. Q., Galvão, P., Leal, L. R. B., Pereira, R. G. F. A., Purificação, C. G. C. Laureano, F. V., 2018b. Evaluation of susceptibility for terrain collapse and subsidence in karst areas, municipality of Iraquara, Chapada Diamantina (BA), Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 77(16), 593. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7769-8>
- Sallun Filho, W., Karmann, I., 2007. Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). *Revista Brasileira de Geociências*, 37(3), 551–564.
- Schrage, T. J., Uagoda, R. E. S., 2017. Distribuição espacial de depressões na bacia do alto Rio Preto (GO, DF, MG) e suas relações com controles geológicos e pedogeomorfológicos. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(2), 379–395.
- Seale, L. D., Florea, L. J., Vacher, H. L., Brinkmann, R., 2008. Using ALSM to map sinkholes in the urbanized covered karst of Pinellas County, Florida - 1, methodological considerations. *Environmental Geology*, 54(5), 995–1005. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0890-8>
- Siart, C., Bubenzer, O., Eitel, B., 2009. Geomorphology combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: a multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*, 112(1–2), 106–121. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.010>
- Silva, H. M., Leal, L. R. B., 2007. Controle estrutural das feições cársticas na bacia hidrogeológica dos rios Verde e Jacaré, micro-região de Irecê, Bahia, in: II Encontro brasileiro de estudos do carste. *Anais... Redespeleo*, São Paulo, pp. 26-31.
- Silva, O. L., Bezerra, F. H. R., Maia, R. P., Cazarin, C. L., 2017. Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. *Geomorphology*, 295, 611–630. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.025>
- Simões, P. R. G., 2007. Caracterização física de ambientes cársticos através de sensoriamento remoto e SIG: O caso do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu - Januária/Itacarambi, MG. Dissertação (Mestrado). Campinas, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- Souza, F. C. R., Salgado, A. A. R., 2014. Caracterização das Feições Exocársticas e Fluviocársticas Desenvolvidas em Quartzitos na Região Sudeste de Diamantina/MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 07(01), 54–65.
- Telbisz, T., Dragušica, H., Nagy, B., 2009. Doline morphometric analysis and karst morphology of Biokovo Mt (Croatia) based on field observations and digital terrain analysis. *Hrvatski Geografski Glasnik*, 71(2), 5–22.
- Telbisz, T., Látos, T., Deák, M., Székely, B., Koma, Z., Standovár, T., 2016. The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example. *Acta Carsologica*, 45(1), 5–48.

- Disponível:
<https://doi.org/10.3986/ac.v45i1.4138>
- Uagoda, R., Avelar, A., Netto, A. L. C., 2011. Karstic morphology control in non-carbonate rocks: Santana basin, middle Paraíba do Sul river valley, Brazil. *Zeitschrift Für Geomorphologie*, 55(1), 1–13. Disponível: <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2011/0055-0031>
- Vital, S. R. O.; Sallum Filho, W.; Barreto, A. M. F.; SILVEIRA, T. A., 2016. Método para detecção e caracterização morfométrica de depressões fechadas a partir de modelos digitais de elevação, in: VI Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Anais... Recife.
- Wall, J., Bohnenstiehl, D. R., Wegmann, K. W., Levine, N. S., 2017. Morphometric comparisons between automated and manual karst depression inventories in Apalachicola National Forest, Florida, and Mammoth Cave National Park, Kentucky, USA. *Natural Hazards*, 85(2), 729–749. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2600-x>
- Williams, P. W., 1972. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*, 83(3), 761–796.
- Disponível: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83)
- Williams, P. W., 1983. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. *Journal of Hydrology*, 61, 45–67.
- Wu, Q., Deng, C., Chen, Z., 2016. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. *Geomorphology*, 266, 1–10. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.05.006>
- Zhu, J., Taylor, T. P., Currens, J. C., Crawford, M. M., 2014. Improved karst sinkhole mapping in Kentucky using LiDAR techniques: a pilot study in Floyds Fork Watershed. *Journal of Cave and Karst Studies*, 76(3), 207–216. <https://doi.org/10.4311/2013ES0135>
- Zhu, J., Pierskalla, W. P., 2016. Applying a weighted random forests method to extract karst sinkholes from LiDAR data. *Journal of Hydrology*, 533, 343–352. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.012>
- Zwahlen, F., 2004. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers: final report (COST action 620). Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

2.3 DESAFIOS NO MAPEAMENTO DE DOLINAS E AS POSSIBILIDADES DO USO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO – MDE'S: UMA REVISÃO METODOLÓGICA

Challenges in mapping dolines and the possibilities of using digital elevation models - DEM's: a methodological review

Resumo

As dolinas são consideradas feições indicadoras do carste e além de atestarem processos evolutivos, também são analisadas frente a processos hidrodinâmicos e ambientais. O mapeamento dessas feições serve como estratégia para análises posteriores, exigindo, desde os primeiros trabalhos, grande dispêndio de tempo e recursos, com significativa subjetividade inerente à fotointerpretação ou problemas de escala. Com a disponibilidade de novas ferramentas e bases de dados, diversos trabalhos realizaram o mapeamento de dolinas com o auxílio de modelos digitais de elevação, seja por abordagens manuais ou automatizadas. Entretanto, as dificuldades de detecção dos pontos de absorção, que individualizam as dolinas, e os limites estabelecidos por seu perímetro continuam sendo uma questão controversa, que restringe a comparação entre áreas cársticas e podem induzir em discrepâncias significativas de atributos espaciais, como área, profundidade e eixos principais de desenvolvimento. Neste artigo são discutidas as principais metodologias de mapeamento de dolinas e sintetizadas as estratégias mais utilizadas para superar questões como erros de omissão de feições verdadeiras, contagem de feições espúrias ou falsas, a localização e individualização mais precisa das depressões cársticas.

Palavras chave: Dolinas; MDE; Detecção

Abstract

Dolines are considered karst indicator features and besides attesting to evolutionary processes, they are analyzed in relation to hydrodynamic and environmental processes yet. The mapping of these features serves as a strategy for later analysis, requiring, since the first works, a great deal of time and resources, with significant subjectivity inherent in photointerpretation or scale problems. With the availability of new tools and databases, several studies carried out the mapping of dolines with the help of digital elevation models, either by manual or automated approaches. However, the difficulties in detecting points of absorption, which individualize the dolines, and the limits established by its perimeter remain a controversial issue, which restricts the comparison between karst areas and may induce significant discrepancies of spatial attributes such as area, depth and main development axes. This paper discusses the main methods of mapping dolines and synthesized the strategies most used to overcome issues such as errors of omission of true features, counting of spurious or false features, location and more accurate individualization of karst depressions.

Keywords: Doline; DEM; Detection

1. Introdução

Dolinas são feições deprimidas, de fluxo centrípeto, sem conexão com redes de drenagem superficiais e sua presença na paisagem pode ser considerada uma forma indicadora do sistema cárstico (FORD e WILLIAMS, 2007). Por representarem a conexão entre a superfície e o meio subterrâneo, tendo forte relação com o maior desenvolvimento do epicarste (WILLIAMS, 1983; KLIMCHOUK, 1995), possuem importância ambiental por concentrarem fluxos hídricos autogênicos e recursos tróficos à fauna subterrânea. Estas feições funcionam como

moderadoras do aporte hidrológico aos sistemas aquíferos subjacentes (epicárstico, vadoso, freático; WILLIAMS, 2008), e frequentemente estão relacionadas a problemas ambientais na superfície, como alagamentos ou colapsos repentinos (GUTIERREZ et al., 2014). Também é comum que dolinas estejam associadas a sistemas de cavernas, muitas vezes servindo de única entrada disponível para acessar essas feições do carste subterrâneo, permitindo uma maior compreensão da evolução e funcionamento dos ambientes cársticos como um todo.

O mapeamento de dolinas é realizado desde muito tempo como um procedimento de caracterização geomorfológica de regiões cársticas, podendo auxiliar interpretações evolutivas destas paisagens, sobretudo quando realizadas com o apoio de análises morfométricas (WILLIAMS, 1972; KARMANN, 1994). Estes mapeamentos podem ser utilizados como precursores de testes qualitativos mais detalhados, com traçadores corantes, para definição de rotas de fluxo e delimitação de bacias hidrográficas subterrâneas (ANGEL et al., 2004). Em regiões com maior risco de colapsos também podem ser aplicadas técnicas de mapeamento de dolinas, baseadas na densidade de ocorrências, de modo a produzir estimativas prévias de maior susceptibilidade (CAHALAN e MILEWSKI, 2018; SALLES et al. 2018). A localização destas importantes feições de concentração de fluxo também é utilizada em análises de vulnerabilidade intrínseca de contaminação dos aquíferos cársticos (ZWAHLEN, 2004). Por fim, destacam-se trabalhos realizados no intuito de se prevenir problemas técnicos de operação em obras viárias, como rodovias e ferrovias, susceptíveis a prejuízos por colapsos associados a dolinas (ZHOU e BECK, 2005; ANASTÁCIO et al., 2019).

São poucos trabalhos que realizaram mapeamentos de dolinas no Brasil, em especial com o uso de modelos digitais e abordagens automatizadas de detecção. A maior parte dos trabalhos realizados nessa área se utilizou de fotointerpretação em escalas inadequadas, como 1:60.000 por exemplo. A identificação de depressões cársticas por métodos “manuais”, ou seja, por meio da delimitação visual em fotos aéreas, imagens de satélite, mapas topográficos ou diretamente no campo, pode significar uma tarefa consideravelmente complexa, subjetiva, imprecisa e demorada, especialmente em grandes áreas. O objetivo deste artigo é justamente investigar de, forma detalhada, os trabalhos já realizados e as metodologias empregadas para detecção remota de dolinas, de forma automatizada ou não, especialmente via modelos digitais de elevação (MDE). A disponibilidade de novas fontes de dados de maior resolução e novas tecnologias devem ser confrontadas aos métodos tradicionais de mapeamento de dolinas. A intenção é avaliar as ferramentas utilizadas, os filtros e demais soluções encontradas em cada trabalho pesquisado para diferenciar feições naturais das artificiais, bem como observar os limites e recortes mais utilizados na delimitação de dolinas. Com base nesta investigação pretende-se estabelecer as estratégias e parâmetros prévios para a futura realização do mapeamento de depressões em uma extensa área cárstica nacional, de difícil recobrimento por métodos tradicionais.

2. Detecção X Delimitação

O mapeamento sistemático de dolinas requer a definição prévia de algumas estratégias e protocolos. Dentre essas premissas está a definição da área de investigação, a escolha da base de dados, a escala mais apropriada, o método de detecção do ponto mais representativo da dolina e, sobretudo, como determinar seu perímetro. A localização pontual das dolinas pode ser realizada no cálculo do centroide, como realizou Denizman (2003) para uma região de carste coberto e relevo suave na Flórida, sob a alegação de diminuir a subjetividade e dinamizar o trabalho. Ford e Williams (2007) defendem que a locação espacial de uma dolina, equivalente ao ponto de detecção, seja a partir do nível mais baixo da depressão, que converge os fluxos, e não necessariamente o centro geométrico da feição. Bondesan et al. (1992) ressaltam a importância que a distribuição dos pontos mais profundos das dolinas possui, por representarem

o foco de corrosão acelerada, equiparáveis aos fundos de vales, ou talvegues em sistemas fluviais abertos. O ponto mais representativo de uma dolina equivaleria, portanto, ao sumidouro, ou ponto de absorção para o subterrâneo. A identificação destes pontos auxilia na tarefa de subdivisão de dolinas numa situação de adjacência, ou seja, numa depressão composta, em que a existência dos pontos de infiltração permite a individualização das dolinas internas, ao passo que o centroide pode generalizar essas nuances. Por outro lado, em situações de dolinas colmatadas, de fundo plano, o centroide pode ser a solução possível, visto que somente com escavação seria possível identificar de fato o ponto de absorção.

A determinação dos pontos de absorção por métodos tradicionais com o uso de mapas topográficos, fotos aéreas e campo, no entanto, nem sempre é possível de forma inequívoca. Muitas vezes é mais fácil e imediato identificar e localizar a depressão pelo seu formato areal mais amplo que determinar o ponto mais profundo. Isso é especialmente verdadeiro em mapas topográficos de pequena escala ou por meio de análise de fotos aéreas em regiões de densa vegetação, que dificultam a identificação precisa dos pontos de absorção. Em outras situações, como em grandes depressões compostas, pode ser mais fácil determinar os pontos de absorção que separar cada dolina interna individualmente, em virtude da falta de um critério de fácil visualização ou aplicação que defina as bordas (perímetro) das feições, muitas vezes em pontos altimétricos distintos. Essas questões são aqui pontuadas para ressaltar a dualidade detecção/delimitação nos trabalhos de mapeamento de depressões cársticas.

Mais complexo que a definição do ponto representativo de uma dolina é a sua delimitação. Os métodos mais tradicionais utilizados para mapeamento indireto do perímetro de dolinas, ou seja, por mapas ou imagens, são: identificação da curva de nível fechada mais externa em mapas topográficos; identificação dos divisores topográficos da bacia de contribuição para cada ponto de absorção; ou a identificação da linha quebra de relevo (em imagens ou campo, geralmente).

A delimitação manual com o uso das linhas fechadas mais externas em mapas topográficos, apesar de laboriosa é de fácil realização, bastando transpor o polígono formado (hachurado em papel vegetal ou vetorizado em ambiente digital), não requerendo maiores interpretações para sua realização. Entretanto, segundo Palmer (2007), a representação de dolinas em mapas topográficos típicos, por meio de contornos fechados (hachurados), alcança de 10 a 25% das feições realmente existentes, normalmente ressaltando apenas as maiores depressões. A identificação das dolinas em mapas topográficos depende, portanto, do tamanho dessas feições, da escala do mapa e da equidistância vertical da linha topográfica. Segundo Bondesan et al. (1992) análises morfométricas em mapas topográficos somente alcançam uma acurácia suficientemente detalhada a partir de escalas na ordem de 1:10.000 ou 1:5.000. Ford e Williams (2007) enfatizam que mesmo em escalas grandes e pequeno intervalo de contorno, informações significativas são perdidas, especialmente para feições rasas, que não ultrapassem a equidistância das linhas topográficas.

O método baseado na bacia de contribuição para cada ponto de absorção, com a delimitação dos divisores topográficos por fotointerpretação (1:15.000) foi utilizado por Williams (1972) para delimitar grandes depressões fechadas justapostas na Nova Guiné. Ao traçar em planta os divisores topográficos que bordejavam os pontos de absorção dessas depressões o autor identificou um padrão em rede celular, com formatos hexagonais ou pentagonais, que recobriam toda a superfície, ao que atribuiu o nome de carste poligonal. O uso de mapas topográficos para esse tipo de delimitação também é possível, porém com as mesmas perdas de informações por conta da escala e equidistância vertical, como já mencionado. O método foi amplamente utilizado posteriormente para delimitação de dolinas ao redor do mundo, especialmente em regiões tropicais com incidência de padrões poligonais, como no carste do Vale do Ribeira, onde Karmann (1994) identificou uma quantidade de feições por área similar ao estudo de

Williams (1972), utilizando, porém, fotografias em escala menos adequada (1:25.000). Apesar da eficácia do método para áreas de carste poligonal, a sua adoção para áreas de dolinas isoladas na paisagem tende a magnificar exageradamente o tamanho das feições, podendo não representar adequadamente a paisagem cárstica (Figura 1). Além disso, como todo trabalho de fotointerpretação, é passível de certo grau de subjetividade e requer muito tempo e trabalho para abranger grandes áreas.

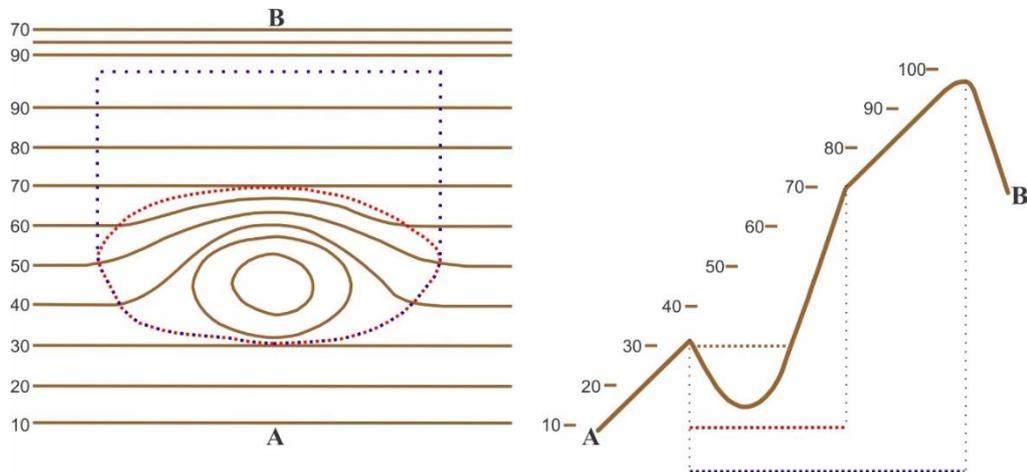


Figura 1: Representação de uma dolina em planta no mapa topográfico e correspondente perfil num relevo inclinado. Pontilhado em azul demarca o perímetro da dolina no método por bacia topográfica, abrangendo uma área maior. A linha pontilhada vermelha representa o método da quebra de relevo. Abrangendo a menor área nessa simulação, o método da linha de contorno fechada mais externa é representado pela cor marrom (pontilhada no perfil e contínua no mapa topográfico). Adaptado de Bondesan et al. (1992).

Por fim, o método baseado na mudança abrupta da inclinação da superfície, ou quebra de relevo, foi defendida por Šušteršič (1994) em oposição à adoção dos métodos anteriores. Segundo o autor a identificação do perímetro de dolinas é relativamente fácil por meio de fotos aéreas (1:5.000, p. ex.), ao identificar a separação entre a superfície cárstica “normal” da influenciada por processos de encosta, induzidas pela influência centrípeta da depressão. Esse conceito, que separa entre processos eminentemente superficiais dos induzidos pelo sistema subterrâneo, indica que outros fatores, como de encosta, operam na configuração da feição além do contorno de contribuição hídrica. Por este motivo o perímetro não é altimetricamente regular, como no caso da linha topográfica mais externa, podendo apresentar variações significativas em relevo mais movimentado (Figura 2). Apesar de mais indicado para áreas com ocorrência de dolinas dispersas na paisagem, o fator subjetividade na fotointerpretação pode ser maior que na identificação dos divisores topográficos, especialmente no caso de feições menores ou de formato mais suave. Por outro lado, fatores como a mudança de aspecto da vegetação ou o efeito de sombra favorecem a identificação da ruptura na fotointerpretação.

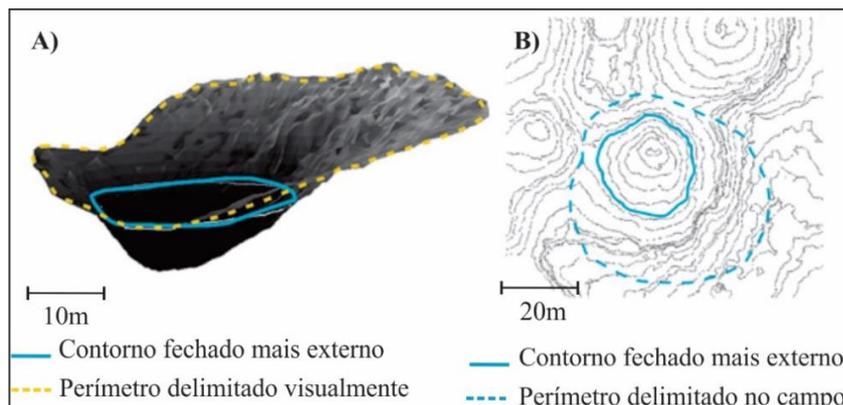


Figura 2: Diferenças de perímetro entre o conceito de contorno fechado e quebra de relevo. A) Perímetro delineado a partir de um MDE LiDAR sombreado; B) perímetro delineado em campo versus mapa topográfico. Adaptado de Šegina et al. (2018).

Nesse contexto de alguma imprecisão ou subjetividade na utilização de bases remotas para delimitação de dolinas, uma alternativa mais direta seria a coleta de dados *in loco*. Embora o mapeamento de campo possa ser um método capaz de gerar dados acurados para análises morfométricas, o dispêndio de tempo e pequena abrangência de área tornam essa opção pouco prática (BONDESAM et al., 1992; FORD e WILLIAMS, 2007). A decisão de qual limite deve ser usado para representar o perímetro permanece, pois nem sempre a dolina se apresenta uniforme, circular, numa paisagem aplainada, especialmente em ambientes de alta interferência de processos superficiais, como no carste tropical. Apesar dessas dificuldades, trabalhos recentes ainda se utilizam desta ferramenta, seja para checar o levantamento prévio de gabinete, seja para efetiva aquisição principal de dados e mapeamento. Por exemplo, Keskin e Yilmaz (2016) mapearam 940 dolinas com o uso de GPS, trena de fita e a laser, numa área de 92km² na Turquia.

Existem algumas formas de se mapear e obter os principais dados morfométricos de dolinas em campo. O mais utilizado é por meio da topografia via instrumentos de medida como bússola, clinômetro, trena, GPS ou teodolito, a partir dos quais é possível estabelecer medições radiais ou fechamento de poligonais, como normalmente utilizado no mapeamento de cavernas (RUBBIOLI e MOURA, 2005). Para feições de grandes tamanhos, uma possibilidade é a coleta de pontos ou caminhamento com GPS ao longo de seu perímetro e coleta do ponto de maior profundidade. Entretanto, essas técnicas carecem de precisão em função do erro inerente aos aparelhos, especialmente em áreas muito vegetadas ou acidentadas. Bondesan et al. (1992) consideram que um dos melhores métodos foi o proposto por Šušteršič (1986, Apud BONDESAM et al., 1992) ao utilizar de um teodolito instalado no ponto mais profundo da dolina, de onde se traça seis perfis radiais até as bordas. A partir de cada um desses perfis são tomadas 12 medidas equidistantes de altura em relação ao solo e assim determinadas 72 coordenadas relativas, de razoável acurácia para posterior processamento computacional. Para uma dolina de tamanho “médio” em ambiente não florestado, Šušteršič levou uma hora e meia para realizar essas medidas, algo praticamente inviável para grandes amostras.

Tabela 1: Matriz qualitativa de avaliação dos métodos manuais de delimitação de dolinas (prós e contras). *escala 1:1 (apenas para pequenas áreas).

| | Curva Fechada | Bacia Topográfica | Quebra de Relevo | Trabalho de Campo |
|--------------------------|---------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Facilidade | ++ | + | +- | -- |
| Tempo | +- | +- | - | -- |
| Subjetividade | ++ | +- | +- | +- |
| Subdimensiona | -- | + | ++ | +- |
| Superdimensiona | + | -- | ++ | +- |
| Ponto mais fundo | - | +- | +- | ++ |
| Precisão morfológica | -- | +- | ++ | + |
| Processos de encosta | - | +- | + | ++ |
| Processos hidrológicos | + | ++ | +- | +- |
| Depende de grande escala | -- | +- | -- | --* |
| Depende de imagens | ++ | +- | - | +- |
| Acertos e Erros | 9 e 9 | 11 e 9 | 11 e 8 | 10 e 11 |
| Precisão final | 1 | 1,22 | 1,37 | 0,9 |

De um modo geral, tendo em vista a análise qualitativa acima (Tabela 1) percebe-se prós e contras em todos os métodos, dependendo fortemente dos propósitos do mapeamento em curso, nível de acurácia desejado, tempo e acesso às fontes de dados disponíveis. Uma ligeira vantagem foi observada para o método quebra de relevo nessa comparação, considerando seu melhor desempenho nos aspectos morfológicos. A análise realizada, entretanto, contém seu fator de subjetividade.

3. O uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) para detecção/delimitação de dolinas

Com o avanço das tecnologias cartográficas, disponibilidade crescente de bases de dados remotas (satélite, sensor aerotransportado) e principalmente com o desenvolvimento, a partir da década de 1980, de computadores e softwares capazes de processar grandes quantidades de informações geográficas, novas possibilidades de mapeamento e automação foram sendo incorporadas e aplicadas no campo das geociências. Os dados raster obtidos por sensoriamento remoto permitiram a construção de modelos digitais de elevação e a partir disso diversas ferramentas computacionais e algoritmos foram sendo criados para a extração e vetorização de informações como a topografia, bacias de drenagem e rotas de fluxos superficiais.

Nesse sentido, o algoritmo apresentado por Jenson e Domingue (1988) tinha como principal propósito a restituição hidrológica dos canais e bacias em modelos digitais, baseados principalmente na direção e acumulação de fluxo de cada pixel, em processos computacionais de crescimento de regiões (técnicas de vizinhança e espaciais iterativas). A definição das linhas de drenagens nos modelos é baseada na sucessão de células mais baixas (conforme altimetria de cada pixel) de forma que o fluxo seja sempre “drenado” da cena (raster). Ou seja, trata-se de uma simulação da drenagem baseada nos dados altimétricos de cada pixel em relação aos seus vizinhos. Em geral o procedimento de construção da drenagem nos modelos encontra percalços, representados por depressões unicelulares (*pits*), que não drenam água para canto algum, sendo considerados defeitos do modelo (artefatos, ou depressões espúrias) e que devem ser corrigidos. A correção se dá pelo preenchimento dos pixels da depressão até o nível a partir do qual possa haver a retomada da conexão com a drenagem, com a elevação “artificial” do valor de altimetria dos pixels inferiores a esse limite (Figura 3).

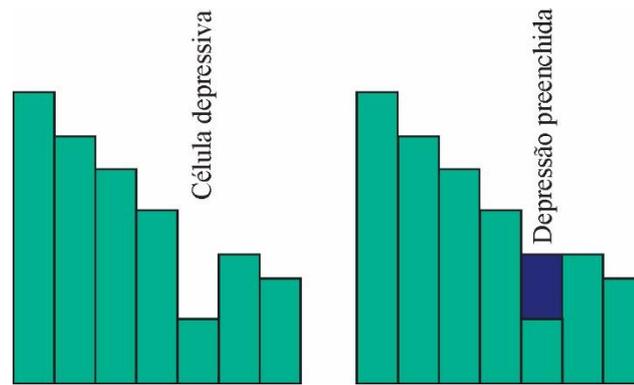


Figura 3: Processo de preenchimento de pontos depressivos (pit) num raster. Adaptado de Guimarães et al. (2005).

O artigo de Jenson e Domingue (1988) previa a possibilidade de que neste processo depressões autênticas, de origem cárstica ou glacial, fossem preenchidas. Entretanto, essa possibilidade se mostrou útil para a detecção de dolinas verdadeiras em áreas carstificadas, por um procedimento aritmético simples de subtração. Uma vez realizado o procedimento de preenchimento, criando-se um “MDE sem depressões”, realiza-se a subtração do mesmo pelo “MDE original”, resultando em uma base de dados contendo apenas depressões. Outra possibilidade trazida pelos algoritmos desenvolvidos de restituição hidrológica é a definição das bacias de contribuição de cada ponto de absorção (buraco), ou seja, depressão unicelular (*pothole*, *sink* ou *pit* em inglês). Ambos os procedimentos admitem ainda a vetorização das informações adquiridas (linhas e polígonos) permitindo a aquisição de dados morfométricos (área e volume, p.ex.).

Esses métodos de identificação de depressões, contudo, não distinguem feições eminentemente cársticas (naturais) de outras artificialmente criadas, necessitando, portanto, de pré ou pós processamento. Depressões espúrias podem ser criadas pelo processamento do raster, como por exemplo na interpolação em áreas muito planas (*loopings*). Por outro lado, ocorrem depressões verdadeiras na superfície, mas de origem antrópica, muitas vezes ligadas a barragens, pontes, minas, diques em obras lineares (estrada, ferrovia), curvas de nível na agricultura, intervenções urbanas, entre outros (Figura 4). Grande parte dos trabalhos envolvendo o mapeamento de depressões cársticas em MDE se dedicam a formas de minimizar este problema, com a utilização de bases de maior resolução, aplicação de técnicas de suavização ou reamostragem e adoção de filtros (pré-requisitos), como será tratado adiante.



Figura 4: Sequência de falsas dolinas associadas a rodovia indicadas por setas azuis (sistema contra enchentes). A) imagem histórica Google que resalta depressões em época seca; B) depressões em época chuvosa, sem contraste da vegetação (foto do autor).

Após uma pesquisa mais aprofundada sobre trabalhos relacionados ao mapeamento de dolinas com o uso de aplicativos de geoinformação, novas bases de dados e em especial por meio de MDE's, observou-se a distinção entre alguns métodos principais para detecção/delimitação automatizada de dolinas. A maior parte dos estudos avaliados utilizam das técnicas de restituição hidrológica em MDE para identificação de dolinas, variando algumas nuances em relação a delimitação e hierarquização das feições.

3.1 Detecção de *pits* e delimitação de dolinas por preenchimento até o limite da bacia

A técnica de detecção de *pits* e delimitação das depressões a partir das células mais inferiores até o divisor topográfico segue os algoritmos propostos por Jenson e Domingue (1988). A principal diferença deste método com o uso de MDE em relação aos que serão tratados em sequência é a delimitação da área de contribuição hídrica para cada ponto mais profundo baseada nos divisores topográficos, similar ao realizado manualmente por meio de mapas topográficos ou fotografias aéreas (como em WILLIAMS, 1972). Cada ponto mais profundo sem alternativas laterais de fluxo é identificado de forma automática, assim como a delimitação da sua bacia, considerando os dados de direção e acumulação de fluxo de cada célula do raster. Este procedimento não considera as quebras de relevo internas à bacia, realizada em análises visuais e nem tampouco a linha de contorno fechada mais externa, criada por interpolação em mapas topográficos. A profundidade da dolina é calculada pela diferença entre a elevação mínima (do *pit*) e a máxima, na cumeada (BAUER, 2015).

Siart et al. (2009) utilizaram o método para contabilizar as dolinas na Ilha de Creta, mas observaram que a baixa resolução das fontes utilizadas para gerar o modelo (SRTM e ASTER) implicou em detecção apenas de feições grandes a médias, necessitando adicionar análises visuais e campo para construção do mapa geomorfológico local. Neste trabalho observa-se uma das primeiras tentativas de aplicação de filtros morfométricos de dolinas para tentar eliminar o grande número de falsos positivos, ou seja, feições depressivas similares a dolinas, mas de origem artificial (antrópica ou por defeito na geração do MDE).

Telbisz et al. (2009) aplicaram a técnica numa área cárstica croata com a utilização de um MDE construído a partir de mapa topográfico (1:25.000). Foi um dos primeiros trabalhos a notar discrepâncias entre a aplicação deste método se comparado a outros, além de notar que é mais indicado para o carste poligonal, pela justaposição das depressões até o divisor topográfico, ocupando toda a área. Isso decorre do fato de que uma vez identificado o ponto mais profundo da dolina pelo método, a delimitação no raster busca de forma iterativa a bacia topográfica contribuinte para este ponto de absorção. Cada *pit*, portanto, terá sua bacia delimitada, o que denota uma dimensão espacial para as dolinas bem superior.

Bases de dados com maior resolução então passaram a ser utilizadas na expectativa de melhores resultados para a identificação de dolinas com o critério de delimitação por bacia. Pardo-Igúzquiza et al. (2013) utilizaram um modelo a partir de fotos aéreas com 5 metros de resolução e conseguiram identificar 324 depressões cársticas na Sierra de las Nieves (Espanha), muitas não anotadas em fotointerpretação ou campo. Os trabalhos de Miao et al. (2013) e Faulkner et al. (2013) inauguram o uso do LiDAR, ou “*Light Detecting and Ranging*”, com um metro de resolução, para a delimitação das dolinas baseadas na bacia de contribuição. A grande vantagem dos modelos LiDAR, além da sua alta resolução espacial, é a possibilidade de que os feixes ultrapassem o dossel em áreas vegetadas e consiga representar de forma mais fidedigna a

superfície do solo, indicando, portanto, o formato mais autêntico das dolinas ou depressões (Figura 5).

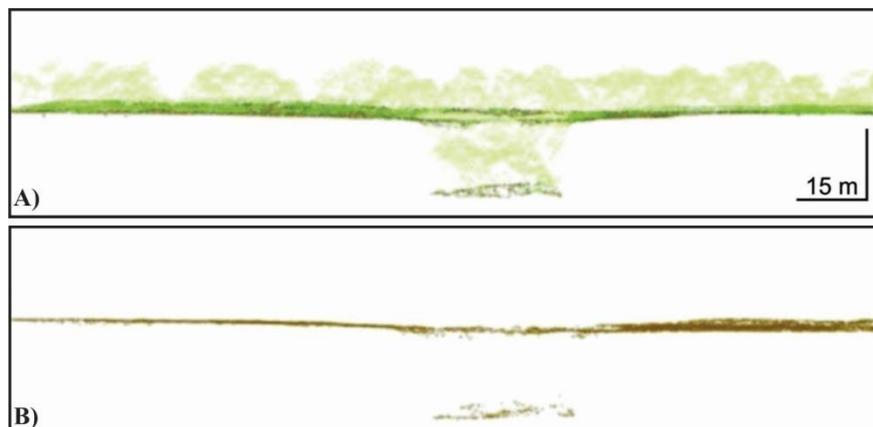


Figura 5: Corte em modelo digital com dados LiDAR mostrando: A) nuvem de pontos com vegetação e solo, com dolina ao centro; B) nuvem de pontos filtrada, com apenas os dados do solo, ressaltando melhor a dolina. Adaptado de Silva et al. (2017).

O uso de bases de maior resolução combinadas com métodos automatizados de detecção de depressões resultou na praticamente onipresente adoção de filtros para reduzir a quantidade de retornos em estudos posteriores (falsos positivos). Os pré-requisitos utilizados, dentre qualitativos (como proximidades) e especialmente morfométricos (área, profundidade, etc.) visam afunilar a amostra de depressões em direção ao que mais represente a realidade de cada local estudado. Uma série de trabalhos de caráter metodológico foram realizados buscando comparar o uso de distintas fontes de dados, o uso de levantamentos manuais prévios versus automatizado, e a adoção de outras técnicas de confirmação de dolinas (MIAO et al., 2013; HIRUMA e FERRARI, 2014; CHEN et al., 2018).

3.2 Detecção e delimitação de dolinas por preenchimento até o nível de extravasamento

Outra possibilidade de detecção e delimitação de dolinas em modelos digitais é parcialmente similar ao descrito anteriormente, baseado nos mesmos princípios de restituição hidrológica via cálculos iterativos entre células adjacentes (direção e acúmulo de fluxo), porém com um delimitador diferenciado. Enquanto no método anterior o limite estabelecido automaticamente pelo programa utilizado era a bacia hidrográfica de contribuição desde o *pit* identificado (maior abrangência), no método por extravasamento o limite é dado pela isolinha virtual determinada a partir do ponto de menor elevação em que fluxo em superfície pode ser retomado a jusante (*pour point*), mesmo que para outra depressão adjacente (abrangência menor). Ou como na analogia de Wall et al. (2017), o limite da depressão seria as margens de uma represa virtual de água num ambiente SIG.

O conceito é similar ao uso da curva de nível fechada mais externa em mapas topográficos para definição do limite da dolina, no qual todos os pontos delimitadores da feição possuem a mesma elevação. Porém, num MDE é possível estabelecer com maior precisão esse limite de extravasamento utilizando as informações de cada pixel, não se limitando a um intervalo pré-estabelecido, como nas curvas de nível em mapas topográficos. As diferenças de profundidade e especialmente de área podem ser bastante significativas entre os métodos (extravasamento-curva fechada mais externa), especialmente para áreas mais planas (Figura 6). Para determinar essa abrangência espacial é realizada, de forma similar, a subtração do MDE preenchido até o

limite de extravasamento pelo original. A profundidade da dolina é calculada pela diferença entre a elevação mínima da depressão (do *pit*) e a elevação do ponto de extravasamento, que é menor que o limite da bacia (BAUER, 2015).

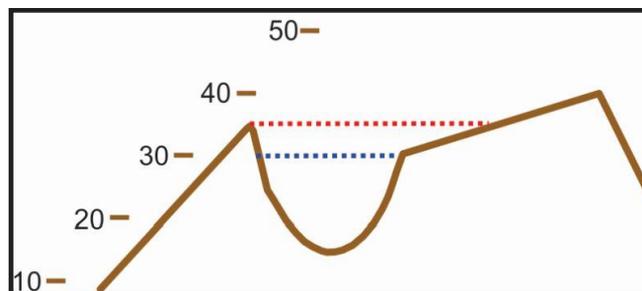


Figura 6: Perfil simulando uma dolina mostrando: pontilhado em azul correspondente à curva fechada mais externa em mapa topográfico (altitude 30m), com abrangência espacial inferior; e pontilhado vermelho no ponto de extravasamento (aproximadamente 36m altitude) passível de ser detectada em MDE, com maior abrangência.

Um dos primeiros esforços para identificação de depressões cársticas utilizando essa técnica automatizada foi realizada por Guimarães et al. (2005) na região de Lago Santa-MG. Utilizando dados de mapas topográficos (1:10:000) e ASTER (15m) para construção de modelos e aplicando a técnica de preenchimento a partir dos *pits* e posterior subtração do MDE original, conseguiram ressaltar as depressões e aferir melhores resultados com os dados ASTER. Apesar de não terem realizado a contabilização das depressões e análises morfométricas, neste trabalho realizaram a aplicação de alguns filtros qualitativos (espectro fotossintético, proximidade a cavernas) e aplicação de suavização do MDE para destacar apenas depressões maiores.

O trabalho de Telbisz et al. (2009) simulou três metodologias já discutidas acima, ou seja, a baseada na bacia, no ponto de extravasamento e do contorno fechado mais externo em mapas topográficos (Figura 7). Apesar de terem optado pelo método por bacia em sua área de estudo, por se tratar de carste poligonal na Croácia, os autores identificaram que muitas vezes o limite entre as duas metodologias restantes era coincidente ou maior para o método de extravasamento. Essas discrepâncias entre as formas de mapear dolinas podem alterar as análises morfométricas e comparativas com outras áreas cársticas.

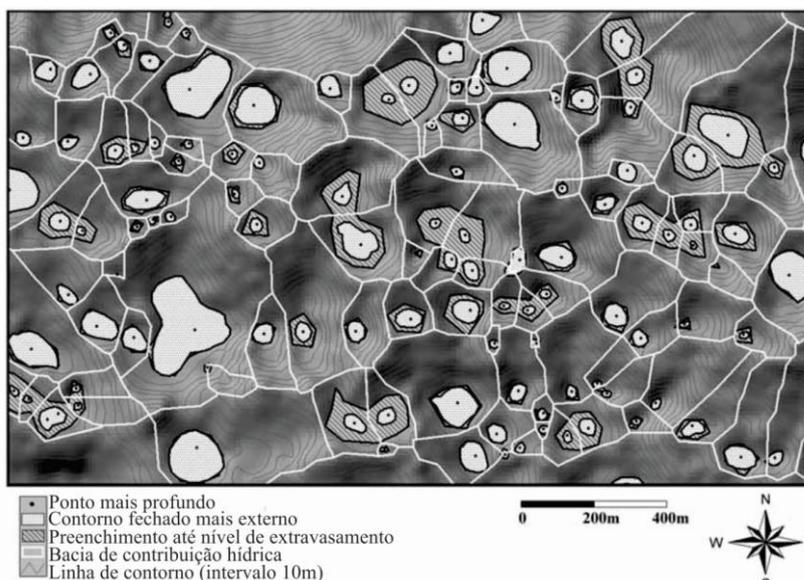


Figura 7: Discrepâncias espaciais conforme metodologia de detecção/delimitação de dolinas. Adaptado de Telbisz et al. (2009).

Em estudo mais recente e com base de dados de maior resolução (LiDAR 1m), Bauer (2015) chegou a conclusões similares ao identificado por Telbisz et al. (2009), ou seja, discrepâncias significativas podem ser notadas conforme o método aplicado. O estudo identificou que as dolinas mapeadas pelo método de preenchimento até o nível de extravasamento sempre superam em área as do contorno fechado mais externo, além de que frequentemente o primeiro método tende a coalescência de feições rasas. Também foi identificado que o método até o limite da bacia superestima a área das dolinas, que para a área estudada, na Áustria, o método de extravasamento parece ser mais adequado. O estudo conclui que a escolha do método deve levar em conta os propósitos (se estudos morfométricos ou hidrológicos) e qual tipo de carste está sob análise, se poligonal ou de dolinas isoladas.

Um dos estudos mais citados a utilizar a metodologia de delimitação por extravasamento é o de Doctor e Young (2013), que realizaram um trabalho comparativo entre a aquisição manual e automática de depressões cársticas na região de Virgínia (EUA), com dados LiDAR (1m). Utilizando o MDE com sombreado e com o auxílio de imagens geraram uma base de referência para comparação posterior e definição de parâmetros morfométricos para a identificação automatizada. O volumoso número de respostas positivas, grande parte espúrias, demonstrou a necessidade de condicionamento adicional prévio no MDE. Neste sentido, para prevenir resultados equivocados, foi realizada a restituição manual da drenagem através de barreiras artificiais (barragens, diques e pontes em rodovias, p. ex.). Após esses procedimentos, considerados mais trabalhosos que a identificação das dolinas em si, os autores avaliaram os resultados como satisfatórios, uma vez que até 99,5% das dolinas localizadas visualmente, com profundidade acima do filtro estabelecido, foram identificadas automaticamente. O resultado geral do método semiautomático adotado de identificação de dolinas foi quase o dobro do método manual.

Após a publicação de Doctor e Young (2013), muitos outros trabalhos utilizaram a técnica de extravasamento, alguns apresentando refinamentos metodológicos. Diferente de outros estudos que estabeleceram apenas filtros mínimos, Zhu et al. (2014) estabeleceram um filtro máximo de profundidade para as dolinas de sua área de estudo, além de realizar uma classificação entre feições “prováveis”, “suspeitas” e “não dolinas”, para posterior checagem em campo. Kobal et al. (2015) estabeleceram um ranqueamento das dolinas (1ª, 2ª, 3ª ordem) baseado na sequência de coalescência de feições com a continuidade do preenchimento em uma depressão composta. Após levantamento automatizado conforme filtros morfométricos, Jeanpert et al. (2016) classificaram dolinas automaticamente conforme declividade e área, identificando quatro tipos principais de feições (colapso, bacia, de fundo chato pequenas ou grandes). O estudo de Zhu e Pierskalla (2016) testou técnicas de aprendizagem de máquina (*random forest*) para separar automaticamente dolinas verdadeiras das demais depressões espúrias ou falsas. Wu et al. (2016) utilizaram o conceito de contorno semente (linha fechada mais interna) para distinguir de forma mais ágil a hierarquia de depressões (quando compostas). Hofierka et al. (2018) individualizaram as dolinas com base na capacidade de armazenamento de água nas depressões em eventos extremos de precipitação simulados uniformemente no MDE, a partir de medidas meteorológicas reais de longo termo (taxa de excesso chuva/infiltração de 50mm/h; pastagem; 2h de evento). Em abordagens combinadas alguns estudos utilizaram imagens históricas do Google para distinguir dolinas, contando com diferenças nas resoluções das imagens e sazonalidade (ZHU et al., 2014; CAHALAN e MILEWSKI, 2018).

3.3 Outros procedimentos automatizados

O procedimento exposto no trabalho de Obu e Podobnikar (2013) é tido como uma metodologia a parte de detecção e delimitação de dolinas por alguns artigos (CARVALHO JÚNIOR et al., 2014; WU et al., 2016; HOFIERKA et al., 2018). A detecção das depressões é baseada numa abordagem combinada entre determinação da direção de fluxo, identificação dos pontos mais deprimido (*pits*) com subsequente projeção da sua bacia de contribuição e a utilização de uma janela móvel (kernel 3 x 3) para reconhecimento do contorno da feição baseado no ponto de extravasamento. Em outras palavras, em adição algoritmo proposto por Jenson e Domingue (1988), o proposto por Obu e Podobnikar (2013) inclui técnicas de filtragem de imagem com janela kernel 3x3 utilizando funções focais. Na prática a abrangência espacial e morfológica na delimitação das dolinas é a mesma que pelo método de extravasamento, sendo por isso assim classificada.

O trabalho de Obu e Podobnikar (2013) foi pioneiro ao estabelecer o ranqueamento de depressões com o uso de modelos digitais, identificando cada sub depressão menor (primeira ordem) contida em depressões maiores (compostas), conseguindo identificar em quantidades decrescentes, dolinas de primeira a quinta ordem numa área cárstica da Eslovênia (Figura 8). Essa abordagem proposta de ranqueamento foi seguida por outros trabalhos subsequentes (KOBAL et al., 2015; WU et al., 2016), e é útil para estabelecer comparações mais adequadas (conforme ordem) entre áreas cársticas e dimensionar de forma relativa o nível de segmentação da carstificação.

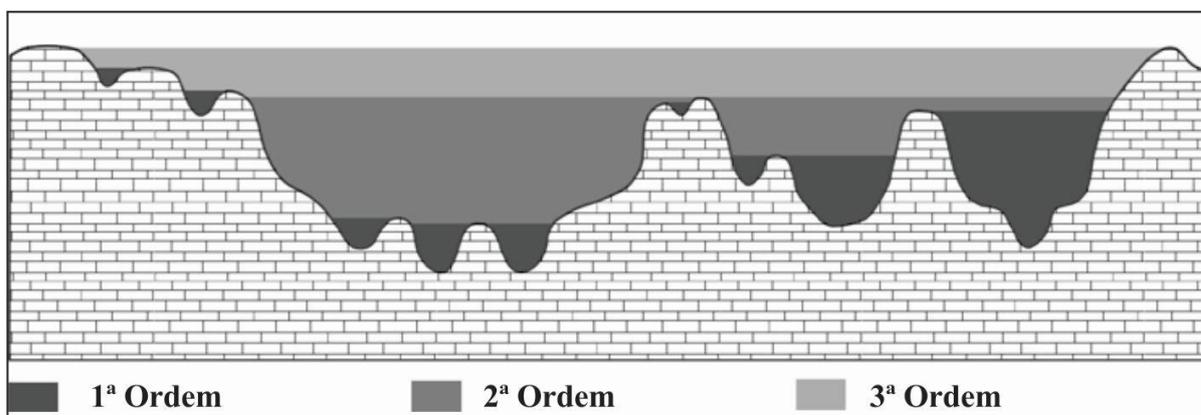


Figura 8: Esquema de ordenamento de dolinas em situação de depressão composta. Adaptado de Obu e Podobnikar (2013).

Outro procedimento metodológico de automação na identificação e delimitação de dolinas via MDE foi apresentado por Filin e Baruch (2010), posteriormente aplicado e mais bem detalhado por Rahimi e Alexander (2013). Tal método foge da lógica utilizada até então, baseada principalmente em técnicas de acumulação e direção de fluxo, preenchimento e subtração em MDE. São dois passos principais na técnica, o primeiro relacionado à detecção dos chamados pontos semente, e o segundo a delimitação da depressão a partir deles. Os pontos sementes são equivalentes aos *pits*, ou seja, pontos mais profundos numa depressão, e a sua localização no método se dá por meio da caracterização geométrica no modelo com o uso de ferramentas morfológicas. Com o uso da janela kernel (qualquer tamanho) é possível comparar os valores de cada pixel da imagem de entrada com seus vizinhos, assinalando como saída valores mínimos para a célula analisada (ferramenta "erosion", MATLAB, p.ex.). O tamanho da matriz

kernel influencia a precisão ao identificar os pontos sementes, sendo que quanto maior, menor a detecção de pequenas possíveis dolinas.

Determinados os pontos sementes o limite da depressão é identificado por imagem com o procedimento contorno ativo (*snake*), baseado na mudança de gradiente do fluxo, ou seja, na linha de maior inclinação, conforme os dados de elevação dos pixels. Conforme Rahimi e Alexander (2013), ao aplicar um processamento conhecido por “vetor de gradiente de fluxo”, cada célula passa a direcionar para o ponto de maior energia, ou seja, inclinação. Com isso é possível identificar a linha de ruptura de relevo (curva fechada), indicada pela convergência da direção dos vetores, tanto internos (a partir do ponto semente), como externos à dolina, uns apontando em direção aos outros. Este último processo é iterativo e sua inicialização se dá a partir do ponto semente, por isso a necessidade prévia de sua identificação correta. O método é uma forma automatizada de identificação de quebras de relevo, e, portanto, necessita que estas estejam aparentes de acordo com a resolução do MDE. Dolinas suaves podem não ser corretamente detectadas pela falta de um limite abrupto. Vale ressaltar que o método foi apresentado e testado a partir de dados LiDAR (1m), e que apesar de ter sido eficiente para detectar as dolinas da região estudada (Winona, EUA), com 82% de acerto pós filtragem (91% sem filtro, mas com muitos falsos positivos) os próprios autores recomendam a sua utilização sob supervisão humana para aumentar a precisão.

3.4 Detecção visual em MDE

Modelos digitais também permitem a identificação visual de depressões. Apesar de significar maior dispêndio de tempo e exigir cuidado para o escrutínio de grandes áreas, essa possibilidade é bastante utilizada, tanto como fonte principal, mas também como fonte alternativa, para construção de base de dados de referência, por exemplo. Uma das formas de identificação é com a geração de curvas de nível e posterior busca por linhas fechadas mais externas em depressões, como feito tradicionalmente em mapas topográficos analógicos. A vantagem em relação aos mapas impressos é a possibilidade de utilizar, caso disponível, de MDE's com maior resolução, capazes de gerar curvas com intervalos de 1 metro, por exemplo, ou ajustar configurações mais apropriadas conforme cada caso. Porém, o aumento de resolução pode levar ao aumento de ruído, gerando artefatos (Figura 9). Tais falsos positivos, decorrentes do processamento do modelo (erros de interpolação) se somam a possíveis depressões artificiais e podem ser de difícil discernimento sem o uso de outras fontes combinadas, como imagens aéreas.



Figura 9: A seta vermelha aponta artefatos numa área mais plana (borda de planalto). Na parte sudeste da imagem ocorre um vale seco com a inserção de algumas dolinas (seis ao todo) marcadas em vermelho. As curvas fechadas entre tais dolinas são artefatos associados a drenagem ou áreas planas, pois toda a área foi checada em campo. Notar também que o modelo não foi suavizado, por este motivo as linhas de contorno (intervalo de um metro) estão bastante irregulares. Modelo digital de terreno construído a partir de imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado, e projetadas em transparência no Google Earth.

Bauer (2015) utilizou desta técnica combinada (contorno fechado e imagens) para comparar os resultados com outros métodos automáticos de detecção de dolinas (por bacia e por extravasamento). Seale et al. (2008), por outro lado, realizaram o levantamento via MDE somente baseado na identificação visual de contornos fechados e já alertavam para o risco de análises automatizadas incorporarem depressões feitas pelo homem, especialmente em áreas urbanizadas. Nesse último trabalho os autores compararam a identificação de dolinas com o uso do modelo LiDAR “puro”, ou seja, somente com curvas de nível, com a detecção por método combinado, com o auxílio de fotointerpretação, notando discrepâncias substanciais. Os autores concluem, portanto, que devido ao grande número de artefatos e demais problemas dos dados LiDAR, como a reflectância na água e bloqueio parcial do retorno pela vegetação, a detecção de dolinas unicamente por esta fonte é suspeita, mesmo tendo gerado curvas de 30cm de intervalo. O estudo sugere, portanto, a análise combinada com outras fontes, como fotos aéreas recentes, para dirimir feições ambíguas.

Outro método de identificação de depressões por meio de modelos digitais é com a aplicação do sombreado no relevo (*hillshade*), tendo sido utilizada de forma combinada a outros métodos em diversos trabalhos baseados em dados LiDAR (DOCTOR e YOUNG, 2013; RAHIMI e ALEXANDER, 2013; ZHU et al., 2014; BAUER, 2015; HOFIERKA et al., 2018). Este método valoriza a quebra de relevo, destacando o ponto de inflexão da depressão de forma mais evidente que por meio de uma linha topográfica fechada, mesmo com baixo intervalo. Entretanto também é passível de interpretação subjetiva, como afirmam Čeru et al. (2017). Estes últimos utilizaram somente dessa fonte, modelo LiDAR sombreado, para detectar dolinas em conglomerados carbonáticos na região central da Eslovênia (bacia de Ljubljana), tendo alcançado resultados bastantes significativos (até 238 dolinas/km²).

Um último método, pouco utilizado, é por meio da aplicação de processamento no MDE de índices topográficos para ressaltar as áreas deprimidas das elevações adjacentes. Lyew-Ayee et al. (2007) utilizaram dessa técnica em um MDE (2m) construído a partir de mapa topográfico

(1:12.500) e altitudes coletadas em campo para delimitar e realizar análises morfométricas dos *cockpits*, em seis áreas da Jamaica. Considerando ser uma área de carste poligonal, sem a recorrência de depressões abertas, ou seja, vales superficiais de drenagem, o método foi eficiente ao ressaltar dolinas, possibilitando, segundo os autores, delimitar as feições de forma mais precisa que utilizando a interpretação de imagens ou MDE sombreado. Mais recentemente outros trabalhos utilizaram do índice de posição topográfica para análises visuais combinadas buscando identificar dolinas de forma mais precisa, porém buscando a construção de base de dados referência, para posterior comparação com métodos automatizados (DOCTOR e YOUNG, 2013; CHEN et al., 2018).

4. Síntese dos métodos de mapeamento de dolinas

Com a revisão de trabalhos relacionados ao mapeamento de depressões cársticas por meio de modelos digitais, observou-se a recorrência no uso de determinadas técnicas automatizadas, porém sem o abandono de formas tradicionais de identificação visual de dolinas. Numa tentativa de classificação dessas metodologias, arrolou-se abaixo as opções mais utilizadas, conforme fonte de dados. A numeração indicada está expressa na tabela a seguir (Tabela 2), no campo “método”, conforme o interpretado para cada artigo analisado. Muitos trabalhos utilizam mais de um método, seja para aferição, seja para comparação metodológica.

Métodos de detecção/delimitação automática (MDE):

- 1- Delimitação a partir do pixel mais baixo até a bacia topográfica de contribuição hídrica;
- 2- Preenchimento a partir do pixel mais baixo até o ponto de extravasamento;
- 3- Contorno ativo, a partir do ponto semente, baseado na mudança de gradiente de fluxo;

Método de detecção/delimitação manual:

- 4- Análise de mapas topográficos analógicos ou digitais (MDE) para identificação de curva de nível fechada mais externa (A) ou bacia de contribuição (B);
- 5- Fotointerpretação estereoscópica, análise de imagens de alta resolução (ortofotos, satélite), mapas sombreados (inclusive próprio MDE), com o critério de delimitação por quebra de relevo (A); por bacia de contribuição (B); ou apenas validação de outros métodos (C)
- 6- A-Topografia em campo (GPS, bússola, clinômetro, trena, teodolito); B- Validação (ponto)

Tabela 2: Trabalhos com levantamento de dolinas/depressões via MDE ordenados por ano, destacando-se as fontes de dados, os métodos de identificação, os filtros utilizados e a acurácia calculada. Métodos automáticos: 1-limite da bacia; 2-extravasamento; 3- contorno ativo. Métodos manuais: 4-mapa topográfico com o critério curva de nível fechada mais externa (A) ou bacia (B); 5- fotointerpretação, análises de imagens e mapas sombreados por critério de quebra de relevo (A), bacia (B) ou apenas validação (C); 6-trabalho de campo para topografia (A) ou validação (B).

| Trabalho | Aquisição/resolução espacial | Métodos Filtros | Acurácia |
|-------------------------------|---|--------------------|---|
| Cahalan e Milewski (2018) | LIDAR (1-10m); Imagens aéreas (1-2m); Google | 2; 5C | Profundidade > 1,55m; excentricidade < 0,96; área > 3m ² ; buffer recobrando acima de 50% das feições: 5m drenagem; 15m rodovias; 3m edificações |
| Chen et al. (2018) | MDE Mapa topográfico (3m); SRTM (30-90m); ASTER (30m); Foto aérea (2,5m) | 1; 5A; 6B | área > 60m ² ; elipsidade < 0,2; TPI ≤ 0; buffer de 90m dos principais cursos d'água; somente rochas calcárias; |
| Harris et al. (2018) | LIDAR (3,8 pés); Foto aérea (<1m) | 5A; 6B | Visual |
| Hofierka et al. (2018) | LIDAR (5m); LIDAR sombreado + curvas; Mapa topográfico 1:10.000; ortofoto | 2*; 4A; 5A e C; 6B | Suavização MDE; Excesso chuva/infiltração de 50mm/h; 120 minutos de evento (em pastagem); ângulo de inclinação < 15° para grandes depressões; rochas carbonáticas; *chuva simulada determina o limite da depressão, e não necessariamente o ponto de extravasamento (limite ≤ ao método 2) |
| Theilen-Willige (2018) | ALOS-PALSAR (12,5m); SRTM (30m); ASTER (30m); Imagens: Sentinel; RapidEye; Landsat; Bing; e Google | 2*; 5A; 6B | Filtro de imagem (passa alta-passa/baixa) para ressaltar súbita mudança de gradiente (borda dolina); Feições circulares/ovais; maior umidade do solo, e índice de vegetação (mais verde); rochas solúveis; *Extração automática serviu de filtro para análise visual |
| Calligaris et al. (2017) | LIDAR (1m); foto aérea | 5A; 6B | Visual |
| Ceru et al. (2017) | LIDAR sombreado (1m) | 5A; 6B | Visual; qualquer tamanho e profundidade |
| Wall et al. (2017) | LIDAR (2m); LIDAR sombreado; mapa topográfico (1:24.000); foto aérea | 2; 4A; 5C; 6B | Profundidade >0,73 m; área >40m ² (local 1) e >119m ² (local 2) |
| Jeanpert et al. (2016) | LIDAR (1m); Ortofoto | 2; 5C; 6B | Área ≥1m ² ; perímetro ≥4m; profundidade ≥0,2m; |
| Pardo-Igúzquiza et al. (2016) | MDE Foto Aérea (5m) | 1 | Área >25m ² (limite inferior do pixel) e < 0,85km ² |
| Telbisz et al. (2016) | LIDAR (2,5m); mapa topográfico (1:10.000); MDE mapa topográfico (10m) | 2; 4A; 6B | Suavização (filtro radial 5 células- "focal statistics"); Profundidade > 1m (MDE Topográfico) e > 0,5 (MDE LIDAR) |
| Wu et al. (2016) | LIDAR (1m); LIDAR Sombreado; ortomagem visível+infravermelho (0,5m) | 2; 5C | Suavização (3x3 median morphological operator); Filtro preliminar: Profundidade > 0,5m; área > 100m ² ; perímetro base (contorno semente) > 39m. Filtro posterior: área < 4000m ² ; profundidade > 0,5m; desvio padrão de elevação > 0,18m; alongamento < 2,54; e CI > 0,31 |
| Zhu e Pierskalla (2016) | LIDAR (1,5m) | 2; 6B | Área >46m ² ; profundidade >0,3m e < 6m; buffer: 6m drenagens; 3m corpos hídricos; 6m rodovias; separação automática via aprendizagem de máquina (Random Forest) |
| Bauer (2015) | LIDAR (1m); LIDAR Sombreado | 1; 2; 4A; 5C; 6B | Retirada manual de feições não cársticas (análise visual); remoção automática de erros de duplicação de pixel mais profundo |
| Kakavas et al. (2015) | ASTER (30m); SRTM (90m); Foto aérea (1:40.000); MDE Foto aérea (1m; 5m); mapa topográfico (1:50.000); MDE topográfico (20m) | 2; 4A; 5A; 6B | Visual (3d) |
| Kobal et al. (2015) | LIDAR (1m) | 2 | Profundidade > 2m; diâmetro > 10m |
| Carvalho Júnior et al. (2014) | ALOS PRISM (2,5m); SRTM (90m); imagens Google | 2; 5A e C; 6B | SRTM: profundidade >2m; área >16.200 m ² ; e IC > 0,3; ALOS/PRISM: profundidade >2m; área >13.125m ² ; e IC > 0,3; |
| Hiruma e Ferrari (2014) | SRTM (30 e 90m); MDE fotos aéreas (10m); Foto Aérea (<1m); mapas topográficos | 1; 4B; 5B; 6B | Sem aplicação de filtros. Dolinas falsas somente fora da área carbonática. |
| Zhu et al. (2014) | LIDAR (1,5m); LIDAR Sombreado; imagens Google; Bing | 2; 5A e C; 6B | Área >46m ² ; profundidade >0,3m e < 6m; relevo sombreado com exagero de 5x |
| Doctor e Young (2013) | LIDAR (1m); LIDAR Sombreado; ortofotocartas (1m) | 2; 5A; 6A e B | Visual Sombreado + TPI; IC < 1,7; elipse ≤0,98; área ≥ 9m ² ; profundidade > 18cm; buffer de construções e drenagem (2m) |
| Faulkner et al. (2013) | LIDAR (1m) | 1 | Profundidade > 0,275m; buffer 20m corpos água; 5m cursos hídricos por acúmulo de fluxo no raster; 20m rodovias; áreas degradadas ou rocha exposta; somente rochas carbonáticas |
| Miao et al. (2013) | LIDAR (1m); Mapa topográfico (1:24.000); Foto aérea | 1; 4A; 5C; 6B | Suavização (Wiener -AWF) de 10m; profundidade > 0,5; separação automática via aprendizagem de máquina (random forest) |
| Obu e Podobnikar (2013) | LIDAR (3m); MDE Mapa topográfico (12,5) | 2; 6B | Profundidade > 2m; diâmetro > 10 metros |
| Pardo-Igúzquiza et al. (2013) | MDE Foto Aérea (5m); Foto Aérea (2m) | 1; 5B; 6B | Área > 250m ² |
| Rahimi e Alexander (2013) | LIDAR (1m); LIDAR Sombreado; Google; Bing | 3; 5A; 6A e B | Profundidade > 90% da dolina mais rasa mapeada manualmente; Relação profundidade/área > 90% dessa menor relação mapeada manualmente; Buffer de rodovias (não informada metragem) |
| Li et al. (2011) | LIDAR (1m); Foto aérea | 2; 5C; 6B | Suavização de 10 a 20 vezes do MDE; área >200m ² ; profundidade > 0,1m |
| Filin e Baruch (2010) | LIDAR (0,5m) | 3; 6B | Parâmetros relativos de área e compactação; profundidade >20cm |
| Siart et al. (2009) | SRTM (90m); ASTER (15m); Quickbird (0,61m) | 1; 5A; 6A e B | Suavização prévia do MDE; profundidade > 5m; área >150m ² ; altitude: 800-1600; declividade até 7%; buffer de 150 metros dos cursos d'água; classificação de uso da terra e unidade petrográfica mais propícia a depressões |
| Telbisz et al. (2009) | Mapa topográfico 1:25.000; MDE mapa topográfico (10m) | 1; 2; 4A; 6B | Sem filtros. Comparação entre métodos |
| Seale et al. (2008) | LIDAR (2,13m); Foto aérea | 4A; 5A; 6B | Contorno fechado mais externo + visual |
| Lyew-Ayee et al. (2007) | MDE mapa topográfico (2m) | 5B; 6B | Limpeza manual de artefatos de interpolação; índice topográfico composto (CTI de 1,8) para diferenciar visualmente depressões de topos. |
| Guimarães et al. (2005) | ASTER (15m); MDE mapa topográfico (10m) | 2 | Suavização prévia do MDE; caracterização do espectro fotossintético da vegetação úmida em dolinas; correlação com pontos de cavernas conhecidas |
| Antonic et al. (2001) | MDE mapa topográfico (10m) | 2 | Sem filtros. Dolinas identificadas para análises de ecologia vegetal |

5. Análise dos trabalhos realizados

Entre 2001 e 2011 identificou-se apenas 8 trabalhos de mapeamento de dolinas via MDE, representando 24,2% dos 33 analisados. Os demais trabalhos (75,8%) foram realizados pós 2013, de forma ininterrupta, o que demonstra a crescente estratégia do uso de modelos digitais para detecção de depressões e aquisição de demais informações, como dados morfométricos (Figura 10-A). Essa tendência pode ser explicada pela maior disponibilidade e precisão das bases de dados, bem como a disseminação do uso de ferramentas de geoprocessamento. A maioria dos trabalhos analisados (63,6%) utilizou modelos baseados no LiDAR (Figura 10-B), que apesar do alto custo, tem sido usado para imageamento sistemático em alguns países e possui vantagens relacionadas a alta resolução e capacidade de representar mais corretamente o nível do solo. Entretanto, muitos outros tipos de bases foram utilizados para gerar modelos e inclusive realizar análises comparativas. Considerando todos os trabalhos analisados e a quantidade total de MDE's gerados (53), pode-se observar a predominância dos dados LiDAR (37,7% em formato puro e 15,1% sombreado), seguidos por modelos digitais baseados em dados de mapas topográficos (15,1%), SRTM (11,3%), ASTER (9,4%), fotos aéreas (7,6%) e ALOS (3,8%).

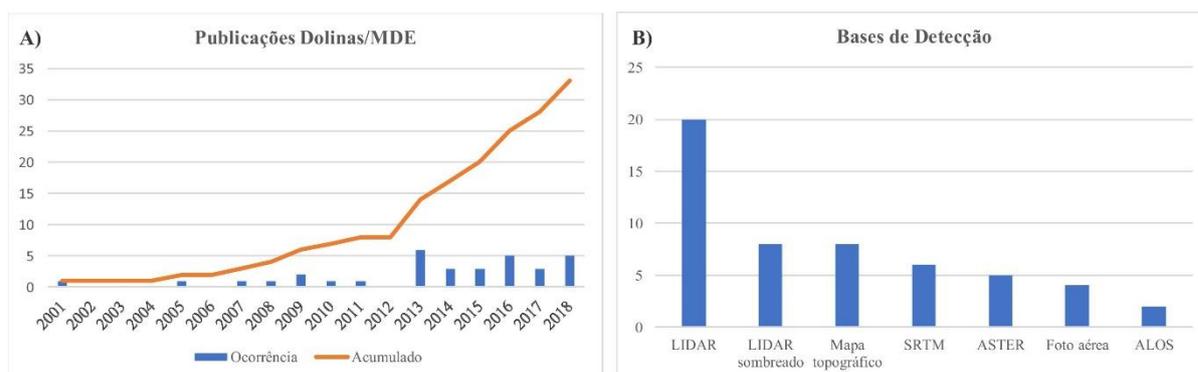


Figura 10: Evolução de estudos sobre detecção de dolinas com MDE (A) e bases de dados mais utilizadas (B).

Essas informações chamam a atenção, obviamente, para uma aparente maior adequação dos dados LiDAR para a detecção e delimitação de dolinas, ao passo que os dados ALOS foram pouco utilizados (em apenas dois trabalhos) e assim mesmo sendo considerado tão ou menos efetivo na tarefa se comparado com a base SRTM. Deve-se ressaltar também a pouca utilização de fotos aéreas para construção de modelos e extração de dolinas, apesar dos avanços recentes com novas possibilidades de aquisição de imagens via Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT). A possível causa dessa pouca utilização de fotos aéreas talvez se explique pelo maior custo de aquisição dos equipamentos, operação em campo, e necessidade de correções dos modelos por meio de pontos de controle em solo, o que pode ser dispendioso de tempo e recursos. Essa dificuldade está expressa no trabalho de Hiruma e Ferrari (2014), que mesmo utilizando fotos aéreas disponíveis em bases públicas, necessitaram realizar uma série de procedimentos, incluindo aquisição de pontos de controle em campo, numa área de difícil acesso, para finalmente resultar no modelo digital esperado.

Entretanto, o uso de imagens e fotografias aéreas foi bastante utilizada para a tarefa de validação visual de análises automatizadas via MDE. Os métodos de detecção e delimitação (expressos na Tabela 2) demonstram claramente uma maior tendência para a automação, porém com a quase constante necessidade de verificações, sejam em imagens ou campo (FIGURA 11a). Se 85% dos trabalhos analisados utilizaram alguma forma automatizada para detecção, em

contraposição aos 15% restantes, que utilizaram apenas análises visuais em MDE, é possível observar por outro lado que 70% dos estudos utilizam de imagens/fotos para checagens adicionais e validação em algum momento do processo. A validação em campo chega a 79% dos trabalhos, restando poucos que não realizaram qualquer tipo de validação (campo ou imagens), com 15%, talvez por confiarem em seus métodos automáticos (Figura 11B).

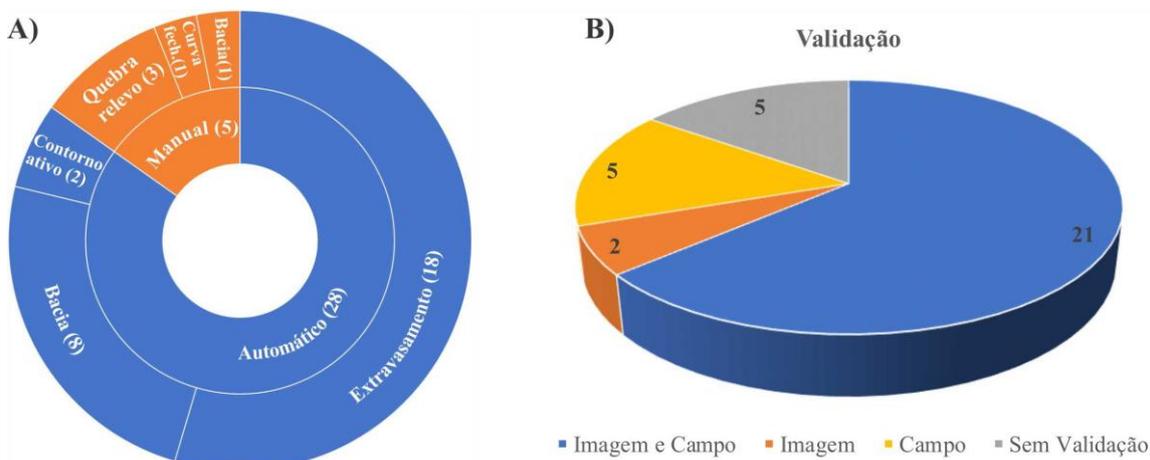


Figura 11: Métodos de detecção entre abordagens automáticas e manuais (A), e tipos de validação nos estudos (B).

Quanto ao uso de métodos automatizados, observou-se 28 estudos no total, porém dois deles, de caráter metodológico, testaram mais de uma técnica (TELBIŞZ et al., 2009; BAUER, 2015). Para efeito de comparação adotou-se para estes dois trabalhos metodológicos a técnica considerada mais adequada pelos autores para suas respectivas áreas de estudo. Nesse sentido a maior parte dos trabalhos adotou o método de preenchimento até o nível de extravasamento, via ferramentas hidrológicas (64,3%), seguido pelo método de delimitação por bacia topográfica de contribuição hídrica (28,6%). Apenas dois trabalhos (7,1%) adotaram o método baseado em contorno ativo.

Foram poucos os trabalhos que utilizaram de MDE para mapeamento visual/manual de dolinas como única fonte (cinco artigos), a maioria deles a partir da análise de imagens derivadas, no critério de quebra de relevo. Entretanto, é possível observar diversos trabalhos que mesmo utilizando técnicas automatizadas, também realizaram análises visuais para mapeamento de dolinas. Nestes casos o uso de imagens serviu para estabelecimento de bases de referência, para obter parâmetros morfométricos no fito de auxiliar o trabalho de filtragem automática de falsos positivos, e para comparações entre metodologias. Nesse sentido foram contabilizadas 13 ocorrências do uso do critério quebra de relevo contra três por divisor topográfico na análise de fotos aéreas ou imagens (derivadas de MDE). De forma parecida foram identificadas oito ocorrências do uso de contornos fechados mais externos contra uma baseada no divisor de bacias em mapas topográficos (Figura 12A). O uso prioritário das técnicas de quebra de relevo em fotos áreas/imagens e contornos fechados mais externos em mapas topográficos condiz com a prática mais tradicional da geomorfologia cárstica, utilizada a décadas.

Dado todo o exposto até aqui verifica-se que os trabalhos de mapeamento de dolinas via MDE foram se avolumando com o tempo, especialmente pós 2013, com a disponibilidade de bases de dados mais adequadas, especialmente LiDAR, e de maior resolução espacial (0,5m a 10 m). O uso de técnicas automatizadas via MDE é uma forte tendência desde os primeiros trabalhos analisados, dadas as novas possibilidades que o uso de ferramentas SIG proporcionam em

ambiente computacional, principalmente relacionadas a restituição hidrológica. Entretanto, a utilização de bases combinadas e análises tanto automáticas como manuais é o caminho mais seguido pelos autores (85%). Mais recentemente parece haver uma tênue reação, com a volta da utilização dos modelos para análises visuais (ČERU et al., 2017; CALLIGARIS et al., 2017; HARRIS et al., 2018). Há um intervalo significativo desde os primeiros a se utilizarem principalmente desta técnica (LYEW-AYEE et al, 2007; SEALE et al., 2008), que é mais adequada para pequenas áreas. Dadas as especificidades de cada região cárstica dificilmente haverá um método pronto e adequado ou totalmente automático e preciso para mapeamento de dolinas. Apesar das altas taxas de acurácia observadas em alguns trabalhos (acima de 80% na maioria dos que realizaram esta medição), a necessidade de controle de dados falsos ou omissões continua sendo necessária e por vezes requerendo muito trabalho manual, mesmo incluindo filtros prévios baseados em amostras de dolinas reais ou típicas das áreas de estudo.

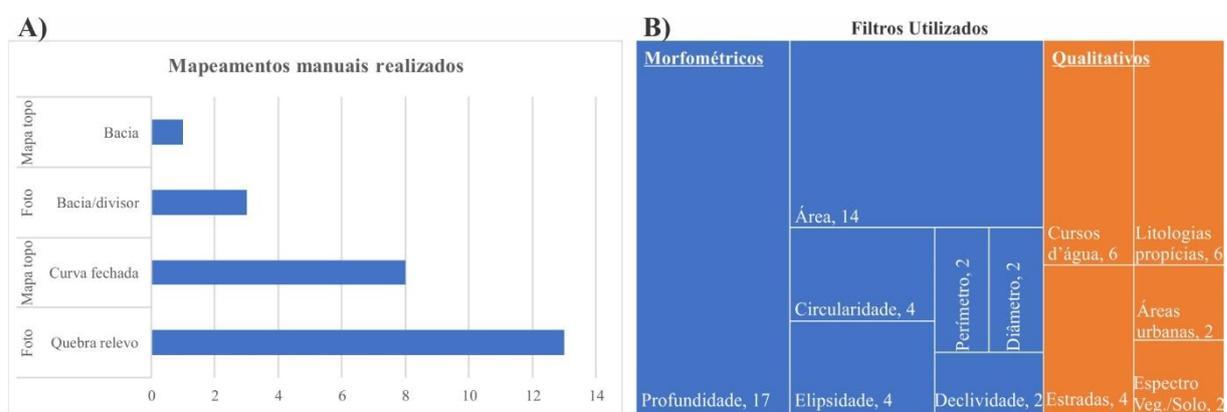


Figura 12: Métodos por mapeamentos manuais realizados (A) e filtros mais utilizados nas abordagens automatizadas (B).

A coluna “filtros” na tabela síntese (Tabela 2) foi destacada justamente visando identificar as estratégias mais utilizadas pelos estudos para aumentar a acurácia na identificação de feições verdadeiras e servir de referência para trabalhos similares, no intuito de diminuir a necessidade de ajustes manuais. Dentre tais filtros os mais utilizados foram os de cunho morfométricos, seja a partir de bases de dados referência ou pela experiência dos autores em suas áreas de estudo (Figura 12B). Os mais utilizados foram: profundidade (em 17 estudos), área (14); elipsidade (4); circularidade (4); perímetro (2); diâmetro (2); declividade (2). Dentre os filtros de cunho qualitativo são muito utilizados os de distância (*buffer*) em relação a fontes de feições artificiais ou espúrias (artefatos), como cursos d’água (6), estradas (4) e áreas urbanizadas (2). Outros relacionam a correspondência de litologias propícias (6) e espectro de vegetação/solo (2) mais relacionado a dolinas. O uso de tais filtros deve ser bem avaliado conforme a realidade de cada área de estudo, pois podem induzir em omissão de feições verdadeiras, como por exemplo dolinas suaves (menor que a profundidade limite) ou de menor tamanho.

O pré-processamento dos MDE’s também visa reduzir erros, especialmente relacionados ao aumento irreal de feições detectáveis. Nesse sentido procedimentos de suavização, especialmente para modelos de alta resolução, foram observados em sete trabalhos. Este procedimento visa reduzir a quantidade de artefatos gerados na construção do modelo, geralmente relacionados a cursos de água encaixados, voçorocas ou áreas planas, que criam uma série de *pits* duplicados ou falsos, induzindo a identificação errônea de possíveis dolinas. Outra medida testada em poucos trabalhos (2) foi a reamostragem da resolução dos modelos, porém não tendo sido observadas melhorias na acurácia. Por fim, um procedimento utilizado

em três trabalhos foi a aplicação de índices topográficos, visando ressaltar as áreas deprimidas das áreas de relevo positivo, no intuito de facilitar a identificação e delimitação de dolinas.

6. Discussão

O mapeamento de dolinas é utilizado como ferramenta de interpretação geomorfológica e ambiental há bastante tempo. Os desafios inerentes à tarefa recaem sobre a forma de identificação e delimitação, bem como a fonte de obtenção de dados, cada qual com suas vantagens e desvantagens. Levantamento em campo é extremamente difícil e demorado, especialmente em grandes áreas ou de acesso limitado. A interpretação visual em mapas topográficos ou fotos aéreas pode ser mais ágil, mas depende de boa resolução dessas fontes e pode sofrer com a falta de precisão altimétrica ou dar margem a análises subjetivas. As novas possibilidades surgidas com o desenvolvimento de ferramentas geoespaciais em ambiente computacional, com obtenção de modelos digitais de elevação, permitiram novas incursões ao tema, com testes e aplicações no mapeamento de depressões em diversos estudos ao longo dos últimos anos. Apesar das facilidades criadas no processamento, organização e resolução das bases de dados, o geoprocessamento com o uso de MDE's não elimina por completo os aspectos de tempo, esforço, subjetividade e custo para mapeamento de dolinas. Continua sendo necessário o uso de outras bases cartográficas ou fontes com abordagens visuais/manuais. A utilização de procedimentos automáticos pode resultar em dados não confiáveis, demandando um certo gasto em pós-processamento (Tabela 3).

Tabela 3: Prós e contras da detecção automatizada de dolinas por MDE's

| Detecção automatizada MDE | |
|---|---|
| Prós - | - Contras |
| Mais rápido - | - Processamentos relativamente demorados |
| Direciona a detecção - | - Grandes quantidade de objetos espúrios |
| Quanto maior resolução mais dolinas - | - Maior resolução muito mais objetos falsos |
| Abrange maiores áreas - | - Necessidade ajustes MDE's |
| Não requer uma mapoteca (cabe tudo no pc) - | - Exige máquinas com boa capacidade |
| Reproduzível mais facilmente com o tempo - | - Não elimina análises manuais/visuais |
| Sem subjetividade - | - Requer conhecimento das dolinas da região |
| | - Filtros para limpar objetos espúrios |
| Delimitação objetiva (com critério) - | - Pode não delimitar corretamente a dolina |
| | - Pode coalescer feições adjacentes |

As metodologias antigas e divergentes de delimitação de dolinas, via curvas fechadas mais externas em mapas topográficos (*I*), quebra de relevo em encostas regulares (*II*), ou a identificação dos divisores topográficos de contribuição hídrica (*III*) encontram paralelo com as novas formas de mapeamento, via processos automatizados. Os novos algoritmos identificam de forma objetiva os pontos deprimidos mais profundos (*pits*) nas imagens raster, mas não discernem entre artefatos (erros do sistema), feições artificiais (depressões verdadeiras não cársticas) e potenciais pontos naturais de absorção do carste. Já na delimitação automatizada permanecem os problemas de discrepância, que resultam em diferenças de formato e abrangência nas metodologias por ponto de extravasamento (*i*), ruptura de declive por contorno ativo (*ii*) e por limite da bacia (*iii*). Essas diferenças mostram que a aplicação da técnica de identificação/delimitação de dolinas deve variar conforme os objetivos propostos, as bases de

dados disponíveis e especialmente as características da área cárstica sob investigação (Figura 13).

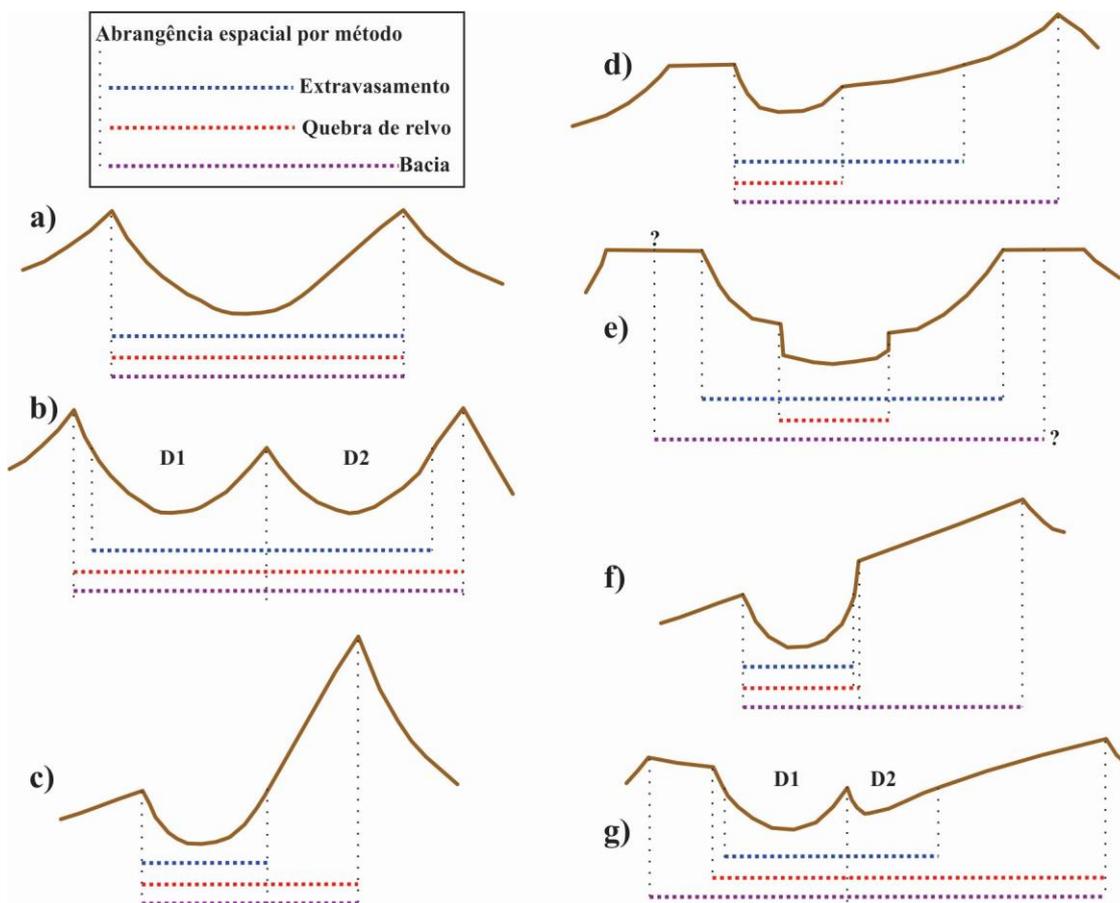


Figura 13: Abrangências de projeção superficial simuladas por método de delimitação em diferentes contextos. A) sem discrepâncias; B) dois sumidouros (pits) definindo duas dolinas com extravasamento inferior aos demais métodos; C) extravasamento bem inferior aos demais; D) quebra de relevo bem inferior que demais; E) depressão composta com dificuldade de determinar limite topográfico no método por bacia (área plana); F) método por bacia bem superior aos demais; G) duas dolinas de formato assimétrico numa situação de depressão composta.

Nesse sentido os métodos baseados nos divisores topográficos podem ser aplicados ao carste poligonal ou para análises ligadas à possíveis contribuições hídricas num evento de contaminação, como em análises de vulnerabilidade. O limite dado pelo ponto de extravasamento também carrega um fator hidrológico que pode ser interessante para análises ligadas a possíveis problemas de inundações. A delimitação baseada na quebra de relevo ressalta os processos gravitacionais de encosta e podem representar com mais exatidão os limites de feições de colapso, e ser utilizada em avaliações de risco potencial. Numa situação heterogênea, comum em áreas cársticas tropicais em que as feições são frequentemente obliteradas por outros fatores, como a erosão superficial, a adoção de mais de um método de delimitação ou a junção de dois pode ser necessária.

Conclusão

O mapeamento de dolinas tem muitas aplicações no campo das geociências, seja para análises de evolução das paisagens cársticas, seja relacionada a aspectos ambientais/risco, e pode representar uma tarefa complexa a depender das estratégias utilizadas e fonte de dados. Após a investigação de uma série de trabalhos relacionados ao tema foram identificadas as principais

metodologias utilizadas para mapeamento de dolinas, seja por meio de técnicas visuais/manuais, como análise de fotografias, mapas topográficos e campo, ou por meio de técnicas automatizadas via MDE. Identificou-se nos trabalhos analisados três tipologias principais de mapeamento automatizado, sendo duas baseadas em ferramentas hidrológicas e uma em identificação de rupturas em imagens. O uso de técnicas tradicionais (interpretação de foto aérea, imagens, mapas topográficos e campo) permanecem necessárias mesmo com os avanços tecnológicos. Também foi possível sistematizar algumas estratégias principais nestes trabalhos para o mapeamento mais adequado das feições, como: o uso combinado de diversas fontes de dados em abordagens manuais e automatizadas; a utilização de filtros morfométricos prévios (principalmente profundidade e área); filtros qualitativos baseados no afastamento ou interseção com fontes de feições artificiais (principalmente cursos d'água, rodovias e rochas não carstificáveis); e a suavização dos modelos para evitar excesso de artefatos.

Com base nos dados sistematizados nesta pesquisa é possível acessar de forma mais imediata as possibilidades de uso e alternativas encontradas na literatura diante problemas reais, o que é útil para eventual aplicação em futuros trabalhos. O mapeamento de dolinas que se pretende realizar em trabalho próximo deverá ser precedido de interpretações quanto à tipologia do carste, da configuração mais usual das depressões e aquisição de dados teste para estabelecer os parâmetros mais adequados para a extração automatizada via MDE. A utilização visual de imagens de maior resolução possível, auxiliará a tarefa de limpeza, ajuste e validação final, em associação com trabalhos de campo.

Referências Bibliográficas

- ANASTÁCIO, E. M.; MAGALDI, T. T.; RODRIGUES, L. S.; VASCONCELOS, R. M.; BARCELLOS, R. S.; ANGARTEN, N. B. O.; JESUS, C. M.; TAGLIARI, P. D. Detecção semi-automática de dolinas ao longo da EF 334/FIOL utilizando imagens drone de alta resolução. *In*: ZAMPAULO, R. A. (Org.). **Congresso Brasileiro de Espeleologia**, 35. Campinas: SBE, 2019, p. 300–305.
- ANGEL, J. C.; NELSON, D. O.; PANNO, S. V. Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 66, n. 1, p. 9–17, 2004.
- ANTONIC, O.; HATIC, D.; PERNAR, R. DEM-based depth in sink as an environmental estimator. **Ecological Modelling**, v. 138, p. 247–254, 2001.
- BAUER, C. Geomorphology Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data. **Geomorphology**, v. 250, p. 78–88, 2015.
- BONDESAN, A.; MENEGHEL, M.; SAURO, U. Morphometric analysis of dolines. **International Journal of Speleology**, v. 21, p. 1–55, 1992.
- CAHALAN, M. D.; MILEWSKI, A. M. Sinkhole formation mechanisms and geostatistical-based prediction analysis in a mantled karst terrain. **Catena**, v. 165, p. 333–344, 2018.
- CALLIGARIS, C.; DEVOTO, S.; ZINI, L. Evaporite sinkholes of the Friuli Venezia Giulia region (NE Italy). **Journal of Maps**, v. 13, n. 2, p. 406–414, 2017.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GILLESPIE, A. R.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; SILVA, N. C. Karst depression detection using

ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. **Remote Sensing**, v. 6, p. 330–351, 2014.

ČERU, T.; ŠEGINA, E.; GOSAR, A. Geomorphological dating of pleistocene conglomerates in central Slovenia based on spatial analyses of dolines using LiDAR and Ground Penetrating Radar. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1213, 2017.

CHEN, H.; OGUCHI, T.; WU, P. Morphometric analysis of sinkholes using a semi-automatic approach in Zhijin County, China. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 15, 2018.

DENIZMAN, C. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwanee River basin, Florida. **Journal of cave and karst studies**, v. 65, n. 1, p. 29–35, 2003.

DOCTOR, D. H.; YOUNG, J. A. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital elevation data. *In*: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 449–458.

FAULKNER, M. G. S.; STAFFORD, K. W.; BRYANT, A. W. Delineation and classification of karst depressions Using LIDAR: Fort Hood Military Installation, Texas. *In*: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 459–467.

FILIN, S.; BARUCH, A. Detection of Sinkhole Hazards using Airborne Laser Scanning Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 76, n. 5, p. 577–587, 2010.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Second ed. Chichester: Wiley, 2007. 562p.

GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, O. A.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T. Detection of karst depression by aster image in the Bambui Group, Brazil. **SPIE**, v. 5983, p. 328–339, 2005.

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. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.

HARRIS, P. M.; PURKIS, S.; REYES, B. Statistical pattern analysis of surficial karst in the Pleistocene Miami oolite of South Florida. **Sedimentary Geology**, v. 367, p. 84–95, 2018.

HIRUMA, S. T.; FERRARI, J. A. Análise comparativa da extração automatizada de dolinas a partir de modelos digitais de terreno. **Revista do Instituto Geológico**, v. 34, n. 2, p. 1–11, 2014.

HOFIERKA, J.; GALLAY, M.; BANDURA, P.; ŠAŠAK, J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. **Geomorphology**, v. 308, p. 265–277, 2018.

JEANPERT, J.; GENTHON, P.; MAURIZOT, P.; FOLIO, J.; VENDÉ-LECLERC, M.; SÉRINO, J.; JOIN, J.; ISEPPI, M. Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, p. 1854–1868, 2016.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, 1988.

KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 274p. DOI:10.11606/T.44.1994.tde-22042013-163755.

KAKAVAS, M. P.; NIKOLAKOPOULOS, K. G.; ZAGANA, E. Karst features detection and mapping using airphotos, DSMs and GIS techniques. **SPIE**, v. 96440, 2015.

KESKIN, I.; YILMAZ, I. Morphometric and geological features of karstic depressions in gypsum (Sivas, Turkey). **Environmental Earth Science**, v. 75, n. 1040, p. 1–14, 2016.

KLIMCHOUK, A. Karst morphogenesis in the epikarstic zone. **Cave and Karst Science**, v. 21, n. 2, p. 45–50, 1995.

KOBAL, M.; BERTONCELJ, I.; PIROTTI, F.; DAKSKOBLER, I.; KUTNAR, L. Using Lidar Data to Analyse Sinkhole Characteristics Relevant for Understory Vegetation under Forest Cover — Case Study of a High Karst Area in the Dinaric Mountains. **Plos One**, v. 10, n. 3, p. 1–19, 2015.

LI, S.; MACMILLAN, R. A.; LOBB, D. A.; MCCONKEY, B. G.; MOULIN, A.; FRASER, W. R. Geomorphology Lidar DEM error analyses and topographic depression identification in a hummocky landscape in the prairie region of Canada. **Geomorphology**, v. 129, n. 3–4, p. 263–275, 2011.

LYEW-AYEE, P.; VILES, H. A.; TUCKER, G. E. The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, p. 165–179, 2007.

MIAO, X.; QIU, X.; WU, S.; LUO, J.; GOUZIE, D. R.; XIE, H. Developing efficient procedures for automated sinkhole extraction from Lidar DEMs. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 79, n. 6, p. 545–554, 2013.

OBU, J.; PODOBNIKAR, T. Algoritem za prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela reliefa. **Geodetski Vestnik**, v. 57, n. 2, p. 260–270, 2013.

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

PARDO-IGÚZQUIZA, E.; DURÁN, J. J.; DOWD, P. A. Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. **Acta Carsologica**, v. 42/1, p. 17–24, 2013.

PARDO-IGÚZQUIZA, E.; PULIDO-BOSCH, A.; LÓPEZ-CHICANO, M.; DURÁN, J. J. Morphometric analysis of karst depressions on a Mediterranean karst massif. **Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography**, v. 98, n. 3, p. 247–263, 2016.

RAHIMI, M.; ALEXANDER, E. C. Locating sinkholes in LIDAR coverage of a glacio-fluvial karst, Winona County, MN. *In*: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 469–481.

RUBBIOLI, E.; MOURA, V. **Mapeamento de cavernas: guia prático**. São Paulo: Redespeleo Brasil, 2005. 92p.

SALLES, L. Q.; GALVÃO, P.; LEAL, L. R. B.; PEREIRA, R. G. F. A.; PURIFICAÇÃO, C. G. C.; LAUREANO, F. V. Evaluation of susceptibility for terrain collapse and subsidence in karst areas, municipality of Iraquara, Chapada Diamantina (BA), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 16, p. 593, 2018.

SEALE, L. D.; FLOREA, L. J.; VACHER, H. L.; BRINKMANN, R. Using ALSM to map sinkholes in the urbanized covered karst of Pinellas County, Florida - 1, methodological considerations. **Environmental Geology**, v. 54, n. 5, p. 995–1005, 2008.

ŠEGINA, E.; BENAC, Č.; RUBINIĆ, J.; KNEZ, M. Morphometric analyses of dolines — the problem of delineation and calculation of basic parameters. **Acta Carsologica**, v. 47, n. 1, p. 23–33, 2018.

SIART, C.; BUBENZER, O.; EITEL, B. Geomorphology combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. **Geomorphology**, v. 112, n. 1–2, p. 106–121, 2009.

SILVA, O. L.; BEZERRA, F. H.R.; MAIA, R. P.; CAZARIN, C. L. Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. **Geomorphology**, v. 295, p. 611–630, 2017.

ŠUŠTERŠIČ, F. Classic dolines of classical site. **Acta Carsologica**, v. 23, p. 123–154, 1994.

TELBISZ, T.; DRAGUŠICA, H.; NAGY, B. Doline morphometric analysis and karst morphology of Biokovo Mt (Croatia) based on field observations and digital terrain analysis. **Hrvatski geografski glasnik**, v. 71, n. 2, p. 5–22, 2009.

TELBISZ, T.; LÁTOS, T.; DEÁK, M.; SZÉKELY, B.; KOMA, Z.; STANDOVÁR, T. The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example. **Acta Carsologica**, v. 45, n. 1, p. 5–48, 2016.

THEILEN-WILLIGE, B. Detection of karst features in the Black Hills area in south Dakota/Wyoming, USA, based on evaluations of remote sensing data. **Geosciences**, v. 8, n. 6, p. 192, 2018.

WALL, J.; BOHNENSTIEHL, D. R.; WEGMANN, K. W.; LEVINE, N. S. Morphometric comparisons between automated and manual karst depression inventories in Apalachicola National Forest, Florida, and Mammoth Cave National Park, Kentucky, USA. **Natural Hazards**, v. 85, n. 2, p. 729–749, 2017.

- WILLIAMS, P. W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. **Geological Society of America Bulletin**, v. 83, n. 3, p. 761–796, 1972. DOI: 10.1130/0016-7606(1972)83
- WILLIAMS, P. W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 61, p. 45–67, 1983.
- WILLIAMS, P. W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. **International Journal of Speleology**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2008.
- WU, Q.; DENG, C.; CHEN, Z. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. **Geomorphology**, v. 266, p. 1–10, 2016.
- ZHOU, W.; BECK, B. Roadway construction in karst areas: management of stormwater runoff and sinkhole risk assessment. **Environmental Geology**, v. 47, p. 1138–1149, 2005.
- ZHU, J.; TAYLOR, T. P.; CURRENS, J. C.; CRAWFORD, M. M. Improved karst sinkhole mapping in Kentucky using LiDAR techniques: a pilot study in Floyds Fork Watershed. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 76, n. 3, p. 207–216, 2014.
- ZHU, J.; PIERSKALLA, W. P. Applying a weighted random forests method to extract karst sinkholes from LiDAR data. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 343–352, 2016.
- ZWAHLEN, F. **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers: final report (COST action 620)**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2004. 297p.

3 TESTE DE APLICAÇÃO

3.1 O USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO-VANT PARA CONSTRUÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO-MDT, E IDENTIFICAÇÃO DE DOLINAS NA ÁREA DA GRUNA DA TARIMBA-GO.

O USO DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO - VANT PARA CONSTRUÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE TERRENO – MDT E IDENTIFICAÇÃO DE DOLINAS NA ÁREA DA GRUNA DA TARIMBA-GO

*THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLE - UAV FOR THE CONSTRUCTION OF DIGITAL
TERRAIN MODELS - DTM AND IDENTIFICATION OF DOLINES IN THE AREA OF GRUNA DA
TARIMBA-GO*

Cristiano Fernandes FERREIRA (1,2); Rogério Elias Soares UAGODA (1)

(1) Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade de Brasília.

(2) Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV/ICMBio.

Contatos: cristiano.ferreira@icmbio.gov.br; rogeriouagoda@unb.br.

Resumo

A identificação de dolinas é realizada a bastante tempo normalmente através da análise de fotografias aéreas, mapas topográficos ou trabalho de campo, o que pode representar uma tarefa bastante dispendiosa de tempo e recursos. Estudos de identificação e classificação de dolinas são realizados para subsidiar análises ambientais e evolutivas do carste. Mais recentemente observa-se o uso de modelos digitais de elevação para detecção de dolinas, mas poucos trabalhos, entretanto, se dedicaram ao mapeamento dessas feições através de dados coletados por Veículos Aéreos Não Tripulados-VANT. O objetivo deste artigo é apresentar o teste de utilização de tal tecnologia para geração de modelos digitais e comparar sua efetividade em relação a dados ALOS-PALSAR e levantamentos de campo na região da Gruna da Tarimba, uma das maiores cavernas do Brasil. Os resultados gerados mostram grande potencialidade do uso de VANT para o mapeamento de dolinas e especialmente para direcionar a prospecções. O processamento adicional prévio nos modelos digitais e o estabelecimento de pontos de controle no solo podem contribuir para a redução de resultados espúrios que elevam sobremaneira o número prováveis dolinas.

Palavras-Chave: dolina; MDT; VANT.

Abstract

Identification of dolines has usually been done through the analysis of aerial photographs, topographic map or fieldwork, which may demand a lot of time and financial resources. Studies of identification and classification of dolines are carried out to support environmental and evolutionary analyzes of karst. Recently, dolines have been detected by digital elevation models, but few studies have been devoted to mapping these features through collecting data by Unmanned Aerial Vehicles (UAV). The objective of this paper is assessing the use of such technology for digital models production and to compare its effectiveness to ALOS-PALSAR data and field surveys in the region of the Gruna da Tarimba, one of the largest caves in Brazil. The results show a great potentiality of UAV for mapping dolines and especially for guide prospecting. Additionally, preprocessing digital models and establishing ground control points can contribute to the reduction of spurious results that greatly increase the number of likely dolines.

Keywords: doline; DTM; UAV.

1. INTRODUÇÃO

As dolinas são feições de estreita relação com o meio subterrâneo, possuindo funções de acúmulo, concentração e transmissão de água superficial para as zonas hidrológicas subjacentes e muitas vezes abrigam as únicas entradas para sistemas de cavernas. As dolinas de dissolução são entendidas como a manifestação topográfica de processos concentrados de fluxo e dissolução no epicarste (WILLIAMS, 1983; 2008) e por isso, o conjunto dolina/epicarste, possui grande importância morfodinâmica e ambiental. Além da dissolução,

fator preponderante, outros processos operam em conjunto para a configuração de dolinas, desde colapsos, colmatação e sufusão, bem como demais processos superficiais de remodelamento (FERREIRA; UAGODA, 2019). Em ambientes tropicais a instalação de ramos de drenagem adiciona complexidade às dolinas, com a obliteração de formas originais, normalmente circulares. Essa condição associada a dificuldades de determinação dos limites precisos das feições em campo ou mesmo gabinete (fotos aéreas, imagens, mapas topográficos) torna o mapeamento de dolinas uma

tarefa potencialmente complexa, sobretudo em grandes áreas.

Métodos tradicionais de mapeamento de dolinas, como através de fotointerpretação, identificação de contornos fechados em mapas topográficos e campo são realizados a bastante tempo (WILLIAMS, 1972; DAY, 1976; BONDESAN et al., 1992; ŠUŠTERŠIČ, 1994). Mais recentemente, com o desenvolvimento de ferramentas de geoprocessamento e com a crescente disponibilidade de bases de dados com maior resolução, aumentaram as possibilidades de identificação de depressões cársticas de forma indireta, o que pode significar menos dispêndio de tempo e recursos. Nesse sentido, Siart et al. (2009) utilizaram modelos digitais (ASTER 15m e SRTM 90m) e imagens de alta resolução (Quickbird 0,61m) para o mapeamento de depressões cársticas na ilha de Creta, enquanto Seale et al. (2008) testaram o uso de modelos a laser de alta resolução (LIDAR 2,13m) para a identificação de dolinas na Flórida, em comparação ao uso de fotos aéreas. Outros trabalhos de cunho metodológico compararam diversas técnicas e bases de dados, especialmente modelos digitais de alta resolução (LIDAR), visando o incremento e eficiência no mapeamento de dolinas (DOCTOR; YOUNG, 2013; HOFIERKA et al., 2018). No Brasil um estudo comparativo entre bases de dados tradicionais e modelos digitais de alta resolução baseados em fotos aéreas antigas (1:25.000) foi realizado por Hiruma; Ferrari (2014), no qual buscou-se identificar as depressões poligonais na região do Vale do Ribeira-SP.

Entretanto, até o momento não se observam muitos trabalhos relacionados a identificação de feições cársticas com o apoio de veículos aéreos não tripulados (VANT), sendo mais comum, especialmente no Brasil, o uso de fotointerpretação tradicional, geralmente com fotos antigas. Dentre os trabalhos em ambientes cársticos com o uso dessa tecnologia destacam-se Ramsey et al. (2014), que realizaram a identificação visual com imagens aéreas de baixa elevação (120m) na Colúmbia Britânica visando o monitoramento de distúrbios em ambientes cársticos, através do mapeamento de dolinas e epicarste em áreas de extração madeireira. No Brasil Silva et al. (2017) utilizaram ortofotos geradas por VANT em associação a modelo digital LIDAR (geradas por levantamento aéreo tradicional) para a identificação e caracterização de feições cársticas e estruturas geológicas na região dos lajedos carbonáticos do Rio Grande do Norte. Em artigo recente de Oliveira et al. (2019) observa-se a aplicação de VANT para levantamento

morfométrico de dolinas, buscando identificar padrões e orientar o planejamento costeiro na região de Algarve, Portugal, onde processos erosivos podem acentuar mecanismos de subsidência e representar risco em áreas ocupadas.

As possibilidades trazidas para as geociências com o desenvolvimento dos VANTs nos últimos anos são inúmeras, desde a viabilidade de levantamentos aerofotogramétricos de alta resolução temporal, espacial (centimétrica) e mesmo espectral (câmeras termais, NDVI, etc.), como também a possibilidade de recobrimento de áreas inacessíveis ou de alto risco. O conjunto de imagens adquiridas em sobreposição permitem a montagem de ortofotomosaicos e modelos digitais de elevação (MDE) de alta resolução por aplicativos especializados. Apesar dos problemas de autonomia (baterias) e elevação máxima de sobrevoos permitida, com conseqüente menor abrangência espacial para os modelos de VANT mais acessíveis e de fácil operação (multi-rotor, p.ex.), as imagens obtidas por essa tecnologia podem suplantam a costumeira falta de dados públicos e institucionais de áreas mais remotas do Brasil, tudo isso a custos relativamente pequenos se comparados a levantamentos aéreos tradicionais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é justamente testar o uso dessa nova ferramenta para a identificação de dolinas numa pequena porção da Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APA-NRV) nordeste de Goiás (Figura 1). Essa região carece de bases de dados compatíveis com a identificação de dolinas por meio remoto, e considerando que a APA-NRV possui uma área muito extensa (176 mil ha), boa parte carstificada, a realização de teste dessa tecnologia para possível uso auxiliar na caracterização do carste local se mostra como uma estratégia oportuna.

A área escolhida para realização do teste é uma depressão composta, poligonal, de 51,5 hectares, com a sub inclusão de diversas dolinas de ordem inferior, muitas das quais dando acesso à parte montante do sistema Gruna da Tarimba (CNC GO_394), umas das maiores cavernas do país, com 11.250m de desenvolvimento (MARTINELLI et. al, 2015). O local é caracterizado por cerrado antropizado de aspecto arbustivo nas partes mais altas do relevo, onde ocorrem sedimentos inconsolidados do Grupo Urucuia (siliciclásticos). Nas partes mais baixas a vegetação se apresenta mais densa, onde afloram os calcários da formação Lagoa do Jacaré e curtos trechos subaéreos da drenagem, com surgências e sumidouros. Essa configuração permite avaliar a aplicação do uso do

VANT para detectar feições nas mais diferentes situações do restante da APA-NRV, seja com

cobertura vegetal densa ou esparsa, áreas alteradas e dolinas com tamanhos variados.

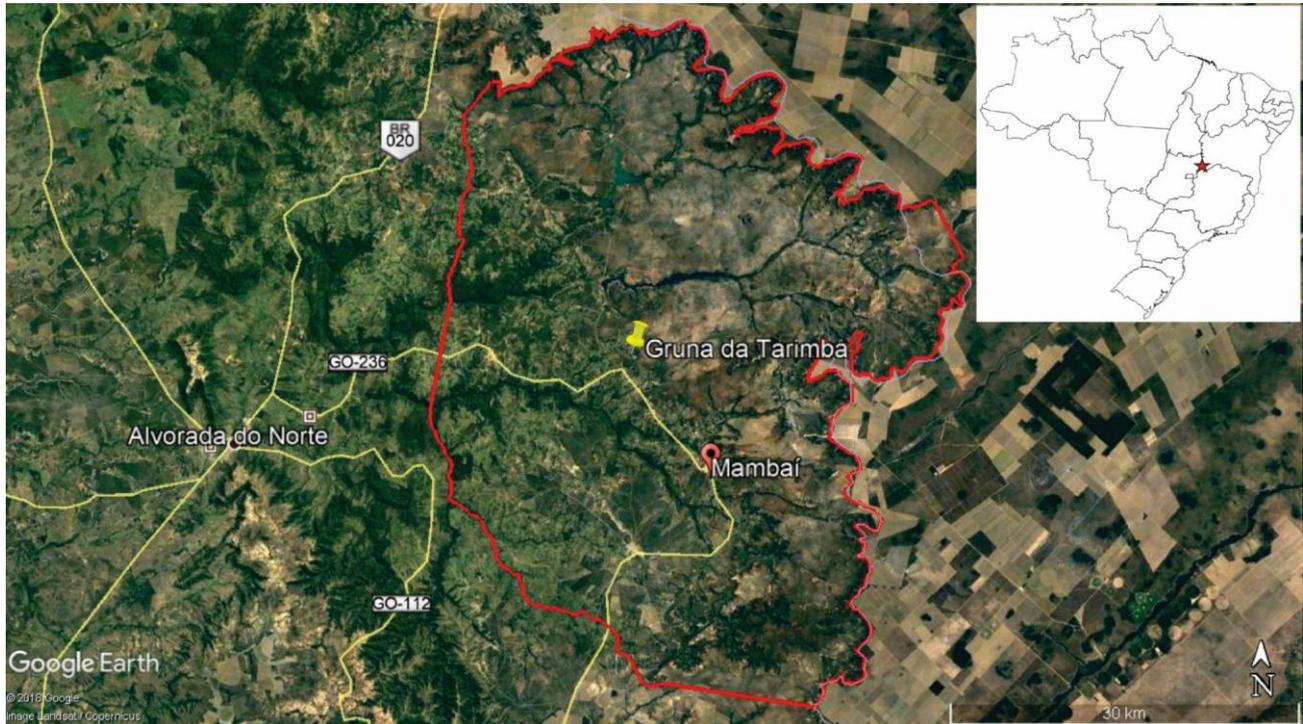


Figura 1: Localização da Gruna da Tarimba, na parte central da APAN-NRV (polígono em vermelho), nas proximidades de Mambai-GO.

2. METODOLOGIA

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado em 17 de setembro de 2018, no final do período de seca, logo após as primeiras chuvas. Para tal foi utilizado o equipamento Phantom-4 PRO, DJI e o sobrevoo foi planejado através do aplicativo Drone Deploy, ajustado para uma altura de 120 metros do solo, posição nadir, em sobreposição de 75% frontal e 65% lateral, velocidade máxima em 15m/s, e resolução máxima do sensor da câmera nativa (20 megapixel) com capacidade de atingir até 3,6cm de resolução por pixel nessa configuração. Após o levantamento, em gabinete, observou-se a aquisição total de 248 imagens que foram processadas pelo aplicativo Pix4Dmapper, com adensamento de nuvem de pontos em padrão otimizado, resultando em um ortomosaico com 5,49cm GSD (ground sample distance), equivalente à resolução espacial final (Figura 2). Por se tratar de um teste para aplicação posterior em áreas mais abrangentes na APA-NRV, nessa etapa não foram utilizados pontos controle em solo, para ajustar de forma mais precisa os produtos gerados. A partir da nuvem de pontos foi possível construir o modelo digital de superfície (MDS), que considera as elevações da vegetação e construções (Figura 3). Entretanto, como o foco deste trabalho é a

identificação de feições geomorfológicas, especificamente as dolinas, também foi gerado um modelo digital de terreno (MDT) e curvas de nível (um metro), optando-se pelas configurações padrões do aplicativo para correção e ajuste ao nível do solo (Figura 4).

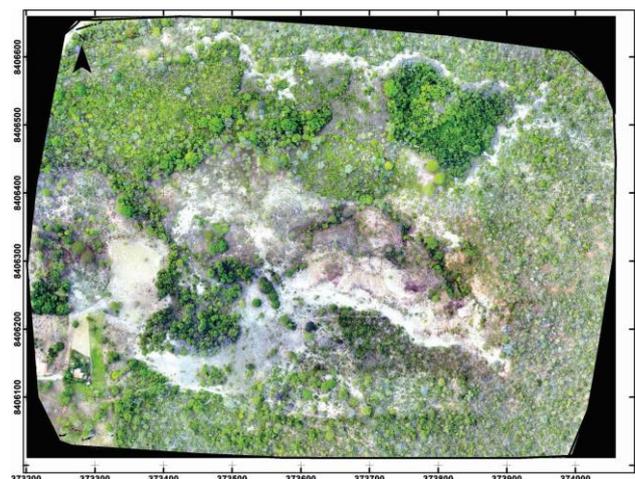


Figura 2: Ortomosaico.

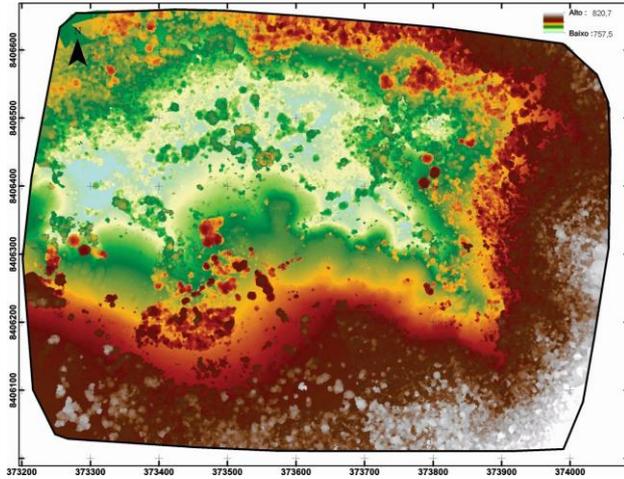


Figura 3: MDS.

Para efeito comparativo utilizou-se também de um MDT com dados ALOS-PALSAR (12,5m) obtido no serviço Vertex, ASF, NASA (Figura 5). As análises visuais dos modelos gerados foram confrontadas com imagens Google Earth, através da ferramenta superposição de imagens, o que permitiu adicionalmente a comparação com dados coletados em campo por GPS (Figuras 6 e 7) bem como a projeção da Gruna da Tarimba em superfície (Figura 8). A atividade de campo ocorreu em duas etapas, uma antes do sobrevoo e geração dos modelos (junho 2018) e outra após, já com os modelos processados (outubro 2018). Dadas as condições do terreno, ora com trechos íngremes e de difícil deslocamento, ora com mata fechada, dificultando a visualização de feições maiores ou de aspecto suave, notou-se significativa discrepância entre a identificação de dolinas no campo com e sem o auxílio dos modelos digitais. Após a elaboração dos modelos e especialmente com a ajuda das curvas de nível geradas (um metro) contabilizaram-se visualmente os polígonos fechados mais externos

(possíveis depressões) para confrontar com os dados de campo.

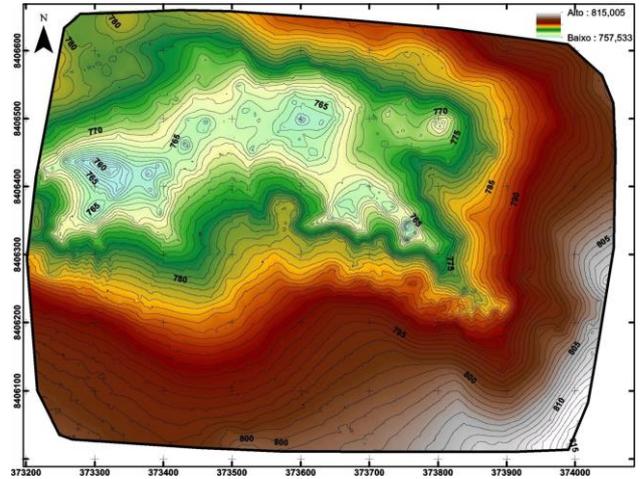


Figura 4: MDT VANT.

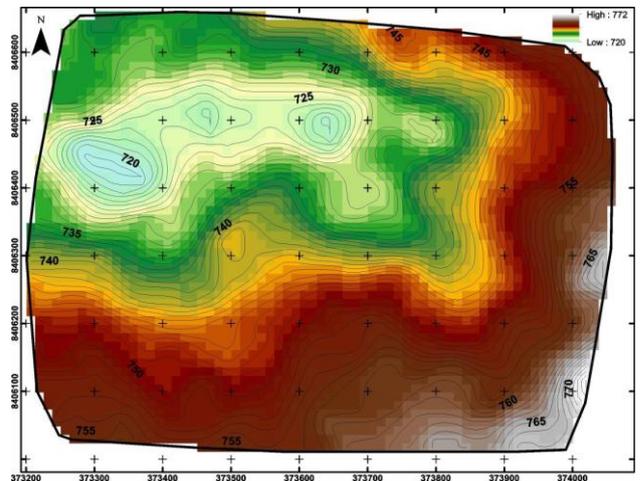


Figura 5: MDT ALOS-PALSAR.

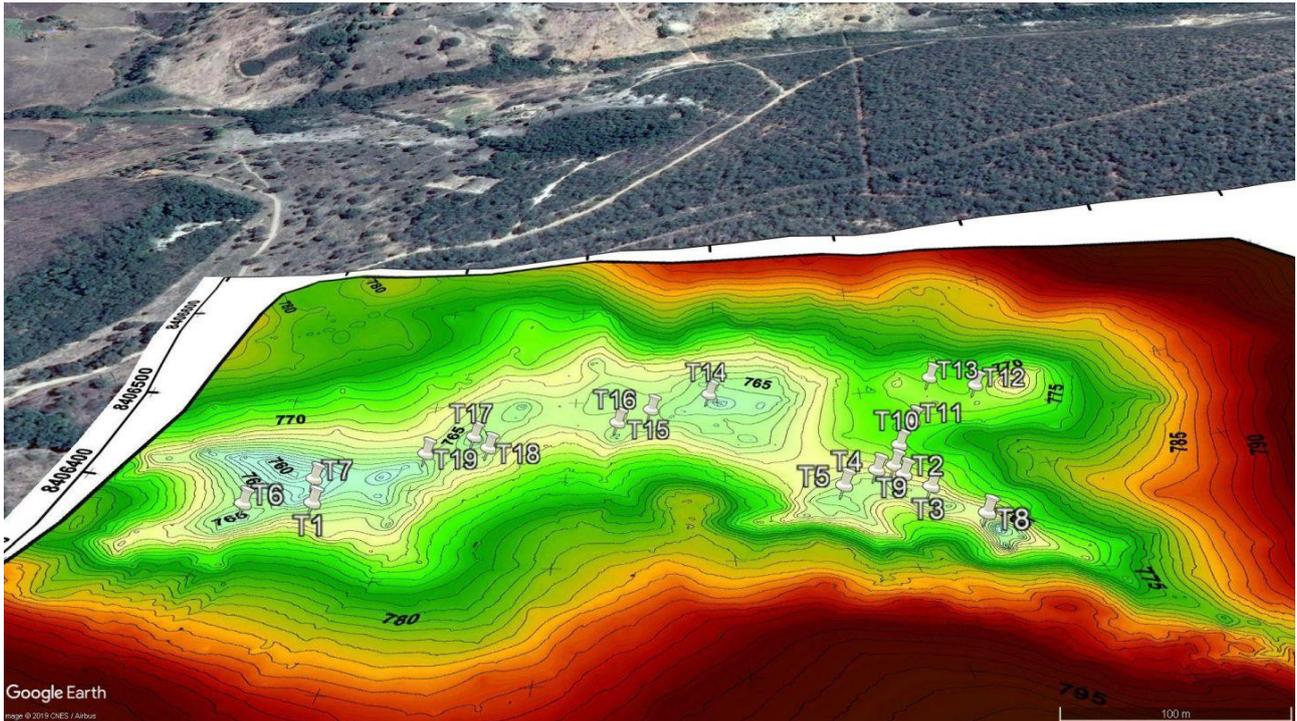


Figura 6: Dolinas identificadas em campo na sobreposição de imagens em perspectiva do Google Earth e MDT VANT.

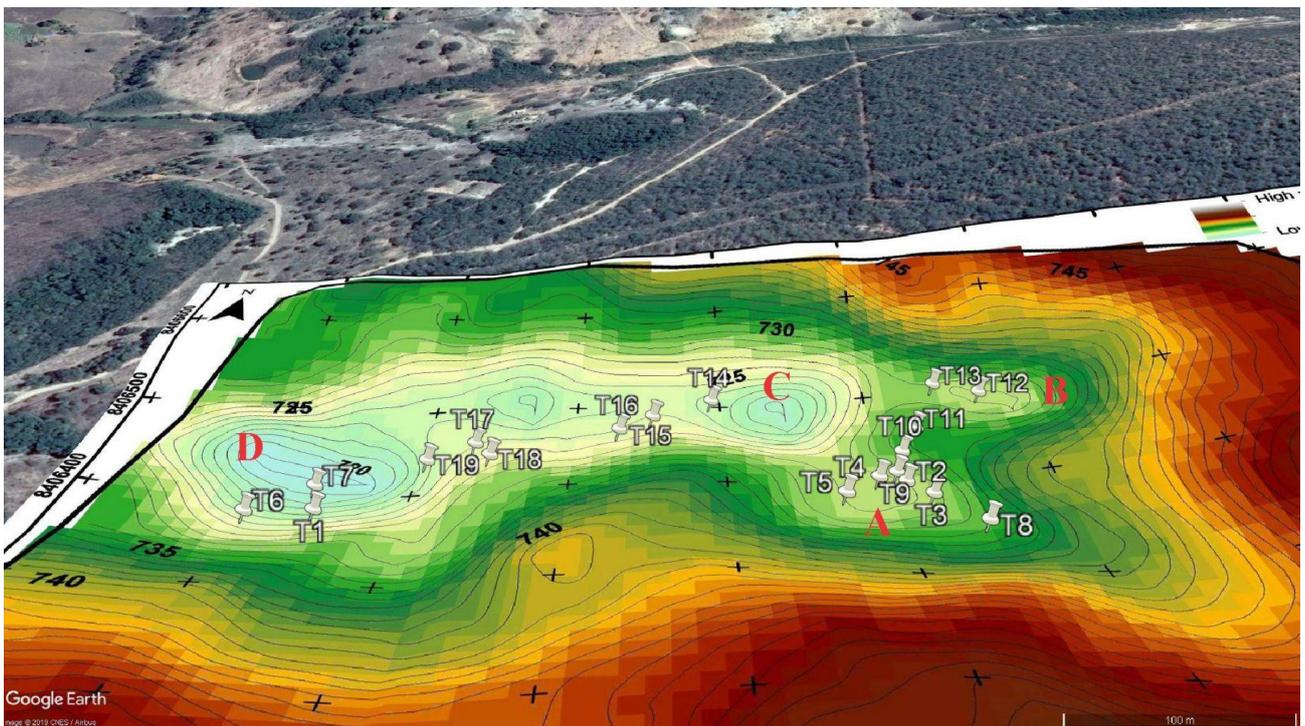


Figura 7: Dolinas identificadas em campo na sobreposição de imagens em perspectiva do Google Earth e MDT ALOS-PALSAR. Letras A-D em vermelho destacam as depressões compostas identificadas por este MDT, englobando dolinas de ordem inferior.

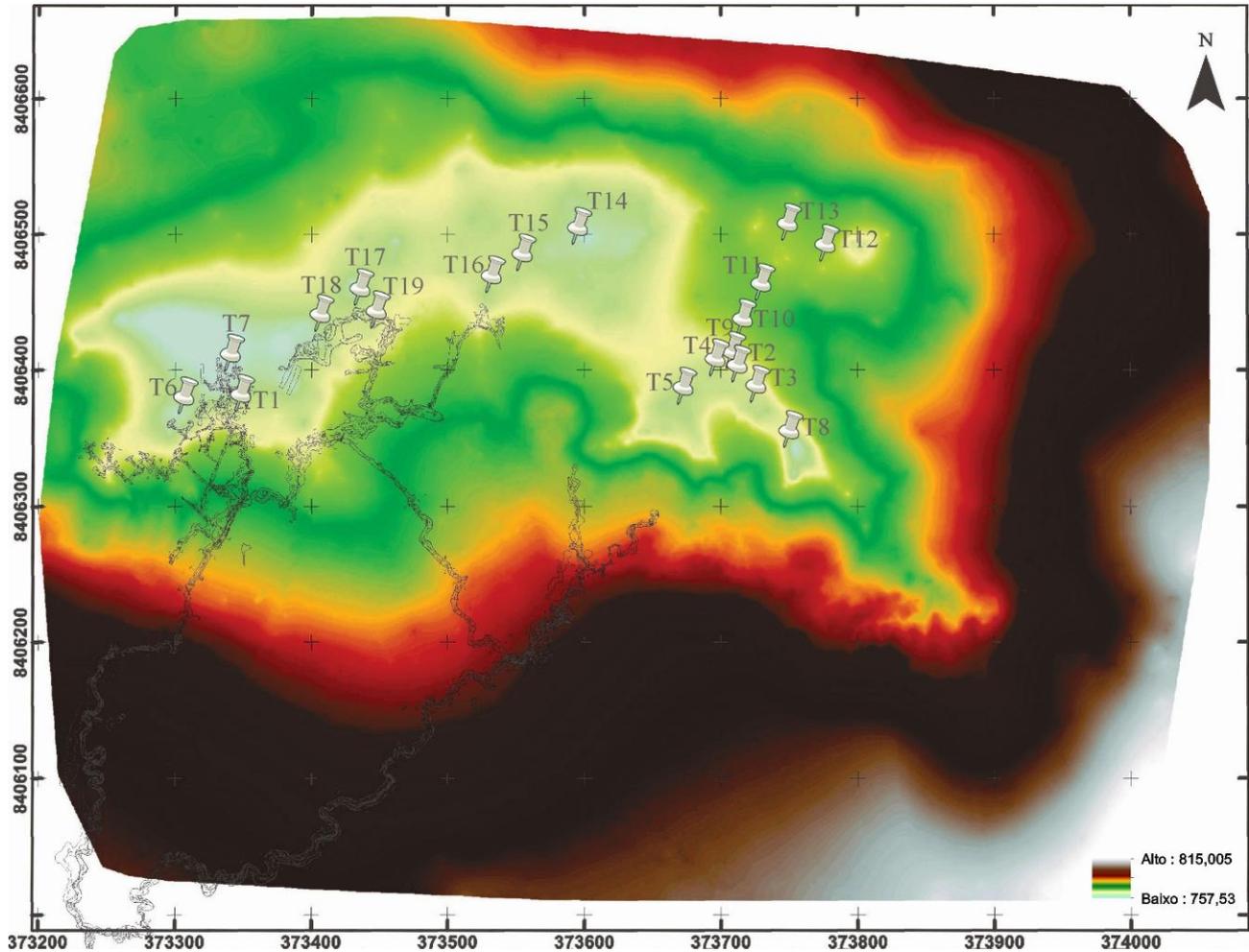


Figura 8: Localização das dolinas em relação a projeção da Gruna da Tarimba em superfície no MDT VANT. Topografia da caverna cedida gentilmente pela União Paulista de Espeleologia.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos após análise visual dos modelos gerados (especialmente em busca de curvas fechadas) e a execução das duas etapas de campo de checagem foram sistematizados para melhor compreensão (Tabela 1). No total foram identificadas 19 dolinas internas à depressão poligonal da Gruna da Tarimba, representando para esta pequena fração do carste da APA-NRV uma densidade equivalente a 37/km², índice provavelmente bastante superior ao restante da região. Na primeira etapa de campo apenas sete feições foram identificadas, sobretudo devido à dificuldade de deslocamento, visualização em áreas de mata fechada e real determinação dos limites da depressão poligonal. Após a elaboração do modelo VANT e a indicação visual de outras prováveis dolinas, procedeu-se o segundo trabalho de campo, onde buscou-se verificar pontos de checagem previamente carregados no GPS. Nesse segundo campo confirmou-se mais 12 dolinas, o que denota grande potencialidade do uso de modelos de alta

resolução VANT no planejamento de atividades de prospecção.

Tabela 1: Relação das dolinas identificadas nos dois trabalhos de campo. Coluna VANT mostra em “x” as convergências entre os dados coletados em campo e MDT, as distâncias em metros das identificadas com deslocamento até 8 metros e as não detectadas (ND). Coluna ALOS mostra as dolinas identificadas em campo convergente com as depressões compostas de maior envergadura apontadas no respectivo MDT, representadas pelas letras A, B, C e D, conforme figura 7. Na última coluna a interpretação tipológica das dolinas conforme observação de campo.

| Dolina | Campo | VANT | ALOS | Tipologia |
|--------|--------|------|------|-----------------|
| T1 | | ND | D | colmatada |
| T2 | | 6m | A | sufusão |
| T3 | | x | A | colapso |
| T4 | jun/18 | 7,3m | A | sufusão |
| T5 | | x | A | sufusão |
| T6 | | x | D | sufusão |
| T7 | | x | D | sufusão |
| T8 | | x | | sufusão |
| T9 | out/18 | 5,3m | A | sufusão/colapso |

| Dolina | Campo | VANT | ALOS | Tipologia |
|--------|-------|------|------|-------------------|
| T10 | | ND | | sufusão/colapso |
| T11 | | 7m | | sufusão/colapso |
| T12 | | 5,5m | B | sufusão |
| T13 | | 5,7m | B | sufusão |
| T14 | | x | C | sufusão |
| T15 | | 4m | | colapso/colmatada |
| T16 | | x | | sufusão |
| T17 | | x | | sufusão |
| T18 | | 5,4m | | sufusão/colapso |
| T19 | | 8m | | sufusão |

Coluna VANT mostra em “x” as convergências entre os dados coletados em campo e MDT, as distâncias em metros das identificadas com deslocamento até 8 metros e as não detectadas (ND). Coluna ALOS mostra as dolinas identificadas em campo convergente com as depressões compostas de maior envergadura apontadas no respectivo MDT, representadas pelas letras A, B, C e D, conforme figura 7. Na última coluna a interpretação tipológica das dolinas conforme observação de campo.

A análise mais detalhada dos contornos gerados no MDT VANT permitiu identificar o nível de precisão para ressaltar dolinas, conforme observado na tabela (Tabela 2). Através do modelo foi possível identificar 17 positivos verdadeiros, sendo oito espacialmente convergentes e nove com deslocamentos de até oito metros, com formatos e dimensões compatíveis. Esses deslocamentos se devem provavelmente ao erro do GPS de campo (Garmin 60Csx) somados ao erro do GPS do aparelho VANT utilizado para sobrevoo, visto que não houve retificação via pontos controle (com RTK, p.ex.). Ressalta-se também que os pontos coletados em campo sempre foram anotados referentes ao nível mais profundo das dolinas (ponto de absorção) conforme recomendado na literatura (BONDESAN et al., 1992; FORD; WILLIAMS, 2007). Esses pontos frequentemente estão posicionados nas bordas das dolinas e não nos

centrodes apontados no modelo, implicando em possíveis maiores afastamentos. Apenas duas dolinas não foram destacadas no MDT VANT (falso negativo), tendo sido observadas cada uma num dos campos realizados. Entretanto, ao analisar detalhadamente todo o MDT gerado, identificou-se 128 polígonos fechados depressivos (curvas de nível) em tamanhos variados, não associados a dolinas (Figura 9). Essas indicações errôneas são artefatos gerados no processo de interpolação das curvas de nível e geralmente ocorrem em áreas planas ou em fundos de vale, sendo esse alto valor compatível com outros trabalhos que utilizaram MDEs de alta resolução (CARVALHO JUNIOR et al., 2014; JEANPERT et al., 2016; HOFIERKA et al., 2018). A correção mais acurada do nível do solo ou a adoção de filtros prévios pode reduzir consideravelmente tais ruídos, que poderiam ser equivocadamente confundidos com dolinas verdadeiras.

Tabela 2: Acurácia dos modelos VANT e ALOS-PALSAR para identificar dolinas verdadeiras, falsos positivos e negativos. * São 17 dolinas sendo oito exatas e nove deslocadas até oito metros; ** São 11 dolinas internas às quatro depressões compostas identificadas no MDT (A, B, C, D).

| | | |
|------------------------------------|-----|--------|
| Total de dolinas existentes | 19 | 100% |
| MDT VANT | | |
| positivos verdadeiros* | 17 | 89,50% |
| falso positivo | 128 | 675% |
| falso negativo | 2 | 10,50% |
| MDT ALOS | | |
| positivos verdadeiros** | 11 | 57,90% |
| falso positivo | 1 | 5,30% |
| falso negativo | 8 | 42% |

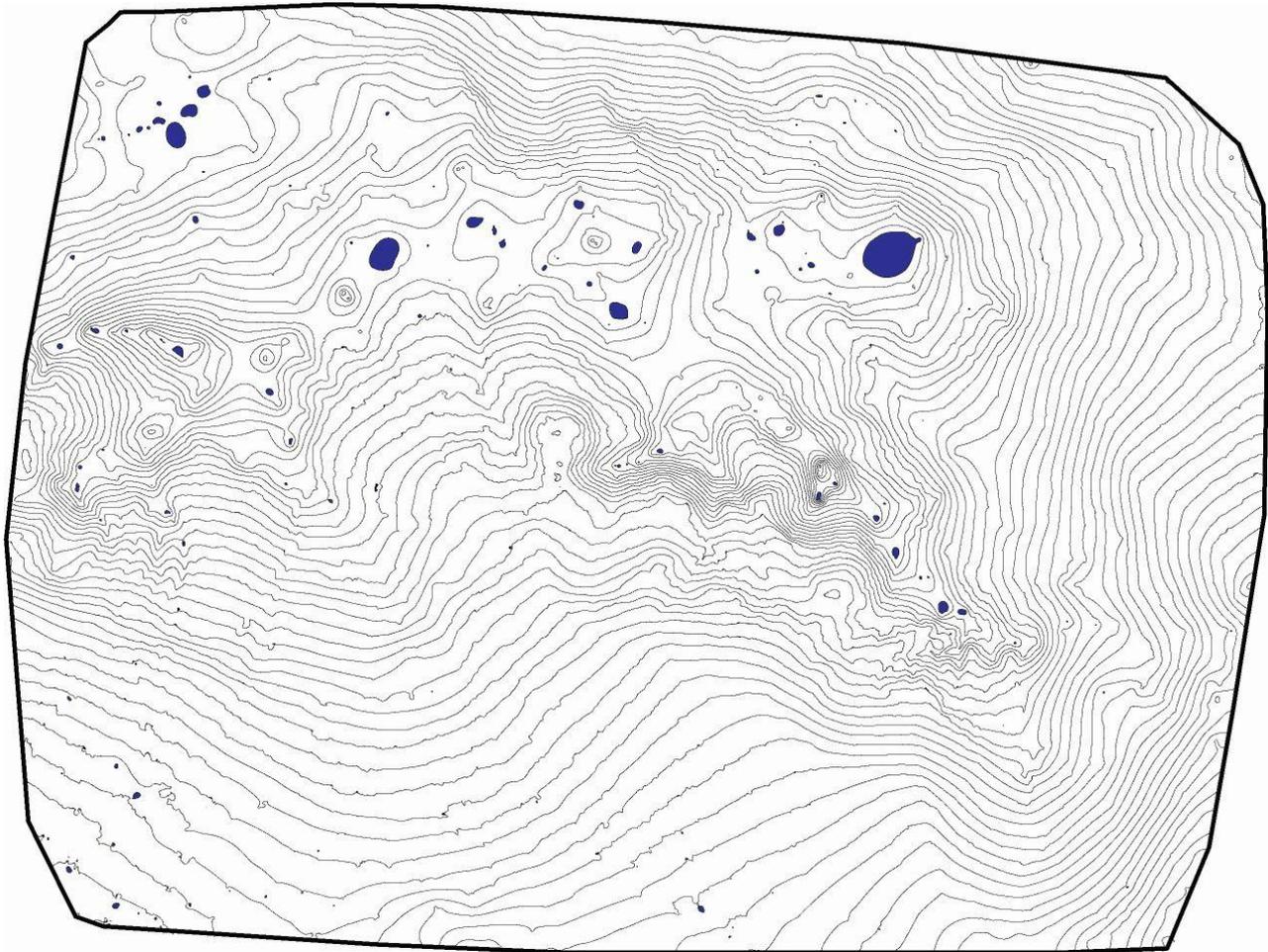


Figura 9: Círculos fechados em azul e pontos escuros de menor tamanho representam artefatos gerados no MDT VANT (128), muitos dos quais imperceptíveis nesta imagem.

A análise do MDT ALOS mostrou que esse modelo não é aplicável à detecção de pequenas dolinas, tendo identificado de forma mais abrangente apenas 4 depressões de ordem superior, que englobam pequenos grupos de dolinas (diferenciadas na Tabela 1 pelas letras A-D). Apesar de ter criado apenas um falso positivo, tal artefato é de tamanho significativo, em uma área de vale seco, sem dolinas. Esse vale seco também induziu a criação de artefatos no MDT VANT, mas de tamanhos reduzidos. No MDT ALOS Foram oito dolinas não detectadas, ou seja, não incluídas numa das quatro depressões compostas observadas. Além disso, não foi destacada uma das maiores feições isoladas da área (T8), de profundidade e diâmetro consideráveis.

Uma das propostas do mapeamento das dolinas na APA-NRV, além da importância enquanto ferramenta de gestão ambiental nessa área protegida, é a identificação das tipologias mais recorrentes e uma possível associação com processos evolutivos. Apesar da expectativa de interpretação remota da tipologia de dolinas através

de modelos ou mesmo ortofotomosaicos de precisão, observou-se que para tal classificação ainda é necessária a checagem em campo. Apenas feições de grande envergadura, como a própria depressão composta da Gruna da Tarimba como um todo (aproximadamente 700m x 500m) podem ser classificadas remotamente, no caso, como uma feição poligonal com a inserção ramos de drenagens superficiais. Das 19 dolinas internas identificadas, a maior parte remete a processos de sufusão (12), que convergem lentamente materiais clásticos para os pontos de absorção (Figura 10). Outras quatro dolinas apresentam processos de sufusão e traços remanescentes de antigos colapsos, com a exposição de bordas rochosas e alguns blocos esparsos. Por fim observou-se apenas uma dolina de colapso, em rocha exposta, uma de formato suave e fundo chato categorizada como colmatada e uma apresentando um misto das duas anteriores. Diante do exposto, verifica-se, portanto, o papel predominante dos materiais inconsolidados associados a processos de modelamento superficiais na configuração das dolinas, obviamente obliterando formatos e

mecanismos iniciais ligados a dissolução e colapso. Essa situação é convergente à grande disponibilidade de materiais inconsolidados na região (sedimentos Urucuia), disponibilidade de energia (declividade) e pluviosidade (1100mm de média anual).



Figura 10: Dolina de sufusão (T16) bastante representativa das feições que ocorrem no interior da depressão poligonal da Gruna da Tarimba. Apesar das pequenas dimensões desta dolina, ela foi identificada de forma precisa no MDT VANT, fruto da alta resolução e pouca cobertura vegetal neste ponto.

No último campo de checagem aproveitou-se também para executar um teste de topografia de duas dolinas com metodologias diferentes a fim de avaliar a possibilidade de execução da tarefa por meios tradicionais (manuais), em campo, sem o uso de ferramentas de sensoriamentos remoto. O primeiro método, com o apoio de um colaborador, se baseou no uso de balizas, trena, clinômetro e bússola (Leica Disto X) para realização de visadas, devidamente ancoradas num ponto de coordenadas conhecidas. Foi selecionada uma pequena dolina (6m diâmetro), onde foram executados oito vértices, que demandou 25 minutos de trabalho, entre visadas, anotação e croqui. A segunda dolina, bem maior e de extrema dificuldade de acesso, com paredes escarpadas em solo, foi mapeada com o uso de pontos coletados por GPS. Foram 10 vértices e um tempo total menor, de 12 minutos, apesar da maior extensão da feição ($\approx 30 \times 40\text{m}$). A despeito da maior ou menor precisão desses métodos, mais sujeitos a erros humanos ou da precisão dos instrumentos (maior erro sob dossel no GPS, p.ex.), o dispêndio de tempo para cada mapeamento de dolina, demonstra a inviabilidade dessas técnicas, especialmente em grandes populações de feições ou extensões de áreas. Além disso deve-se considerar os deslocamentos custosos pelas áreas (escarpas, morros, carrascais, etc.) ou a possibilidade de locais

inacessíveis (por risco ou proibição de proprietários).

4. CONCLUSÕES

O mapeamento de dolinas é uma estratégia importante tanto para entendimento da evolução de regiões cársticas como para conservação ambiental, visto que juntamente com o epicarste, possuem destacada função na recarga e moderação de aportes hídricos ao meio subterrâneo. O desafio reside normalmente na disponibilidade de bases de dados de alta resolução que permitam a identificação de feições que por vezes se apresentam de tamanhos diminutos na paisagem. Tendo em vista a inexistência de fotos aéreas de detalhe e atualizadas para a região da APA-NRV, bem como de outras bases mais apropriadas, o presente trabalho apresenta um teste de utilização de VANT para mapeamento de uma depressão poligonal ligada ao sistema Gruna da Tarimba. Foram gerados alguns produtos de suporte, como um ortofotomosaico, MDS e MDT com os dados do VANT e também um MDT ALSO-PALSAR. Observou-se que os dados ALOS-PALSAR não são adequados para detecção de pequenas feições, tendo permitido identificar apenas quatro depressões compostas. Já os dados do VANT, numa resolução bem superior, permitiram identificar 17 das 19 dolinas da área, numa taxa de 89,5% de acerto, dentre dolinas totalmente convergentes e até oito metros de deslocamento. Entretanto, as duas dolinas restantes, omitidas pelo modelo (falso negativo) e as 128 curvas fechadas adicionais relacionadas a depressões espúrias (falso positivo) indicam que trabalhos suplementares de pré-processamento, filtragem e checagens serão necessários para a utilização dessa metodologia em larga escala.

De uma forma geral o teste permitiu compreender que para identificação das dolinas da APA-NRV será necessário a análise de bases distintas, a depender da escala de interesse do estudo, e que trabalhos de campo para checagem e melhor descrição tipológica das feições serão imprescindíveis. Uma vez que a utilização de sensores mais apropriados para a tarefa, baseados na formação de nuvem de pontos a laser, capazes de ultrapassar o dossel e representar de forma mais adequada o nível do solo (LIDAR) não estão disponíveis a custos acessíveis, pretende-se utilizar dados gerados por VANT de baixo custo, com câmera nativa (visível) para viabilizar o projeto. Uma das possibilidades para diminuir a taxa de erros é a retificação espacial dos modelos baseados

em pontos de controle no solo e o pré-processamento buscando suavizar e filtrar os objetos falsos (dossel), aproveitando-se da disponibilidade de pontos esparsos da vegetação no cerrado local. Em próximos trabalhos poderão ser testadas metodologias, amplamente discutidas na literatura,

de extração automatizada de dolinas sob supervisão e filtros pré-estabelecidos, buscando dinamizar a tarefa.

REFERÊNCIAS

- BONDESAN, A.; MENEGHEL, M.; SAURO, U. Morphometric analysis of dolines. **International Journal of Speleology**, v. 21, p. 1–55, 1992.
- CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GILLESPIE, A. R.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; SILVA, N. C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. **Remote Sensing**, v. 6, p. 330–351, 2014.
- DAY, M. The morphology and hydrology of some Jamaican karst depressions. **Earth Surface Processes**, v. 1, p. 111–129, 1976.
- DOCTOR, D. H.; YOUNG, J. A. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital elevation data. *In*: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 449–458.
- FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. **Revista Caminhos de Geografia**. 2019. “No prelo”
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Second ed. Chichester: Wiley, 2007. 562p.
- HIRUMA, S. T.; FERRARI, J. A. Análise comparativa da extração automatizada de dolinas a partir de modelos digitais de terreno. **Revista do Instituto Geológico**, v. 34, n. 2, p. 1–11, 2014.
- HOFIERKA, J.; GALLAY, M.; BANDURA, P.; ŠAŠAK, J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. **Geomorphology**, v. 308, p. 265–277, 2018.
- JEANPERT, J.; GENTHON, P.; MAURIZOT, P.; FOLIO, J.; VENDÉ-LECLERC, M.; SÉRINO, J.; JOIN, J.; ISEPPI, M. Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, p. 1854–1868, 2016.
- MARTINELLI, R. S.; CALVO, E. M.; LOBO, H. A. S.; GERIBELLO, R. K.; DOURADO, R. S. Exploração e mapeamento do sistema Dores - Tarimba – Pasto de Vacas (Mambáí, Goiás, Brasil). *In*: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (Orgs.). **Congresso Brasileiro de Espeleologia**. Campinas: SBE, 2015, v. 33, p. 349–354. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_349-354.pdf.
- OLIVEIRA, S.; MOURA, D.; BOSKI, T.; HORTA, J. Coastal paleokarst landforms: A morphometric approach via UAV for coastal management (Algarve, Portugal case study). **Ocean and Coastal Management**, v. 167, p. 245–261, 2019.

- RAMSEY, C. L.; GRIFFITHS, P. A.; STOKES, T. R. Multi-rotor unmanned aerial vehicles (UAVS) and high-resolution compact digital cameras: A promising new method for monitoring changes to surface karst resources. **Acta Carsologica**, v. 43, n. 2–3, p. 269–286, 2014. Seale et al. (2008)
- SIART, C.; BUBENZER, O.; EITEL, B. Geomorphology combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. **Geomorphology**, v. 112, n. 1–2, p. 106–121, 2009.
- SILVA, O. L.; BEZERRA, F. H.R.; MAIA, R. P.; CAZARIN, C. L. Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. **Geomorphology**, v. 295, p. 611–630, 2017.
- ŠUŠTERŠIČ, F. Classic dolines of classical site. **Acta Carsologica**, v. 23, p. 123–154, 1994.
- WILLIAMS, P.W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. **Geological Society of America Bulletin**, v. 83, n. 3, p. 761–796, 1972. DOI: 10.1130/0016-7606(1972)83
- WILLIAMS, P. W. The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 61, p. 45–67, 1983.
- WILLIAMS, P. W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. **International Journal of Speleology**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2008.

4 RESULTADOS

4.1 DETECÇÃO DE DOLINAS COM MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO - MDE'S E IMAGENS DE SATÉLITE NA REGIÃO DA APA DAS NASCENTES DO RIO VERMELHO E BACIA DO RIO CORRENTE-GO

Resumo

O mapeamento de dolinas é uma atividade corriqueira na geomorfologia cárstica, serve como primeiro parâmetro da evolução dessas paisagens, para análises ambientais e de risco. Entretanto, quando realizada por métodos tradicionais, como fotointerpretação, demanda tempo e carrega significativa carga de subjetividade. Técnicas mais modernas utilizam diversas bases conjugadas, como Modelos Digitais de Elevação e imagens de satélite. Em função da escala abrangente, este trabalho teve como objetivo detectar grandes e médias depressões cársticas na Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho e no alto vale do Rio Corrente-GO. Para tanto foram utilizados dados ALOS-PALSAR (12,5m) e SRTM (30m) para detecção automatizada por diferença de preenchimento até o nível de extravasamento. As validações foram realizadas principalmente por meio de imagens Google Earth, disponibilizadas gratuitamente com séries históricas. Apesar das diferenças de resolução espacial entre os modelos digitais utilizados, ambos resultaram em quantitativos de objetos equivalentes, com uma complementariedade de detecções próprias considerada benéfica. Os resultados mostram áreas de maior adensamento de grandes depressões dentro e nos limites externos da unidade de conservação, onde ainda não foram identificadas cavernas, demonstrando áreas sensíveis à conservação dos sistemas cársticos.

Palavras chave: Dolinas, Detecção, MDE

Introdução

As dolinas são depressões naturais que se apresentam na superfície em tamanhos e formatos variados, mas normalmente em aspectos circulares a sub-circulares, desde poucos metros até quilômetros de diâmetro (FORD e WILLIAMS, 2007). Essas feições são características dos ambientes cársticos e denotam o predomínio dos processos de dissolução em subsuperfície, que ocorrem na interação de águas levemente ácidas com rochas solúveis, em geral carbonáticas. Do ponto de vista ambiental as dolinas possuem grande importância por concentrarem fluxos hídricos superficiais e operarem, em conjunto com o epicarste, na moderação e armazenamento de água para o meio subterrâneo, necessária à manutenção da fauna cavernícola e espeleotemas, por exemplo (WILLIAMS, 2008). Em artigo recente Ferreira e Uagoda (2019a) fazem uma revisão sobre as tipologias de carste e especialmente de dolinas e seu desenvolvimento genético.

A identificação e o mapeamento de dolinas são atividades realizadas há bastante tempo, em geral feito com a finalidade de obter dados morfométricos para estimar a taxa de carstificação e realizar considerações sobre a evolução deste tipo de paisagem (WILLIAMS, 1972; DAY, 1976). Também é realizada com propósitos ambientais, visando estabelecer áreas de conservação ou de risco para colapsos (HOFIERKA et al., 2018; SALLES et al., 2018). A tarefa, entretanto, é considerada custosa do ponto de vista de tempo e recursos, sobretudo quando realizada por meio de fotointerpretação clássica, ou mapeamento em campo, especialmente em grandes áreas. Visando reduzir tais custos, diversos trabalhos ao longo dos

anos se dedicaram à detecção e mapeamento de dolinas por meio de ferramentas de geoprocessamento, com o uso de imagens de satélite, Modelos Digitais de Elevação-MDE's, ou outras fontes cartográficas, muitos com abordagens automatizadas no processo (GUIMARÃES et al., 2005; SIART et al., 2009; CARVALHO JÚNIOR et al., 2014; WU et al., 2016; CAHALAM e MILEWSKI, 2018).

O objetivo deste estudo é elaborar um mapeamento semi-automatizado com base em geoprocessamento, em uma escala abrangente, das dolinas presentes na Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho (APA-NRV) e bacia do alto Rio Corrente, no nordeste do estado de Goiás (Figura 1). Juntas estas duas áreas alcançam um total de 3.923,14km², exigindo, portanto, bases de dados adequadas para investigação em grande extensão territorial. Nesse sentido pretende-se avaliar a utilização de MDE's em abordagens automatizadas e imagens de satélite para verificações visuais. O resultado deste mapeamento visa subsidiar o plano de manejo da APA-NRV, e, portanto, o alvo são as feições significativas do ponto de vista hidrodinâmico (grandes e médias depressões).

Área de estudo

A área estudada, na parte alta da bacia do Rio Corrente, junto a Serra Geral de Goiás, engloba rochas sedimentares, especialmente clásticas, correspondentes aos divisores Serra da Saudade, formação Três Marias, aos grupos Urucuaia e Areado, bem como materiais residuais inconsolidados associados (SGM/SIC e CPRM, 2008). Nas porções intermediárias e baixas da área de estudo ocorrem sedimentos clasto-químicos da formação Lagoa do Jacaré, especialmente rochas carbonáticas, potencialmente mais propícias à carstificação. Ao Sul, fora da APA-NRV, ocorrem coberturas detrítico lateríticas ferruginosas correspondentes às superfícies mais altas da região (Figura 2).

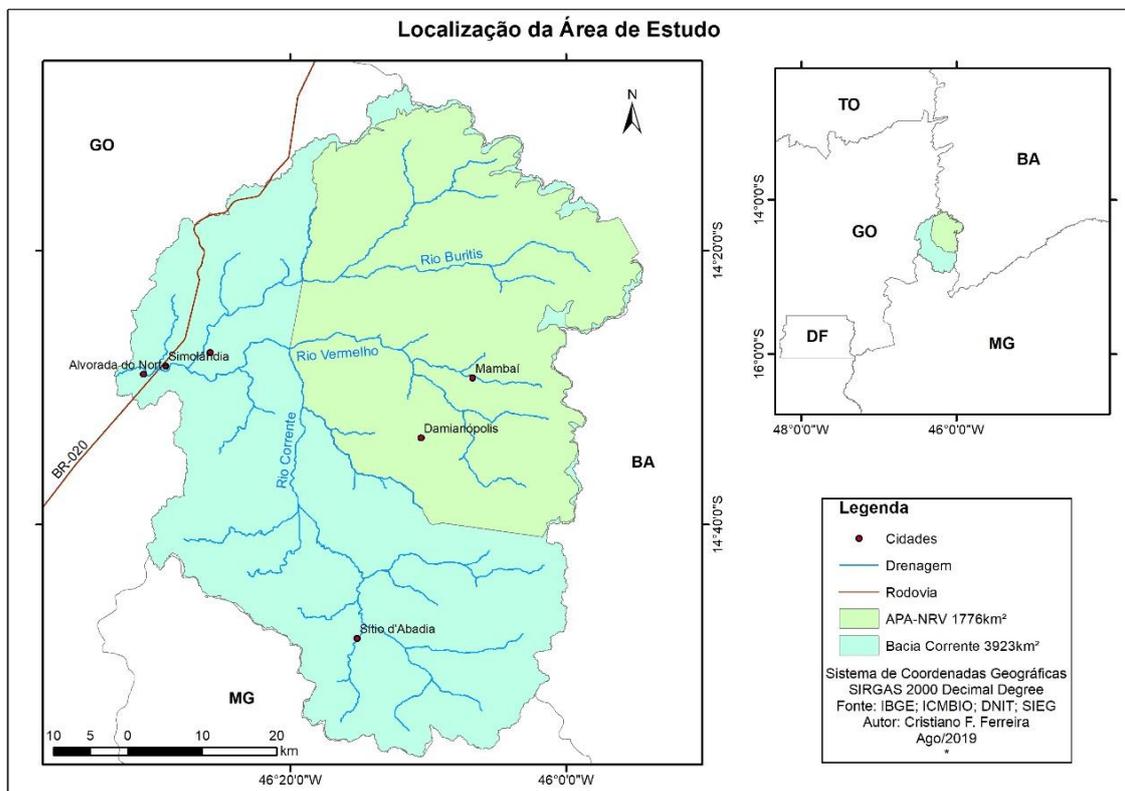


Figura 1: Localização da área de estudo.

Quanto ao relevo destaca-se a presença da cuesta da Serra Geral, que impõe um escalonamento altimétrico gradual descendente de leste para oeste, sendo acompanhado pela mudança nos materiais e litotipos (CHEREM e VARAÇÃO, 2014). Basicamente o reverso e front é caracterizado pelas rochas do grupo Urucuia (patamar mais elevado), seguidos pelos sedimentos residuais colúvio-eluvionares do desmonte da cuesta (patamar intermediário) e por fim, nos setores mais rebaixados a oeste-noroeste, afloram rochas da formação Lagoa do Jacaré. Além disso, morros residuais, associados ao grupo Urucuia, despontam em meio aos sedimentos do patamar intermediário. Cabe ressaltar que sotoposto aos sedimentos do grupo Urucuia, estão mapeadas rochas pelítico-carbonáticas do grupo Bambuí (GASPAR e CAMPOS, 2007).

Esse importante divisor topográfico entre o oeste da Bahia e nordeste de Goiás, caracterizada por espessa camada de sedimentos siliciclásticos, armazena grandes volumes de água subterrânea. O sistema aquífero Urucuia, que abrange parte significativa da área de estudo, alimenta tributários da margem direita do Rio Tocantins (GASPAR e CAMPOS, 2007), representado na região pelo Rio Corrente e seus afluentes, Rio Vermelho e Buritis. Conforme se observa nas figuras apresentadas (Figura 2) a presença dos carbonatos (Lagoa do Jacaré), altamente solúveis, na parte centro-norte da área, onde se inserem os rios Vermelho e Buritis, parece ter dinamizado a dissecação regional se comparado com o setor sul, onde superfícies lateríticas suportaram o relevo frente a erosão regressiva promovida pelo Rio Corrente. A área da APA-NRV, com a ocorrência de inúmeros sistemas de cavernas, demonstra a interconectividade da superfície com os sistemas subterrâneos, facilitando e criando um aparato dual para a maior dissecação regional, exemplificado pela instalação de grandes *canyons* (Rio Vermelho, p.ex), onde ocorrem ressurgências cársticas.

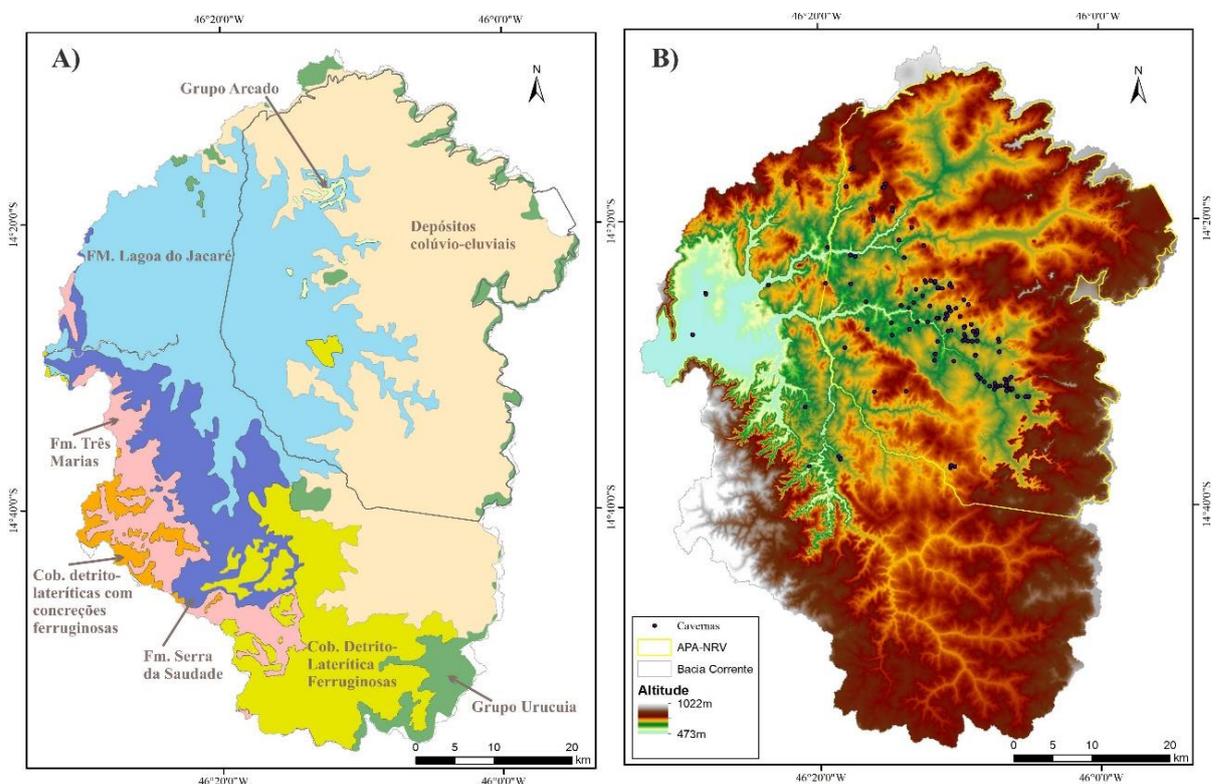


Figura 2: Comparação entre as unidades geológicas (A) e a configuração do relevo (B) com a inserção das cavernas conhecidas na região e o limite da APA-NRV. Fonte: geologia CPRM (<http://geosgb.cprm.gov.br/downloads/#>); altimetria ALOS-PALSAR; Cavernas CANIE/CECAV-ICMBio (<http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>). Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.

Concepção teórica

Uma das formas de identificação de dolinas por MDE se dá com o uso de ferramentas de restituição hidrológica, utilizadas normalmente para eliminar depressões relativas a erros de processamento (artefatos) e permitir a delimitação das drenagens. Tais ferramentas identificam os pixels depressivos (*sinks*) e permitem o seu preenchimento conforme valores adjacentes, possibilitando que o fluxo virtual retome o curso a jusante. Jenson e Domingue (1988) são pioneiros no desenvolvimento do algoritmo baseado nesse conceito e já anteviam a possibilidade de sua utilização para identificação de depressões naturais, como dolinas, e não apenas para a eliminação de depressões espúrias. Posteriormente vários trabalhos criaram e testaram algoritmos para detecção de depressões em áreas cársticas baseadas nos procedimentos de restituição hidrológica (DOCTOR e YOUNG, 2013; BAUER, 2015; KOBAL et al., 2015; ZHU e PIERSKALLA, 2016). Em revisão bibliográfica sobre o tema, Ferreira e Uagoda (2019b) identificaram as principais estratégias para detecção e delimitação de dolinas com o uso de MDE e outras bases de dados em análises combinadas, como fotos aéreas, imagens de satélite e campo.

Dentre as metodologias mais utilizadas se destaca a baseada no procedimento de preenchimento das depressões a partir do *sink* (Figura 3) até o nível de extravasamento, ou seja, o ponto a partir do qual a água passa a fluir a jusante ou para outra depressão (*pour point*). Deste modo, o limite da provável dolina é dado pela cota altimétrica, ou seja, todos os pontos da sua borda possuem o mesmo valor, relativo ao pixel mais baixo que permita a continuidade do fluxo. Apesar deste método não representar corretamente determinados tipos de dolinas, como as depressões poligonais ou aquelas remodeladas por processos de superfície (de encosta ou fluviais), é possível identificar de forma muito mais precisa e acelerada as depressões do que por métodos manuais/visuais, que requerem grande dispêndio de tempo. Isso é válido especialmente para grandes regiões cársticas, como na área sob investigação, onde localizar as dolinas apenas visualmente, mesmo de tamanhos médios ou grandes, pode representar uma tarefa árdua, subjetiva e demorada.

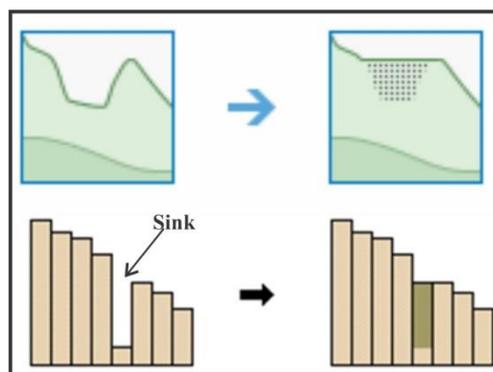


Figura 3: Processo de preenchimento dos pontos depressivos (*sink*) em um raster, até possibilitar a retomada da drenagem a jusante (extravasamento). Fonte: adaptado de <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/>

O primeiro passo para este método é o preenchimento do MDE original para criar uma superfície sem depressões. Em seguida realiza-se a subtração do MDE preenchido pelo MDE original, resultando em uma nova base, apenas de depressões (dolinas, artefatos, depressões artificiais). Este procedimento, aqui chamado de “diferença por preenchimento” (ferramenta *Fill-ArcMap*), ressalta as depressões delimitadas no critério nível de extravasamento (ponto de fluidez). Equivale a um contra-molde das depressões do MDE original (Figura 4). Esta nova

base de dados contém na maioria dos casos artefatos ou depressões não cársticas (artificiais normalmente) que precisam ser filtradas para restar apenas dolinas.

A maior parte dos problemas de processamento no MDE geram “*sinks*” ou “*pits*” (buracos) de baixa amplitude altimétrica, mas que poluem a identificação de depressões verdadeiras. Isso ocorre geralmente do processo iterativo em áreas mais aplainadas (planícies fluviais, topo de planaltos). Assim, um dos parâmetros mais utilizados de filtragem é o de profundidade, que implica em estabelecer um recorte a partir do qual as depressões serão consideradas possíveis dolinas (Figura 4). Ou seja, as depressões abaixo do valor estipulado de profundidade são preenchidas, eliminando geralmente pequenas feições (ruídos). Outros filtros morfométricos podem ser utilizados, como área, circularidade, faixa altimétrica de ocorrência, entre outros, conforme o conhecimento prévio do pesquisador sobre a área de estudo. Uma outra forma muito eficaz de eliminar o ruído é com o auxílio de recortes por interseção ou por proximidade (*buffer*), especialmente de drenagens, rodovias ou áreas urbanas. Tais elementos podem induzir a criação de artefatos, ou seja, depressões artificiais, não cársticas.

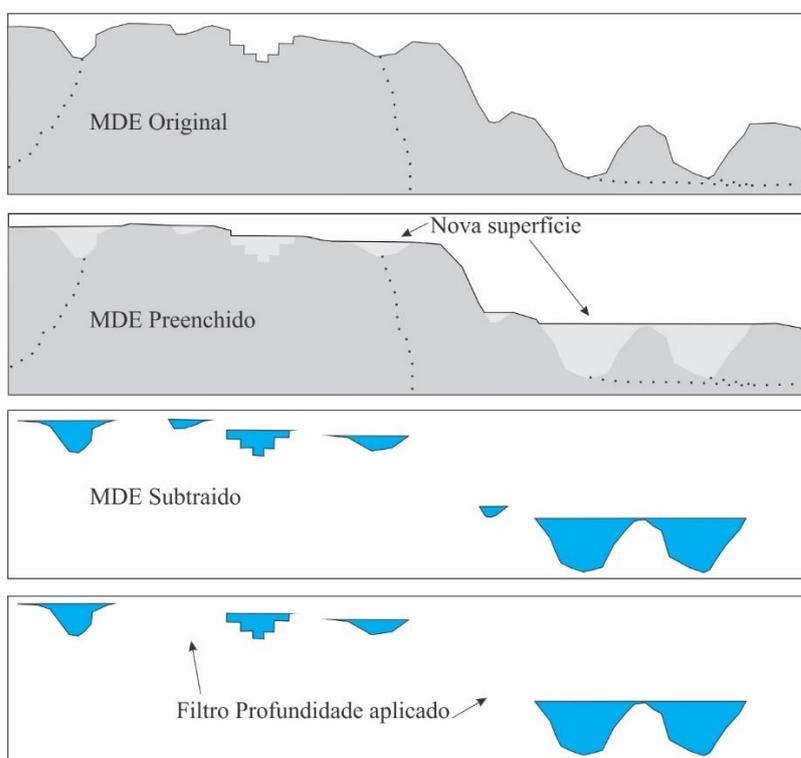


Figura 4: Corte representando o procedimento de preenchimento e subtração do MDE original e filtragem por profundidade.

Metodologia

O principal produto utilizado para detecção prévia das dolinas na área de estudo foi o MDE ALOS-PALSAR (12,5m). O sensor PALSAR (*Phased Arrayed type L-Band SAR*) é capaz de obter dados da superfície terrestre em qualquer condição atmosférica, tanto de dia como a noite. Tal produto é disponibilizado gratuitamente, já com os devidos ajustes, por meio do serviço Vertex, ASF, NASA (<https://search.asf.alaska.edu/#/>). Em teste comparativo com MDE produzido via imagens de Veículo Aéreo Não Tripulado – VANT (5,5cm) em uma pequena porção checada em campo da APA-NRV, observou-se que a base ALOS-PALSAR se mostra adequada à análise de grandes a médias dolinas, tendo um baixo retorno de falsos positivos

(FERREIRA e UAGODA, 2019c). Além disso o recobrimento de tamanha área de estudo é inviável com a utilização de VANT, o qual, além disso, poderia gerar uma quantidade de informações inexequível para processamento.

De forma acessória também foi utilizado o MDE SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), com 30 metros de resolução espacial, adquirido gratuitamente junto ao site do serviço geológico norte-americano (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Apesar da menor resolução espacial, este MDE foi utilizado no sentido de se comparar os resultados obtidos com os dados ALOS-PALSAR e avaliar possíveis diferenças e desempenho. Por fim, para checagens de alvos específicos, foram utilizadas imagens de satélite de alta resolução disponibilizadas pelo programa Google Earth Pro, inclusive em séries históricas.

De início, após a aquisição das bases, foi realizado o procedimento de diferença por preenchimento no MDE ALOS-PALSAR, sem filtrações, como artifício exploratório para identificar visualmente os principais problemas e traçar as estratégias de solução. Numa primeira etapa sem a adoção de qualquer filtro, foi observada a criação de muitas feições junto aos cursos de água e em alguns casos a formação de grandes “represas virtuais”. Tais represas, não verdadeiras, se devem ao caráter encaixado de alguns rios na região que formam *canyons* com mais de 80 metros de escarpa, com a presença de desfiladeiros estreitos, causando a identificação errônea de depressão no MDE. Para evitar que estes grandes acúmulos virtuais de água eclipsassem possíveis dolinas verdadeiras nas margens da drenagem, foram realizadas algumas retificações prévias no MDE, conforme recomendam Doctor e Young (2013). Com a ferramenta *Serval Plugin* do Qgis, foi possível alterar os valores de pixel nos “barramentos”, nivelando para baixo os pontos de estrangulamento artificial (checados por imagem). Esse procedimento permitiu que o preenchimento diferencial do MDE não gerasse depressões tão grandes associadas a rios encaixados (Figura 5). Tal procedimento foi utilizado com moderação, apenas em pontos de acúmulo exagerado no raster.

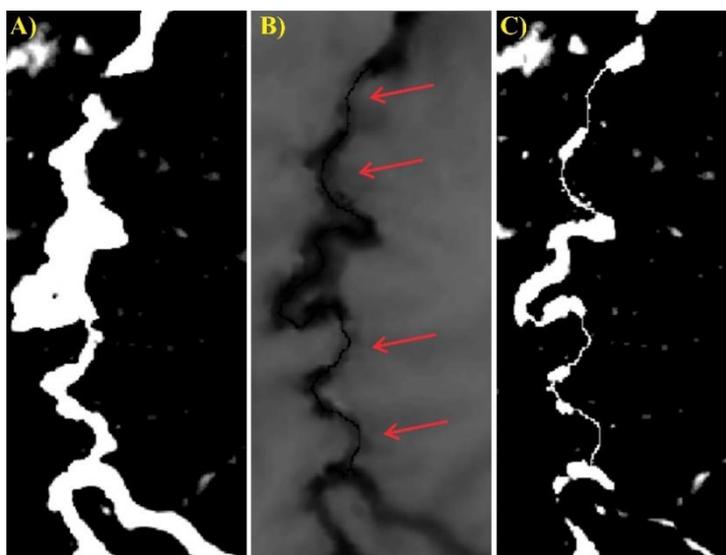


Figura 5: processo de retificação do MDE nos pontos de estrangulamento da drenagem por meio da ferramenta *Serval* (Qgis). Em “A” grandes represamentos de mais de 500 metros de largura. Em “B” as setas apontam para a retificação linear realizada no raster original. Em “C” o MDE retificado, com larguras abaixo de 150 metros nas drenagens representadas.

A partir do MDE retificado foi realizado o procedimento de preenchimento diferencial com a aplicação de um filtro altimétrico de três metros (*Z limit*, ferramenta *Fill*, ArcGis). O valor de

três metros foi arbitrado conforme a experiência dos autores na área de estudo, visto que as dolinas de tamanho médio ou grande (depressões compostas), alvo deste trabalho, dificilmente apresentam profundidades mais baixas que esse valor. Como teste também foram gerados preenchimentos diferenciais com o valor de Z-0 (26.410 objetos) e Z-10 (393 objetos) para a base ALOS-PALSAR. O filtro de três metros (Z-3) resultou em 3.377 objetos, valor compatível com o esperado para o tamanho da área de estudo, mas ainda elevado para eventual checagem visual (Figura 6).

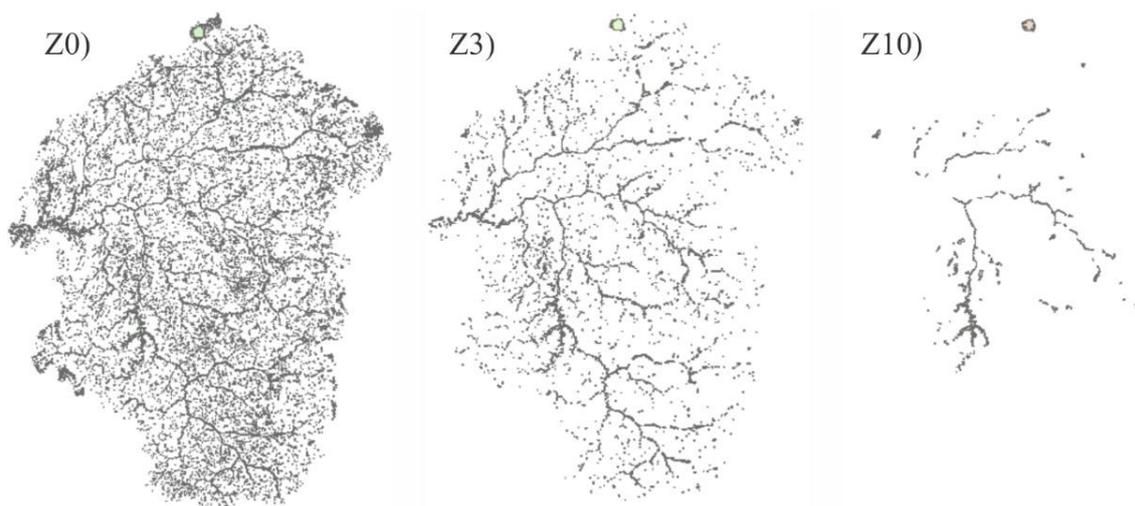


Figura 6: Decréscimo de objetos com a aplicação do limite de profundidade zero (Z0) para dez (Z10) com os dados ALOS-PALSAR. O limite estabelecido para análise foi Z-3.

O raster de depressões com mais de três metros de profundidade foi vetorizado (*raster to polygon*) e uma coluna com os dados de área foi criada (*calculator geometry*). Considerando também a experiência prévia, atribuiu-se um valor mínimo de área para as possíveis dolinas da região, estabelecido em 625m², ou seja, quatro pixels do MDE ALOS-PALSAR (cada pixel de 12,5m=156,25m²). Com isso utilizou-se das ferramentas de seleção por atributo e eliminou-se as feições com valores inferiores ao estabelecido, restando 3.032 objetos.

A etapa de limpeza subsequente foi estabelecida pelo cruzamento da drenagem com os objetos previamente identificados. Como não existem na área de estudo bases de dados de hidrografia em escala e precisão compatíveis com a tarefa, optou-se pela criação desta camada a partir do próprio MDE ALOS-PALSAR, conforme realizado por Faulkner et al. (2013). Com ferramentas de restituição hidrológica no ArcGis é possível construir uma camada de drenagem a partir do raster e posteriormente vetorizar (*hydrology: fill>flow direction> flow accumulation*). A intersecção desta nova camada com a base de objetos filtradas até então resultaria em apenas 351 objetos, que não possuem qualquer sobreposição com a drenagem (*select by location*). Considerando que na área ocorrem grandes depressões cársticas com drenagens internas, optou-se por armazenar esta base sem conexão com drenagens somente para inspeção visual em etapa posterior. Foi decidido então pela utilização apenas dos rios de maior ordem, conforme o método de Strahler. Realizou-se a eliminação dos objetos na intersecção com rios de 6^a até 8^a ordem (máximo), resultando em 2.686 feições a serem conferidas na próxima etapa. A utilização de rios de 5^a ordem resultaria na eliminação de algumas das grandes depressões referidas anteriormente, como a associada ao sumidouro da Lapa do Penhasco, já conhecida. Uma redução maior desta quantidade de objetos, apesar de desejável, demandaria a existência de uma base de dados detalhada e validada da drenagem superficial aberta, para refinar a filtragem.

A etapa final de limpeza foi realizada visualmente por meio do Google Earth Pro, em cada um dos 2.686 objetos remanescentes para a base ALOS-PALSAR. A utilização de mais filtros ou com parâmetro mais agressivos poderia eliminar feições verdadeiras, ação não aconselhável tendo em vista o objetivo primordial de detectar depressões cársticas na região. O *shapefile* das possíveis depressões foi convertido em KML por meio do Qgis. As imagens em boa resolução do Google Earth, com a opção de visualização de imagens históricas e em três dimensões, permitiram a classificação dos objetos em dolinas prováveis (verde), suspeitas (amarelo) e não dolinas (vermelho), conforme Zhu et al., (2014) e Cahalan e Milewski (2018).

Nesta inspeção visual utilizou-se como critério para eliminação as feições próximas ou intersectadas por drenagens abertas evidentes, assim como aquelas notadamente atreladas a áreas urbanas, estradas ou demais alterações antrópicas (como barramentos). A mudança de aspecto da vegetação ou a existência de cavernas internas (base CANIE/CECAV-ICMBio, <http://www.icmbio.gov.br/cecav/canie.html>), por outro lado, colaborou para identificação positiva de depressões. Depressões formadas por veredas também foram excluídas da análise, por não serem formadas por processo de carstificação. Os critérios utilizados para esta análise visual (Tabela 1) e um exemplo do processo de classificação no Google Earth (Figura 7) podem ser vistos adiante. Quando a existência de parâmetros negativos e positivos para confirmação dos objetos se somavam ao ponto de não permitir uma decisão inequívoca, tais feições foram enquadradas em dolinas suspeitas, um intermédio entre prováveis e não dolinas. Doravante as dolinas prováveis e suspeitas são referidas no texto como “possíveis dolinas”.

Tabela 1: Critérios para classificação visual dos objetos nas imagens do Google Earth.

| Dolinas prováveis | | Não dolinas |
|---------------------------------|---|----------------------------|
| Drenagem centrípeta | S u s p e i t a s | Drenagens abertas |
| Drenagem com sumidouro aparente | | Barragem |
| Mudança na vegetação | | Vegetação homogênea |
| Rocha solúvel | | Rocha pouco solúvel |
| Padrão circular | | Formatos atípicos |
| Ocorrência em planalto | | Fundo de grandes canyons |
| Depressão grande e profunda | | Veredas (depressões rasas) |
| Presença de caverna | | Estrada |
| Dolinas conhecidas | | Área antropizada |

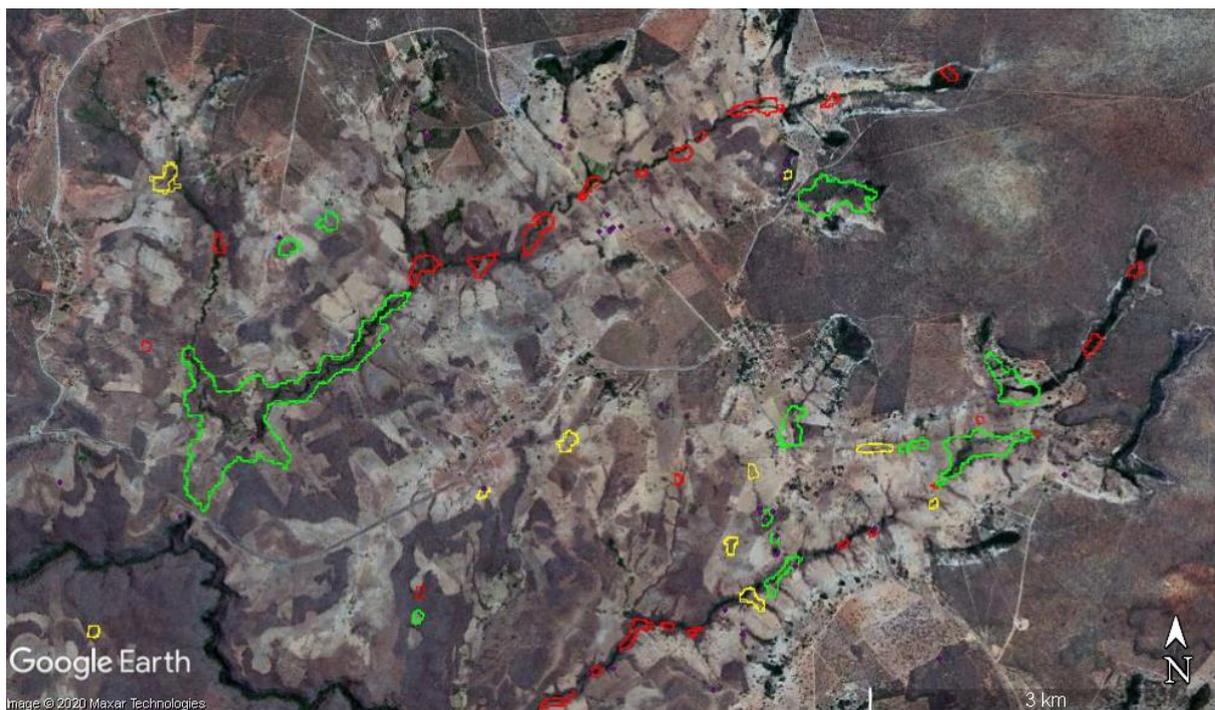


Figura 7: Identificação manual de feições no Google Earth entre dolinas prováveis (verde), suspeitas (amarelo) e não dolinas (vermelho). Objetos em branco ainda não avaliados. Imagem Google Earth.

Todos os passos descritos anteriormente para o MDE ALOS-PALSAR também foram realizados para o MDE SRTM, à exceção do filtro de área mínima, visto que o pixel deste último modelo já possui tamanho superior aos 625m² estipulados. De 25.479 objetos iniciais, a análise visual pós filtragens avaliou 3.020 remanescentes. Após a classificação dos objetos no Google Earth, tanto ALOS-PALSAR como SRTM, o arquivo KML consolidado das possíveis dolinas foi novamente convertido para *shapefile*, sendo então realizadas operações morfométricas no ArcGis. Para todas as feições consideradas possíveis dolinas (prováveis ou suspeitas) foram obtidas as medidas de área, perímetro, profundidade e altitude mínima, ou seja, cota do provável sumidouro. Para o cálculo de profundidade foi utilizado o MDE ALOS-PALSAR original, sem preenchimento, para que se obtivesse o ponto verdadeiramente mais profundo em comparação ao ponto de extravasamento (borda).

Com base nos centroides das possíveis dolinas foi estabelecido um mapa de densidade de feições para a área (*point density*). Para comparação, também foi criado um mapa de densidade de cavernas, com base nos dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE/CECAV. Os passos de todo o processo de extração de dolinas deste trabalho estão sumarizados no fluxograma a seguir (Figura 8).

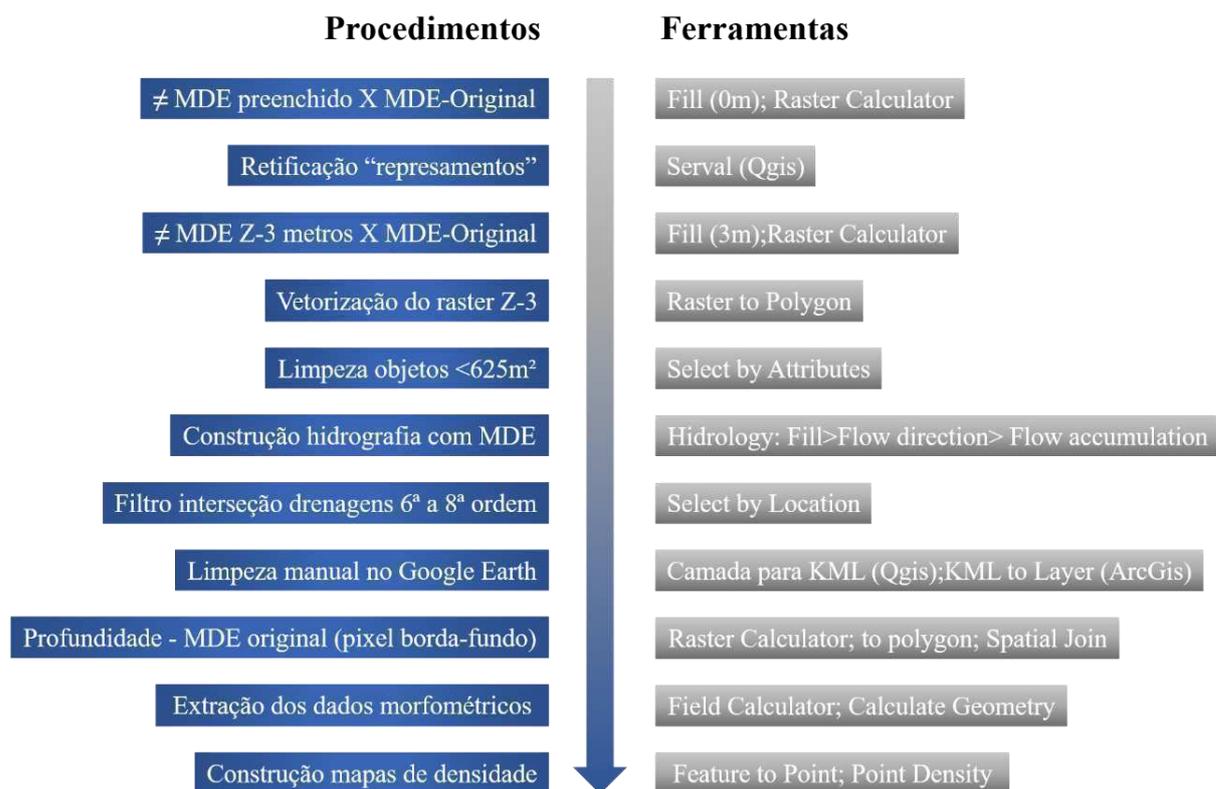


Figura 8: Fluxograma da metodologia.

Resultados e discussão

Após a avaliação visual dos objetos ALOS-PALSAR e SRTM, considerando os critérios de classificação estabelecidos, obteve-se o resultado total de 232 possíveis dolinas, entre 102 dolinas prováveis e 130 suspeitas. Os quantitativos de objetos por MDE na sequência de procedimentos metodológicos adotados estão expressos na tabela a seguir (Tabela 2).

Tabela 2: quantidade de objetos conforme procedimentos de filtragem e classificação.

| | ALOS | % | SRTM | % |
|------------------------------|--------|-------|-----------------------|-------|
| Z-0 | 26.410 | 100 | 25.479 | 100 |
| Z-3 | 3.377 | 12,79 | 3.430 | 13,46 |
| Área < 625m² | 3.032 | 11,48 | 3.430 | 13,46 |
| Drenagens 6ª-8ª ordem | 2.686 | 10,17 | 3.020 | 11,85 |
| Limpeza visual Google | 218 | 0,83 | 213 | 0,84 |
| Objetos prováveis | 99 | 0,37 | 97 | 0,38 |
| Objetos suspeitos | 119 | 0,45 | 116 | 0,46 |
| Não dolinas | 2.510 | 9,50 | 2.807 | 11,02 |
| Total ALOS/SRTM | | | 232 possíveis dolinas | |

Considerando que muitos objetos têm correspondência espacial, mas que eventualmente poderia haver diferenças nos resultados dos MDE's avaliados, realizou-se uma análise comparativa para identificar a complementariedade. Em relação com a base ALOS-PALSAR, foram identificadas três dolinas prováveis a mais com a análise da base SRTM. Já em relação as dolinas suspeitas, observou-se oito acréscimos da base SRTM que se referem a objetos totalmente próprios. Entretanto, notou-se um conflito em uma área onde um grande objeto ALOS-PALSAR se referia na verdade a quatro dolinas suspeitas, demonstrando que a

delimitação SRTM neste caso foi mais precisa. Os objetos complementares de ambas as bases foram incorporados na base final de feições consideradas possíveis dolinas (232). As quantidades de objetos classificados nas duas bases analisadas, tanto prováveis como suspeitas (Tabela 2), indica uma grande equivalência, tendo sido identificados, como relatado acima, poucos objetos próprios em cada MDE. Isso indica que ao menos para detecção, a base SRTM com uma resolução espacial bem inferior, foi capaz de indicar praticamente os mesmos objetos que a base ALOS-PALSAR.

De uma forma geral os objetos encontrados na base SRTM têm grande correspondência posicional, com algumas discrepâncias no formato devido ao tamanho do pixel se comparado aos objetos ALOS-PALSAR. A maior quantidade total de objetos gerados para análise visual no SRTM (3.020) se deve à maior fragmentação no processo de transformação de raster para polígono, gerando uma grande quantidade de objetos menores, normalmente um pixel, associados a objetos maiores por interseção no vértice do pixel. Tal problema deveria ter sido identificado para filtragem prévia. Em virtude desses aspectos, optou-se pela delimitação dos objetos preferencialmente a partir da base ALOS-PALSAR, considerada mais refinada. Apesar do maior volume de trabalho para inspeção manual de tantos objetos (5.706 ao todo), a análise combinada das duas bases garantiu redundância e maior confiança na classificação visual.

O total de possíveis dolinas, em 232 feições (102 prováveis + 130 suspeitas), resultou naturalmente em uma baixa densidade geral (0,059/km²) considerando a grande extensão da área de estudo (3.923,14km²). Deve-se considerar, entretanto, o propósito de se identificar as grandes dolinas da região (depressões compostas), ou seja, sem considerar neste momento as dolinas internas de menor ordem, somente identificáveis em escala de detalhe. Além disso há uma concentração de feições em determinadas áreas, certamente associadas aos carbonatos, em oposição a grandes extensões vazias onde ocorrem poucas dolinas, por predominarem rochas menos solúveis (siliciclásticas, pelíticas, lateritas). Ao se considerar apenas as possíveis depressões que ocorrem na área da formação Lagoa do Jacaré (162 feições), onde predominam rochas carbonáticas, a densidade, mesmo que ainda baixa, é superior ao dobro, em 0,155/km².

Entre as dolinas identificadas, uma em especial apresenta dimensões muito superiores às demais (*outlier*), tendo sido descartada nas análises morfométricas realizadas, descritas a seguir (Tabela 3). Essa depressão, considerada “provável”, possui 3,47km² com 20 metros de profundidade e encontra-se no topo da Serra Geral de Goiás, ao norte da área de estudo, junto aos sedimentos do grupo Urucuia. Trata-se provavelmente de uma depressão de acomodamento gerada por carste subjacente (“*sagging dolines*”, GUTIERREZ et al., 2008; FERREIRA e UAGODA, 2019a) cuja ocorrência e significância deve ser investigada em próximas pesquisas.

Tabela 3: Parâmetros morfométricos das depressões identificadas. *Do total de 102, foi retirado um outlier da análise morfométrica, sendo considerados dados de 101 feições portanto.

| Morfometria | Dolinas Prováveis (102) | | | Dolinas Suspeitas (130) | | |
|---------------------------------------|-------------------------|-------|--------|-------------------------|-------|--------|
| | max | min | média | max | min | média |
| Área (m ²) | 851.875 | 3.750 | 76.807 | 404.063 | 2.812 | 22.126 |
| Perímetro (Km) | 10,6 | 0,275 | 1,63 | 9,025 | 0,225 | 0,795 |
| Profundidade (m) | 31 | 3 | 7,89 | 19 | 3 | 4,55 |
| Altitude mínima (m) | 956 | 535 | 683,56 | 959 | 521 | 702,5 |
| Densidade total (n°/km ²) | 0,059 | | | | | |

Considerando os parâmetros de área, perímetro e profundidade na tabela acima (Tabela 3) observa-se claramente uma maior envergadura nos dados das dolinas prováveis se comparado ao caso das dolinas suspeitas. Os dados médios mostram valores próximos ao dobro para perímetro e mais que o triplo para área. Essa discrepância mostra a dificuldade para discernimento das feições de menor envergadura com os MDE's utilizados, mesmo quando checados por meio do Google Earth, tendo sido consideradas conservadoramente como suspeitas. Quanto aos dados de altimetria mínima, ou seja, ponto mais profundo das depressões analisadas, observa-se uma variação média entre as cotas de 680 a 700, mas com ocorrência nas mais variadas altitudes, o que é compatível com uma situação de carste coberto em processo de exumação. Apesar da adoção de um filtro conservador de área (625m^2), a menor depressão suspeita identificada foi de 2.812m^2 , o que indica que para esta análise, com os MDEs utilizados e suas respectivas resoluções, dolinas médias a grandes partiriam desse valor.

Quanto à distribuição espacial, foi elaborado um mapa de densidade a partir dos pontos centroides de todas as feições identificadas, tanto prováveis como suspeitas (Figura 9). Apesar da utilização dos pontos mais profundos das dolinas ser o mais recomendado para este tipo de análise (FORD e WILLIAMS, 2007), a escala de representação abrangente tende a eliminar possíveis distorções posicionais. A identificação dos pontos mais profundos demandaria base de dados de maior detalhe ou atividade de campo, ao passo que a utilização dos centroides dinamiza o processo. De forma similar, também foi produzido um mapa de densidade baseado nos pontos de cavernas conhecidas na área de estudo (164 cavernas), a partir dos dados do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE, CECAV/ICMBio).

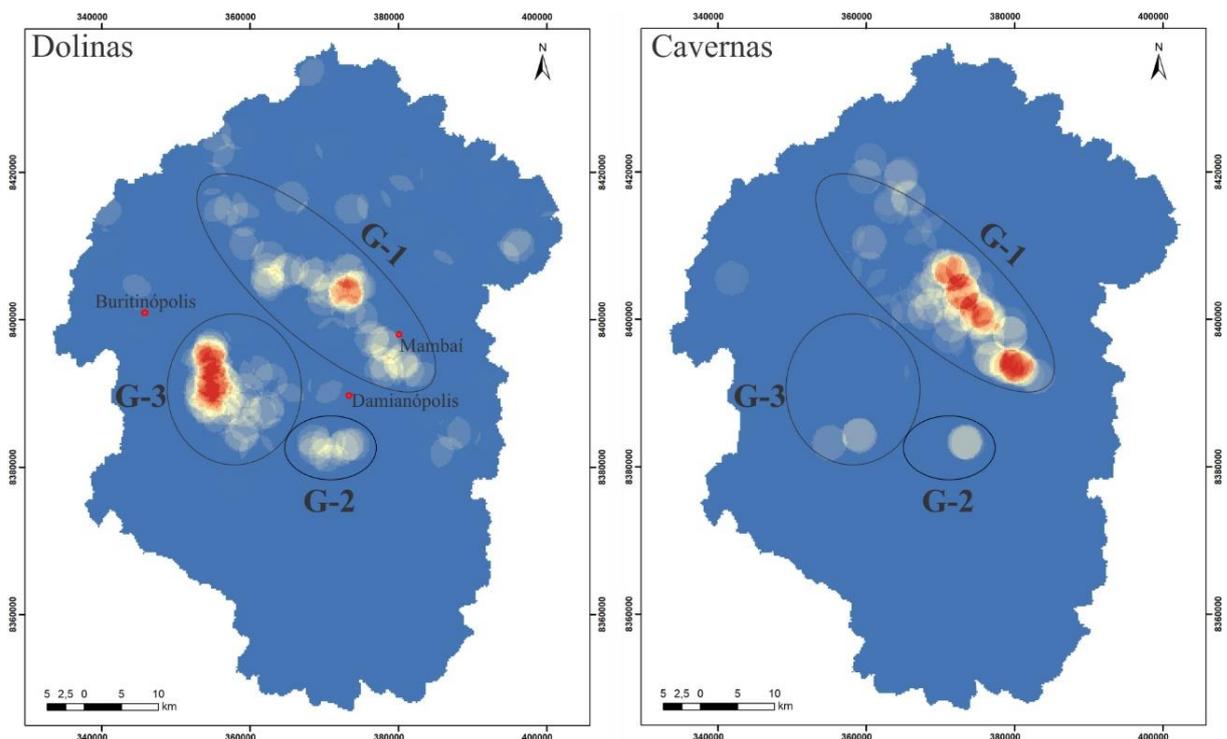


Figura 9: Densidade de dolinas versus densidade de cavernas. Grupos de possíveis dolinas identificados pelas siglas G-1, G-2 e G-3. Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.

A análise dos mapas de densidades citados (Figura 9) permitem a realização de algumas considerações. As dolinas possíveis estão concentradas principalmente em três grupos: o primeiro caracterizado por uma extensa faixa na direção noroeste a partir da cidade de Mambai

(Grupo-1); o segundo, de menor destaque, ao sul de Damianópolis (Grupo-2); e o terceiro a sudeste de Buritinópolis, se destacando pela maior densidade de todos. Na comparação com o mapa de densidade de cavernas, observa-se clara convergência no adensamento dessas feições com o Grupo-1 de dolinas da figura anterior, ambas marcadas pela direção SE-NO. Há também uma suave relação entre cavernas e dolinas do Grupo-2. O Grupo-3 praticamente não apresenta adensamentos de cavernas.

É importante ressaltar que o mapa de densidade de dolinas apresenta o resultado de uma investigação baseada em sensoriamento remoto, sem a confirmação em campo de todas as feições. Isso pode explicar a ocorrência de setores dispersos no mapa com certo adensamento, não incluídas em qualquer grupo citado, que podem ou não conter dolinas de fato. Por outro lado, o adensamento notório no Grupo-3 e a convergência com a densidade de cavernas dos Grupos 1 e 2 permitem concluir pela maior possibilidade de serem feições verdadeiras nesses setores. Os três grupos identificados convergem em maior ou menor grau com a área de ocorrência dos carbonatos da formação Lagoa do Jacaré, como se observa na sobreposição com o mapa geológico da área (Figura 10). As ocorrências dispersas estão mais associadas aos depósitos clásticos colúvio-eluviais do desmonte da Serra Geral. Há que se considerar também a ocorrência de carstificação subjacente aos sedimentos clásticos da região, demonstrado especialmente na intersecção dos grupos um e dois com tais materiais (G-1 e G-2).

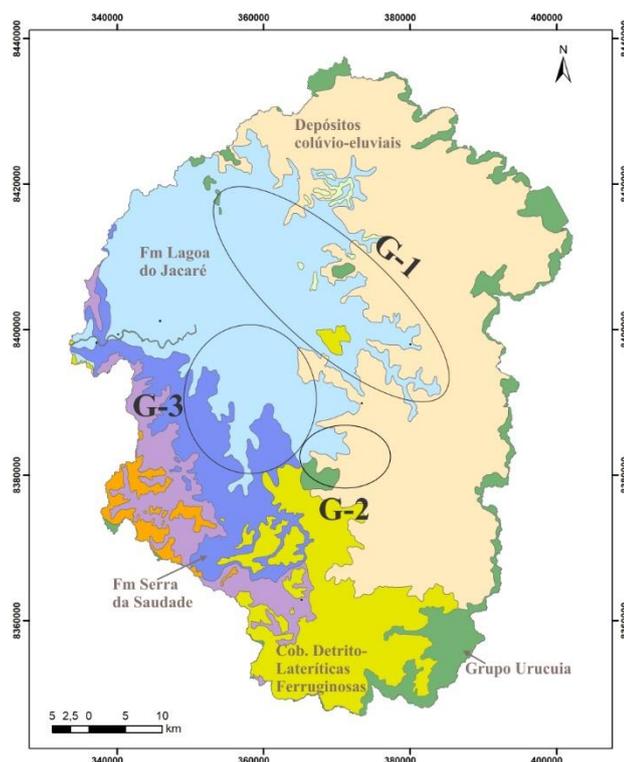


Figura 10: Grupos adensados de possíveis dolinas em relação às unidades geológicas da área. Fonte dados geologia CPRM (<http://geosgb.cprm.gov.br/downloads/#>). Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.

O maior destaque na densidade do Grupo-3 sem a correspondência de cavernas nessa região pode decorrer do fato de que a área ainda não foi alvo de uma prospecção espeleológica sistemática. Ou se foi, tais dados não foram alimentados no cadastro oficial (CANIE/CECAV-ICMBio). De toda forma, tendo em vista o maior destaque da área, procedeu-se uma análise interpretativa mais acurada por meio do Google Earth, utilizando-se o método de delimitação

visual de dolinas por bacia de contribuição e não apenas por nível de extravasamento. O resultado, que pode ser visto a seguir (Figura 11), mostra uma tipologia poligonal para o carste local, algo inesperado se considerado o padrão recorrente de áreas cársticas adjacentes com dolinas isoladas na paisagem. A inspeção visual permitiu ainda a identificação de outras dolinas não apontadas no processo automatizado, bem como a subdivisão de depressões, que haviam sido coalescidas no processo de filtragem (Z-3 metros). Essas questões demonstram que a metodologia semi-automatizada aplicada é útil para a detecção inicial de dolinas, porém requer um refinamento visual posterior para checagem e redelimitação, assim como observado por Hiruma e Ferrari (2014).

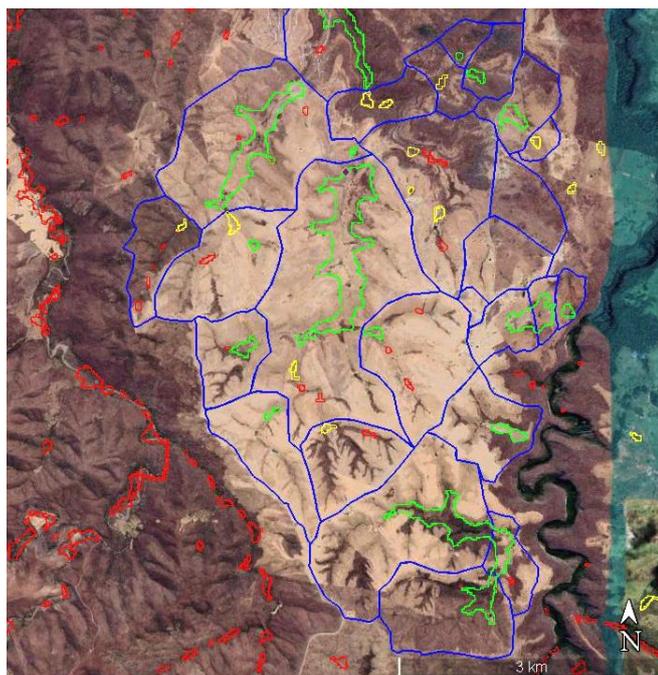


Figura 11: Padrão de carste poligonal (em azul) delimitadas visualmente na região equivalente ao G-3. Objetos em verde (dolinas prováveis), em amarelo (dolinas suspeitas) e em vermelho (não dolinas) foram delimitados por ponto de extravasamento, automaticamente. Imagem Google Earth.

A contextualização dos resultados frente a localização da APA-NRV mostra que grandes estruturas cársticas se encontram fora da unidade de conservação (Grupo-3, p.ex.) ou em situação limítrofe (Grupo-2), representando uma situação de alerta (Figura 12). Feições isoladas de grandes dimensões, algumas caracterizadas como depressões poligonais ou de acomodamento (*sagging*) também se encontram além dos limites da APA-NRV, mas inseridas na bacia do Rio Corrente. A envergadura morfométrica dessas feições indica uma alta capacidade de condução de águas superficiais para o meio subterrâneo, o que eleva a vulnerabilidade destas áreas para a contaminação dos aquíferos cársticos.

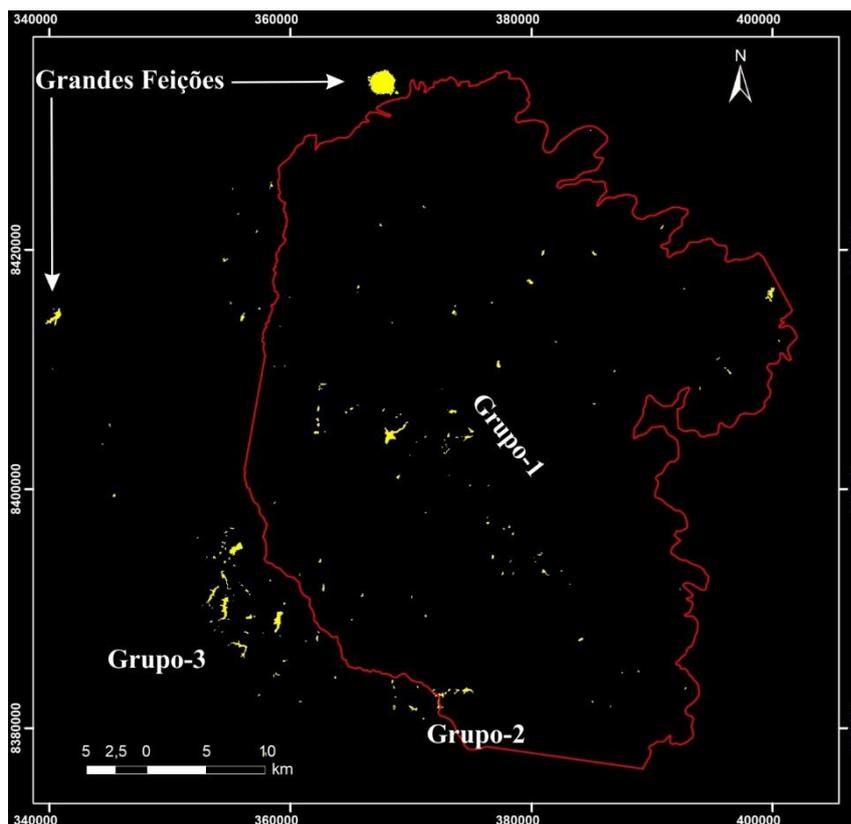


Figura 12: Localização das possíveis dolinas identificadas no levantamento e a APA Nascentes do Rio Vermelho (sem o limite da Bacia do rio Corrente), mostrando que diversas feições importantes se encontram fora ou nos limites da unidade de conservação. Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.

Confirmações de campo

Em trabalhos paralelos na região, especialmente referente à área do Grupo-1 e em menor parte no Grupo-3, indicados nas figuras anteriores, foi possível identificar em campo diversas dolinas menores (que não geraram objetos) e algumas de tamanhos médios a grandes que de fato confirmaram objetos identificados como possíveis. Do total de 152 dolinas mapeadas em campo nestas duas áreas, 69 estão associadas a 23 objetos criados na detecção semi-automática das bases utilizadas (possíveis) e o restante não gerou objetos, por serem feições de menor envergadura. Alguns dos 23 objetos apresentam apenas uma dolina de campo e outros, diferentemente, muitas dolinas por objeto (dolinas compostas). O mapeamento realizado neste trabalho, focando feições de maiores dimensões, nem sempre é de fácil confirmação em campo devido à dificuldade de visualização clara das bordas das depressões de maior ordem, como as compostas. Mas de toda forma foi possível atestar a ocorrência de dolinamentos nas duas áreas de grande adensamento de objetos, conforme tabela a seguir (Tabela 4), demonstrando a eficácia do método como indicador de áreas mais carstificadas, onde também ocorrem dolinas menores isoladas. Neste caso, apesar de 83 dolinas não terem polígonos associados, tais feições estão justamente nas áreas de maior adensamento de grandes objetos.

As tipologias predominantes de dolinas mais encontradas em campo nessas duas áreas foram de sufusão, seguidas por cockpits e colapsos. Tipos como colmatada, dissolução e colapsos de cobertura tiveram pouca recorrência. O Grupo-1 apresentem mais dolinas porque vem sendo percorrido a mais tempo que o Grupo-3, que justamente chamou a atenção após os mapeamentos realizados nessa pesquisa. Ambas as áreas e todos os demais objetos gerados

neste trabalho ainda requerem maiores confirmações. A expectativa é que o número total de dolinas seja bastante superior para toda a área, após as confirmações de campo e possivelmente em convergência ao mapa de densidade apresentado (Figura 9).

Tabela 4: Quantitativos de dolinas mapeadas em campo por área e tipologia predominante identificada.

| Tipo/área | Grupo-1 | Grupo-3 | Parciais |
|-------------------|----------------|----------------|-----------------|
| Sufusão | 54 | 16 | 70 |
| Cockpit | 37 | 2 | 39 |
| Colapso | 26 | 1 | 27 |
| Colmatada | 7 | 0 | 7 |
| Dissolução | 5 | 0 | 5 |
| Colapso cobertura | 4 | 0 | 4 |
| Totais | 133 | 19 | 152 |

Considerações finais

O mapeamento de dolinas se apresenta como uma tarefa complexa, especialmente por meio de técnicas manuais, não automatizadas, em áreas de grande extensão territorial. O uso de modelos digitais de elevação representa uma fonte a mais de informação passível de ser explorada com recursos geotecnológicos na detecção de dolinas, especialmente se realizado em análises combinadas com imagens de alta resolução. Nesse sentido foram utilizados neste trabalho os MDE's ALOS-PALSAR e SRTM, nos quais se adotou uma série de procedimentos automatizados, direcionados à identificação prévia de médias a grandes depressões cársticas. Os resultados mostram que apesar dos modelos digitais utilizados não apresentarem resoluções compatíveis à detecção de pequenas dolinas, são muito úteis para sinalizar áreas de possível maior carstificação, em que ocorrem grandes e médias depressões, mas também feições diminutas. A análise dos dois modelos em paralelo garantiu redundância, complementariedade e maior confiança na classificação dos objetos. Surpreendentemente a base SRTM, de menor resolução espacial, apresentou resultados equivalentes ao ALOS-PALSAR, demonstrando sua ampla versatilidade.

Assim, a partir desta pesquisa foi possível identificar as áreas de maior adensamento de dolinas possíveis, presença de grandes feições isoladas, bem como de estruturas de alto significado hidrológico, como zonas de carste poligonal. Tais dados serão utilizados para a fase de planejamento da APA-NRV, direcionando confirmações detalhadas em campo. Os resultados também mostram áreas de alto potencial espeleológico, indicando que a metodologia pode ser replicada para regiões sob investigação a respeito da ocorrência de cavernas, comuns em processo de licenciamento ambiental. Vale ressaltar que cavernas e dolinas possuem significativa importância evolutiva e ambiental, testemunhando os processos de carstificação regional e indicando pontos de maior concentração hídrica e vulnerabilidade dos aquíferos.

Referências

- BAUER, C. Geomorphology Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data. **Geomorphology**, v. 250, p. 78–88, 2015.
- CAHALAN, M. D.; MILEWSKI, A. M. Sinkhole formation mechanisms and geostatistical-based prediction analysis in a mantled karst terrain. **Catena**, v. 165, p. 333–344, 2018.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GILLESPIE, A. R.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; SILVA, N. C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. **Remote Sensing**, v. 6, p. 330–351, 2014.

CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C. O papel da lito-estrutura do carste na morfodinâmica cenozóica da Serra Geral de Goiás (GO/TO/BA): aproximações iniciais. **Revista Geonorte**, v. 10, n. 6, p. 180–184, 2014.

SUPERINTENDÊNCIA DE GEOLOGIA E MINERAÇÃO DA SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DO ESTADO DE GOIÁS, SGM/SIC; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, CPRM. Mapa Geológico do Estado de Goiás: corte cartográfico 1:250.000. Folha SD23YB-Posse, 2008. Disponível em: <<http://www2.sieg.go.gov.br/post/ver/171324>>. Acesso em: 22 jan. 2018.

DAY, M. The morphology and hydrology of some Jamaican karst depressions. **Earth Surface Processes**, v. 1, p. 111–129, 1976.

DOCTOR, D. H.; YOUNG, J. A. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital elevation data. In: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 449–458.

FAULKNER, M. G. S.; STAFFORD, K. W.; BRYANT, A. W. Delineation and classification of karst depressions Using LIDAR: Fort Hood Military Installation, Texas. In: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 459–467.

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 70, p. 519-537, 2019a. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG207044169>

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. Desafios no mapeamento de dolinas e as possibilidades do uso de modelos digitais de elevação – MDE's: uma revisão metodológica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 2019b. “No prelo”

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. O uso de Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT para construção de Modelos Digitais de Terreno – MDT e identificação de dolinas na área da Grana da Tarimba-GO. In: 35º Congresso Brasileiro de Espeleologia (CBE), 35., 2019, Bonito. **Anais...** Campinas: SBE, 2019c.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Second ed. Chichester: Wiley, 2007. 562p.

GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. O sistema aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37(4), p. 1068–1078, 2007.

- GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO, O. A.; MARTINS, E. S.; CARVALHO, A. P. F.; GOMES, R. A. T. Detection of karst depression by aster image in the Bambui Group, Brazil. **SPIE**, v. 5983, p. 328–339, 2005.
- GUTIÉRREZ, F.; GUERRERO, J.; LUCHA, P. A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain. **Environmental Geology**, v. 53, p. 993–1006, 2008.
- HIRUMA, S. T.; FERRARI, J. A. Análise comparativa da extração automatizada de dolinas a partir de modelos digitais de terreno. **Revista do Instituto Geológico**, v. 34, n. 2, p. 1–11, 2014.
- HOFIERKA, J.; GALLAY, M.; BANDURA, P.; ŠAŠAK, J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. **Geomorphology**, v. 308, p. 265–277, 2018.
- JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, 1988.
- KOBAL, M.; BERTONCELJ, I.; PIROTTI, F.; DAKSKOBLER, I.; KUTNAR, L. Using Lidar Data to Analyse Sinkhole Characteristics Relevant for Understory Vegetation under Forest Cover — Case Study of a High Karst Area in the Dinaric Mountains. **Plos One**, v. 10, n. 3, p. 1–19, 2015.
- SALLES, L. Q.; GALVÃO, P.; LEAL, L. R. B.; PEREIRA, R. G. F. A.; PURIFICAÇÃO, C. G. C.; LAUREANO, F. V. Evaluation of susceptibility for terrain collapse and subsidence in karst areas, municipality of Iraquara, Chapada Diamantina (BA), Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 16, p. 593, 2018.
- SIART, C.; BUBENZER, O.; EITEL, B. Geomorphology combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. **Geomorphology**, v. 112, n. 1–2, p. 106–121, 2009.
- WILLIAMS, P. W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. **Geological Society of America Bulletin**, v. 83, n. 3, p. 761–796, 1972. DOI: 10.1130/0016-7606(1972)83
- WILLIAMS, P. W. The role of the epikarst in karst and cave hydrogeology: a review. **International Journal of Speleology**, v. 37, n. 1, p. 1–10, 2008.
- WU, Q.; DENG, C.; CHEN, Z. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. **Geomorphology**, v. 266, p. 1–10, 2016.
- ZHU, J.; TAYLOR, T. P.; CURRENS, J. C.; CRAWFORD, M. M. Improved karst sinkhole mapping in Kentucky using LiDAR techniques: a pilot study in Floyds Fork Watershed. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 76, n. 3, p. 207–216, 2014.
- ZHU, J.; PIERSKALLA, W. P. Applying a weighted random forests method to extract karst sinkholes from LiDAR data. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 343–352, 2016.

4.2 APLICAÇÃO DE DADOS OBTIDOS POR VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO-VANT COM SENSOR VISÍVEL PARA DETECÇÃO DE DOLINAS NA ÁREA CÁRSTICA DA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DAS NASCENTES DO RIO VERMELHO-GO

Resumo

As dolinas são depressões que possuem forte relação com o desenvolvimento e evolução das paisagens cársticas além de serem indicadoras de aspectos ambientais dado o seu papel de concentração e transmissão hídrica e risco para colapsos. O mapeamento dessas feições é um desafio há tempos, sobretudo em abordagens visuais, por meio de trabalhos campo ou análise de imagens. Mais recentemente o uso de Modelos Digitais de Elevação-MDE e técnicas automatizadas de detecção vêm sendo empregadas, visando dinamizar o trabalho e reduzir a subjetividade. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia de detecção de dolinas a partir de MDE's gerados de imagens adquiridas por VANT, de baixo custo, em uma porção da Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho-GO e avaliar os resultados frente a outros trabalhos realizados no mundo. Os resultados mostram que a alta resolução espacial das imagens RGB permitiram delinear e categorizar os tipos de dolinas, bem como reduzir os erros de omissão e comissão normalmente observados nas técnicas de detecção automática empregadas.

Introdução

Dolinas são feições características de regiões cársticas, consideradas indicadoras destes sistemas, embora a carstificação possa ocorrer em subsuperfície, mesmo sem qualquer manifestação superficial (FORD e WILLIAMS, 2007). Também possuem intrínseca relação com a evolução dos geo-ecossistemas onde se inserem, podendo indicar o nível de conectividade e carstificação desses ambientes (BONDEZAN et al., 1992). Possuem forte relação com aspectos ambientais, denotando maior fragilidade e vulnerabilidade nas áreas onde ocorrem, em função dos riscos de colapsos e da sua funcionalidade hidrológica entre os meios superficiais e subterrâneos (FERREIRA, 2019).

Seu mapeamento é feito desde os primórdios da geomorfologia cárstica, como no trabalho pioneiro de Cvijić (1893, Apud FORD, 2007), e teve grande impulso com a retomada do tema, em abordagens morfométricas, no final do século passado (WILLIAMS, 1972; DAY, 1976; BONDEZAN et al., 1992). No Brasil, importantes trabalhos de detecção foram realizados por meio de fotointerpretação, especialmente na região do Vale do Ribeira em São Paulo (KARMANN, 1994) e Lagoa Santa em Minas Gerais (PILÓ, 1998; AULER, 2020), conforme pode ser observado em recente revisão sobre mapeamento de dolinas no país (FERREIRA e UAGODA, 2020-A). A detecção por métodos visuais com imagens ou mapas topográficos foi realizada em diversos trabalhos pelo mundo (HYATT e JACOBS, 1996; DENIZMAN, 2003; FLOREA, 2005; GAO et al., 2005; PLAN e DECKER, 2006; KOVAČIĆ e RAVBAR, 2013; PEPE e PARISE, 2014; AGUILAR et al., 2016; GESSERT, 2016 KESKIN e YILMAZ, 2016; YECHIELI et al., 2016; ČERU et al., 2017; HARRIS et al., 2018).

O grande desafio em mapear dolinas reside na dificuldade de sua identificação em campo em grandes áreas, inexistência de bases cartográficas em escala adequada, grande dispêndio de tempo e subjetividade na fotointerpretação. Mais recentemente vários trabalhos apresentaram

técnicas automatizadas para detecção e mapeamento de dolinas por meio de Modelos Digitais de Elevação-MDE's (SIART et al., 2009; TELBISZ et al., 2009; DOCTOR e YOUNG, 2013; FAULKNER et al., 2013; MIAO et al., 2013; OBU e PODOBINIKAR, 2013; PARDO-IGÚZQUIZA et al., 2013; ZHU et al., 2014; KOBAL et al., 2015; JEANPERT et al., 2016; PARDO-IGÚZQUIZA et al., 2016; TELBISZ et al., 2016; WU et al., 2016; ZHU e PIERSKALLA, 2016; WALL et al., 2017; CAHALAN e MILEWSKI, 2018; CHEN et al., 2018; HOFIERKA et al., 2018). Porém foi observado que nem sempre essas técnicas reduzem tempo, diminui subjetividade, ou prescinde fortemente de análises visuais (FERREIRA e UAGODA, 2020-B). O uso de técnicas automatizadas pode incorrer em erros de omissão (não detecção de dolinas verdadeiras) ou, em especial, na interpretação generalizada de feições nem sempre verdadeiras como dolinas de fato (comissão). Para Seale et al. (2008), o julgamento do operador é, no final, que decide se uma feição topográfica deprimida, detectada por técnicas de sensoriamento remoto, será ou não definida como dolina, de origem natural, só comprovável de forma definitiva por trabalho de campo.

No Brasil, um país continental e que ainda carece de boas bases cartográficas, o desafio do mapeamento de dolinas é ainda mais acentuado, sendo muitas vezes realizado com fotografias aéreas da década de 1960 (USAF-Exército), com baixa resolução espacial para esse propósito (escalas de 1:60.000, p.ex.). Nesse contexto inclui-se a região do presente estudo, situada na Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho em Goiás (APA-NRV), uma porção do território carente de estudos e bases cartográficas de detalhe, onde a melhor alternativa atualmente é o uso de MDE's de acesso gratuito, em escala abrangente, como ALOS PALSAR e SRTM.

O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados -VANT é uma das novas possibilidades para geração de MDE's, apesar do alcance limitar o uso para escalas de detalhe. Tal alternativa foi avaliada em alguns trabalhos em pequenas áreas, sendo considerada satisfatória para diversas aplicações, sobretudo se levado em conta os baixos custos e facilidade de manuseio para geração de produtos cartográficos de alta resolução. Nesse sentido Sopchaki et al. (2018) realizaram testes com VANT (*Phanton 3 Pro*) e avaliaram o Modelo Digital de Terreno-MDT derivado, construído sem utilização de pontos de apoio em solo e com rotinas automatizadas no software utilizado (Agisoft Photoscan). Os autores obtiveram resultados muito próximos à base de dados de referência, desviando 0,06% a 1,69% da verdade de campo, para uma área de 0,43km². Hung et al. (2018) também obtiveram resultados similares com o mesmo tipo de VANT, alcançando diferenças entre 0,53m e 0,01m na comparação do MDT e os dados de topografia, gerando produtos compatíveis com a escala de 1:5.000 (área de 0,18km²). Oliveira et al. (2017) também estimaram as diferenças entre pontos de verificação no campo e seus homólogos no MDT, construído com VANT (asa fixa, área teste de 0,54km²). Concluíram que os produtos eram compatíveis com a escala de até 1:1.000 (diferença média de 5cm), desde que realizadas duas etapas da classificação da nuvem densa de pontos (automática e manual). Marotta et al. (2015) compararam a precisão de Modelos Digitais de Superfície-MDS produzidos por LiDAR e VANT (asa fixa, câmera pequeno formato), concluindo pela compatibilidade e boa qualidade entre os dois métodos (ativo e passivo) de aquisição de dados (1km²).

Tais pesquisas mostram alta viabilidade do uso de VANT para construção de MDS e MDT, porém pouco se sabe se esses produtos serviriam para a detecção de dolinas em uma área maior (50km², p.ex.), com grande variabilidade de ambientes e tipologia vegetal? Em revisão sobre trabalhos que mapearam dolinas por MDE em várias partes do mundo, Ferreira e Uagoda (2020-

A) identificaram que a maior parte dos estudos utilizou bases de alta resolução, principalmente a partir de dados LiDAR (63,3%), nenhum realizado com dados VANT (com sensor passivo). Recentemente Anastácio et al. (2019) utilizaram dados obtidos por VANT (sensor visível) para detecção semiautomática de dolinas, tendo resultados considerados satisfatórios (acerto de 95%), apesar de notarem discrepâncias entre os dados obtidos pelo MDS e MDT (depressões sobre árvores) e a falta de confirmação em campo. Em um levantamento teste em pequena área, por análise visual em mapa topográfico (1m) construído a partir de dados VANT, Ferreira e Uagoda (2019-B) obtiveram bons resultados para detectar dolinas verdadeiras (89,5%) mas com uma quantidade bem elevada de falsos positivos (675%).

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é avaliar os produtos gerados a partir do levantamento de imagens por VANT na detecção automática de dolinas em uma área cárstica com grandes sistemas de cavernas, na parte central da APA-NRV. Pretende-se detectar as depressões de forma automatizada a partir do método de diferença por preenchimento de MDE até o nível de extravasamento, para posterior avaliação visual com imagens. Decidiu-se usar o VANT para pequenas escalas mesmo cientes das possíveis limitações que os produtos derivados podem gerar, como a incapacidade de detectar através do dossel, geração de artefatos, problemas de alinhamento e retificação de imagens, falhas de recobrimento e alta demanda de trabalho/tempo em grandes áreas. O objetivo principal do trabalho é avaliar o conjunto de estratégias e base de dados para uma detecção prévia e remota de dolinas, em substituição à fotointerpretação estereoscópica tradicional. Como resultado, espera-se um banco de dados predominantemente indicativo da presença de dolinas (e não artefatos), base a ser checada em campo por amostragem.

Área de estudo

A área de estudo abrange uma porção de 49,47km² no centro da APA-NRV (1.760km²), localizada na região nordeste de Goiás, junto a divisa com Bahia (Figura 1). Predominam rochas sedimentares, especialmente siliciclásticas, associadas ao Grupo Urucuaia, bem como resíduos eluviais do desmonte da Serra Geral de Goiás, próxima à área. Ocorrem de forma sotoposta rochas carbonáticas mais antigas, do Grupo Bambuí (Neoproterozóico), formação Lagoa do Jacaré, caracterizadas pela intercalação de finas camadas pelíticas e presença de cherts. Os carbonatos afloram somente nas partes médias a baixas do relevo, com a remoção dos materiais siliciclásticos inconsolidados, o que caracteriza a região, conforme Klimchouk e Ford (2000), como de carste coberto ou subjacente, em transição para exposição (desnudo/exumado), a depender ou não de uma fase paleocárstica. Essa exposição aparentemente foi acelerada pela redefinição do nível de base regional, que impôs forte gradiente hidráulico, bem ilustrado pela profunda calha do Rio Vermelho, localizado ao sul da área de estudo, com cerca de 80 metros de paredes verticais (*canyon*). Essa nova condição parece ter dinamizado o sistema cárstico local com a interconexão de cavernas, esvaziamento de galerias antes preenchidas (paragênese), formação de passagens subterrâneas vadosas bastante verticais, capturas de drenagens superficiais para o meio subsuperficial, intensificação de processos erosivos superficiais junto as calhas e principalmente dolinas.

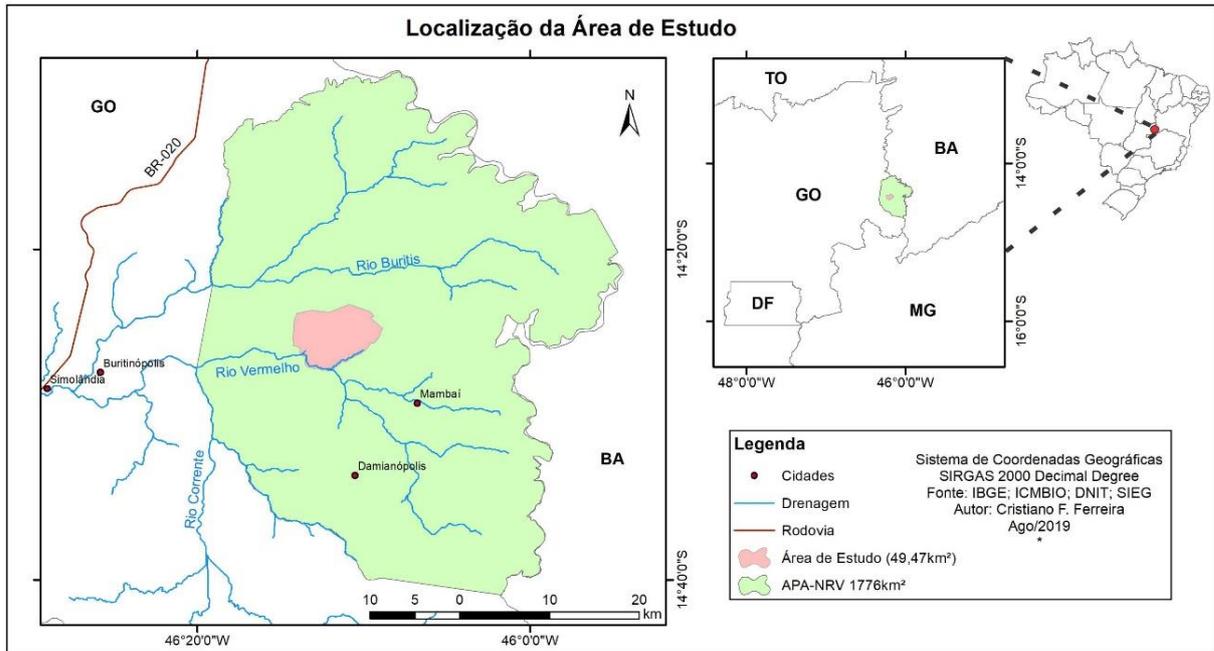


Figura 1: Localização da área de estudo

A área de sobrevoo do VANT engloba duas sub-bacias “superficiais” associadas ao Rio Vermelho, principal drenagem da região. O córrego Serragem divide a área de estudo aproximadamente ao meio, tendo toda sua bacia inserida na análise. O córrego Extrema delimita a área a sudeste, junto com o trecho do Rio Vermelho a sul, possuindo, portanto, apenas parte de sua bacia sob análise. Uma questão que se impõe na região é sobre a possível captura da drenagem do córrego Serragem pelo córrego Extrema por meio da principal caverna da região, a Gruna da Tarimba, com 11.250m de extensão (LOBO et al., 2015). Essa condição poderia indicar um reordenamento das bacias superficiais/subterrâneas em função do reposicionamento do nível de base regional. Existem ainda 23 cavernas mapeadas e outras 17 com pontos conhecidos na área (Figura 2-A). Outros importantes sistemas espeleológicos da área são a Lapa do Penhasco (1.436m de projeção horizontal), Dores (1.240m), Pasto de Vacas (933m), Extrema (600m) e Serragem (500m).

As cotas altimétricas variam de 533 a 822 metros. Da área cárstica total sob análise (49,47km²), somente pouco menos de 8km² estariam sob domínio dos materiais inconsolidados associados ao Grupo Urucua, onde não são esperadas a ocorrência de dolinas de forma significativa. Esse setor corresponde às maiores cotas altimétricas na região, na porção norte-nordeste. Corresponde também às áreas de vegetação mais preservada, do tipo cerrado (campo aberto). Nas porções mais baixas, onde há maior disponibilidade de água, ocorrem matas galerias e poucas áreas de cerrado, em franca substituição por pastagens e culturas associadas a práticas rudimentares.

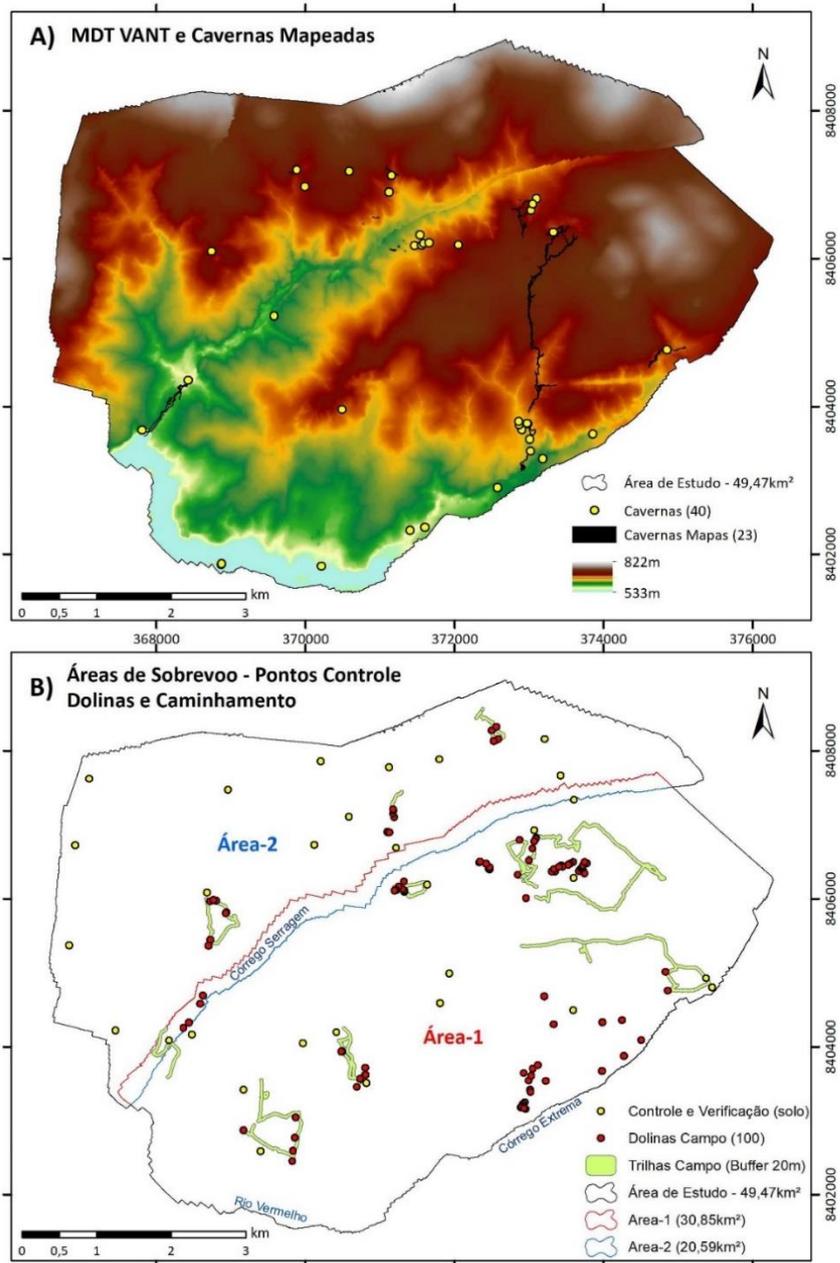


Figura 2: Em A observa-se o MDT construído a partir de imagens VANT, permitindo uma avaliação geral do relevo e a inserção de sistemas de caverna. Em B observa-se as áreas sobrevoadas (1 e 2) com suas respectivas sobreposições, bem como os pontos de controle, caminhamentos realizados e dolinas mapeadas em campo. Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.

Materiais e Métodos

- Aquisição de imagens aéreas e tratamento de dados

Para a aquisição das imagens foi utilizado um único VANT, modelo *Phanton 4 Pro*, marca DJI, com as configurações de sobrevoos expressas abaixo (Tabela 1). Os levantamentos foram realizados em duas etapas (Área-1 e Área-2, Figura 2-B) e cada área foi repartida em subáreas menores para a construção dos planos de voo. Utilizou-se softwares de sistemas de informação geográfica (Arcmap; Google Earth; Drone Deploy) para amparar as tomadas de decisão na definição dos planos de voo. Foram consideradas as vias de melhor acesso, como estradas pavimentadas e vicinais, para o início dos levantamentos (decolagens). Assim, as linhas de voo

criadas não foram muito extensas (<1,5km da base), de modo que não prejudicassem a visualização e telemetria em relação ao VANT. Isso também visou a compatibilidade com a quantidade de baterias disponíveis (não mais que 10 ao total). Foram consideradas sobreposições espaciais de 10% entre cada um dos planos de voo.

Tabela 1: Dados do planejamento de voo.

| Planejamento de Voo | |
|--------------------------|-------------------------|
| VANT | Phanton 4 Pro DJI |
| Câmera | Visível, 20 MP, CMOS 1' |
| Posição | Nadir |
| Baterias disponíveis | 10 |
| Aplicativo | Drone Deploy |
| Altura do solo | 120m |
| Recobrimento frontal | 75% |
| Recobrimento lateral | 65% |
| Sobreposição Planos Voos | 10% |
| Operadores | 2 |

Paralelamente foi traçada uma estratégia de coleta de pontos de controle e verificação para ajuste dos produtos cartográficos. Utilizou-se um receptor GNSS de dupla frequência Hiper X (RTK) para coletar os dados em pontos previamente estabelecidos, visando maior distribuição espacial e altimétrica (Figura 2B). De posse das imagens aéreas e pontos de controle iniciou-se a fase de processamento dos dados com o programa Agisoft Photoscan, conforme fluxograma a seguir (Figura 3). Uma síntese dos números alcançados nesse projeto pode ser visualizada a seguir (Tabela 2).

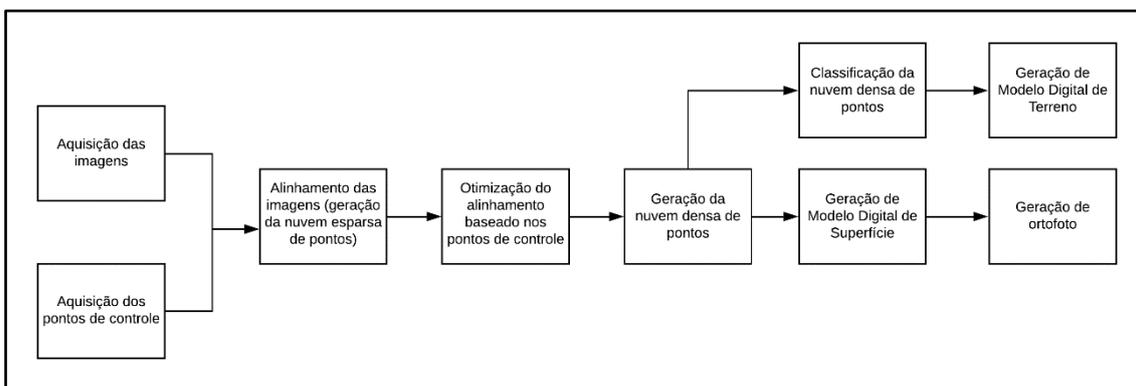


Figura 3: Fluxograma do processamento dos dados com o programa Agisoft Photoscan.

Tabela 2: Síntese de dados do levantamento aéreo realizado e pontos de controle.

| Dados Gerais | Área-1 | Área-2 |
|--------------------|-------------|-------------|
| Km ² | 30,85 | 20,59 |
| Planos de voo | 8 | 6 |
| Baterias usadas | 52 | 37 |
| Período | 23-26/11/18 | 22-23/03/19 |
| | 08-09/12/18 | 12-14/04/19 |
| Fotos | 16.594 | 10.621 |
| GSD (cm) | 3,98 | 3,74 |
| Pixel MDE's (cm) | 31,83 | 14,95 |
| Pontos Nuvem | 14.885.898 | 12.768.678 |
| Pontos Controle | 12 | 12 |
| Erro X | 0,0526547 | 0,000192606 |
| Erro Y | 0,0879643 | 0,000349652 |
| Erro Z | 0,915858 | 0,000744357 |
| Erro total | 0,921578 | 0,000844643 |
| Imagem (pix) | 0,655 | 0,297 |
| Pontos Verificação | 4 | 2 |
| Erro X | 0,722299 | 1,55095 |
| Erro Y | 0,764216 | 0,285871 |
| Erro Z | 1,3493 | 1,20615 |
| Erro total | 1,71066 | 1,98543 |
| Imagem (pix) | 0,68 | 0,217 |

A resolução do pixel final para os ortofotomosaicos das duas áreas foi bastante semelhante (GSD), porém houve certa discrepância nas resoluções dos MDE's resultantes. A Área-2 apresentou resultados significativamente melhores para a resolução dos MDE's e de erro total para os pontos de controle. Esse comportamento se deve possivelmente ao fato de a área ser 33% menor, apresentar menor gradiente altimétrico e terem sido alocados uma quantidade relativamente maior de pontos de verificação do solo (pontos por área). Considerando o propósito de detecção de dolinas os produtos foram considerados satisfatórios. A busca por depressões foi realizada em cada área e respectivos modelos de forma independente.

- Amostra de dolinas em campo

Ao passo que os dados do VANT foram sendo obtidos, realizou-se também a verificação de dolinas em campo por amostragem. Buscou-se abranger diversas partes da área de estudo, visando uma melhor distribuição espacial. Nos percursos realizados a pé, após geração de objetos para análise, utilizou-se de um GPS com o modo de registro de caminhada ligado para identificar dolinas verdadeiras e caracterizar possíveis erros de comissão (Figura 2-B). Ao todo foram localizadas e caracterizadas em campo 100 dolinas, o que para a área de estudo equivale a uma densidade mínima de 2,02/km². Ao se considerar os dados da revisão realizada por Ferreira e Uagoda (2020-A) esse resultado prévio já seria superior a 62% dos mapeamentos de dolinas no Brasil.

- Procedimentos de preenchimento MDT

O primeiro passo adotado foi o preenchimento do MDT com a ferramenta “*Fill*” (Arcmap, *Hidrology*), sem especificação de limite “Z”, o que impõe um preenchimento total de todas as depressões ou artefatos do modelo (aqui chamado de Z-0). Em seguida a essa operação foi realizada uma subtração com o MDT original, sem preenchimento, resultando em um novo MDT somente de depressões, verdadeiras ou não. Procedimentos similares, chamados de diferença por preenchimento (FERREIRA; UAGODA, 2020-C), foram realizados em diversos trabalhos (DOCTOR e YOUNG, 2013; BAUER, 2015; KOBAL et al., 2015; ZHU e PIERSKALLA, 2016)

Ao converter o raster de depressões para polígono observou-se uma grande quantidade de objetos, a maior parte deles espúrios. Isso ocorre especialmente em MDT’s de maior resolução, conforme relatos na literatura (FAULKNER et al., 2013). Para reduzir a quantidade de objetos falsos, um dos procedimentos mais adotados é a inclusão de um limite mínimo de Z para preenchimento, ou seja, preencher depressões menos profundas antes de novamente realizar a operação de subtração com o MDT totalmente preenchido (Z-0). A maior parte dos artefatos são de baixa profundidade e considerando a realidade das dolinas amostradas na área de estudo, o valor mínimo de um metro foi considerado adequado. A operação assim realizada resultou em uma nova base de polígono (Z-1), sem qualquer depressão abaixo de um metro de profundidade (Tabela 3). Apesar da expressiva redução de objetos, o volume de itens para análise ainda permaneceu elevado. Além da supressão das sobreposições, foram eliminados polígonos de um pixel junto às bordas de objetos maiores, frutos da fragmentação do processo de transformação de raster para polígono.

Tabela 3: Quantitativos de objetos resultantes da diferença por preenchimento do MDT após cada procedimento realizado. A Área-2, apesar de menor, apresentou uma quantidade de objetos maior, possivelmente em função da melhor resolução do MDT.

| Objetos/áreas | Área 1 | Área 2 | Parcial |
|--------------------------------|---------|-----------|---------------|
| Z-0 | 949.635 | 2.637.549 | 3.587.184 |
| Z-1 | 8.142 | 10.185 | 18.327 |
| Z-1 Sem Pixels Isolados | 5.644 | 6.049 | 11.693 |
| Sobreposições | | 101 | -101 |
| Total | | | 11.592 |

O resultado foi confrontado com o ortofotomosaico e com relevo sombreado (*hillshade*, MDT) para avaliação visual da efetividade do método em detectar dolinas autênticas. Foi observada uma grande quantidade de objetos que aparentavam ser típicas dolinas no mapa sombreado, mas ao avaliar a imagem, coincidiam com copas de árvores (Figura 4). Problema semelhante foi observado por Anastácio et al. (2019) ao realizarem o procedimento de preenchimento para identificação de dolinas com dados VANT, tendo sido sanado com limpeza manual e adoção do MDS como base principal de análise.

O problema possivelmente foi causado na classificação da nuvem densa de pontos pelo programa utilizado para construção do MDT, no modo padrão (*default*), que aparentemente colocou as copas no nível do solo juntamente com os pixels mais profundos internos, causando a falsa criação de depressões. A limpeza correta parece ter ocorrido apenas nas bordas das árvores e não no centro. Oliveira et al. (2017) já haviam percebido incongruências na classificação automática do MDT (Agisoft Photoscan) em que a imprecisão da limpeza ocorreu

de forma marginal às áreas classificadas como não solo. A classificação supervisionada para o MDT em toda a área seria inexecuível. Uma alternativa para detectar padrões e diferenciar artefatos de dolinas é compreender o comportamento dos pixels internos a cada objeto gerado da diferença de preenchimento. Como teste foi utilizado os dados do MDS da Área-1 (e não MDT) visando compreender a variabilidade altimétrica dos pixels sem a interferência realizada pelo aplicativo de correção para o nível do solo.

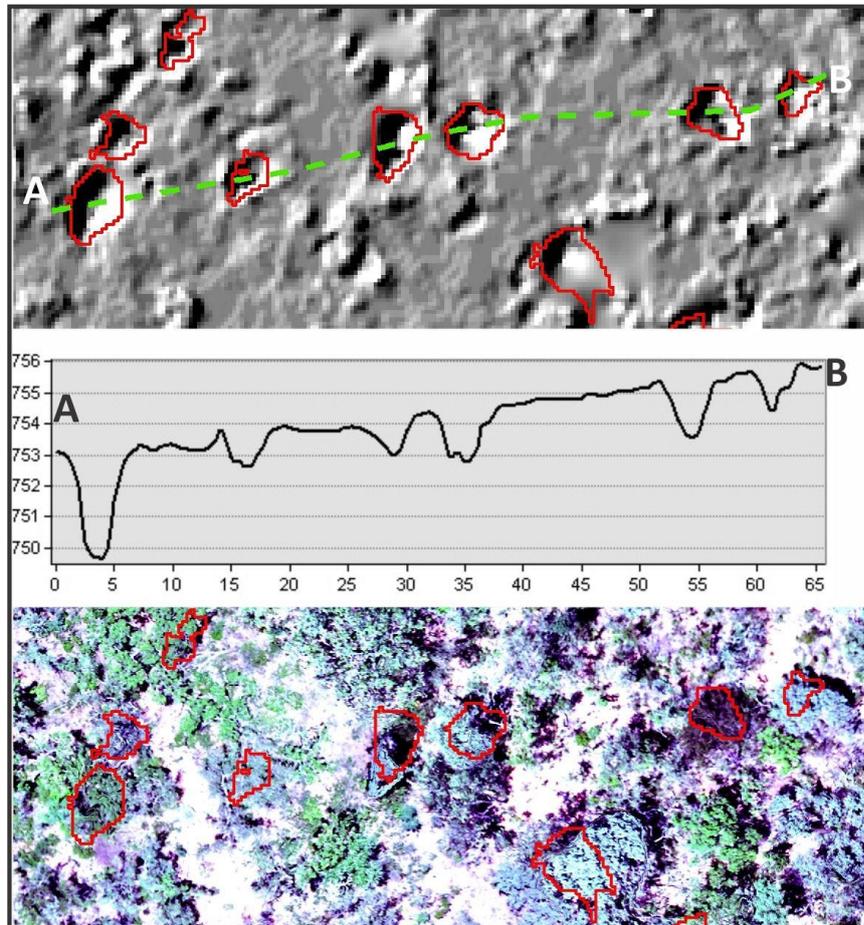


Figura 4: No topo da figura é possível observar o que aparentam ser pequenas dolinas de colapso no mapa sombreado, delimitadas em vermelho no processo de diferença por preenchimento. Ao centro realizou-se o perfil topográfico da linha verde tracejada na imagem acima (A-B). Por fim, abaixo, verifica-se a mesma cena no ortofotomosaico, em que os objetos em vermelho estão sobre as copas das árvores.

Com a ferramenta de estatísticas zonais do Qgis foram gerados diversos parâmetros para cada objeto (altimetria média, desvio padrão, amplitude etc.). A análise destes dados brutos, por parâmetro, em comparação com dolinas verdadeiras ou artefatos identificados em campo não permitiu notar um padrão claro de comportamento. Entretanto, com tais dados atrelados aos objetos é possível também realizar uma análise de agrupamento no Qgis (ferramenta “*Attribute Based Clustering*”, 3 a 6 classes, k-means, peso 1). Foram utilizados os pontos centroides dos objetos e realizada, inicialmente, a análise com os parâmetros altimetria mínima (fundo das depressões), altimetria média, área, amplitude e desvio padrão (Figura 5).

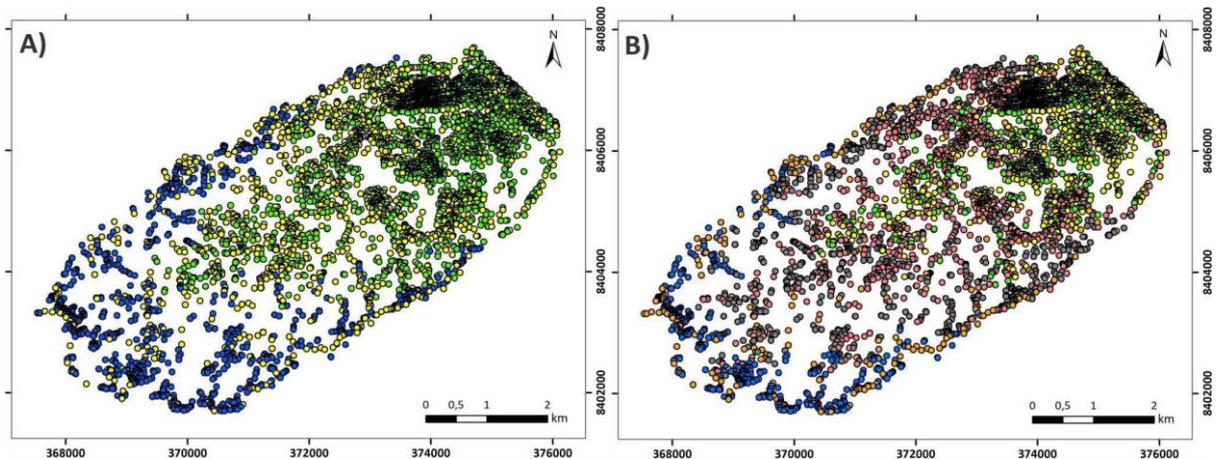


Figura 5: Centroides dos objetos da Área-1 agrupados em três classes (A) e seis classes (B) considerando altimetria mínima, altimetria média, área, amplitude e desvio padrão. A variação das classes aproxima-se da variação do relevo com os parâmetros utilizados. Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.

Conforme as figuras acima, é possível perceber alguns padrões de distribuição espacial, com uma grande densidade a nordeste, junto aos sedimentos associados ao Grupo Urucuia, concentrações de determinadas classes na alta e média vertente, bem como outras classes nas calhas dos tributários e junto ao *canyon* do Rio Vermelho. Confrontando esses padrões com dados de campo e objetos sobre árvores nas imagens percebeu-se que este resultado também não explicaria corretamente a ocorrência de dolinas ou artefatos, visto que tais feições podem ocorrer por toda a área. Atribuiu-se esses padrões à utilização dos dados de altimetria mínima e média, que induziram à uma classificação prioritária conforme altitude.

Encadeamento de filtros simples (*model builder*), usados em outros trabalhos a partir de áreas mínimas, drenagens, estradas ou litologias (JEANPERT et al., 2016; CAHALAN e MILEWSKI, 2018) não foram eficazes, restando ainda muitos objetos. A análise estatística de pixel por objeto a partir do MDS permitiu, entretanto, verificar um comportamento peculiar das depressões sobre copas de árvore. Elas tendiam ser mais profundas e com maior perímetro se comparadas à sua área. Testes com valores arbitrários dessas razões (amplitude/área e perímetro/área) se mostraram promissores para eliminar objetos espúrios e afinar melhor o universo para checagem posterior. Normalmente dolinas têm uma relação proporcional entre profundidade e tamanho, em geral mais circulares que de formatos irregulares (SAURO, 2012). Estudos importantes em morfometria cárstica também usam taxas de profundidade/diâmetro para caracterizar dolinas em suas áreas estudo, dada sua relação com origem e evolução da feição (DAY, 1976; BONDESAN et al., 1992). Os objetos espúrios amostrados se apresentavam desproporcionais quanto a essas métricas.

Adotou-se limites de corte baseados em dados de campo, assim como Rahimi e Alexander (2013) que também utilizaram a relação entre profundidade e área. Dessa forma, foram identificados os objetos associados a dolinas verdadeiras e encontrado o maior valor das relações profundidade e perímetro por área conforme observa-se a seguir (Tabela 4), permitindo a eliminação de considerável quantidade de objetos de formatos mais abruptos. Ressalta-se que a identificação de menos objetos no MDT (44 polígonos) como sendo relativos a dolinas verdadeiras em campo (100 feições) se deve principalmente à tendência de coalescência em depressões compostas. O preenchimento ocorre até o nível de extravasamento, o que pode implicar na junção de depressões suaves adjacentes.

Tabela 4: Os pontos de dolinas de campo permitiram associar 44 polígonos Z-1 MDT como reais. A razão máxima de amplitude e área variou significativamente de MDT para MDS, demonstrando o efeito da correção para nível do solo no Agisoft Photoscam. A razão de perímetro por área não depende de dados de pixel.

| Objetos Dolinas | Origem Formato | Razão | Dados Pixels | Corte para análise | Objetos remanescentes |
|-----------------|----------------|----------------|--------------|--------------------|-----------------------|
| 44 | Z-1 MDT | Amplitude/Área | MDT | < 0,02 | 1.590 |
| | | | MDS | < 0,07 | 1.744 |
| | | Perímetro/Área | - | < 0,52 | 578 |

Buscando redundância para não eliminar objetos verdadeiros optou-se por realizar nova análise de agrupamento com parâmetros não altimétricos. Foram realizados quatro testes, chamados de “K4x4-MDS”, “K4x4-MDT”, “K3x5-MDS” e “K3x5-MDT”. Os objetos são oriundos do processamento Z1-MDT, considerado mais representativo em formato, mas a base de dados de pixel para a nova análise de agrupamento variou conforme o MDS ou MDT. A abreviação K4x4 se refere à adoção dos parâmetros área, perímetro, amplitude e desvio padrão (4) e a distribuição em quatro classes obrigatórias. A abreviação K3x5 se refere à adoção dos parâmetros área, perímetro e amplitude (3) e a distribuição em cinco classes obrigatórias.

O *K-means clustering* utilizado na ferramenta *Attribute Based Clustering* (Qgis) é um método de agrupamento não hierárquico que requer um número de grupos (clusters) definido previamente. Ele minimiza a soma dos quadrados das distâncias de cada objeto em relação ao centroide do grupo a que pertence (GOTELLI e ELLISON, 2013). Para determinar o número ideal grupos foi utilizado o pacote *factoextra* (KASSAMBARA e MUNDT, 2019) do programa estatístico R (R Core Team 2019). O método escolhido foi a soma dos quadrados *intra-cluster* (“*within cluster sums of squares*”) com número de grupos variando de 1 a 10 (Figura 6). Diante do resultado, decidiu-se continuar as análises com 4 e 5 clusters, por ser o número de grupos localizados na inflexão do gráfico. Aumentar o número de grupos além de 5 minimiza pouco a soma dos quadrados *intra-cluster*.

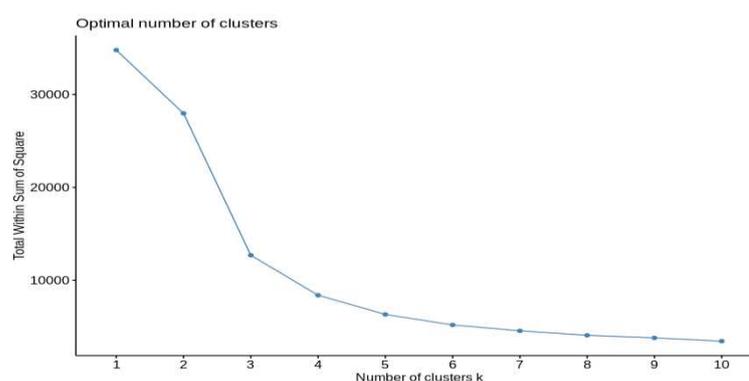


Figura 6: Número ótimo de agrupamentos elaborado no pacote “factoextra” do programa R, indicando uma quebra na curva entre 4 e 5 grupos.

Os testes realizados com a nova análise de agrupamento foram sintetizados na tabela a seguir (tabela 5) onde é possível observar em cores a variação dos arranjos de parâmetros/grupos escolhidos para comparação. A coluna dolinas são polígonos relacionados a dolinas autênticas validadas em campo (44 ao total), distribuídos conforme o resultado do agrupamento. A coluna não dolinas também está relacionada a objetos validados em campo como espúrios, por estarem no buffer de 20 metros dos caminhamentos realizados em dupla (duas pessoas em trajetos paralelos), que contabilizou 403 objetos no total. Por fim, a coluna objetos se relaciona à

distribuição dos 11.592 polígonos por classes (agrupamentos), demonstrando o volume de material conforme a classe. Em negrito observa-se uma primeira estimativa dos resultados mais significativos de acertos para dolinas e possíveis erros para não dolinas, indicando uma aparente melhor relação para K3x5-MDS, ainda mais se considerado o menor volume de objetos para posterior análise.

Tabela 5: Distribuição dos objetos por classes (grupos) conforme testes com três ou quatro parâmetros e quatro ou cinco classes, com respectivos quantitativos de objetos (no total 11.592). As colunas Dolinas (44) e Não Dolinas (403) representam as amostras de campo.

| Classes | K4x4-MDS | | | K4x4-MDT | | | K3x5-MDS | | | K3x5-MDT | | |
|----------|-----------|-------------|---------|-----------|-------------|---------|-----------|-------------|---------|-----------|-------------|---------|
| | Dolinas | Não Dolinas | Objetos |
| 0 | 1 | 110 | 4.140 | 12 | 154 | 3.283 | 2 | 103 | 2.856 | 0 | 165 | 5.946 |
| 1 | 31 | 37 | 1.118 | 0 | 44 | 1.388 | 5 | 158 | 3.044 | 0 | 44 | 1.393 |
| 2 | 4 | 84 | 3.021 | 2 | 182 | 6.473 | 36 | 16 | 731 | 4 | 125 | 3.075 |
| 3 | 8 | 172 | 3.313 | 30 | 23 | 448 | 1 | 46 | 2.178 | 19 | 0 | 78 |
| 4 | - | - | - | - | - | - | 0 | 80 | 2.783 | 21 | 69 | 1.100 |

Foi utilizada uma matriz de confusão para avaliar os resultados dos testes, como realizado em diversos trabalhos (FILIN e BARUCH, 2010; MIAO et al., 2013; RAHIMI e ALEXANDER, 2013; ZHU e PIERSKALLA, 2016; CHEN et al., 2018). Esse tipo de matriz compara os dados coletados em campo com os dados preditos pelos processamentos realizados com o intuito de separar objetos falsos de dolinas. Nos casos em que há compatibilidade entre dolinas reais e dolinas preditas no modelo, tem-se um positivo verdadeiro (TP). O mesmo ocorre quando a previsão do modelo aponta para não dolinas e estas são confirmadas em campo como negativos verdadeiros (TN). Entretanto, também ocorrem predições equivocadas, como no caso do modelo apontar como dolina um objeto confirmado em campo como não dolina, sendo chamado de falso positivo (FP). Por fim, dolinas verdadeiras podem ser classificadas como não dolinas pelo modelo, chamadas de falso negativo (FN).

Os resultados da análise de agrupamento (Tabela 5) serviram como fonte de dados para a matriz de confusão (Tabela 6). A maior ocorrência de dolinas verdadeiras em uma das classes foi adotada como positivo verdadeiro, considerando que a análise de agrupamento conseguiu discernir aquele conjunto como pertencente a um mesmo tipo de objetos. As ocorrências de não dolinas verificadas em campo que caíram na classe com maior resultado de dolinas verdadeiras foram consideradas como falso positivo. Ambos os valores estão em negrito na tabela, que serviu como um primeiro parâmetro para avaliar os resultados, ou seja, um valor alto de positivo verdadeiro com baixo falso positivo tende a ser considerado um melhor modelo para a filtragem geral dos objetos. Entretanto, a matriz de confusão prevê também considerar os parâmetros negativos. Foram considerados negativos verdadeiros aqueles objetos não dolinas (verificados em campo) que caíram em todas as demais classes que não a de dolinas verdadeiras (que tinham mais objetos corretos). Por fim os falsos negativos são as dolinas verdadeiras que foram classificadas em outras classes que não a de maior recorrência de dolinas, ou seja, foram controversamente classificadas como não dolinas.

Tabela 6: Matriz de confusão a partir dos dados de campo para as análises de agrupamento e análises morfológicas.

| | | Análises de Agrupamento | | | | Análises Morfológicas | | |
|--|----------------------------|-------------------------|----------|---------------|----------|-----------------------|----------------|----------------|
| | | K4x4-MDS | K4x4-MDT | K3x5-MDS | K3x5-MDT | Range/Área-MDT | Range/Área-MDS | Perímetro/Área |
| Negativo Verdadeiro | TN | 366 | 380 | 387 | 334 | 333 | 349 | 375 |
| Positivo Verdadeiro | TP | 31 | 30 | 36 | 21 | 44 | 44 | 44 |
| Falso Negativo | FN | 13 | 14 | 8 | 23 | 0 | 0 | 0 |
| Falso Positivo | FP | 37 | 23 | 16 | 69 | 70 | 54 | 28 |
| | Total (dados campo) | 447 | 447 | 447 | 447 | 447 | 447 | 447 |
| Acurácia Geral (AC) | TP+TN/TP+TN+FP+FN | 88,81% | 91,72% | 94,63% | 79,42% | 84,34% | 87,92% | 93,74% |
| Tx. Positivo Verdadeiro (TPR) | TP/TP+FN | 70,45% | 68,18% | 81,82% | 47,73% | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| Tx. Negativo Verdadeiro (TNR) | TN/TN+FP | 90,82% | 94,29% | 96,03% | 82,88% | 82,63% | 86,60% | 93,05% |
| Acurácia Média (AAC) | TPR+TNR/2 | 80,64% | 81,24% | 88,92% | 65,30% | 91,32% | 93,30% | 96,53% |
| Objetos remanescentes com este filtro | | 1.118 | 448 | 731 | 1.100 | 1.590 | 1.744 | 578 |

Nessa matriz foram incluídas também os dados da análise morfológica, para uma melhor comparação. Nesse caso foram considerados a totalidade dos objetos confirmados em campo associados a dolinas (44) como pertencentes ao grupo de positivos verdadeiros, o que por consequência levou a nenhum evento de falso negativo. Essa decisão afeta os resultados da matriz, elevando as acurácias e taxas para os modelos adotados na análise morfológica. Portanto não considera um potencial equívoco do analista ao classificar um objeto como representativo de dolina, mesmo baseado em dados reais de campo, que potencialmente viriam a representar na realidade (e coincidentemente) mais um artefato que uma depressão real. Optou-se por realizar assim mesmo essa análise porque isso permitiria decidir qual dos modelos da análise morfológica se saiu melhor (avaliação interna), considerando os erros e acertos relativos aos dados coletados de não dolinas.

Foram calculadas a acurácia geral, as taxas de positivo e negativos verdadeiros e a acurácia média, fruto das duas taxas calculadas, visando balancear melhor as análises em amostras diferentes (44 dolinas versus 403 não dolinas). Nas análises de agrupamento observou-se resultados mais significativos para a base de dados K3x5-MDS, com índices sempre acima de 80%, uma acurácia média de quase 89% e relativamente pouca quantidade de objetos remanescentes para análise. O modelo K4x4-MDT, apesar de menor quantidade de objetos, apresenta índices bem inferiores.

Para as análises morfológicas os melhores resultados foram com a razão perímetro/área, alcançando uma acurácia média superior a 96%. Isso mostra que ao menos para caracterizar os objetos espúrios, o produto dessa razão pode ser bastante efetivo (93%), uma vez que os dados de dolinas verdadeiras foram considerados 100% corretos. Ao se comparar a performance dessa razão com o modelo K3x5-MDS verifica-se, por exemplo, que o último se sai melhor na taxa de negativos verdadeiros (96% contra 86,6%) e acurácia geral (94,6% contra 93,7%). Isso significa que o melhor resultado para acurácia média da razão perímetro por área só ocorreu devido ao desbalanceamento na adoção de todos os objetos considerados dolinas (positivos verdadeiros) como de fato representativos desse fenômeno. De toda forma, considerando apenas os testes da análise morfológica, além da razão perímetro/área ter obtido melhores índices que os demais (Range/Área-MDT e Range/Área-MDS), também resultou em uma quantidade de objetos bastante inferior para análise visual.

Os objetos gerados das melhores análises de agrupamento e morfológica foram reunidos em uma mesma base para futura inspeção visual, conforme os dados a seguir (Tabela 7). É possível perceber que dos 933 objetos remanescentes, 41% foi obtida da base K3x5-MDS, 25% da razão perímetro/área e 34% são convergentes, tendo sido ainda eliminados os já confirmados falsos positivos.

Tabela 7: Quantidades de objetos remanescentes da junção das bases K3x5-MDS e da razão Perímetro/Área, para posterior análise visual.

| | K3x5-MDS | Perímetro/Área |
|-------------------------|-------------|----------------|
| K3x5-MDS | 731 | 336 |
| Perímetro/Área | 336 | 578 |
| Próprios | 395 (40,6%) | 242 (24,9%) |
| Convergentes | 336 (34,5%) | |
| Falsos Positivos | -40 | |
| Total | 933 | |

- Procedimentos de preenchimento MDS

Considerando que foram identificadas dolinas em campo, mas que não geraram polígonos nos procedimentos com MDT, foi realizado também a diferença por preenchimento no MDS. Essa medida visou detectar depressões mais suaves em campo aberto ou sob mata, cuja vegetação tenha eventualmente acompanhado o relevo. A classificação automática da nuvem de pontos para o MDT poderia deturpar informações importantes.

A adoção de filtro de profundidade (Z-1, p.ex.) não se mostrou expressiva, mas considerando que o formato dos objetos espúrios era ainda mais irregular se comparado a dolinas reais (Figura 7), optou-se pela razão máxima de perímetro/área (0,4), lastreada em dados de campo, resultando em uma limpeza significativa (Tabela 8). Essa nova base, considerada acessória, foi mantida independente dos objetos gerados a partir do MDT. Apesar da correspondência locacional de muitos objetos entre essas bases, considerou-se que pela diferença significativa de formato, não deveriam ser congregadas para análise visual.



Figura 7: Diferença de formato entre objetos gerados no MDS considerados a partir da verificação em campo como dolina (azul) e os demais considerados como espúrios (vermelho). Os objetos em vermelho possuem um produto da razão perímetro/área bem superiores às dolinas observadas em campo.

Tabela 8: Quantidades de objetos remanescentes dos procedimentos de preenchimento do MDS e aplicação de filtro (perímetro/área), para posterior análise visual.

| Objetos/áreas (MDS) | Área 1 | Área 2 | Parcial |
|-----------------------------------|---------|-----------|------------|
| Z-0 | 720.555 | 2.979.847 | 3.700.402 |
| Z-0 Perímetro/Área <0,4 | 597 | 173 | 770 |
| Sobreposições | | 40 | -40 |
| Total | | | 730 |

- Procedimentos manuais/visuais

Na análise visual, com apoio do ortofotomosaico, perfis topográficos e relevo sombreado (MDT e MDS), classificou-se objetos entre não dolinas e possíveis dolinas. O primeiro grupo é constituído por objetos associados a copas de árvores remanescentes, depressões ligadas a drenagens, bordas de superfícies inclinadas entre pastos e matas (especialmente na base MDS), depressões antrópicas associadas a barragens e estradas (Figura 8). Procedimentos similares de limpeza de objetos foram realizados em diversos trabalhos (ZHU et al., 2014; ZHU e PIERSKALLA, 2016; WALL, et al., 2017; CHEN et al., 2018; CAHALAN e MILEWSKI,2018).

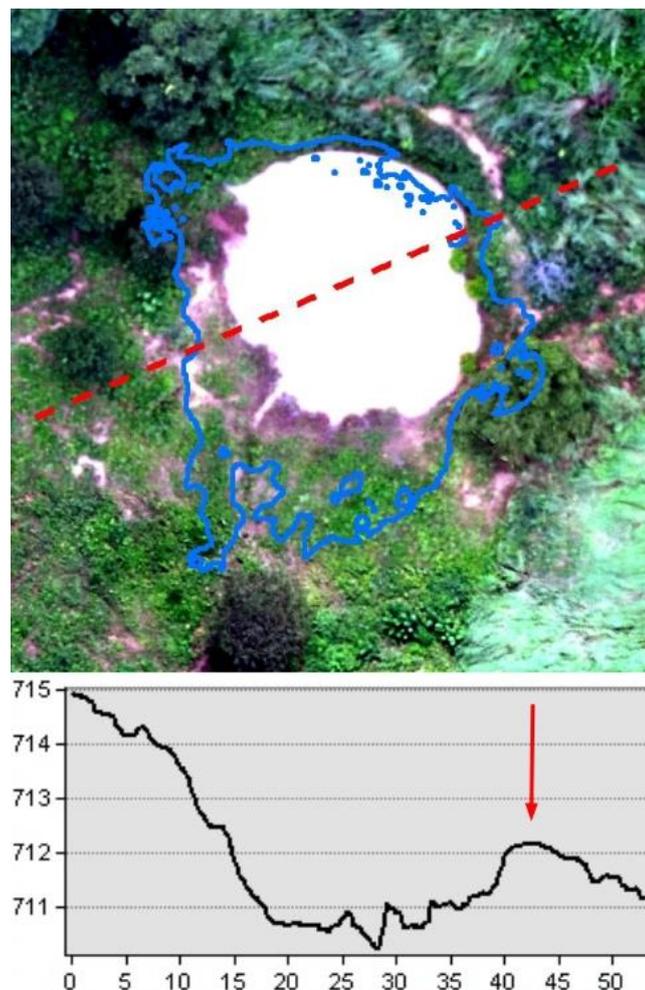


Figura 8: Exemplo de pequena barragem identificada no processo de preenchimento diferencial como uma possível dolina (vista em planta). Notar no perfil correlato (Arcmap-3d analyst-profile) o ponto proeminente marcado com seta vermelha, indicando ser uma feição de origem antrópica.

Além dos objetos já confirmados como dolinas (44), classificou-se como possíveis depressões cársticas objetos denominados “prováveis”, em que os elementos visuais indicam uma chance de aproximadamente 90% ou mais de serem verdadeiras e objetos “suspeitos”, com chances acima de 75%. Colaboraram para maior convicção a presença de drenagens centrípetas, mudança de vegetação, aspectos morfológicos, sumidouro, rochas carbonáticas, entre outros. Existem, porém, objetos inconclusos (50%), chamados de baixios, em meio a vegetação densa ou matas que podem ser drenagens não aparentes, clareiras profundas, ou mesmo dolinas, como muitas vistas em campo (Figura 9).

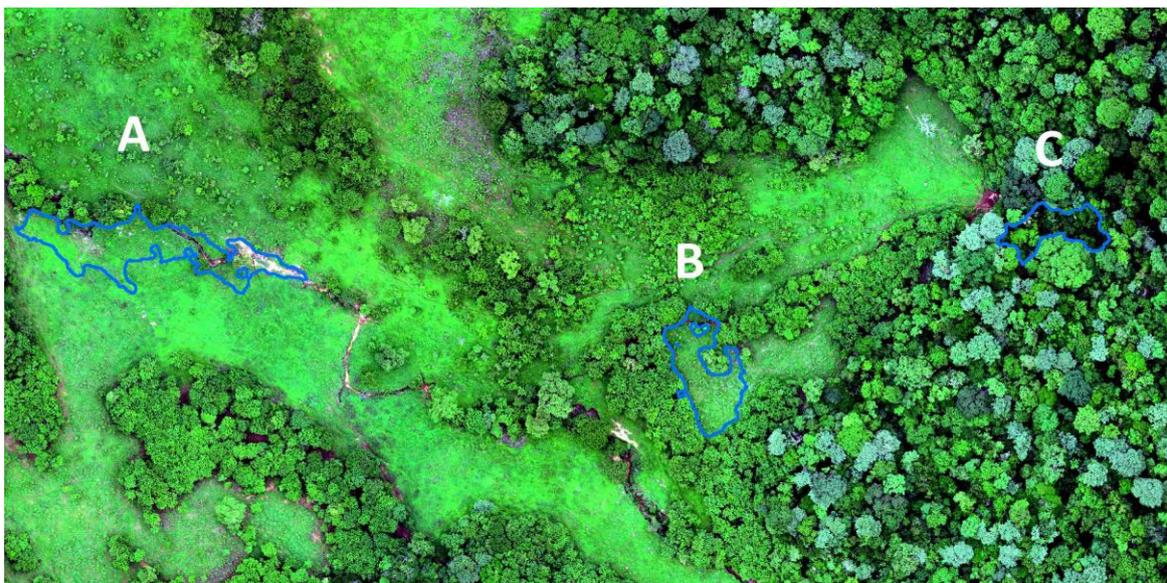


Figura 9: Objetos associados a drenagens (A), geralmente alongados em que é possível observar claramente o canal; objetos associados a bordas da vegetação mais alta no contato com mais baixa (B), comum na junção pasto/mata e; objetos chamados de baixios (C), que não é possível visualizar o ponto mais fundo e decidir de forma inequívoca por uma dolina ou não. Neste caso o baixio tem 10m de profundidade.

Resultados e discussão

- Dados de campo

As 100 dolinas identificadas em campo foram devidamente caracterizadas quanto à sua tipologia, uso do solo, existência de água (córrego, lago), acesso a caverna e se do tipo simples ou composta. Conforme revisão de Ferreira e Uagoda (2019-A), as tipologias genéticas mais usadas para classificar dolinas são as de dissolução, colapso, sufusão, colapso de cobertura e colmatadas, podendo-se ainda incluir aqui o tipo cockpit, ou seja, aquelas remodeladas por canais superficiais de escoamento, bastante comuns na região (equivalentes às poligonais, mas isoladas). Considerando que tais processos genéticos podem ocorrer na natureza de forma combinada e simultânea, as feições foram classificadas indicando, conforme o caso, os processos predominantes e secundários (Tabela 9).

Tabela 9: Tipologias de dolinas observadas em campo

| Tipo Dolina | Predominante | | Secundário | | Total | |
|---------------------|--------------|--------|------------|--------|-------|--------|
| Sufusão | 40 | 40,00% | 16 | 33,33% | 56 | 37,84% |
| Cockpit | 34 | 34,00% | 13 | 27,08% | 47 | 31,76% |
| Colapso | 19 | 19,00% | 11 | 22,92% | 30 | 20,27% |
| Colmatada | 3 | 3,00% | 5 | 10,42% | 8 | 5,41% |
| Colapso cob. | 4 | 4,00% | 3 | 6,25% | 7 | 4,73% |

Conforme se observa a sufusão foi considerado o processo mais atuante, responsável em média por 37,8% dos eventos, sendo seguido pela tipologia cockpit (31,7%). Ambas tipologias são condicionadas predominantemente pelos materiais de cobertura (abundantes na região) e processos superficiais de modelagem (de encosta ou fluviais). Os colapsos em rocha respondem por aproximadamente 20% dos eventos, inferior às tipologias anteriores, mas ainda sim significativo. Já os processos de colmatagem e colapso de cobertura são mais localizados, em geral de forma secundária. Não foram observadas dolinas tipicamente de dissolução nesta amostra, situação bem distinta da encontrada, por exemplo, nas montanhas Taurus na Turquia, onde as depressões desse tipo predominam em carbonatos expostos (Öztürk et al., 2015; Öztürk et al., 2018). Por outro lado, em análise dos tipos de dolinas no nordeste da Itália, Calligaris et al. (2017) também identificaram a predominância do processo de sufusão (29%), seguido por processos de colapso (própria rocha 16%; cobertura 15%; rocha subjacente 11%), numa região caracterizada pelo predomínio de coberturas móveis (alúvio-glacias) sobre rochas solúveis.

Em diversas oportunidades em campo foi possível observar um padrão de associação entre feições do tipo cockpit, seguidas por colapsos e diversas dolinas de sufusão (Figura 10). Ou seja, a drenagem é capturada, muitas vezes por um desnível abrupto (15 a 20m), e por consequência desse rebaixamento do nível de base, ocorre a indução de colapsos e subsidências na superfície a jusante. Isso é frequente em matas galeria e paleocanais, mostrando que pequenos córregos podem ser capturados e manterem um aspecto superficial de drenagens ativa sob mata.

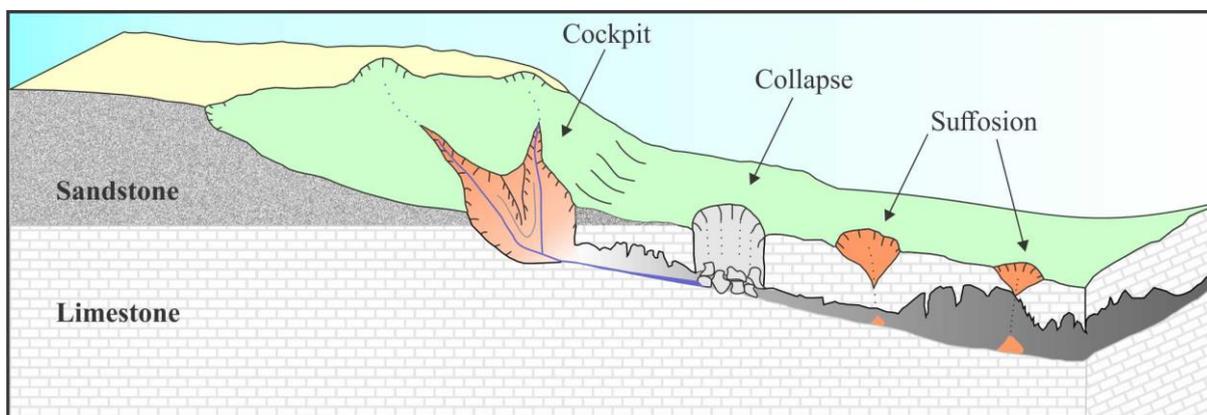


Figura 10: Sequência típica de dolinas encontradas na área, muitas vezes associadas a cavernas. Nos pontos onde os depósitos siliciclásticos ou solos sobre os carbonatos estão pouco espessos, ocorrem dolinas.

A análise do uso do solo na amostra de dolinas também indicou alguns comportamentos principais, entre as classes mata, cerrado, pasto e solo exposto (tabela 10). Em geral nas dolinas predominam matas em 62% das vezes, influenciando 85 feições das 100 ao todo. Isso indica um enorme desafio para detecção de tais tipos de feições neste projeto, com o uso de VANT e câmera simples (visível). Em seguida a tipologia pasto alcançou 33% como uso do solo predominante e 59% como secundário. Ao contrário do esperado foram poucas as dolinas em usos como cerrado ou solo exposto. Isso indica, com base nessa amostra, que áreas mais abertas, sem ocorrência de desníveis abruptos ou exposição do epicarste (rochas aflorantes), em que geralmente ocorre o cerrado, houve uma substituição para pastagens. As zonas de mata em que ocorrem dolinas mais profundas (colapsos, p.ex.) e não se mostram tão favoráveis à agropecuária, foram preservadas.

Tabela 10: Usos do solo nas dolinas de campo.

| Uso Solo | Predominante | | Secundário | | Total | |
|---------------------|--------------|--------|------------|--------|-------|--------|
| Mata | 62 | 62,00% | 23 | 39,66% | 85 | 54,14% |
| Pasto | 33 | 33,00% | 34 | 58,62% | 67 | 42,68% |
| Solo exposto | 3 | 3,00% | 1 | 1,72% | 3 | 1,91% |
| Cerrado | 2 | 2,00% | 0 | 0,00% | 2 | 1,27% |

Por fim, foi observado ainda que apenas 32% das dolinas apresentavam água em seu interior (córregos ou lagos perenes). Isso possivelmente decorre do forte componente de captura para o subterrâneo na região, visto que deste total de dolinas com água, a maior parte são colapsos (janelas cársticas) ou cockpits de drenagem perene. Por outro lado 54%, das dolinas da amostra dão acesso a cavernas, demonstrando que a detecção de dolinas também serve como indicador da presença de feições espeleológicas. Pouco mais da metade da amostra está inserida em depressões maiores, compostas (51%), o que é coerente com a recorrente tipologia de cockpits, em geral depressões poligonais que contêm dolinas de menor ordem.

- Detecção remota

Após a análise das duas bases de dados, primeiramente a oriunda do processamento com o MDT (K3x5-MDS e perímetro/área) com 933 objetos e secundariamente a obtida junto ao MDS (perímetro/área), com 730 objetos, obteve-se os resultados expressos a seguir (Tabela 11). De forma geral, e como já previsto, a maior parte dos objetos analisados foi categorizado como negativo, numa relação aproximada e coincidente de 70% para as duas bases. No universo de objetos MDT, a maior parte desses negativos ainda se deve à criação de depressões sobre copas de árvores ou junto a drenagens. Nos objetos MDS, a maior parte dos negativos se deram relacionados a bordas da vegetação, com bem menor participação de depressões associadas a drenagem. Essa diferença entre as duas bases é justificável exatamente pelos efeitos de correção do nível do solo na criação do MDT. Na base MDS não se observou depressões relacionadas a copas de árvore, mas por outro lado houve consequências da presença dos maciços florestais em encostas funcionando como barreiras virtuais, no processo de preenchimento por diferença de MDE, com o uso de ferramentas de restituição hidrológica. Aparentemente isso poderia levar à impressão de que o uso de uma base ou de outra implicaria apenas na substituição de problemas, ou seja, ou ocorreria falsas depressões relativas a copas de árvore, como na base de MDT ou ocorreriam depressões espúrias relativas à borda da vegetação, como na base MDS.

Tabela 11: Resultados da análise visual dos objetos oriundos do MDT e MDS.

| MDT (K3x5 e Perímetro/Área) | | | MDS (Perímetro/Área) | | |
|-----------------------------|------------|---------------|----------------------|------------|---------------|
| Negativo | | | Negativo | | |
| Barragem | 25 | 2,68% | Barragem | 39 | 5,34% |
| Estrada | 10 | 1,07% | Estrada | 19 | 2,60% |
| Copa | 268 | 28,72% | Copa | 0 | 0,00% |
| Borda | 93 | 9,97% | Borda | 331 | 45,34% |
| Drenagem | 256 | 27,44% | Drenagem | 143 | 19,59% |
| Parcial | 652 | 69,88% | Parcial | 532 | 72,88% |
| Positivo | | | Positivo | | |
| Baixio | 146 | 15,65% | Baixio | 77 | 10,55% |
| Suspeita | 66 | 7,07% | Suspeita | 61 | 8,36% |
| Provável | 25 | 2,68% | Provável | 23 | 3,15% |
| Dolina | 44 | 4,72% | Dolina | 37 | 5,07% |
| Parcial | 281 | 30,12% | Parcial | 198 | 27,12% |
| Total | 933 | 100% | Total | 730 | 100% |

Entretanto, a análise dos resultados positivos, que é o que definitivamente interessa ao se considerar o objetivo de detectar dolinas, revelou dados interessantes. Ambas as bases analisadas resultaram em quantitativos relativos similares de objetos suspeitos ou prováveis, variando de 7-8% no primeiro caso e cerca de 3% no segundo. Os polígonos associados a dolinas identificadas em campo também orbitaram próximo de 5% dos totais em ambas as bases. Entretanto, ao contrário do esperado, o número de baixios foi maior para a base MDT que a base MDS. Como tais depressões ocorrem geralmente em matas densas, acreditava-se que o processamento de nivelamento por interpolação na criação do MDT eliminasse tais áreas depressivas de forma mais generalizada. É possível que isso se deva a existência de pronunciados gradientes internos a essas áreas florestais, tornando válida a decisão de manter os baixios como positivos, para futura checagem em campo.

Essa análise das duas bases foi pensada, por precaução, para que houvesse ainda mais redundância e garantisse melhor detecção de possíveis dolinas para a área de estudo. A inspeção das bases em separado garantiu que se obtivesse os quantitativos adicionais, não expressos claramente na tabela anterior pela equivalência de objetos. Considerando a base MDT como principal e MDS acessória, pode-se observar que os quantitativos de objetos positivos acrescidos pela última são significativos, inclusive com a criação de 3 objetos relacionados a dolinas de campo que não haviam sido detectadas na base MDT (tabela 12). O acréscimo de mais de 43% (122) no total de positivos pela base MDS revela que a análise conjunta dos MDE's se mostra produtiva, indicando uma complementariedade necessária para este tipo de trabalho.

Tabela 12: Quantidades de positivos da base MDT e a quantidade acrescida pela análise do MDS.

| Positivos | MDT | MDS | Parciais |
|---------------|------------|------------|------------|
| Baixio | 146 | 61 | 207 |
| Suspeita | 66 | 46 | 112 |
| Provável | 25 | 12 | 37 |
| Dolina | 44 | 3 | 47 |
| Totais | 281 | 122 | 403 |

Os polígonos ligados a dolinas (47) relativos a pontos verificados em campo (100) nem sempre se referem a apenas uma depressão, visto que a metodologia por preenchimento tende a englobar dolinas de ordem inferior em depressões compostas. Além disso, identificou-se dolinas em campo não detectada por nenhuma base de dados (22). Para garantir uma melhor representação da distribuição de dolinas verdadeiras na área juntamente com as possíveis dolinas optou-se pela transformação dos polígonos em pontos e a substituição daqueles relacionados a dolinas (47) pelas de fato coletadas na área (100). Com isso os 403 objetos originais (tabela 12) geraram 456 pontos, entre baixios, suspeitas, prováveis e dolinas, como pode ser observado no mapa a seguir (Figura 11-A). Essa medida evitou que na análise de densidade, por exemplo, uma grande depressão composta gerasse apenas um ponto. O mapa de densidade prévia da área (Figura 11-B) foi elaborado com peso inferior aos baixios (1) enquanto os tipos dolinas, prováveis e suspeitas foi dado um peso ligeiramente superior (2). Além dos baixios serem maioria, o que aumentaria a densidade, também podem não representar de fato a existência de dolinas, apenas indicando uma potencialidade.

A análise dos mapas apresentados acima (Figura 11 A e B) mostra primeiramente que nas partes mais altas do relevo, onde predominam sedimentos associados ao Grupo Urucuia, de fato não ocorrem dolinas e objetos possíveis. Há uma maior densidade junto às incisões de drenagem, especialmente acentuada de jusante a montante em direção a nordeste. No bloco oeste-sudoeste, setores mais baixos, há uma maior dispersão de ocorrências, muito ligadas a existência de baixios. Essa condição parece se coadunar com a ideia de maior dolinamento nos pontos onde os carbonatos começam a serem expostos (Figura 10), indicando justamente a captura de drenagens superficiais para sistemas subterrâneos que se desenvolvem na área de forma simultânea e muitas vezes pouco interdependentes (carste subjacente). Ou seja, os dolinamentos ocorrem quando as superfícies associadas aos sedimentos siliciclásticos do Urucuia se tornam pouco espessas, o suficiente para haver a conexão e a formação de depressões. Neste caso não se trata de processos de liquefação do material de cobertura por processos de inundação junto a canais ou variação do nível do aquífero, como alguns trabalhos em carste coberto apontaram (CARVALHO JUNIOR et al., 2014; CAHALAN e MILEWSKI, 2018), mas sim a interconexão da erosão superficial acentuada pelo desnível com estruturas já bem desenvolvidas no eipicarste ou mesmo ocorrência de cavernas.

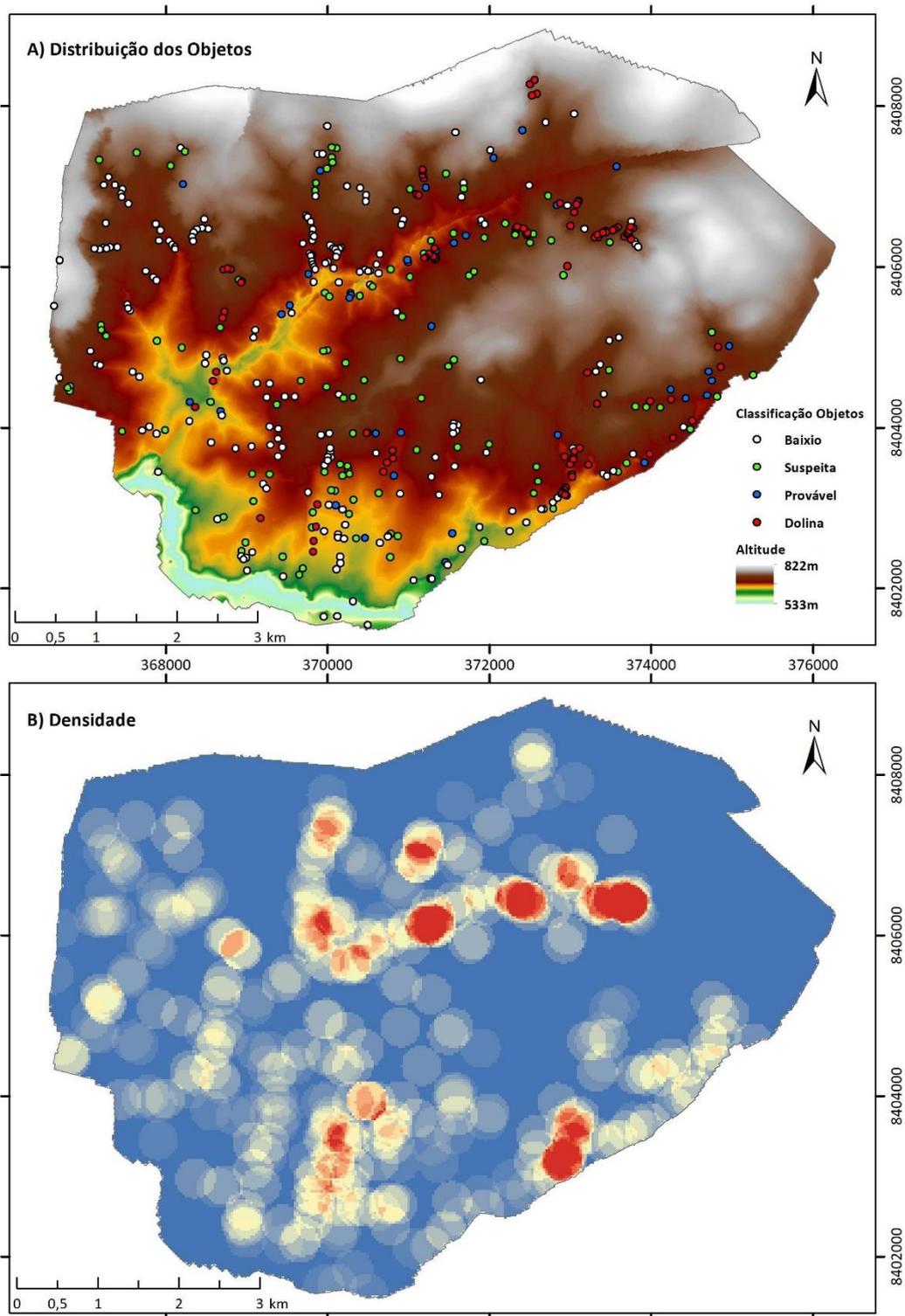


Figura 11: Em A, distribuição dos objetos e sua respectiva classificação, em que é possível perceber uma maior ocorrência junto às incisões da drenagem. Em B, a densidade de todos os objetos possíveis (point density), considerando peso ligeiramente inferior para os baixios. Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.

Ao se considerar apenas as dolinas de campo e os objetos suspeitos e prováveis (249 ao total), sem a inclusão dos baixios, tem-se uma densidade para a área de 5,03/km², bastante significativa se considerados outros trabalhos no Brasil. Bem inferior ao ponto mais denso da área já levantado, na região da Gruna da Tarimba, com uma densidade relativa de 37/km² (FERREIRA

e UAGODA, 2019-B), mas comparativamente melhor que 86% dos trabalhos analisados no país (FERREIRA e UAGODA, 2020-A). Obviamente que a parte das dolinas possíveis identificadas remotamente nesse modelo apresentado requer confirmação, mas considerando que ainda vão ser checados os baixios (não incluídos nessa densidade) e que certamente muitos dos objetos possíveis incluem dolinas de menor ordem interna, espera-se que esta estimativa esteja de fato compatível ou subdimensionada com a presente área cárstica.

Um mapa de densidade considerando essa análise, sem baixios, foi construído (Figura 12-A) e pode ser comparado com um outro (Figura 12-B) relativo apenas aos baixios e os objetos possíveis, todos ainda não confirmados (sem dolinas). Essa comparação mostra as áreas onde há maior dolinamento ou indícios fortes de sua ocorrência versus áreas onde a prospecção por dolinas deve ser priorizada. Ambos os mapas servem como indicativos indiretos da possibilidade de ocorrência de cavernas, e provavelmente, das áreas de maior carstificação da região analisada.

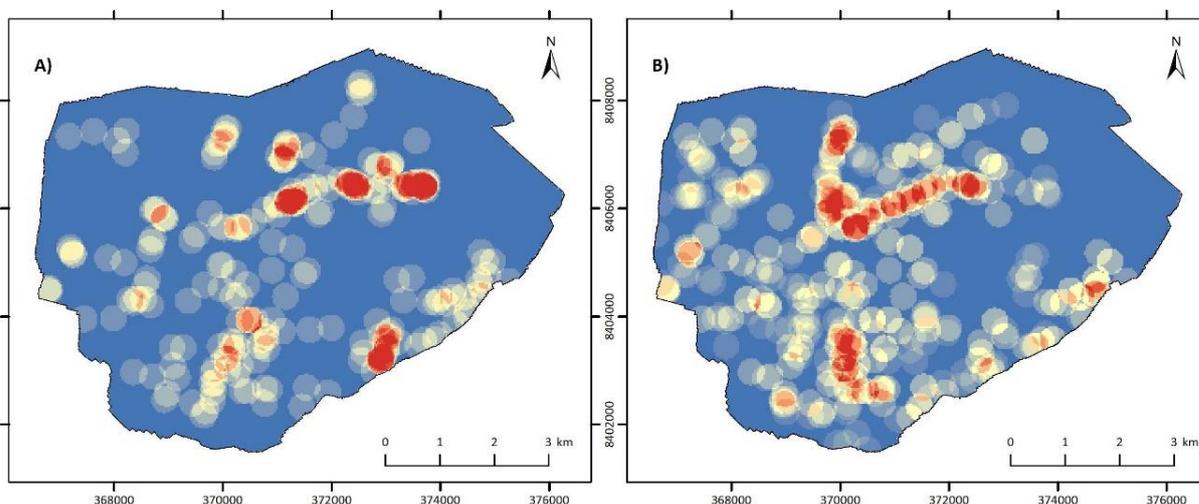


Figura 12: Em A observa-se a densidade gerada sem os baixios, considerando, portanto, somente as dolinas de campo e os objetos mais prováveis e suspeitos. Ao lado, em B, retirou-se as dolinas da análise, mantendo baixios (peso 1) suspeitos (peso 2) e prováveis (peso 3). Representa, portanto, a potencialidade para prospecção. Sistema de projeção UTM 23S, sistema de referência SIRGAS 2000.

A comparação com trabalhos desenvolvidos em diversas partes do mundo, entretanto, mostra que a densidade prévia alcançada para a área de estudo ainda é bem inferior à grande maioria das regiões estudadas (Tabela 13). Há que se contrapor, porém, à larga utilização de dados LiDAR ou outras bases de boa resolução. Alguns dos levantamentos com maiores resultados foram realizados em áreas muito pequenas ou em regiões cársticas importantes da Europa, por exemplo (Eslovênia, Itália, Áustria, Hungria). A densidade de 5/km² alcançada neste estudo, onde ocorre a maior caverna do estado de Goiás é compatível, porém, com a alcançada na região da maior caverna do mundo (Mammoth Cave) onde Wall et al. (2016) realizaram a detecção com dados LiDAR. Resultados equivalentes ainda são observados em Ghizhou na China (CHEN et al., 2018), em parte da Eslováquia (GESSERT, 2016), na Geórgia e na Flórida nos Estados Unidos (HYATT e JACOBS, 1996; DENIZMAN, 2003). A região das nascentes do Rio Vermelho apresentou cinco vezes mais dolinas por área que o recente mapeamento que Auler (2020) apresentou para a região cárstica de Lagoa Santa-MG. É sabido, porém, que mapeamentos de detalhe em pequena área apontaram densidades superiores a 18/km² na mesma região (PILO, 1998).

Tabela 13: Densidades de dolinas e bases de dados em trabalhos de mapeamento no mundo. Dados coletados com as informações de tamanho das áreas de estudo, mapas apresentados e número total de dolinas identificadas.

| Região | Dolinas/km ² | Base principal | Fonte |
|--|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| Dobrava, bacia do Ljubljana (Eslovênia) | 238,54 | LiDAR 1m | Čeru et al. (2017) |
| Poljšica, bacia do Ljubljana (Eslovênia) | 235,98 | LiDAR 1m | Čeru et al. (2017) |
| Maciço Hochschwab (Áustria) | 122 | Ortofoto 1:5.000 e campo | Plan e Decker (2006) |
| Colina Wildoner, bacia do Styrian (Áustria) | 109,23 | LiDAR 1m | Bauer (2015) |
| Costa oeste do Mar Morto (Israel), evaporitos | 66,66 | InSar e LiDAR | Yechieli et al. (2016) |
| Maciço do Sul (Nova Caledônia); lateritas/ultramáficas | 58,11 | LiDAR 1m | Jeanpert et al. (2016) |
| Podbrezje, bacia do Ljubljana (Eslovênia) | 54,96 | LiDAR 1m | Čeru et al. (2017) |
| Candaglia Plateau (Itália) | 51 | Mapa topo.1:5.000 | Bondezan et al. (1992) |
| Montanhas Biokovo (Croácia) | 44 | MDE 10m (Mapa topo.1:25.000) | Telbisz et al. (2009) |
| Hrpelje-Kozina e Divača, Kras Plateau (Eslovênia) | 42 - 59 | Mapa topo.1:5.000 | Kovačič e Ravbar (2013) |
| Leskova dolina (Eslovênia) | 40,2 | LiDAR 1m | Kobal et al. (2015) |
| Borgo Grotta Gigante (Itália) | 40 | Mapa topo.1:5.000 | Bondezan et al. (1992) |
| Montello (Itália) | 31 | Mapa topo.1:5.000 | Bondezan et al. (1992) |
| Norte do Vale de Shenandoah, Virgínia (EUA) | 24,21 | LiDAR 1m | Doctor e Young (2013) |
| Rio Flint, Dougherty, Geórgia (EUA) 183km ² | 18,64 | LiDAR 1m | Cahalan e Milewski (2018) |
| Apalachicola National Forest, Flórida (EUA) | 14,85 | LiDAR 1m | Wall et al. (2017) |
| Montanhas Owl, leste do Texas (EUA) | 14,65 | LiDAR 1m | Faulkner et al. (2013) |
| Carste de Aggtelek (Hungria) | 13,6-15,5 | LiDAR 2,5m | Telbisz et al. (2016) |
| Yucatán (México) | 12,32 | Mapa topo.1:50.000 | Aguilar et al. (2016) |
| Sierra Gorda, Granada e Málaga (Espanha) | 12,3 | MDE 5m | Pardo-Igúzquiza et al. (2016) |
| Vale do Raša, Komen (Eslovênia) | 11,83-39,96 | MDT 3m | Obu e Podobinikar (2013) |
| Montanhas Taurus (Turquia) | 10,62 | Mapa topo.1:25.000 | Öztürk et al. (2018) |
| Bacia do Sivas (Turquia); evaporitos | 10,22 | Mapa topo.1:25.000 | Keskin e Yilmaz (2016) |
| Cárpatos ocidentais (Eslováquia) | 9,91 | LiDAR 5m | Hofierka et al. (2018) |
| Barbarano del Capo, península de Salento (Itália) | 8,1-11,87 | Foto aérea e campo | Pepe e Parise (2014) |
| Condado de Oldham, Kentucky (EUA) | 8,06 | LiDAR 1,5m | Zhu e Pierskalla (2016) |
| Nixa, Missouri (EUA) | 7,38 | LiDAR 1m | Miao et al. (2013) |
| Baixo Rio Suwannee, Flórida (EUA) | 6,07 | Mapa topo.1:24.000 | Denizman (2003) |
| Planaltos Jasov e Zádiel (Eslováquia) | 6 | Mapa topo.1:10.000 | Gessert (2016) |
| Mammoth Cave National Park, Kentucky (EUA) | 5,1 | LiDAR 2m | Wall et al. (2017) |
| Nascentes do Rio Vermelho, Mambai (Brasil) | 5,03 | MDE VANT 0,32m | Ferreira e Uagoda (2020) |
| Rio Flint, Dougherty, Geórgia (EUA) 71km ² | 4,39 | Trabalho de campo | Hyatt e Jacobs (1996) |
| Condado de Zhijin, província de Guizhou (China) | 4,03-5,06 | MDE 3m (mapa topo.1:10.000) | Chen et al. (2018) |
| Oólitos na região de Miami (EUA) | 2,97 | LiDAR 1,16m | Harris et al. (2018) |
| Bacia do Floyds Fork, Kentucky (EUA) | 2,69 | LiDAR 1,5m | Zhu et al. (2014) |
| Sierra de las Nieves, Málaga (Espanha) | 2,55 | MDE 5m (fotos aéreas) | Pardo-Igúzquiza et al. (2013) |
| Fillmore, sudeste de Minnesota (EUA) | 2,37 | LiDAR 1m | Wu et al. (2016) |
| Condado de Pinellas, Flórida (EUA) | 2,09 | LiDAR 2,13m | Seale et al. (2008) |
| Montanhas Ida, Creta (Grécia) | 1,78 | SRTM 90m e ASTER 15m | Siart et al. (2009) |
| Kentucky (EUA) *55% do estado | 1,76 | Mapa topo.1:24.000 | Florea (2005) |
| Serra do Ramalho e Correntina-BA (Brasil) | 1,46 | MDE VANT | Anastácio et al. (2019) |
| Carste de Lagoa Santa (Brasil) | 1 | Imagens Google Earth | Auler (2020) |
| Minnesota, 5 condados (EUA) | 0,15-4,82 | Mapa topo. (intervalo 15m) | Gao et al. (2005) |

- Comparação dos resultados com outras detecções realizadas na área

O trabalho executado por Ferreira e Uagoda (2020-C) também processou objetos e os analisou visualmente (imagens Google Earth) na mesma área, porém com bases de menor resolução (ALOS-PALSAR-12,5m e SRTM-30m). Foram 95 objetos totais na área (50 ALOS e 45 SRTM) sendo 23 objetos confirmados naquele trabalho como possíveis dolinas, em geral grandes feições (nunca menor que 3.750m²). No presente estudo foram avaliados visualmente ao total 1.633 objetos (933+730), resultando em 196 positivos, entre prováveis, suspeitas e dolinas, sem considerar os baixios. Apesar da grande quantidade de objetos positivos obtidos neste trabalho se comparado ao trabalho de Ferreira e Uagoda (2020-C), principalmente em função da maior resolução, as taxas entre o total de objetos avaliados e aqueles considerados

positivos são bem diferentes, numa relação 12% de confirmações (VANT) contra 24,2% (ALOS/SRTM).

Entretanto, dois objetos considerados possíveis da base ALOS/SRTM não geraram objetos correlatos na análise dos dados VANT, sendo provavelmente falsos positivos. Por outro lado, cinco objetos classificados como não dolinas naquele trabalho tiveram equivalentes de posição e formato classificados como provável (2) suspeita (1) e até mesmo dolina (2) neste trabalho com dados VANT (falsos negativos). Ainda houve cinco objetos ALOS/SRTM dados como negativos que coincidiam com objetos classificados como baixios neste trabalho. Tais desacertos entre as análises se deve a dificuldade de validar objetos gerados com bases de menor resolução e uso de imagens não tão nítidas como as do ortofotomosaico utilizado.

Tudo isso demonstra que bases de dados de maior resolução geram exponencialmente maiores quantidades de objetos, de trabalho, mas também de resultados positivos, aumentando por exemplo as densidades totais, como observado em diversos trabalhos (WU et al., 2016; WALL et al., 2017; CHEN et al., 2018). O trabalho com ALOS/SRTM teve a menor densidade ($0,059/\text{km}^2$), porque trabalhou com uma área extremamente extensa, de 3.923km^2 , com MDE's de baixa resolução. Por outro lado, o trabalho na área da Gruna da Tarimba (FERREIRA; UAGODA, 2019), em pouco mais de meio quilometro quadrado, teve resultados de densidade muito superior ao realizado no trabalho atual (37km^2 contra $5,03/\text{Km}^2$), mostrando que, de fato o tamanho da área e as bases de dados influenciam diretamente sobre tais resultados (BAUER, 2015). A análise na microrregião da Tarimba, por exemplo, gerou 675% de falsos positivos para uma taxa de acerto de 89,5%, demonstrando os efeitos resolução versus tamanho dos recortes espaciais de análise.

Conclusões

O desafio na utilização de modelos digitais construídos a partir de dados VANT, de pequeno tamanho (comercial) e com câmera padrão (visível) está expresso nas inúmeras rotinas empregadas neste trabalho, que resultou em uma base ainda carente de confirmação. Ficou comprovado que é possível detectar dolinas verdadeiras com os produtos cartográficos avaliados, que foram construídos dentro das limitações que se impuseram, desde que assumidas algumas perdas (22% de falsos negativos contra 78% de positivos verdadeiros para dados de campo). Vale lembrar que 85% das dolinas da amostra de campo possuíam matas e mesmo assim obteve-se polígonos associados a 78 das 100 vistoriadas.

Os erros de omissão se devem certamente pelas limitações do sensor utilizado, incapaz de detectar corretamente o nível do solo sob a vegetação, ao contrário das possibilidades geradas por dados LiDAR, por exemplo. Mas assim mesmo o modelo adotado se mostra efetivo dentro de um contexto de baixos custos empregados e a indicação de áreas promissoras para confirmação em campo, reduzindo o tempo nessa atividade. Se comparado com uma análise de pares estereoscópicos tradicionais, avalia-se que apesar do grande volume de processamentos e objetos resultantes, o método empregado dá maior direcionamento para a avaliação visual se comparada a uma busca aleatória, que demandaria muito mais tempo e trabalho. Isso sem dúvida reduz significativamente a subjetividade de uma análise puramente visual. A delimitação automática dos objetos no método de extravasamento, apesar de não ser considerada ideal para muitas aplicações, é certamente menos subjetiva, podendo ser replicada sempre sem alterações de formato. A delimitação visual, porém, pode ser mais adequada para

fins morfométricos, especialmente quando utilizadas as bases MDS e MDT para detecção, que geram objetos em formatos diferentes.

Outro fato que restou compreendido neste trabalho é da necessidade de utilização conjugada dos produtos cartográficos produzidos, tanto MDT, ortofotomosaicos, relevo sombreado e, sobretudo, do MDS. As interferências nos produtos mais primitivos, gerados pelos aplicativos utilizados, tendem a eclipsar informações ou mesmo deturpá-las. Tais interferências podem ser utilizadas desde que acompanhadas de confirmações paralelas, em abordagens redundantes. O objetivo de detecção, porém, foi alcançado e os produtos gerados serão úteis para referenciar o planejamento de uso da Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho, em uma das suas áreas de maior importância, considerando a presença de grandes sistemas espeleológicos a uma frente de intensa carstificação. A realização de novos sobrevoos na área é uma possibilidade visando ampliar essa análise conforme a necessidade, em pontos inacessíveis ou de menor conhecimento e locais de maior pressão do ponto de vista ambiental.

Referências bibliográficas

AGUILAR, Y., BAUTISTA, F., MENDOZA, M. E., FRAUSTO, O., IHL, T. Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 78, n. 2, p. 51–60, 2016.

ANASTÁCIO, E. M.; MAGALDI, T. T.; RODRIGUES, L. S.; VASCONCELOS, R. M.; BARCELLOS, R. S.; ANGARTEN, N. B. O.; JESUS, C. M.; TAGLIARI, P. D. Detecção semi-automática de dolinas ao longo da EF 334/FIOL utilizando imagens drone de alta resolução. *In*: ZAMPAULO, R. A. (Org.). **Congresso Brasileiro de Espeleologia**, 35. Campinas: SBE, 2019, p. 300–305.

AULER, A. S. Karst Landforms in the Lagoa Santa Area. *In*: AULER, A. S.; PESSOA, P. (Orgs.). **Lagoa Santa Karst: Brazil's Iconic Karst Region**. Switzerland: Springer, 2020. P. 109-134.

BAUER, C. Geomorphology Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data. **Geomorphology**, v. 250, p. 78–88, 2015. BONDEZAN et al., 1992.

BONDESAN, A.; MENEGHEL, M.; SAURO, U. Morphometric analysis of dolines. **International Journal of Speleology**, v. 21, p. 1–55, 1992.

CAHALAN, M. D.; MILEWSKI, A. M. Sinkhole formation mechanisms and geostatistical-based prediction analysis in a mantled karst terrain. **Catena**, v. 165, p. 333–344, 2018.

CALLIGARIS, C.; DEVOTO, S.; ZINI, L. Evaporite sinkholes of the Friuli Venezia Giulia region (NE Italy). **Journal of Maps**, v. 13, n. 2, p. 406–414, 2017.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GILLESPIE, A. R.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; SILVA, N. C. Karst depression detection using ASTER, ALOS/PRISM and SRTM-derived digital elevation models in the Bambuí Group, Brazil. **Remote Sensing**, v. 6, p. 330–351, 2014.

ČERU, T.; ŠEGINA, E.; GOSAR, A. Geomorphological dating of pleistocene conglomerates in central Slovenia based on spatial analyses of dolines using LiDAR and Ground Penetrating Radar. **Remote Sensing**, v. 9, p. 1213, 2017.

CHEN, H.; OGUCHI, T.; WU, P. Morphometric analysis of sinkholes using a semi-automatic approach in Zhijin County, China. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 15, 2018.

DAY, M. The morphology and hydrology of some Jamaican karst depressions. **Earth Surface Processes**, v. 1, p. 111–129, 1976.

DENIZMAN, C. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwanee River basin, Florida. **Journal of cave and karst studies**, v. 65, n. 1, p. 29–35, 2003.

DOCTOR, D. H.; YOUNG, J. A. An evaluation of automated GIS tools for delineating karst sinkholes and closed depressions from 1-meter LiDAR-derived digital elevation data. *In*: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 449–458.

FAULKNER, M. G. S.; STAFFORD, K. W.; BRYANT, A. W. Delineation and classification of karst depressions Using LIDAR: Fort Hood Military Installation, Texas. *In*: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 459–467.

FLOREA, L. J. Using State-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structure. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 67, n. 2, p. 120–124, 2005.

FERREIRA, C. F. Fragilidades e impactos ambientais no carste e nas cavernas. *In*: CRUZ, J. B.; PILÓ, L. B. (Orgs.). **Espeleologia e Licenciamento Ambiental**. Brasília: ICMBio, 2019, p. 167–216.

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. Tipologias do carste e classificações de dolinas: uma revisão. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 70, p. 519–537, 2019-A.

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. O uso de veículo aéreo não tripulado - VANT para construção de modelos digitais de terreno – MDT e identificação de dolinas na área da gruna da Tarimba-GO. *In*: ZAMPAULO, R. A. (Org.). **Congresso Brasileiro de Espeleologia, 35**. Campinas: SBE, 2019, p. 52–62.

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. Um panorama sobre mapeamentos de dolinas no Brasil, feições elementares do carste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.13, n. 1, 2020-A. No prelo

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. Desafios no mapeamento de dolinas e as possibilidades do uso de modelos digitais de elevação – MDE's: uma revisão metodológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 2020-B. No prelo.

FERREIRA, C. F.; UAGODA, R. E. S. Detecção de dolinas através de Modelos Digitais de Elevação - MDE's e imagens de satélite na região da APA Nascentes do Rio Vermelho e Bacia do Rio Corrente-GO. Não submetido, 2020-C.

- FILIN, S.; BARUCH, A. Detection of Sinkhole Hazards using Airborne Laser Scanning Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 76, n. 5, p. 577–587, 2010.
- FORD, D. Jovan Cvijić and the founding of karst geomorphology. **Environmental Geology**, v. 51, n. 5, p. 675–684, 2007.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. Second ed. Chichester: Wiley, 2007. 562p.
- GAO, Y.; ALEXANDER JR, E. C.; BARNES, R. J. Karst database implementation in Minnesota: analysis of sinkhole distribution. **Environmental Geology**, v. 47, p. 1083–1098, 2005.
- GESSERT, A. Geomorphology of the Slovak Karst (Eastern Part). **Journal of Maps**, v. 12, n. 1, p. 285–288, 2016.
- GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. A primer of ecological statistics. Second ed. Massachusetts: Sinauer Associations, 2013. 614p.
- HARRIS, P. M.; PURKIS, S.; REYES, B. Statistical pattern analysis of surficial karst in the Pleistocene Miami oolite of South Florida. **Sedimentary Geology**, v. 367, p. 84–95, 2018.
- HOFIERKA, J.; GALLAY, M.; BANDURA, P.; ŠAŠAK, J. Identification of karst sinkholes in a forested karst landscape using airborne laser scanning data and water flow analysis. **Geomorphology**, v. 308, p. 265–277, 2018.
- HYATT, J. A.; JACOBS, P. M. Distribution and morphology of sinkholes triggered by flooding following Tropical Storm Alberto at Albany, Georgia, USA. **Geomorphology**, v. 17, p. 305–316, 1996.
- HUNG, M. N. W. B.; SAMPAIO, T. V. M.; SCHULTZ, G. B.; SIEFERT, C. A. C. LANGE, D. R.; MARANGON, F. H. S.; SANTOS, I. Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa. **Ra'e Ga**, v. 43, p. 215–231, 2018.
- JEANPERT, J.; GENTHON, P.; MAURIZOT, P.; FOLIO, J.; VENDÉ-LECLERC, M.; SÉRINO, J.; JOIN, J.; ISEPPI, M. Morphology and distribution of dolines on ultramafic rocks from airborne LiDAR data: the case of southern Grande Terre in New Caledonia (SW Pacific). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 41, p. 1854–1868, 2016.
- KARMANN, I. **Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. 274p. DOI:10.11606/T.44.1994.tde-22042013-163755.
- KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. Factoextra: extract and visualize the results of multivariate data analyses R package version 1.0.6, 2019. Disponível em <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>
- KESKIN, I.; YILMAZ, I. Morphometric and geological features of karstic depressions in gypsum (Sivas, Turkey). **Environmental Earth Science**, v. 75, n. 1040, p. 1–14, 2016.

KLIMCHOUK, A.B.; FORD, D.C. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. In: KLIMCHOUK, A.B.; FORD, D.C.; PALMER, A.N.; DREYBRODT, W. (editors) **Speleogenesis: evolution of karst aquifers**. Huntsville, Alabama: National Speleological Society, 2000. p. 45–53

KOBAL, M.; BERTONCELJ, I.; PIROTTI, F.; DAKSKOBLER, I.; KUTNAR, L. Using Lidar Data to Analyse Sinkhole Characteristics Relevant for Understory Vegetation under Forest Cover — Case Study of a High Karst Area in the Dinaric Mountains. **Plos One**, v. 10, n. 3, p. 1–19, 2015.

KOVAČIČ, G.; RAVBAR, N. Analysis of human induced changes in a karst landscape — the filling of dolines in the Kras plateau, Slovenia. **Science of the Total Environment journal**, v. 447, p. 143–151, 2013.

LOBO, H. A. S.; BICHUETTE, M. E.; HARDT, R.; MARTINELLI, R. S.; BRUNO FILHO, F. G. GALLÃO, J. E.; FERNANDES, C. S.; RIZZATO, P. P.; SCHMONSKY, D. M.; CALVO, E. M. Caracterização ambiental preliminar e proposta de conservação do sistema cárstico da Gruna da Tarimba – Mambai, GO. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (Orgs.). **Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33**. Campinas: SBE, 2015, p. 281–290.

MAROTTA, G. S.; CICERELLI, R. E.; ROIG, H. Avaliação posicional de Modelo Digital de Superfície derivado de câmara de pequeno formato. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 67/7, p. 1467–1477, 2015.

MIAO, X.; QIU, X.; WU, S.; LUO, J.; GOUZIE, D. R.; XIE, H. Developing efficient procedures for automated sinkhole extraction from Lidar DEMs. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 79, n. 6, p. 545–554, 2013.

OBU, J.; PODOBNIKAR, T. Algoritem za prepoznavanje kraških kotanj na podlagi digitalnega modela reliefa. **Geodetski Vestnik**, v. 57, n. 2, p. 260–270, 2013.

ÖZTÜRK, M. Z.; ŞENER, M. F.; ŞENER, M.; ŞİMŞEK, M. Structural controls on distribution of dolines on Mount Anamas (Taurus Mountains, Turkey). **Geomorphology**, v. 317, p. 107–116, 2018.

ÖZTÜRK, M. Z.; ŞİMŞEK, M.; ŞENER, M. F.; UTLU, M. GIS based analysis of doline density on Taurus Mountains, Turkey. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, p. 536, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12665-018-7717-7>>.

OLIVEIRA, D. R.; CICERELLI, R. E.; ALMEIDA, T.; MAROTTA, G. S. A. Geração de modelo digital do terreno a partir de imagens obtidas por veículo aéreo não tripulado. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69/6, p. 1143–1151, 2017.

PARDO-IGÚZQUIZA, E.; DURÁN, J. J.; DOWD, P. A. Automatic detection and delineation of karst terrain depressions and its application in geomorphological mapping and morphometric analysis. **Acta Carsologica**, v. 42/1, p. 17–24, 2013.

PARDO-IGÚZQUIZA, E.; PULIDO-BOSCH, A.; LÓPEZ-CHICANO, M.; DURÁN, J. J. Morphometric analysis of karst depressions on a Mediterranean karst massif. **Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography**, v. 98, n. 3, p. 247–263, 2016.

PEPE, M.; PARISE, M. Structural control on development of karst landscape in the Salento Peninsula (Apulia , SE Italy). **Acta Carsologica**, v. 43, n. 1, p. 101–114, 2014.

PILÓ, L. B. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú - carste de Lagoa Santa, MG**. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998. 268p.

PLAN, L.; DECKER, K. Quantitative karst morphology of the Hochschwab plateau, Eastern Alps, Austria. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 147, p. 29–54, 2006.

RAHIMI, M.; ALEXANDER, E. C. Locating sinkholes in LIDAR coverage of a glacio-fluvial karst, Winona County, MN. *In*: LAND, L.; DOCTOR, D. H.; STEPHENSON, J. B. (Orgs.). **Sinkholes and the engineering and environmental impacts of Karst: proceedings of the thirteenth multidisciplinary conference**. Carlsbad, New Mexico: National Cave and Karst Research Institute, 2013, p. 469–481.

SAURO, U. Closed depressions in karst areas. *In*: White, W. B.; Culver, D.C. (Eds.), **Encyclopedia of Caves**. Second Ed. New York: Elsevier, 2012. p.140-155

SEALE, L. D.; FLOREA, L. J.; VACHER, H. L.; BRINKMANN, R. Using ALSM to map sinkholes in the urbanized covered karst of Pinellas County, Florida - 1, methodological considerations. **Environmental Geology**, v. 54, n. 5, p. 995–1005, 2008.

SIART, C.; BUBENZER, O.; EITEL, B. Geomorphology combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. **Geomorphology**, v. 112, n. 1–2, p. 106–121, 2009.

SOPCHAKI, C. H.; PAZ, O. L. S.; GRAÇA, N. L. S. S.; SAMPAIO, T. V. M. Verificação da qualidade de ortomosaicos produzidos a partir de imagens obtidas com aeronave remotamente pilotada sem o uso de pontos de apoio. **Ra'e Ga**, v. 43, p. 200–214, 2018.

TELBISZ, T.; DRAGUŠICA, H.; NAGY, B. Doline morphometric analysis and karst morphology of Biokovo Mt (Croatia) based on field observations and digital terrain analysis. **Hrvatski geografski glasnik**, v. 71, n. 2, p. 5–22, 2009.

TELBISZ, T.; LÁTOS, T.; DEÁK, M.; SZÉKELY, B.; KOMA, Z.; STANDOVÁR, T. The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example. **Acta Carsologica**, v. 45, n. 1, p. 5–48, 2016.

WALL, J.; BOHNENSTIEHL, D. R.; WEGMANN, K. W.; LEVINE, N. S. Morphometric comparisons between automated and manual karst depression inventories in Apalachicola National Forest, Florida, and Mammoth Cave National Park, Kentucky, USA. **Natural Hazards**, v. 85, n. 2, p. 729–749, 2017. WILLIAMS, 1972;

WILLIAMS, P. W. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. **Geological Society of America Bulletin**, v. 83, n. 3, p. 761–796, 1972.

WU, Q.; DENG, C.; CHEN, Z. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. **Geomorphology**, v. 266, p. 1–10, 2016.

YECHIELI, Y.; ABELSON, M.; BAER, G. Sinkhole formation and subsidence along the Dead Sea coast, Israel. **Hydrogeology Journal**, v. 24, n. 3, p. 601–612, 2016.

ZHU, J.; TAYLOR, T. P.; CURRENS, J. C.; CRAWFORD, M. M. Improved karst sinkhole mapping in Kentucky using LiDAR techniques: a pilot study in Floyds Fork Watershed. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 76, n. 3, p. 207–216, 2014.

ZHU, J.; PIERSKALLA, W. P. Applying a weighted random forests method to extract karst sinkholes from LiDAR data. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 343–352, 2016.

5 CONCLUSÃO GERAL

Estudos sobre geomorfologia cárstica são realizados há mais de 125 anos e ainda se mostra um campo de pesquisas muito vasto, com diversas regiões pouco estudadas, sistemas por serem descobertos, especialmente no Brasil, um país de dimensões continentais. Os principais tipos de carste e seus processos eminentemente subsuperficiais foram discutidos no sentido de permitir possíveis enquadramentos e realizar uma atualização dos termos usados. As dolinas, feições consideradas dentre as mais peculiares e próprias destes sistemas, juntamente com as cavernas, despontam como um importante indicador de áreas mais carstificadas e ao mesmo tempo vulneráveis frente a problemas ambientais na superfície. Os principais estudos sobre mapeamentos de dolinas realizados no mundo e no país foram reunidos e discutidos, sobretudo quanto aos aspectos morfométricos e frequência de distribuição dessas feições. Regiões clássicas dos estudos do carste apresentam de fato grandes densidades de dolinas, como nos Alpes Dináricos, inserindo-se países como Croácia, Eslovênia, Áustria e Hungria. Pode-se incluir ainda regiões importantes de estudos deste tipo na Itália e nos Estados Unidos.

No Brasil mapeamentos de dolinas foram especialmente desenvolvidos nas regiões cársticas de Lagoa Santa-MG, do alto vale do Rio Ribeira-SP e da Chapada Diamantina-BA. Outros estudos ocorrerem nas mais variadas localidades e tipos litológicos pelo país. As técnicas mais utilizadas nos trabalhos nacionais para mapeamento envolvem a análise de imagens, normalmente pares estereoscópicos de escala inapropriada e bastante atividade de campo. Mais recentemente, porém, trabalhos sobretudo internacionais se empenharam na detecção de dolinas por meio de Modelos Digitais de Elevação de alta resolução, muitos em abordagens automatizadas, com estratégias de delimitação e filtragens diferenciadas.

O uso dessas técnicas foi testado em diversas escalas na área de estudo desta pesquisa, a região da Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho e a parte alta da bacia do Rio Corrente. A região da Gruna da Tarimba, uma das maiores cavernas do país, apresentou densidade de dolinas equivalentes aos estudos no carste europeu (37/km²), tendo sido realizado, entretanto, numa área bastante reduzida, com forte influência do sistema espeleológico subjacente. Utilizando técnicas automatizadas para detecção de grandes e médias dolinas na área total de estudo (bacia do rio Corrente), por outro lado a densidade encontrada foi irrisória, demonstrando o efeito de diluição na adoção de escalas diferenciadas e uso de bases de baixa resolução espacial. Por fim, o estudo realizado na área de exposição dos carbonatos, parte

central da APA-NRV, com técnicas automatizadas, imagens e MDE's de alta resolução, parece demonstrar os valores mais equilibrados para as áreas carstificadas dessa região, com 5/km².

As análises feitas a partir dos dados de sensoriamento remoto e várias atividades em campo permitiram algumas considerações sobre a dinâmica geomorfológica local. A grande disponibilidade de materiais móveis na superfície, especialmente siliciclásticos, vêm sendo capturados por sistemas cársticos subjacentes, notadamente por meio de depressões e dolinas. Superfícies laterizadas ou com maior espessamento dos pelitos (Fm. Lagoa do Jacaré), suportam de forma diferenciada algumas estruturas do relevo e mesmo drenagens superficiais. A dualidade entre sistemas superficiais e subterrâneos é atestada por capturas de drenagens para sistemas espeleológicos bem complexos, alimentados tanto por fluxos concentrados superficiais (pontos de recarga) como fluxos autogênicos difusos (sedimentos do Grupo Urucuia). As zonas de exumação dos carbonatos em relação aos sedimentos siliciclásticos foram as que apresentaram maiores adensamentos de dolinas, demonstrando que o adelgaçamento dessas coberturas favorece a ocorrência dessas feições de interface e o acesso a sistemas espeleológicos. Essa frente de exumação na APA-NRV se estende de jusante, a partir dos tributários do Rio Vermelho, até montante, formando uma linha de direção SE-NO onde estão concentradas as cavernas e dolinas.

Aspectos interessantes observados nesta pesquisa ainda carecem de maiores estudos, como a presença de grandes depressões sobre a Serra Geral de Goiás, possivelmente as maiores dolinas do país, ou setores de carste poligonal nas proximidades de Alvorada do Norte. A ocorrência de cavernas com grandes volumes de água, drenando áreas relacionadas ao desmonte da Serra Geral poderiam indicar a presença prévia de estruturas cársticas sob os sedimentos do Grupo Urucuia (paleocarste)? Algumas cavernas apresentam feições típicas de desenvolvimento em circunstância de grande preenchimento (paragênese), sucedidas por fase de significativo entalhe vadoso e formação de cânions. Qual a relação dessas tipologias com a disponibilidade de sedimentos em superfície e com o importante rebaixamento do nível de base marcado pelo Rio Vermelho? Tudo isso mostra que a região merece ainda maiores investigações no futuro para a melhor compreensão geomorfológica, com implicações inclusive na gestão de seus recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ANGEL, J. C.; NELSON, D. O.; PANNO, S. V. Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain. **Journal of Cave and Karst Studies**, v. 66, n. 1, p. 9–17, 2004.

CHEREM, L. F. S.; VARAJÃO, C. A. C. O papel da lito-estrutura do carste na morfodinâmica cenozóica da Serra Geral de Goiás (GO/TO/BA): aproximações iniciais. **Revista Geonorte**, v. 10, n. 6, p. 180–184, 2014.

FERRARI, J. A.; KARMANN, I. Comportamento hidrodinâmico de sistemas cársticos na bacia do Rio Betari, município de Iporanga - SP. **Revista do Instituto Geológico**, v. 8, n. 1, p. 1–13, 2008.

GASPAR, M. T. P.; CAMPOS, J. E. G. O sistema aquífero Urucuia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 37(4), p. 1068–1078, 2007.

KLIMCHOUK, A. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. **Acta Carsologica**, v. 44/3, p. 289–313, 2015.

SUPERINTENDÊNCIA DE GEOLOGIA E MINERAÇÃO DA SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO DO ESTADO DE GOIÁS, SGM/SIC; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, CPRM. Mapa Geológico do Estado de Goiás: corte cartográfico 1:250.000. Folha SD23YB-Posse, 2008. Disponível em: <<http://www2.sieg.go.gov.br/post/ver/171324>>. Acesso em: 22 jan. 2018.