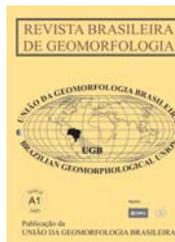




www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 14, nº 1 (2013)



SEDIMENTOS CLÁSTICOS EM SISTEMAS DE CAVERNAS E SUAS CONTRIBUIÇÕES EM ESTUDOS GEOMORFOLÓGICOS: UMA REVISÃO

CAVE CLASTIC SEDIMENTS AND THEIR ROLE ON GEOMORPHOLOGICAL STUDIES: A REVIEW

Fernando Verassani Laureano

PPGG-IGcUSP. Laboratório de Gestão Ambiental – Dep. Ciências Biológicas PUCMinas.
Rua do Rosário 1081 Betim MG - CEP 32604-115.
E-mail: fernandolaureano@pucminas.br

Ivo Karmann

Instituto de Geociências USP – Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental -
Rua do Lago 562 São Paulo SP - CEP 05508-080.
E-mail: ikarmann@usp.br

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:
04/07/2012

Data de Aprovação:
02/05/2013

Palavras-chave:

Cavernas; sedimentos clásticos; Geomorfologia.

Keywords:

Caves; clastic sediments; Geomorphology.

Resumo

Sedimentos detríticos depositados em sistemas de cavernas são relativamente bem protegidos dos processos intempéricos superficiais e, em diversos casos, susceptíveis ao emprego de técnicas de datação. Constituem, pois, objetos de investigação em estudos geomorfológicos e paleoambientais. O artigo apresenta uma revisão de literatura sobre sedimentos clásticos em cavernas: fácies, proveniência e estratigrafia. As fácies sedimentares encontradas na bibliografia consultada são apresentadas conforme sua deposição na zona vadosa, na zona de oscilação do nível d'água e na zona freática. Os principais métodos geocronológicos aplicados a este tipo de depósito (^{14}C , U-Th, Paleomagnetismo e Isótopos Cosmogênicos) são brevemente apresentados no sentido de ressaltar suas potencialidades e limitações em estudos geomorfológicos. São ainda apresentadas as principais contribuições da análise do registro sedimentar cavernícola no âmbito da obtenção de idades para cavernas, da espeleogênese ou do desenvolvimento da porosidade secundária do aquífero cárstico, da quantificação de taxas erosivas e do balizamento cronológico de evolução do relevo.

Abstract

Cave clastic deposits are often well protected from surface weathering processes and in several cases, they can be dated. Furthermore, they are valuable for geomorphic and palaeoenvironmental studies. This paper presents a literature review on cave clastic sediments: facies, provenance and stratigraphy. Sedimentary facies are described as related to their deposition in vadose, water table and phreatic zones. The major geochronological methods (^{14}C , U-Th, Paleomagnetism and Cosmogenic Isotopes) are presented in terms of their potential and limitations on geomorphic investigations. The text also summarizes the role of cave sediments in dating cave systems, speleogenesis and evolving karst porosity analysis, as well as for measuring erosion rates and dating landscape evolution.

Introdução

Cavernas são feições erosivas e assim como todos os demais componentes do relevo tendem a ser destruídas no compasso dos mesmos processos erosivos que as esculpíram. Por outro lado, os vazios que as constituem são sítios propícios para receberem sedimentos e preservá-los dos processos intempéricos superficiais.

Além dos resíduos insolúveis da rocha encaixante e dos clastos provenientes do abatimento de tetos e galerias, os sistemas de condutos recebem injeções de sedimentos fluviais via sumidouros ou pela retro-inundação de rios adjacentes (Figura 1). Recebem também a injeção de coberturas superficiais por juntas e fraturas do epicarste, por descargas pluviais em dolinas, quedas por efeito de tubificação no solo e abatimento de dolinas em superfície (Bosh e White, 2007). A atividade biológica pode também desempenhar um papel importante na geração de detritos no interior de condutos. Grandes acumulações de guano são descritas em cavernas de diversas regiões do planeta sendo função do tamanho da colônia e do tempo em que a comunidade reside na caverna (McFarlane, 2004). Estes depósitos são explorados para uso como fertilizantes ou para fabricação da pólvora, atividade que teve um papel econômico relevante na história econômica do Brasil colonial (Gomes e Piló, 1992).

Uma vez no interior dos condutos, principalmente aqueles associados ao nível d'água, os sedimentos são retrabalhados em ciclos sucessivos de erosão e deposição entre as entradas e as ressurgências do sistema de condutos (Gillieson, 1996; Bosh e White, 2007). O monitoramento da condutividade hidráulica e da carga de sedimentos em surgências cársticas vem mostrando que o padrão de remobilização de detritos em sistemas de cavernas está associado à morfologia

dos condutos, variando de sistema para sistema (Toran *et al.*, 2006). Uma vez depositados, os sedimentos finos movem-se pelos condutos em tempestades ordinárias, mas o movimento de sedimentos mais grossos depende de eventos hidrológicos de alta intensidade e infrequentes, o que faz com que a grande parte do fluxo de sedimentos seja episódico, não linear em relação ao aumento da condutividade, com longos períodos de armazenamento e curtos intervalos de movimento (Herman *et al.*, 2008).

A cronologia dos processos de desnudação continental em rochas carbonáticas aponta para a persistência de sistemas de cavernas no relevo por até 10 milhões de anos sendo então, seus sedimentos, páginas da história do Pleistoceno e parte do Neógeno (Sasowsky, 2007). Uma diversidade de métodos geocronológicos pode ser atualmente empregada para obtenção de idades absolutas em sedimentos de cavernas (Abeyratne *et al.*, 1997; Stock *et al.*, 2005; White, 2007) e conjugados a investigações mineralógicas, geoquímicas, isotópicas e de suas propriedades geofísicas vem proporcionando contribuições no âmbito da evolução de condutos (Martini, 2011; Farrant e Smart, 2011), na determinação de condições ambientais e climáticas vigentes no passado (Moriarty *et al.*, 2000; Wurster *et al.*, 2008; Auler *et al.*, 2009;), na investigação de oscilações do nível do mar (Henguston *et al.*, 2011) e da quantificação das taxas de incisão fluvial e desnudação de relevos (Auler *et al.*, 2002, Antony e Granger, 2007, entre outros). Este artigo apresenta uma revisão de literatura sobre sedimentos clásticos em cavernas: principais fácies, estratigrafia e aspectos geocronológicos. Busca-se compor o estado da arte de suas aplicações no estudo da geomorfologia contemporânea, suprindo uma lacuna na geomorfologia de terrenos cársticos em língua portuguesa.

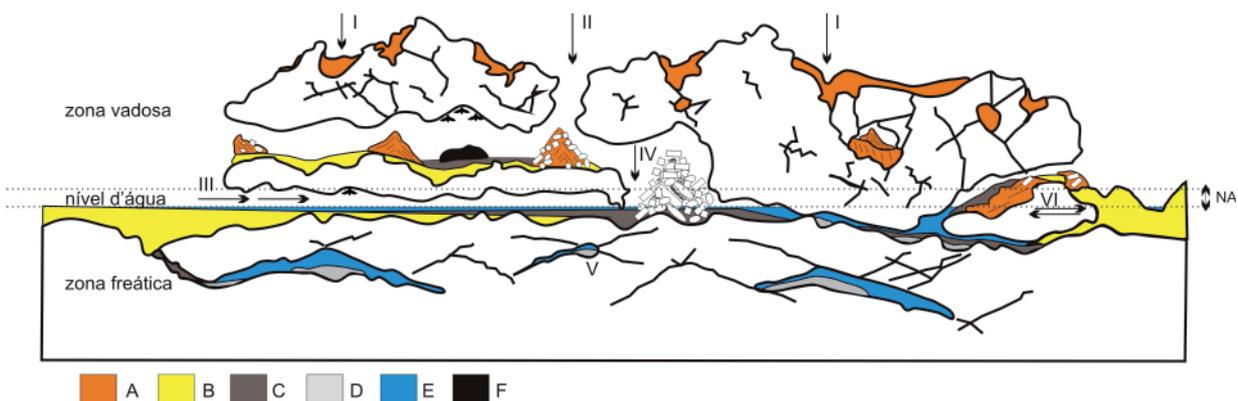


Figura 1 - Sedimentos detríticos em um sistema de caverna. As cores representam tipos de preenchimentos da porosidade secundária: A-material pedogenizado ou proveniente da superfície; B- alúvio; C-lamas lacustres ou epifreáticas; D-resíduo insolúvel; E-água; F-guano e outros depósitos orgânicos. As setas ilustram as principais fontes na injeção de detritos: . I- Fraturas ampliadas do epicarste; II abismos; III sumidouros (bacia hidrográfica superficial); IV abatimentos internos; V rede de galerias inundadas (bacia subterrânea); VI retro-inundação.

Tipos de depósitos e fácies sedimentares

A maioria dos textos dedicados à classificação de sedimentos detríticos de cavernas agrupam os depósitos em dois grandes grupos: autóctones e alóctones, referindo-se respectivamente aos sedimentos provenientes do interior das galerias e aqueles provenientes da superfície, do epicarste ou dos terrenos adjacentes (Ford, 1975; White, 1988; Ford e Williams, 1989; Gillieson, 1996; White, 2007; Fornós *et al.*, 2009). Uma vez que não se encontram atreladas a processos e ambientes deposicionais, tais classificações acabam por demandar subdivisões baseadas em critérios que variam de autor para autor. Gillieson (1996), por exemplo, reagrupa os sedimentos clásticos segundo os principais agentes de transporte, considerando os movidos pela ação da gravidade e aqueles transportados pela ação da água. White (2007) utiliza-se da natureza dos depósitos, distinguindo dentre os detritos alóctones *talus* de entrada, os infiltrados do epicarste, os transportados por cursos d'água, os fluxos de detritos e os depósitos eólicos. Contudo, todos estes sub-tipos podem receber em algum momento de sua história de deposição, contribuições autóctones e alóctones e, portanto, o critério de proveniência parece não sustentar uma boa classificação.

A distinção entre fácies de entrada e fácies de interior é sugerida por Ford e Williams (1989) devido à importância arqueológica da primeira e por sua complexidade estratigráfica. Diversos outros autores agruparam seus resultados em fácies descritivas, as quais são fundamentadas na observação de variações texturais, estruturas sedimentares e da composição química e mineralógica dos sedimentos (Milske *et al.*, 1983; Gillieson, 1986; Springer *et al.*, 1997, entre outros). Contudo, tais classificações acabam por possuir uma conotação local, aplicáveis apenas aos sistemas de caverna estudados, ou melhor, ao contexto no qual estas cavernas se encontram.

Bosch e White (2007) apresentam o modelo de fácies mais realístico para sedimentos depositados em aquíferos cársticos no domínio continental. Fundamentados nos mecanismos de transporte preponderantes em sistemas de condutos, os autores propõem cinco litofácies distinguíveis a partir de sua granulometria e seu grau de seleção, as quais denominam de fácies de canal, talvegue, águas estagnadas (*slackwater*), pântanos (*back-swamp*) e fluxos de detritos (diamictons). Embora este modelo incorpore características sedimentares limitadas na concepção das associações de fácies, elas apresentam uma forte correlação com as características de fluxo vigentes nos sistemas flúvio-cársticos (Hermann *et al.*, 2012). Já no contexto do ambiente costeiro, Hengstum *et al.* (2011) reuniram evidências mineralógicas, geoquímicas e fossilíferas para distinguir fácies sedimentares depositadas nos ambientes vadoso, litorâneo, anquialino e submarino, demonstrando ainda que o nível do mar controla a sedimentação em cavernas neste contexto.

Se por um lado a salinidade da água não parece constituir atributo relevante para deposição de detritos no domínio continental, o controle do nível d'água sobre os processos sedimentares é evidente (Figura 1). Na zona vadosa predominam os processos gravitacionais, mas também são descritos registros associados a processos eólicos (Bull *et al.*, 1989), glaciais (Shroeder e Ford, 1983; Pierre, 1988; Lawson, 1995) e de movimento de massa (Gillieson, 1986). Rios e lagos subterrâneos constituem os principais ambientes de sedimentação na zona de oscilação do nível d'água, onde os detritos são transportados em suas cargas de fundo e em suspensão. Na zona freática os sedimentos são depositados em condutos permanentemente inundados e devido às limitações de acesso (somente por atividades de mergulho) constituem o tipo menos descrito na literatura.

Fácies sedimentares do ambiente vadoso

Os fenômenos de abatimentos de tetos e paredes de galerias são importantes processos na evolução de terrenos cársticos. Variam em forma de pequenas e isoladas acumulações de lascas a grandes pilhas e domos onde podem conter grandes blocos de rocha. Segundo White (1988) os processos geológicos que promovem os abatimentos podem ser a remoção do suporte hidrostático ou rochoso, a expansão do gelo ou outros minerais em fraturas da rocha ou podem ainda ser ativados em passagens verticais ou pelo ataque das águas superficiais. São sedimentos de fácil reconhecimento, mas podem também desempenhar um papel importante na história deposicional de uma caverna, quer favorecendo a geração de detritos no interior das galerias ou mesmo alterando a direção ou as condições de fluxo de água nos condutos.

Talus de entrada ou fácies de entrada são terminologias utilizadas para descrever os sedimentos com baixo grau de seleção e pobremente estratificados que ocorrem onde as passagens subterrâneas interceptam a superfície (White, 1988; Ford e Williams, 1989). Compreendem detritos transportados principalmente pela ação da gravidade, semelhantes a depósitos de vertentes e podem demonstrar diferentes estágios de bioturbação. Kos (2001), analisando depósitos acumulados na base de um abismo na Austrália descreve 6 (seis) fácies associadas a processos gravitacionais ou de retrabalhamento, devido à oscilação do nível d'água na base do abismo. O autor descreve a estruturação de pacotes em pilhas e cones, onde porções internas apresentam relações caóticas de acamamento. Os processos eólicos, fluviais, de inundação ou mesmo glaciais que porventura se desenvolvam nas proximidades da entrada da caverna podem gerar registros sedimentares associados às fácies gravitacionais de entrada. Sancho *et al.* (2004) descrevem também a ocorrência de cinzas vulcânicas neste contexto.

Mas os processos gravitacionais não se restringem às entradas de cavernas (Figura 1). Uma grande quantidade de detritos pode adentrar os sistemas de condutos através das fraturas da rocha ampliadas no epicarste, ou através de drenos verticais. Estes depósitos possuem inicialmente uma configuração cônica no interior das galerias e podem possuir uma granulometria fina quanto se tratam de solos transportados através de fissuras do epicarste, ou podem ser constituídos de sedimentos de granulometria mais grossa quando se tratam de fluxo de detritos que caem por poços verticais (White, 2007). Diversos autores denominaram este tipo de sedimento de “peneirados”, referindo ao efeito de seleção exercido na porosidade secundária do epicarste. Gillieson (1986) foi o primeiro a utilizar o termo *diamictons* para descrever brechas matriz suportadas, mal selecionadas (silte a cascalho) que ocorrem no interior de cavernas existentes nas terras altas da Nova Guiné. Estes sedimentos são produtos de movimentos de massa (fluxos de lama) transportadas das bacias de captação durante regime de chuvas de alta intensidade. Independente do contexto ambiental restrito dos depósitos descritos por Gillieson (1986), Bosh e White (2007) adotaram a denominação genérica de fácies *diamicton* para qualificar depósitos gravitacionais encontrados no interior de condutos. Laureano (1998) descreveu brechas de matriz argilosa com clastos intraformacionais correspondente a fluxos de lama que retrabalharam sedimentos pré-existent na Lapa Doce, uma das cavernas mais visitadas da Chapada Diamantina, no estado da Bahia (Figura 2).

A observação em microscópio eletrônico de varredura do elevado grau de arredondamento de grãos de quartzo encontrados em cavernas da China (Bull *et al.*, 1989) e da Austrália (Darrénougué *et al.*, 2009) levou os autores a interpretar os registros como sendo de origem eólica. Palmer (2007) afirma que o vento e gelo são agentes de transporte de menor importância no contexto dos registros sedimentares em condutos, mesmo porque o gelo parece não se propagar pelas cavernas (White, 1988). Schroeder e Ford (1983), Lawson (1995) e outros autores que descreveram depósitos de cavernas situados no contexto glacial atribuem a contribuição do gelo na geração e aporte por injeção fluvio-glacial dos sedimentos, com posterior retrabalhamento fluvial ou lacustre dos mesmos. Embora o conceito de fácies não esteja presente nestes trabalhos, os autores remetem-se a uma ampla variação textural e de estruturas sedimentares, desde depósitos finos laminados, depósitos arenosos a ciclos sucessivos de brechas grandecrescentes variando de clasto a matriz suportada da base para o topo (Quinif e Maire, 1998).

Fácies sedimentares na zona de oscilação do nível d'água

Embora alguns autores se refiram às cavernas como planícies de inundação subterrâneas, elas se comportam mais como gargantas ou cânions profundos, dado as limitações laterais impostas pelas paredes e teto das galerias (Gillieson, 1996). Há que se considerar também que rios subterrâneos passam regularmente para ambientes freáticos em eventos de inundação, fato que altera o balanço e o fluxo de sedimentos ao longo dos condutos. Uma ampla variação textural (argilas a calhaus) é observada nos sedimentos injetados via sumidouro, a depender das características hidrológicas e geomorfológicas da bacia de captação. As principais estruturas sedimentares reportadas na literatura são, até o presente momento, semelhantes em forma e regime de fluxo àquelas observadas nos depósitos fluviais de superfície, sendo as mais recorrentes estratificações cruzadas, laminações paralelas e onduladas, marcas de onda, estruturas de corte e preenchimento, embriamento de seixos e marcas dendríticas.

Quatro das cinco associação de fácies descritas por Bosh e White (2007) encontram-se claramente dispostas no contexto da zona de oscilação do nível d'água, sendo as fácies de canal e de talvegue relacionadas ao ambiente fluvial enquanto as fácies de águas estagnadas (*slackwater*) estão relacionadas ao ambiente lacustre ou epifreático. As fácies de canal são depositadas durante ciclos hidrológicos ordinários (Herman *et al.*, 2012), apresentam ampla variação textural podendo ser compostas por várias subfácies descritivas e podem, ainda, apresentar variações bruscas ao longo da coluna estratigráfica (Figura 2). As fácies de talvegue, por sua vez, constituem-se de sedimentos muito grossos (superiores a cascalho) bem selecionados, embutidos em discordância em meio às fácies de canal devido sua remoção por causa da erosão praticada durante eventos hidrológicos extremos (Herman *et al.*, 2012). Ambas as fácies (canal e talvegue) compreendem depósitos trativos, transportados predominantemente como carga de fundo. Por outro lado, as fácies de águas estagnadas referem-se a argilas e siltes transportados pelos condutos como carga em suspensão (Figura 2). Usualmente as fácies de águas estagnadas aparecem no topo do registro sedimentar na forma de lamas laminadas e sobrepõem as fácies de canal e/ou talvegue (Bosh e White, 2007). O termo *slackwater* fácies foi também utilizado por Springer e Kite (1997) para designar sedimentos deixados em cavernas rasas e laterais ao rio Cheat (Virgínia, EUA), durante inundações catastróficas.

Depósitos lacustres são também descritos em regiões sobre influência glacial e possuem as mesmas características daqueles descritos para regiões tropicais e sub-tropicais. Bull (1980, 1981) descreveu espessos e contínuos pacotes de lama (*mud caps*) nas cavernas da Grã-Bretanha, os quais aderem a superfícies com inclinação de até 70 graus por acreção

paralela sem demonstrar sinais de escorregamento, a não ser que sejam expostos às condições aéreas, quando os taludes superiores são parcialmente entalhados e deformados levando a formação de marcas dendríticas onduladas (*dendritic surge marks* – Bull, 1976). Outros autores denominaram varves este tipo de depósitos, devido a aparência rítmica de sua laminação (Schroeder e Ford, 1983; Quinif e Maire, 1998). A possibilidade da associação destes depósitos com sedimentos fluviais originados pelo derretimento do gelo deixa dúvidas se eles, de fato, foram depositados em lagos proglaciais subterrâneos, ou se refletem momentos de estagnação do fluxo, correspondendo assim às fácies de água estagnada, no sentido de Bosh e White (2007).

Gillieson (1986) descreve ainda depósitos com estruturas sedimentares análogas aos turbiditos, gerados pelo barramento e deposição de fluxos de detritos em lagos. Sedimentos grossos depositam nas porções proximais, enquanto lamelas e argilas avançam e agradam por acreção paralela sobre superfícies pré-existentes, seguindo o ritmo de inundações ou de oscilações do nível d'água.

Fácies sedimentares na zona freática

Encontram-se aqui abordados os detritos transportados e depositados em condições de condutos totalmente inundados, cuja observação direta está restrita aqueles que se aventuram no mergulho subterrâneo. As descrições de registros e fácies sedimentares neste contexto é ainda incipiente e conspícua na literatura, tornando seu entendimento de certa forma obscuro. Segundo Ford e Williams (1989) todas as categorias texturais de sedimentos podem ser encontrados em condutos inundados, todavia siltes e argilas laminados predominam no ambiente freático.

Experimentos de transporte de sedimentos em tubos conduzidos em laboratório (Newitt *et al.*, 1955) evidenciaram quatro modos principais de transporte, os quais variam em função do tamanho da partícula, da velocidade do fluxo e do diâmetro do tubo: (i) fluxo por tração ou saltação de grãos em uma camada estacionária; (ii) fluxo em uma camada deslizante (*sliding bed*) que evolui da parte superior da carga de fundo, mas se estende ao conjunto da carga com o aumento da velocidade; (iii) fluxo em suspensão homogênea e (iv) fluxo em suspensão heterogênea. Os dois primeiros modos de fluxo aplicam-se a uma variedade de tamanho de partículas, enquanto os dois últimos são preferencialmente observados em sedimentos finos (argila a areia fina).

Schroeder e Ford (1983) registraram a deposição de uma praia de cascalho e matacões (3 a 7cm) na caverna Castleguard (Canadá), a qual atribuíram a rápidas e violentas subidas do nível d'água que teriam soerguido os seixos provenientes de condutos freáticos. Saunderson (1977) descreve a ocorrência de camadas deslizantes em depósitos do tipo *esker* no Canadá,

atribuindo a geração de areias e cascalhos a condições de *pipe fill* na base de geleira. Ambos os trabalhos encontram correspondência com os experimentos de Newitt e colaboradores e atribuem eventuais discrepâncias a limitações dos modelos experimentais. Curry *et al.* (2002) também associaram cascalheiras encontradas em um conduto abandonado da Windy Mouth Cave (Virgínia – EUA) ao ambiente freático, designando os mesmos de depósitos caóticos de cascalho.

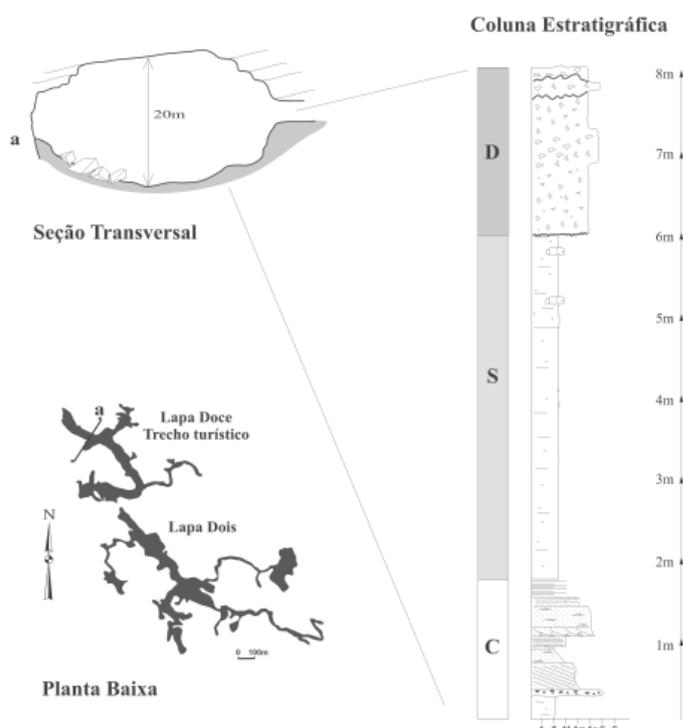


Figura 2 - Coluna estratigráfica obtida no interior do trecho turístico da Lapa Doce, Chapada Diamantina (BA). A sequência sedimentar está relacionada a três das associações de fácies de Bosh e White (2007): C (fácies de canal): sequências granodrecrescentes para o topo com abundância de marcas onduladas; S (fácies de águas estagnadas): lamelas maciças e laminadas com ou sem gretas de contração; D (fácies diamicton): brechas de matriz argilosa com clastos de sedimentos intraformacionais. Modificado de Laureano (1998).

Parte das cavernas com morfologia labiríntica (em planta) tem sua gênese associada a meandros de rios (*subterranean meander cut-off*) que entalham o relevo cárstico (Palmer, 1975). Milks *et al.* (1983), estudando os sedimentos da Mystery Cave, geneticamente associada a um meandro do rio Root (Minnesota, EUA), atribuiu ao ambiente freático laminações plano-paralelas de aproximadamente 1mm compostas de camadas alternadas de silte médio a grosso e silte fino a argila, os quais demonstram um conteúdo de 50% de grãos de composição carbonática proveniente da rocha encaixante. Springer *et al.* (1997) descreveram qua-

tro fácies depositadas abaixo do nível d'água em cavernas labirínticas e com seção transversal elípticas localizadas ao longo rio Cheat (Virgínia, EUA): diamicton, areia laminada, ritmitos de silte-argila e lamitos arenosos. Bosh e White (2007) utilizam-se do termo fácies de pântano (*backswamp facies*) para agrupar os depósitos regularmente observados em cavernas labirínticas, onde o fluxo é limitado e ocorre pouco transporte lateral. Referem-se ao resíduo insolúvel e materiais infiltrados da superfície que atingem condutos inundados e ali são imediatamente depositados. Diferem da fácies de águas estagnadas pelo menor grau de seleção, uma vez que componentes insolúveis da rocha podem fornecer clastos com tamanho bem superior a areia. Martini (2011) atribuiu à fácies de pântano de Bosh e White (2007) lamias carbonáticas de coloração cinza apresentando laminações paralelas, convolutas e ainda estratos deformados devido a processos de escorregamentos.

Proveniência e estratigrafia dos depósitos

Análises de proveniência são importantes para determinar a origem e a extensão da(s) área(s) fonte e, atualmente, ganharam muita atenção no âmbito de sedimentos de caverna devido ao interesse na dinâmica de contaminantes (Mahler *et al.*, 2007). Podem ser conduzidas através do emprego de técnicas como a microscopia eletrônica de varredura em grão de quartzo (Bull *et al.*, 1989), através da mineralogia e/ou geoquímica de argilas (Bottrell *et al.*, 1999; Foos *et al.*, 2000; Forbes e Bestland, 2007, Lynch *et al.*, 2007) e da trama e características magnéticas dos minerais (Kladec *et al.*, 2008). Dentre estes estudos de proveniência citados, somente o trabalho de Foos *et al.* (2000) conclui para uma origem 100% autóctone do sedimento, fato que é totalmente compatível com as características genéticas da caverna de Lechuguilla, talvez uma das mais famosas cavernas hipogênicas do mundo.

Kladec *et al.*, (2008), assim como Milske *et al.* (1983), Springer *et al.* (1997) e outros autores, reconhecem uma fase sedimentar inicial da história da caverna onde o resíduo insolúvel e intercalações siliciclásticas da rocha são a única fonte de detritos, todavia registram a ampliação da área fonte para ambientes externos a partir de um dado momento em sua história. Bottrell *et al.* (1999) mesmo concluindo que o fluxo de sedimentos proveniente da recarga alogênica não contribui significativamente para o balanço de sedimentos nas cavernas na região cárstica de Castleton, Reino Unido, foi capaz de distinguir na superfície duas unidades geológicas distintas que se revezaram no tempo a fornecer sedimentos para a drenagem subterrânea, demonstrando assim que a área fonte de uma caverna pode variar no decorrer da evolução do relevo. Puscas *et al.* (2010) também observaram incompatibilidades entre as rochas aflorantes na bacia hidrográfica atual e a mineralogia de sedimentos e a petrografia de clastos

maiores encontrados na Grande Caverna da Montanha Sallitrat (Romênia), propondo uma origem extra-bacinal para os mesmos.

Em regiões áridas ou com forte expressão de processos eólicos (dunas) a área fonte de detritos para o interior das cavernas apresenta expressão geográfica muito mais ampla que bacia hidrográfica. Forbes e Bestland (2007) e Darrénougué *et al.* (2009) realizaram investigações mineralógicas, geoquímicas e isotópicas detalhadas em sedimentos de cavernas da região de Naracoorte, sudeste da Austrália e, embora apresentem pequenas divergências em suas interpretações, seus estudos sustentam tal hipótese. Matmon *et al.* (2012) descrevem areias quartzosas presentes no interior da gruta Wonderwek (África do Sul) e reúnem argumentos para sua proveniência das dunas do deserto do Kalahari, atualmente a mais de 100km a norte da caverna, embora sua introdução e retrabalhamento no interior do conduto tenha se dado por meio de transporte aquoso.

Em termos estratigráficos é importante lembrar que o ambiente cavernícola é marcado pela constante presença da erosão e pela operação de uma variedade de mecanismos deposicionais que podem levar a ocorrência de discordâncias, variações laterais de fácies e, por vezes, a um quadro de estratigrafia reversa (Osborne, 1984), onde camadas mais antigas repousam sobre estratos mais recentes. Sedimentos detriticos recobertos por capas estalagmíticas são usualmente removidos, e o vazio então constituído, pode ser preenchido por outro pulso posterior de detritos. Esta complexidade parece estar presente nos registros discutidos por Auler *et al.* (2009) que destacam a baixa taxa de desnudação do Brasil central para o favorecimento de múltiplas cargas e descargas de sedimentos durante a evolução de um mesmo nível de caverna, gerando assim um cenário estratigráfico bastante complexo e, por vezes, reverso. O contínuo avanço de métodos de datação vem proporcionando importantes discussões no entendimento de registros sedimentares em condutos e suas complexas relações estratigráficas. Todavia, é muito importante se ter em mente existem especificidades e limitações da aplicação destes métodos e sem um bom conhecimento das fácies sedimentares e de suas relações estratigráficas, idades podem constituir números isolados, sem o menor significado geomorfológico ou ambiental.

Os principais métodos de datação atualmente aplicados aos registros cavernícolas são: Carbono-14, Paleomagnetismo, Decaimento da Série U/Th e Isótopos Cosmogênicos (White, 2007). Há também registros da aplicação de técnicas ligadas às propriedades óticas do quartzo como a Termoluminescência e a Luminescência Oticamente Estimulada (Abeyratne *et al.*, 1997), contudo sua aplicação é restrita a poucos trabalhos. Não é objetivo deste artigo detalhar as questões metodológicas individuais de cada tipo de datação, embora possa constituir mérito para uma outra revisão, pois

são constituídos por técnicas geocronológicas largamente descritas na literatura internacional e aplicadas em diversas partes do globo. Aqui restringe-se a descrever suas aplicações e limitações no campo das investigações geomorfológicas.

Devido a seu alcance de tempo limitado a aproximadamente 50.000 anos, a aplicação da datação por Carbono-14 tem sua utilização restrita quando em investigações de cunho geomorfológico e/ou paleoambiental. Todavia, seu uso é amplamente difundido em investigações arqueológicas em cavernas. Por outro lado, a idade de cristalização da calcita em espeleotemas através da série de decaimento do U-Th (Dorale *et al.*, 2004) constitui o método mais aplicado até o momento para a cronologia de eventos e processos geomorfológicos em cavernas e no carste (Stock *et al.*, 2005). Permite a obtenção de idades inferiores a 600.000 anos, quando o equilíbrio secular do sistema é normalmente atingido e pode ser utilizada em crostas estalagmíticas sobrepostas ou que estejam intercaladas em pacotes de sedimentos detríticos, sempre fornecendo uma idade mínima para o depósito, pois ela pode ter vindo a se formar centenas, milhares ou mesmo milhões de anos após o sedimento ter se depositado.

A datação por paleomagnetismo baseia-se na correlação das reversões magnéticas eventualmente existentes em uma coluna estratigráfica com o registro paleomagnético global, uma vez que os minerais magnéticos tendem a sedimentar seguindo a orientação do campo magnético vigente quando de sua deposição. A amostra coletada para o datação é normalmente um sedimento argiloso necessariamente depositado por suspensão e a principal limitação cronológica está relacionada aos grandes intervalos de tempo existentes entre as inversões, de sorte que sua aplicação está restrita a intervalos de tempo seguramente grandes. Variações na mineralogia magnética ao longo do pacote sedimentar podem comprometer as interpretações e a calibração com idades absolutas é sempre recomendável, pois as inversões magnéticas surgem a partir de 780 mil anos atrás, ou seja, há um longo período onde o vetor campo magnético registrado nos sedimentos é o mesmo do atual.

Isótopos cosmogênicos são produzidos quando raios cósmicos se chocam com alguns átomos presentes na atmosfera e nos primeiros metros da superfície terrestre. Em geomorfologia a aplicação geocronológica destes isótopos não está restrita às cavernas, mas elas constituem o caso ideal para obtenção de idades de soterramento, inicialmente proposta por Lal (1991). Tomando-se como exemplo o mineral quartzo, quando este é atingido por estes raios cósmicos, seus elementos constituintes ^{28}Si e ^{16}O são transformados, respectivamente, em ^{26}Al (meia vida de 700.000 anos) e ^{10}Be (meia vida de 1.500.000 anos). Quando sedimentos quartzosos expostos na atmosfera são rapidamente levados para o interior dos condutos, a produção de novos nuclídeos é cessada e o cronômetro disparado através do decaimento dos isótopos existentes, sendo possível alcançar neste mineral

idades entre 100 mil e 5 milhões de anos (Granger e Muzikar, 2001). A obtenção de idades de soterramento é uma tarefa cara, pois requer a quantificação de pelo menos dois pares de isótopos em níveis tão baixos quanto 10^{-6} átomos, o que somente é possível através da Espectrometria de Aceleração de Massa (AMS – Accelerator Mass Spectrometry). As idades apresentam erros analíticos mínimos na faixa de 50Ka.

A escolha do método a ser aplicado a certo depósito depende de uma série de fatores como o seu conteúdo mineralógico, sua antiguidade e mesmo os recursos financeiros disponíveis. Até o presente momento nenhum laboratório da América Latina dispõe de rotinas implantadas para a aplicação das técnicas e a obtenção de idades ainda está restrita a submissão de amostras a laboratórios no exterior. Stock *et al.* (2005) advogam para um maior benefício dos isótopos cosmogênicos na cronologia de processos geomorfológicos, contudo estudos recentes demonstram que a conjugação desta técnica com o paleomagnetismo potencializa as discussões no período entre a entrada dos detritos nas cavernas e sua deposição final no interior dos condutos (Matmon *et al.*, 2012; Tassy *et al.*, 2013).

Contribuições em investigações geomorfológicas

Sedimentos detríticos são regularmente interpretados como sendo mais jovens que as cavernas onde se depositam, embora estudos teóricos de velocidade de fluxo em aquíferos cársticos demonstrem que sedimentos, caso disponíveis, podem ser transportados desde a iniciação dos condutos (White e White, 1968). Perfazem, na maioria das vezes, os únicos elementos cronológicos disponíveis para se discutir uma idade mínima para a caverna (Sasowsky, 1998), pois somente em casos muitos específicos pode-se associar a abertura de condutos com a cristalização de minerais (Polyak *et al.*, 1998).

O papel do transporte e deposição de sedimentos no interior das galerias subterrâneas vem há muito tempo permanecendo no centro das discussões a cerca da evolução de cavernas calcárias. Davis (1930), em clássico trabalho sobre a origem das cavernas calcárias, utilizou os resíduos insolúveis encontrados em cavernas para postular seu modelo de evolução freática seguido do entalhamento vadoso, resultando na seção em forma de fechadura. Por outro lado, o modelo de evolução de cavernas designado de Paragênese (Renault, 1968) ou Erosão Antigravitativa (Pasini, 2009) vem ganhando observações e interpretações sustentadas por todo o mundo, desde sua proposição inicial no final da década de 60. Neste modelo os sedimentos detríticos desempenham um papel essencial para a ampliação ascendente dos condutos devido à colmatação do piso por detritos e o favorecimento da dissolução nas paredes e tetos das galerias. Farrant e Smart (2011) ampliaram o significado espeleogenético de sedimentos de cavernas através do processo aluvial, no qual o preenchimento parcial de condutos vadosos leva a ampliação

lateral de condutos gerando entalhes ou patamares (*notches*) nas paredes dos condutos, podendo ainda evoluir para uma obstrução da porosidade secundária e instalação do ambiente freático, onde os processos paragenéticos assumirão a continuidade do esculpimento dos condutos.

Cavernas formam-se no mesmo compasso da evolução do conjunto de morfologias do modelado na superfície da Terra, possuindo desta forma uma história evolutiva correlacionada à história da paisagem que a cerca. Na medida em que o soerguimento lento e contínuo dos continentes (isostasia) remove os materiais rochosos transportando-os para o oceano, o alívio de carga gerado propicia a sucessiva formação de novos níveis de condutos, normalmente inferiores e freáticos, que gradativamente assumirão o papel das galerias superiores no transporte de água e sedimentos (Figura 1). Em regiões tectonicamente ativas este processo tende a ser mais rápido e a existência de níveis distintos de cavernas, mais pronunciado. Seguindo este raciocínio, as idades dos depósitos sedimentares tendem a diminuir em direção ao topo em um mesmo nível de caverna, por outro lado, em uma sucessão de níveis de cavernas, os sedimentos depositados nos níveis inferiores serão sempre mais jovens que aqueles encontrados em níveis superiores (Stock *et al.*, 2005). O modelo é simples e vem proporcionando bons resultados no campo de estudos das taxas de erosão.

Seguindo os trabalhos pioneiros da aplicação da magnetoestratigrafia em sedimentos de cavernas conduzidos por Schmidt (1982) e Schmidt *et al.* (1984), diversos pesquisadores dirigiram esforços na tentativa de medir taxas de incisão fluvial de longo prazo, onde níveis distintos de cavernas preservaram sedimentos fluviais em galerias já abandonadas pelo rio (Sasowsky *et al.*, 1995; Farrant *et al.*, 1995; Springer *et al.*, 1997; Auler *et al.*, 2002). Todos estes estudos baseiam-se no confronto das inversões magnéticas registradas nos depósitos com suas altitudes relativas ao nível atual do rio e os valores medidos apresentam boa conformidade com o contexto tectônico onde as medições foram realizadas.

Em uma linha de raciocínio semelhante, diversos estudos de quantificação de taxas de incisão e erosão vêm sendo conduzidos em sedimentos de cavernas a luz da datação de soterramento, a partir da quantificação de isótopos cosmogênicos. A principal diferença é que este método oferece uma idade absoluta para o soterramento dos grãos de quartzo e isto proporciona maior precisão, potencializando as interpretações geomorfológicas. Os resultados apontam para o fato de que entalhamento do relevo não é constante e conjuga momentos de entalhamento com momentos de estabilidade (Granger *et al.*, 2001; Stock *et al.*, 2004) e ainda permitem discutir a atuação de forças neotectônicas que possam estar associadas às taxas de soerguimento diferentes entre blocos (Granger *et al.*, 1997).

Estudos geomorfológicos conjugando morfologia fluvial na paisagem superficial com níveis de cavernas e seus sedimentos no ambiente subterrâneo têm proporcionado avanços

na cronologia da evolução dos modelados. Isto principalmente porque os sedimentos de cavernas são relativamente bem preservados dos processos intempéricos superficiais, são passíveis de datação e estão diretamente associados aos processos geomorfológicos que se desenrolam na superfície. Stock *et al.* (2004) e Antony e Granger (2007) foram capazes de relatar os últimos milhões de anos da evolução da topografia da Sierra Nevada (Califórnia) e dos platôs Apalachianos (Kentucky) nos Estados Unidos. Wagner *et al.* (2011) utilizaram idades obtidas em sedimentos de cavernas para discutir terraços fluviais e pequenas superfícies de aplainamento, balizando a história de evolução do relevo ao longo da margem leste dos Alpes nos últimos 5 milhões de anos. Tassy *et al.* (2013) utilizaram idades de soterramento e inversões paleomagnéticas para cronometrar a evolução geodinâmica de uma porção do carste peri-Mediterrâneo. As idades obtidas em sedimentos de diversos níveis de caverna associados ao vale do rio Archède, no sul da França, confirmam a hipótese construída a partir de um robusto mapeamento de superfície, no qual sucedem eventos alternados de soerguimento e inundação da área ao longo dos últimos 6 milhões de anos.

Considerações finais

Sedimentos detríticos depositados em cavernas constituem há séculos objetos de investigações paleontológicas e arqueológicas, mas só a partir da segunda metade do século XX nota-se sua utilização recorrente como elemento de análise em estudos de cunho geomorfológico. Atualmente, os sedimentos de caverna constituem importantes fontes para a obtenção de idades e taxas erosivas, mas são também elementos indissociáveis em alguns modelos de gênese e evolução dos sistemas de condutos no aquífero cárstico. Os estudos geocronológicos deste tipo de depósito em curso vêm possibilitando a obtenção de idades cada vez antigas demonstrando, desta forma, que muitos sistemas de caverna já estavam abertos e recebendo sedimentos em tempos que vão além do Pleistoceno e, em alguns casos, por todo ou boa parte do Plioceno.

No Brasil um campo de pesquisa encontra-se aberto, dado a ampla distribuição de terrenos cársticos no país e o número reduzido de trabalhos publicados até o momento. Há que se considerar ainda, neste contexto, o potencial destes depósitos com registros paleoclimáticos e paleoambientais. Se, do ponto de vista global, a utilização destes depósitos em pesquisas sobre as condições ambientais vigentes no passado ainda encontra-se na infância (White, 2007), ainda esperamos sua aplicação no território nacional.

É difícil prever o encaminhamento futuro das pesquisas, nem tão pouco é objetivo desta revisão. Todavia é factível acreditar que muitas outras novas possibilidades de contribuições nas investigações geomorfológicas ainda estão para emergir.

Agradecimentos

As pesquisas sobre sedimentos de caverna que possibilitaram a elaboração desta revisão foram financiadas pela FAPESP (Processos 96/05686-0 e 2010/20560-2). Os autores agradecem a Dra Sônia Maria Barros de Oliveira pelo incentivo, aos doutores Augusto S. Auler e Darryl Granger pela revisão do manuscrito e aos revisores anônimos pelas contribuições ao aprimoramento do trabalho.

Referências Bibliográficas

- ABEYTRATNE, M., SPOONER, N.A., GRUÛN, R. e HEAD, J. Multidating studies of Batadomba cave, Sri Lanka. *Quaternary Science Reviews :Quaternary Geochronology*. v. 16, p. 243-255, 1997.
- ANTONY, D.M. e GRANGER, D.E. A new chronology for the age of Appalachian erosional surfaces determined by cosmogenic nuclides in cave sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 32, p. 874-877, 2007.
- AULER, A.S., SMART, P.L., TARLING, D.H., FARRANT, A.R. Fluvial incision rates derived from magnetostratigraphy of caves sediments in the cratonic area of eastern Brazil. *Z. Geomorph.N.F.*, v. 46, n. 3, p. 391-403, 2002.
- AULER, A.; SMART, P.L.; WANG, X.; PILÓ, L.B.; EDWARDS, L. e CHENG, H. Cyclic sedimentation in Brazilian caves: mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology*, v.106, p.142-153, 2009.
- BOSH, R.F. e WHITE, W.B. 2007 Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. In: SASOWSKY, I.D. AND MYLROIE, J. *Studies of cave sediments – Physical and Chemical records of paleoclimate*. Dordrecht: Springer, 2007. p. 1-22.
- BOTTRELL, S.; HARDWICK, P. e GUNN, J. Sediment dynamics in the Castleton Karst, Derbyshire, U.K. *Earth Surface Process and Landforms*, v. 24, p. 745-759, 1999.
- BULL, P.A. Dendritic surge marks in caves. *Transactions of the British Cave Research Association*, v. 3, n.1, p. 1-5, 1976.
- BULL, P.A. Towards a reconstruction of time-scale and palaeoenvironments from cave sediment studies. In: CULLINGFORD, D.A.; DAVIDSON, D.A.; LEWIN, J. (eds). *Timescales in geomorphology*. John Wiley & Sons. p.177-187. 1980.
- BULL, P.A. Some fine-grained sedimentation phenomena in caves. *Earth Surface and Landforms*, v. 6, p. 11-22, 1981.
- BULL, P.A.; DAOXIAN, Y.; MENGJU, H. Cave sediments from Chuan Shan Tower Karst, Guilin, China. *Cave Science*, v. 16, n. 2, p. 51-56, 1989.
- CURRY, M.D.; SASOWSKY, I.D.; SHANK, D.A. Sediments from an abandoned karst groundwater conduit: Windy Mouth Cave, Greenbrier County, West Virginia. In: GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA ANNUAL MEETING, 2002, Denver. *Abstracts*. . . Denver, 2002.
- DARRÉNOUGUÉ, N.; DECKKER, P.D.; FITZSIMMONS, K.E.; NORMAN, M.; REED, L. KARRS, S.V.D; FALLON, S. A Late Pleistocene record of aeolian sedimentation in Blanche Cave, Naracoorte, South Australia. *Quaternary Science Reviews*, v. 28, p. 2600-2615, 2009.
- DAVIS, W.M. Origin of limestone caverns. *Geological Society of America Bulletin*, v. 41, p. 475-628, 1930.
- DORALE, J.A.; EDWARDS, R.L.; ALEXANDER JR, E.C.; SHEN, C.; RICHARDS, D.A.; CHEG, H. Uranium-series dating of speleothems: current techniques, limits, and applications, in: SASOWSKY, I.D; MYLROIE, J. (Eds), *Studies of Cave Sediments*, Kluwer Academic, New York, 2004.
- FARRANT, A. R. e SMART, P.L. Role of sediment in speleogenesis: alluviation and paragenesis. *Geomorphology* (2011). Doi:10.1016/j.geomorph.2011.06.006.
- FARRANT, A.R.; SMART, P.L.; WHITAKER, F.F.; TARLING, D.H. Long-term Quaternary uplift rates inferred from limestone caves in Sarawak, Malaysia. *Geology*, v. 23, n.4, p. 357-360, 1995.
- FOOS, A.M.; SASOWSKY, I.D.; LAROCK, E.J.; KAMBESIS, P.N. Detrital origin of a sedimentary fill, Lechuguilla Cave, Guadalupe Mountains, New Mexico. *Clays and Clay Minerals*, v. 48, n. 6, p. 693-698, 2000.
- FORBES, M.S. e BESTLAND, E.A. Origin of the sedimentary deposits of Naracoorte Caves, South Australia. *Geomorphology*, v. 86, p. 369-392, 2007.
- FORD, D.C.; WILLIAMS, P.W. *Karst Geomorphology and Hydrology*. London, Unwin Hyman. 1989, 601p.
- FORD, T. Sediments in caves. *Trans. British Cave Research Association*. v.2, n.1, p. 41-46. 1975.
- FORNÓS, J.J., GINÉS, J., GRÀCIA, F. Present-day sedimentary facies in the coastal karst caves of Mallorca Island (Western Mediterranean). *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 71, n. 1, p. 86-89, 2009.
- GILLIESON, D. Cave sedimentation in the New Guinea Highlands. *Earth Surface Process and Landforms*, v. 11, p. 533-543, 1986.
- GILLIESON, D. *Caves: processes, development, management*. Oxford, Blackwell. 1996, 324 p.
- GOMES, M.C.A. e PILÓ, L.B. As minas de salitre: a exploração econômica das cavernas de Minas Gerais nos fins do período colonial. *Espeleotema*, v.16, p. 83-93, 1992.
- GRANGER, D.E., FABEL, D. & PALMER, A.N. Pliocene-Pleistocene incision of the Green River, Kentucky, determined from radioactive decay of cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be in Mammoth Cave sediments. *Geological Society of America Bulletin*, v. 113, n. 7, p. 825-836, 2001.

- GRANGER, D.E., KIRCHNER, J.W. and FINKEL, R.C. Quaternary downcutting of the New River, Virginia, measured from differential decay of cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be in cave-deposited alluvium. *Geology*, v. 25, n.2, p. 107-110, 1997.
- GRANGER, D.E. e MUZIKAR, P.F. Dating sediment burial with in situ-produced cosmogenic nuclides: theory, techniques and limitations. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 188, p. 269-281, 2001.
- HENGSTUM, P.J., SCOTT, D.B., GRÖCKE, D.R. e CHARETTE, M.A. Sea level controls sedimentation and environments in coastal and sinkholes. *Marine Geology*, v.286, p. 35-50, 2011.
- HERMAN, E.K., TORAN, L. e WHITE, W.B. Threshold events in spring discharge: evidences from sediments and water level measurements. *Journal of Hydrology*, v. 351, p. 98-106, 2008.
- HERMAN, E.K., TORAN, L. e WHITE, W.B. Clastic sediment transport and storage in fluvio-karst aquifers: an essential component of karst hydrogeology. *Carbonates and Evaporites*, v.27, p.211-241, 2012.
- KLADDEC, J. ;CHADIMA, M.; LISÁ, L. ;HERCMAN, H.;OSINTSEV, A. e OBERHÄNSLI, H. Clastic cave deposits in Botovskaya Cave (Eastern Siberia, Russian Federation). *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 70, n. 3, p. 142-155, 2008.
- KOS, A.M. Stratigraphy, sedimentary development and palaeoenvironment context of a naturally accumulated pitfall cave deposit from southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 48, p. 621-632, 2001.
- LAL, D. Cosmic ray labeling of erosion surfaces: in situ nuclide production rates and erosion models. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 104, p. 424-439, 1991.
- LAUREANO, F.V. *O registro sedimentar clástico associado aos sistemas de cavernas Lapa Doce e Torrinha, Município de Iraquara, Chapada Diamantina (BA)*. Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 99p.
- LAWSON, T.J. An analysis of sediments in caves in the Assynt area, NW Scotland. *Cave and Karst Science*, v. 22, n.1, p. 23-30, 1995.
- LYNCH, F.L.; MAHLER, B.J. e HAUWERT, N.N. Provenance of suspended sediment discharged from a karst aquifer determined by clay mineralogy. In: SASOWSKY, I.D. AND MYLROIE, J. *Studies of cave sediments – Physical and Chemical records of paleoclimate*. Dordrecht: Springer, 2007. p. 83-94.
- MAHLER, B.J.; PERSONNÉ, J-C.; LYNCH, F.L. e METRE, P.C.V. Sediment and sediment-associated contaminant transport through karst. In: SASOWSKY, I.D. AND MYLROIE, J. *Studies of cave sediments – Physical and Chemical records of paleoclimate*. Dordrecht: Springer, 2007. P. 23-46.
- MARTINI, I. 2011. Cave clastic sediments and implications for speleogenesis: New insights from the Mugnano Cave (Montagnola Senese, Northern Apennines, Italy). *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2011.07.024.
- MATMON, A. RON, H., CHAZAN, M., PORAT, N. e HORWITZ, L.K. Reconstructing the history of sediment deposition in caves: A case study from Wonderwerk Cave, South Africa. *Geological Society of America Bulletin*, v. 124, p. 611-625, 2012.
- MC-FARLANE, D.A. Guano. In: GUNN, J. (Ed.) *Encyclopedia of caves and karst science*. New York: Fitzroy Dearborn, 2004. p. 409-410.
- MILSKÉ, J.A.; ALEXANDER JR., E.C.; LIVELY, R.S. Clastic sediments in Mystery Cave Southeastern Minnesota. *National Speleological Society Bulletin*, v. 45, p. 55-75. 1983.
- MORIARTY, K.C.; McCULLOCH, M.T.; WELLS, R.T.; McDOWELL, M.C. Mid-Pleistocene cave fills, megafaunal remains and climate change at Naracoorte, South Australia: towards a predictive model using U-Th dating of speleothems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 159, p. 103-143, 2000.
- NEWITT, D.M.; RICHARDSON, J.F.; ABBOTT, M.; TURTLE, R.B. Hydraulic conveying of solids in horizontal pipes. *Transactions of the Institution of Chemical Engineers*, v. 33, p. 93-110, 1955.
- OSBORNE, R.A.L. Lateral facies changes, unconformities and stratigraphic reversals: their significance for cave sediment stratigraphy. *Cave Science*, v. 11, n.3, p. 175-184, 1984.
- PALMER, A.N. The origin of maze caves. *The National Speleological Society Bulletin*, v. 37, p. 56-76, 1975.
- PALMER, A.N. *Cave Geology*. Dayton: Cave Books, 2007. 454p.
- PASINI, G. A terminological matter: parageneis, antigravitative erosion or antigravitational erosion? *International Journal of Speleology*, v. 38, n. 2, p. 129-138, 2009.
- PIERRE, S.S. Morphology and sediments of the Grönli-Seter Caves, Norway. *Cave Science*. v. 15, n. 1, p. 109-116. 1988.
- POLYAK, V.J.; MC-INTOSH, W.C.; GÜVEN, N. e PROVENCIO, P. Age and origin of Carlsbad Cavern and related caves from ⁴⁰Ar/³⁹Ar of alunite. *Science*. v. 279, n. 5358, p. 1919-1922. 1998.
- PUSCAS, C.M.; STREMTAN, C.C. e KRISTÁLY, F. Past surface conditions and speleogenesis as inferred from cave sediments in the Great Cave of Salitrari Mountain (SW Romania). *Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Geologia*, v. 55, n. 2, p. 51-57, 2010.
- QUINIF, I.; MAIRE, R. Pleistocene deposits in Pierre Saint-Martin Cave, French Pyrenees. *Quaternary Research*, v. 49, p. 37-50, 1998.
- RENAULT, P. Contribution a l'étude des actions mécaniques et sédimentologiques dans la spéléogénèse. *Annales de Spéléologie*, v. 23, n. 3, p. 575-593, 1968.
- SANCHO, C.; PEÑA, J.L.; MIKKAN, R.; OSÁCAR, C. e QUINIF, Y. Morphological and speleothemic development

- in Brujas Cave (Southern Andean Range: Argentine): paleoenvironment significance. *Geomorphology*, v.57, p. 367-384, 2004.
- SASOWSKY, I.D. Cave formation – determining the age of what is not there. *Science*. v. 259, n. 5358, p.1874, 1998.
- SASOWSKY, I.D. Clastic sediments in caves – imperfect recorders of processes in karst. In: SASOWSKY, I.D. *Time in Karst*. Postojna: Karst Water Institute Special Publication, 2007, p-147-149.
- SASOWSKY, I.D.; WHITE, W.B.; SCHMIDT, V.A. Determination of stream-incision rate in the appalachian plateaus by using cave-sediment magnetostratigraphy. *Geology*, v. 23, n. 4, p. 415-418, 1995.
- SAUNDERSON, H.C. The sliding bed facies in esker sand and gravels: a criterion for full-pipe (tunnel) flow? *Sedimentology*, v. 24, p. 623-638, 1977.
- SCHMIDT, V.A. Magnetostratigraphy of sediments in Mammoth Cave, Kentucky. *Science*, v. 217, n. 27, p. 827-829, 1982.
- SCHMIDT, V.A; JENNINGS, J.N.; HAOSHENG, B. Dating of cave sediments at Wee Jasper, New South Wales, by magnetostratigraphy. *Australian Journal of Earth Sciences*, v. 31, p. 361-370, 1984.
- SCHROEDER, J.; FORD, D.C. Clastic sediments in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta Canada. *Arctic and Alpine Research*, v. 15, n.4, p. 451-461, 1983.
- SPRINGER, G.S. e KITE, J.S. River-derived slackwater sediments in caves along Cheat River, West Virginia. *Geomorphology* v.18, p. 91-100, 1997.
- SPRINGER, G.S.; KITE, J.S. e SCHMIDT, V.A. Cave sedimentation, genesis, and erosional history in the Cheat River Canyon, West Virginia. *Geological Society of America Bulletin*, v. 109, n. 5, p. 524-532, 1997.
- STOCK, G.S., ANDERSON, R.S and FINKEL,R.C. Rates of erosion and topographic evolution of the Sierra Nevada, California, inferred from cosmogenic ²⁶Al and ¹⁰Be concentrations. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 30, p. 985-1006, 2004.
- STOCK,G.M; GRANGER,D.E.; SASOWSKY,I.D.; ANDERSON,R.S; FINKEL,R.C. Comparison of U-Th, paleomagnetism and cosmogenic burial methods for dating caves: Implications for landscape evolution studies. *Earth and Planetary Science Letters*, v.236, p.388-403, 2005.
- TASSY, A., MOCOCHAIN,L.; BELLIER, O.; BRAUCGER, R.; GATTACCECA, J.; BOURLÈS, D. Coupling cosmogenic dating and magnetostratigraphy to constrain the chronological evolution of peri-Mediterranean karst during the Messinian and the Pliocene: Example of Ardèche Valley, Southern France. *Geomorphology*, v.189, p.81-92, 2013,
- TORAN, L.; TANCREDI, J.H.; HERMANN, E.K.; WHITE, W.B. Conductivity and sediment variation during storms as evidence of pathways to karst springs. In: HARMON, R.S. e WICKS, C. (Eds). *Perspectives on karst geomorphology, hydrology, and geochemistry – a tribute to Derek C. Ford and William B. White*. Geological Society of America Special Paper 404, 2006. p. 39-50.
- WAGNER, T.; FRITZ, H.; STÜME, K.; NESTROY, O.; RODNIGHT, H. HELLSTROM, J. e BENISCHKE, R. Correlations of cave levels, stream terraces and planation surfaces along the River Mur – timing of landscape evolution along the eastern margin of the Alps. *Geomorphology* (2011), doi:10.1016/j.geomorph.2011.04.024.
- WHITE, W.B. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. Oxford, University Press. 1988, 464p.
- WHITE, W.B. Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*. v. 69, n. 1, p. 76-93, 2007.
- WHITE, E.L.; WHITE, W.B. Dynamics of sediment transport in limestones caves. *NSS Bulletin*, v.30, n. 4, p. 115-129, 1968.
- WURSTER, C.M.; PATTERSON, W.P.; McFARLANE, D.A.; WASSENAAR, L.I.; HOBSON, K.A.; ATHFIELD, N.B. e BIRD, M.I. Stable carbon and hydrogen isotopes from bat guano in the Grand Canyon, USA, reveal Younger Dryas and 8.2ka events. *Geology*, v. 36, n.9, p. 683-686, 2008.