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 05/03/2020

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, interestratil 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 descontinuidades 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; Kovačič 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; Kovačič 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	Ceru et al. (2018)
Podbrezje, bacia do Ljubljana (Eslovênia)	54,96	
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 Yılmaz (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 Floyd 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	Bondezan et al. (1992)
Candaglia Plateau (Itália)	51	
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 profusas,

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, 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

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

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 poligonais na região do Ribeira, elas possuem inúmeras dolinas internas, nem sempre detectáveis

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

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/km², 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 “Geomatica”) 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 $1,68/\text{km}^2$, 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 ($0,08 \text{ dolinas}/\text{km}^2$), 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 ($2/\text{km}^2$). 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 descontinuidades estruturais a situação favorece a maior permeabilidade e consequentemente 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
Ferreira, C. F.; Uagoda, R. E. S.

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, Moraes (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; Dc; Pe; Amp; Alt; Cd; Dd; Ic; R; 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		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	gnais; 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
 315

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., Šašak, 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., Bertonecelj, 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.