

**DINÂMICA DOS SEDIMENTOS CLÁSTICOS CAV-
ERNÍCOLAS: POTENCIALIDADE PARA ESTUDO
PALEOAMBIENTAIS NO BRASIL**

**DYNAMICS OF CLASTIC SEDIMENTS IN CAVE: POTENTI-
ALITY FOR PALEO-ENVIRONMENTAL STUDY IN BRAZIL**

**Dandara Maria Vitalina Da Silva Caldeira¹, Rogerio Uagoda²
& Adivane Moraes Nogueira²**

¹ Universidade de Brasília/UnB
Programa de Pós Graduação em Geociências Aplicadas, Laboratório de Geografia
Física, ICC Norte, Mód. 23, Campus Darcy Ribeiro,
CEP: 70910-900, Brasília, Distrito Federal, Brasil
Email: dandara.caldeira2014@gmail.com

² Universidade de Brasília/UnB
Departamento de Geografia, Laboratório de Geografia Física, ICC Norte, Mód. 23,
Campus Darcy Ribeiro, CEP: 70910-900,
Brasília, Distrito Federal, Brasil
Email: rogeriouagoda@unb.br, adinogueira2010@hotmail.com

Recebido 29 de Abril de 2020, aceito 06 de Junho de 2020

Resumo: Registros paleoambientais são importantes para entender a evolução da paisagem, resultando na melhor compreensão dos processos atuais. Protegidos do cenário evolutivo superficial, os ambientes cavernícolas abrigam ótimos registros cuja dinâmica sedimentar, por vezes, é análoga à superfície. Nesse cenário, os sedimentos clásticos constituem uma boa fonte de estudo ainda pouco explorada no Brasil. Desse modo, este artigo apresenta uma revisão bibliográfica da dinâmica sedimentar em ambientes cavernícolas, discutindo aspectos como definição, classificação, processos de sedimentação, diagênese e fácies, juntamente com os principais métodos utilizados para o estudo de registros paleoambientais (Carbono

14, luminescência, análises químicas e físicas.). A potencialidade do emprego desse objeto de estudo no Brasil comprova-se por meio de buscas a artigos recentes disponíveis no Portal Periódicos CAPES, base Web of Science. Ainda incipiente frente à quantidade de cavernas mapeadas, os resultados demonstram um aumento tímido, porém significativo das pesquisas. A boa resposta à utilização dos vários *proxies* que abrange intervalos de até milhões de anos constituem alternativa para estudos paleoambientais brasileiros dada a dificuldade de encontrar tais registros em ambientes superficiais nos trópicos húmidos.

Palavra-Chave: Cavernas, paleoambientes, fácies, geocronologia.

Abstract: paleoenvironmental records are important for understanding the current processes of landscape evolution. The cave environment are protected from the superficial evolution having excellent sedimentary records, sometimes analogous to the surface. In this way, clastic sediments are a good source of paleoenvironmental study, being almost unexplored in Brazil. This paper presents a review of sediment records in cave environments, discussing aspects such as alteration, classification, sedimentation processes, diagonal and facies, with the methods used for paleoenvironmental records (Carbon 14, luminescence, statistics and chemical techniques). The potential of this goal in Brazil was showed by the search for recent articles available on the CAPES portal, based on Web of Science. The topic is still incipient in view of the number of caves mapped. Results show a timid, but significant increase in research in the last decade. The good response to the use of the proxies covering intervals up to million years is an alternative for Brazilian paleoenvironmental studies given the difficulty of finding such dynamics in a tropical surface environment.

Keywords: Cave, paleoenvironment, facies, geochronology.

INTRODUÇÃO

Cavernas atuam como repositório de diversos tipos de sedimentos, gerando depósitos secundários que contêm registros hidrogeológicos, paleoclimatológicos

e paleoambientais, principalmente do Quaternário (Bosch e White, 2007; Ford e Williams, 2007; Laureano, 2014, 1998; Martini, 2011; White, 2007). Ademais, são importantes registros paleoecológicos (Chazan *et al.*, 2012; Ghinassi *et al.*, 2008; Van der Geer e Dermitzakis, 2013), fornecem informações sobre a presença humana (Feathers *et al.*, 2010; Fontugne, 2013; Martini *et al.*, 2018) e atuam como marcadores geomórficos e ambientais.

Os sedimentos no interior das cavernas estão relacionados com o material presente na superfície que foram transportados por agentes não seletivos (Haddad-Martim *et al.*, 2017). Processos como precipitação química, entrada e remoção de sedimentos estão intimamente relacionados com as condições paleoclimáticas/hidrológicas do passado gerando complexos sedimentares interessantes para a compreensão do paleoambiente (Auler *et al.*, 2009). Além disso, são importante fontes de pesquisa, sendo utilizados para determinar ambientes deposicionais, gênese dos sedimentos, grau de desenvolvimento de cavernas ou paisagens e investigações paleontológicas (Springer, 2005). No entanto, constituem feições complexas com um estudo desafiador devido à natureza complicada da acumulação sedimentar, capaz de induzir erros quanto à sua interpretação (Ford e Williams, 2007; Gillieson, 1996; Hubbe *et al.*, 2011). Nesse sentido, uma abordagem integrada que emprega diferentes metodologias (análise *multi proxy*) auxilia na redução de eventuais lacunas deixadas pelos métodos ampliando a compreensão sobre os eventos formadores dos depósitos. Nesta perspectiva, este trabalho tem como propósito a realização de uma revisão bibliográfica da dinâmica dos sedimentos clásticos no interior de cavernas e principais métodos aplicados para estudos paleoambientais. Em um segundo momento buscou-se verificar o uso deles em pesquisas brasileiras com fins de compreensão de paleoambientes nos últimos 30 anos.

A metodologia empregada consiste na verificação do arcabouço teórico

contemplando os principais autores e obras clássicas acerca do tema. Para o levantamento dos estudos no Brasil utilizou-se a base Web of Science no Portal Periódicos Capes, com buscas de palavras chave como: sedimento clástico – clastic sediment, caverna - cave, Brasil - Brazil, América do Sul - South America, datação - dating, paleoambiental - paleoenvironmental . Desse modo, foram excluídos da análise, por exemplo, os trabalhos com finalidades arqueológicas/ paleontológicas.

2. SEDIMENTOS CLÁSTICOS CAVERNÍCOLAS

2.1 Definição

Sedimentos clásticos são compostos por fragmentos erodidos das rochas preexistentes, que são transportados e depositados nas cavernas por correntes de água, perda de massa, vento, ação de ondas e gelo (Gillieson, 1996; Springer, 2005). Para White (2007), correspondem aos sedimentos movidos mecanicamente, enquanto os químicos são formados no local por precipitação. Laureano (1998) estabelece como os detritos são transportados ao longo de condutos cársticos, incluindo os depósitos químicos (carbonatos, sulfatos e nitratos) e orgânicos (guano, fragmento de madeira, ossos) que são retrabalhados por ação gravitacional ou por processos fluviais.

Entre os sedimentos clásticos, dois materiais são comumente encontrados (Sasowsky, 2007): sedimentos de colapso oriundos de paredes e teto rochosos da caverna, de tamanhos variados e formato angular encontrados nas interseções das passagens da caverna e condutos próximos à superfície e; sedimentos aluvionares transportados geralmente por um fluxo d'água, com tamanhos variados, presença de estruturas sedimentares e imbricações de seixo que refletem o material de origem.

2.2 Classificação

A classificação dos sedimentos no interior de cavernas apresenta vários critérios a depender do autor, sendo adotado um consenso nos trabalhos das últimas décadas quanto à proveniência/origem dos sedimentos. Quatro critérios de classificação são analisados a partir de três bibliografias internacionais e uma nacional, com base na recorrência nos trabalhos (Tabela 1). Classificar o sedimento no interior da caverna é importante para entender as relações entre a sucessão dos fluxos e a dinâmica de deposição sedimentar para além de auxiliar nos possíveis *proxies* para estudo.

No que tange aos sedimentos clásticos, Gillieson (1996) define-os basicamente em alogênicos (origem fora da caverna) e autigênicos (origem dentro da caverna). White (2007) e Ford and Williams (2007) partem do mesmo princípio, mas realizam uma discussão mais detalhada acerca de tais sedimentos e as subclasses a que estariam correlacionados. Dessa forma, definem que os sedimentos alóctones são formados no exterior da caverna principalmente por ação do intemperismo superficial e subsuperficial, transportados com uma composição variada de acordo com o tipo de rocha disponível na bacia (Bosch e White, 2007; Ford e Williams, 2007; White, 2007). Para estes sedimentos, Ford and Williams (2007) e White (2007) utilizam essencialmente as mesmas subdivisões, englobando as principais fontes dos sedimentos clásticos como sendo de origem fluvial, lacustre, glacial, vulcânico dentre outros. Sedimentos autóctones seriam formados no interior da caverna compreendendo os originários de colapso, fluviais, intemperismo ou guano.

Tabela 1: Comparação das classificações para sedimentos em caverna

Gillieson (1996)	Origem	Clástico	Orgânico	Químico	Gelo
		1 Alogênico	1 Detritos Alogênicos	1 Alogênico	1 Cavidade Autigênica de Gotejamento
	2 Autigênico	2 Depósitos Autigênicos	2 Autigênico	2 Condensação de parede	
				3 Piscinas de Caverna	
Laureano (1998)	Mecanismo de Transporte	Fluvial		Gravitacional	
		Tração, saltação e suspensão (acresção paralela)		Abatimentos (queda livre)	Fluxo de detritos (corrida de lama)
	Origem	Alóctone com contribuição autóctone	Autóctone	Alóctone com contribuição autóctone	
	Morfologia e Textura	Bancos e leitos fluívia em canais ativo; bancos e terraços em canais abandonados; ampla variação textural: argila e seixo	Cones e pilhas irregulares, de tamanho variado, compostos por brechas de colapso, de teto ou parede. Grânulos a matações	Cones, bancos e pilhas de sedimentos, muitas vezes preenchendo galeria. Diamictitos, brechas matriz e clastossuportadas	
White (2007)	Proveniência	Sedimentos Clásticos		Sedimentos Químicos	
		A Sedimentos Alóctones 1 Entrada de talus 2 Infiltração a Solos de lavagem b Detritos Gravitacionais 3 Sedimentos transportados por fluxo a Orgânicos de lavagem b Sedimentos aluviais c Glacial de lavagem d Vulcânico de lavagem B Sedimentos Autóctones 1 Detritos de intemperismo 2 Colapso 3 Guano		A Travertinos 1 Flowstone 2 Dripstone B Evaporitos 1 Crosta 2 Bulk Deposits C Fosfatos D Resistatos E Gelo	
Ford & Williams (2007)	Origem	Sedimentos Clásticos		Orgânicos	Precipitados e Evaporitos
		A Sedimentos Alóctones 1 Fluvial 2 Infiltrado 3 Lacustre 4 Marinho 5 Eólico 6 Glacial e injeção glaciofluvial 7 Dejetos, colúvios e lama 8 Vulcânicos B Sedimentos Autóctones 1 Colapso 2 Fluvial 3 Intemperismo 4 Eólico		Sedimentos Alóctones 1 Água, vento, etc 2 Fauna exterior	1 Gelo 2 Calcita 3 Outros carbonatos e carbonatos hidratados 4 Sulfatos e sulfatos hidratados 5 Haletos 6 Nitrato e Fosfato 7 Silica e Silicatos 8 Manganês e óxidos de ferro hidratado 9 Minério associado e diversos minerais

Laureano (1998) questiona o fato dos detritos poderem ser remobilizados e misturados no interior das cavernas, principalmente devido a processos fluviais, o que diminuiria a confiabilidade da proveniência, enfraquecendo a classificação de origem. Em trabalho posterior, o autor adverte que em algum momento durante a deposição sedimentar poderá ocorrer contribuições autóctones e alóctones,

tornando o critério de proveniência um parâmetro insuficiente para classificação (Laureano e Karmann, 2013). Deste modo, apresenta uma classificação baseada no processo de sedimentação nos condutos, destacando os mecanismos de transporte e deposição, dividindo os sedimentos em duas classes: fluviais e gravitacionais, relacionando o mecanismo de transporte e a origem.

2.3 Transporte

Os sistemas subterrâneos são análogos aos superficiais. A água é o principal mecanismo de transporte e conduz os sedimentos autóctones e alóctones por fluxos através de condutos. Apesar de similares aos superficiais, os fluxos subterrâneos apresentam duas diferenças (Sasowsky, 2007) que podem implicar em altas velocidades e fluxo freático ascendente: (1) a largura do canal em cavernas é limitada pela forma dos condutos que pode promover um rápido alagamento; e (2) possuem fluxos confinados em vez de abertos com vários distributários. Importante observar que os sedimentos clásticos em muitos casos se movem devido a vários pulsos episódicos e não a um fluxo contínuo (Herman *et al.*, 2012). Tal característica favorece o armazenamento de sedimentos que podem ser removidos por grandes inundações durante fluxo de tempestades (Bosch e White, 2007).

Gillieson (1996) descreve algumas cavernas comumente como planícies de inundação que se comportam como *canyons* com vales encaixados. Ainda assim, a morfologia dos canais implica na ocorrência de dois principais eventos: (1) oscilação no nível d' água resultando em uma maior variação da textura dos sedimentos por unidade de comprimento do canal, comparada com a superfície; (2) remoção total ou parcial de sedimentos anteriormente depositados devido aos fluxos de água que podem acarretar no retrabalhamento destes sedimentos a depender da textura e geometria da passagem local. Para este último item, Ghilardi *et al.* (2011) reafirmam que sedimentos em cavernas são constantemente

retrabalhados por inundações que destroem o empilhamento estratigráfico misturando-os aos sedimentos fósseis, geralmente relacionados aos períodos de maiores chuvas com aumento na drenagem superficial.

Os sedimentos podem ser transportados de cinco maneiras em um fluxo tubular a depender das suas características litológicas (Newitt *et al.*, 1955 apud Ford and Williams, 2007): (1) grãos rolantes que produzem ondulações em camadas estacionárias, (2) saltação de grãos individuais acima do leito, (3) camada deslizante envolvendo primeiramente a parte superior da carga com aumento da velocidade, (4) suspensão heterogênea e (5) suspensão homogênea em velocidades mais altas. Pelo menos os quatro primeiros acontecem em cavernas freáticas ou inundadas (Ford e Williams, 2007).

Bosch e White (2007) apresentam um modelo de fluxo global para os sedimentos através de bacias hidrográficas subterrâneas (Figura 1) que contém várias origens de entrada e uma única saída (a descarga para fluxo de superfície). Farrant e Smart (2011) definem parâmetros similares para a entrada de sedimentos clásticos em cavernas: (1) através de correntes em sumidouros, (2) colapso de sumidouros, (3) fissuras no leito rochoso e drenos de poços, (4) por injeção glacial e (5) através de inundações de rios.



Figura 1 - Fluxo global de sedimentos em bacia subterrânea (Bosch e White, 2007).

A velocidade do fluxo hídrico necessária para mover uma partícula pode ser estimada através do histograma de Hjulstrom (Ford e Williams, 2007; Gillieson, 1996; Springer, 2005). Dentre os materiais finos (silte, argila e areia fina), a areia fina é o tamanho de partícula mais fácil de ser transportados por suspensão. Assim, areias são erodidas e transportadas por fluxos d'água, com maior facilidade o que corrobora para explicar a natureza dos sedimentos presentes em cavernas, dominadas por cascalhos e lamias (Gillieson, 1996). Ford e Williams (2007) asseguram que a movimentação dos sedimentos se inicia quando a tensão de cisalhamento excede o valor crítico observado. Também nota-se que a velocidade necessária para iniciar a erosão é maior do que para manter o transporte, devido à força hidráulica necessária para retirar a partícula das camadas coesivas de sedimentos do que para mantê-la em saltação ou suspensão (Gillieson, 1996).

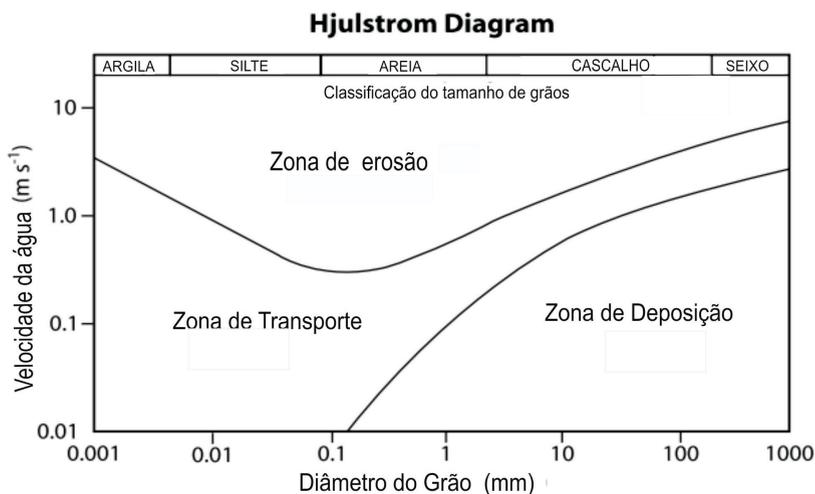


Figura 2 - Histograma de Hjulstrom demonstrando a relação entre o tamanho das partículas e a velocidade necessária para erosão, transporte e deposição. (Ford e Williams, 2007; Gillieson, 1996; Springer, 2005).

2.4 Processos De Sedimentação

As taxas de deposição e a natureza dos sedimentos possuem controles climáticos que condicionam os processos de intemperismo e conseqüentemente a quantidade de sedimentos fornecidos. Assim, qualquer mudança climática acarreta automaticamente a alteração do fluxo sedimentar com aumento/diminuição da quantidade de material disponível (Farrant e Smart, 2011). As variações nas taxas de deposição podem ser extremas, uma vez que no interior da caverna o movimento dos sedimentos pode ser obstruído a jusante causando retrabalho e deposição (Ford e Williams, 2007).

Depósitos sedimentares em caverna são complexos com estudo desafiador, uma vez que as sucessões sedimentares podem não respeitar a lei de sobreposição causando reversões estratigráficas. Osborne (1986) distingue cinco ambientes principais de sedimentação: (i) vadoso superior, ambiente de entrada; (ii) vadoso superior, ambiente interior; (iii) ambiente vadoso menor; (iv) ambiente freático dinâmico; e (v) ambiente não freático.

Os sedimentos acumulados são distinguidos por serem imaturos, mal classificados, granulometria diversa, alto teor de matéria orgânica, cor escura e níveis com cimentação de carbonato (Ghilardi *et al.*, 2011). Comumente, a deposição acontece por gravidade (queda) ou transporte aquoso, no entanto a diferenciação de tais processos se torna ineficaz quando, por exemplo, correntes de turbidez movimentam sedimentos em áreas íngremes ou devido à injeção de lama nas passagens de cavernas tropicais por movimento de massas (Gillieson, 1996, 1986).

A acumulação nas passagens das cavernas ocorre quando as forças motrizes são insuficientes para mover o sedimento originário de depósitos nas margens dos canais ou em espessos pacotes sob os leitos dos rios (Springer, 2005). À medida que o nível de base é rebaixado, condutos são abandonados resultando em passagens antigas mais secas e com maior elevação, com depósitos sedimentares

que preservam o episódio final de deposição (Bosch e White, 2007).

A partir das deposições, estruturas sedimentares são formadas (Figura 3), correlacionadas às tendências da energia deposicional e a natureza dos fluxos de água (Gillieson, 1996). Tais estruturas são semelhantes àquelas presentes em depósitos fluviais de superfícies, sendo recorrentes estratificações cruzadas, laminações paralelas e onduladas, marcas de onda, imbricamento de seixos, estruturas de corte e preenchimento (Laureano e Karmann, 2013).

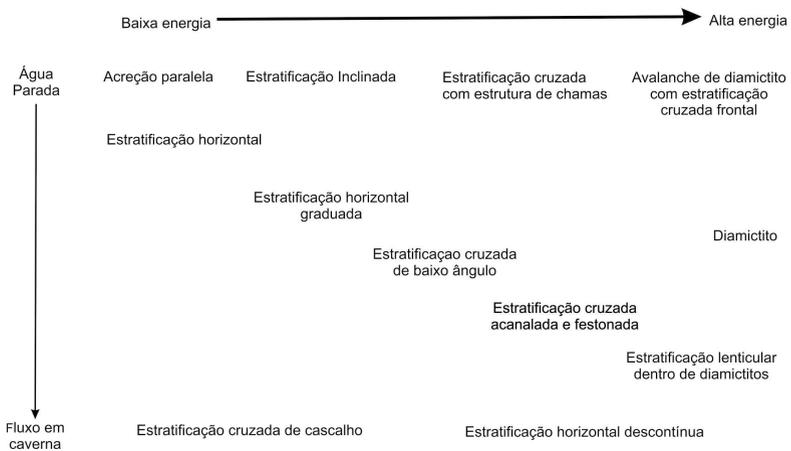


Figura 3 - Relações entre o tipo de fluxo de água e a energia de depósito expressa em estruturas de sedimentos de cavernas (Gillieson, 1986).

2.5 Diagênese

Processos diagenéticos modificam a textura e estrutura dos sedimentos após sua deposição, com alterações físicas, químicas e biológicas envolvendo processos como compactação, cimentação, dissolução e recristalização (Bridge e Demico, 2008). Poucos trabalhos que sintetizam essa temática são encontrados na literatura em ambientes cavernícolas dada a dificuldade em observar e mensurar tais processos, além de sua natureza variada.

No interior das cavernas a dinâmica geralmente ocorre em condições estáveis de temperatura e pressão com variação no lençol freático e taxas altas de dissolução de carbonato de cálcio, que estão presentes na cimentação da maioria dos sedimentos clásticos das cavernas (Osborne, 2001, 1984). Sabe-se que a natureza e a quantidade de diagênese é mais significativa nos calcários e incluem processos físicos como secagem, encolhimento de paredes, deformação, bioturbação etc (Ford e Williams, 2007). As condições ambientais caracterizadas pela falta de luz, altas taxas de umidade e uma temperatura quase constante, reduz a quantidade de alteração química que pode ocorrer nos sedimentos clásticos (Gillieson, 1996).

Pesquisas usam minerais autigênicos dentro dos sedimentos para reconstruir antigas condições químicas paleoambientais com finalidade arqueológica (Karkanas *et al.*, 2000). Técnicas como micromorfologia dos solos e análise por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), por exemplo, foram usadas no depósito arqueológico da Caverna de Esquilleu, Espanha, com objetivo de avaliar alterações/transformações diagenéticas (Mallol *et al.*, 2010).

2.6 Fácies Sedimentares

O conceito de fácies possui diferentes aplicações na sedimentologia, mas costuma se caracterizar pelo agrupamento de conjuntos de rocha com características similares, como granulometria, geometria e estrutura, distinguindo-as das demais (Anderton, 1985). Esse conceito também pode ser aplicado aos sedimentos em caverna, em que tais características auxiliam na compreensão do ambiente de deposição e nas correlações estratigráficas.

A organização das fácies depende da dinâmica interna dos condutos das

cavernas e refletem a maneira pela qual o sedimento foi organizado e depositado (White, 2007), podendo ser definidas como: litofácies (litologia), depofácies (relativas ao ambiente deposicional), fácies texturais, dentre outras. No entanto, os modelos de fácies precisam ser usados com cautela, pois nem todos podem ser empregados nas cavernas, dada a dinâmica específica do ambiente cárstico.

O conjunto de fácies frequentemente adotado nos trabalhos corresponde ao de Bosch e White (2007), que as organizam com base no mecanismo de transporte, diferenças no tamanho de partículas e grau de seleção. Cinco fácies sedimentológicas são descritas: fácies de canal (*Channel Fácies*), talvegue (*Thalweg Fácies*), águas paradas (*Slackwater Fácies*), diamictito (*Diamicton Fácies*) e pantanosa (*Backswamp Fácies*) (Figura 4).

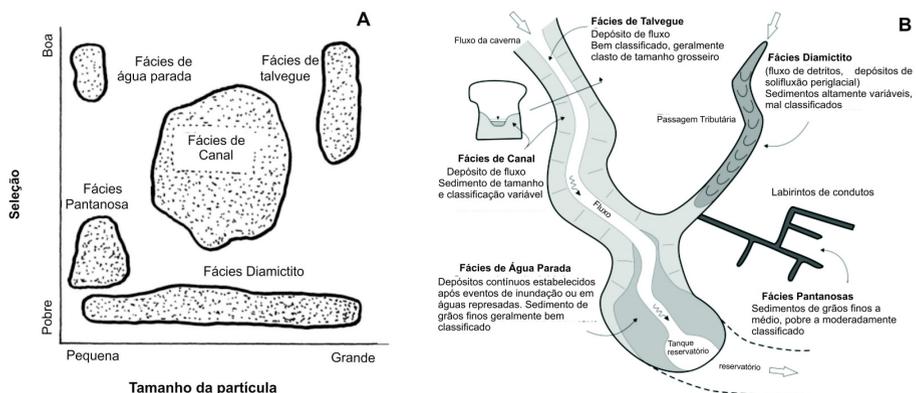


Figura 4 A - Fácies sedimentares classificadas com base no tamanho das partículas e grau de selecionamento, segundo Bosch e White (2007). B - Esquema de fácies sedimentares adaptado de Bosch e White (2007) em zonas vadasas com labirintos tributários adaptado de Farrant and Smart (2011).

As fácies de canal (*Channel Facies*) representam grande parte dos sedimentos clásticos encontrados nas cavernas, com materiais geralmente bem classificados dentro de um leito, mas com mudanças abruptas ao longo da seção estratigráfica (Bosch e White, 2007). Tais fácies são geralmente observadas

onde as correntes mais recentes cortam os sedimentos mais antigos, mostrando uma estratigrafia distinta, que raramente é contínua ao longo da caverna (White, 2007). Os sedimentos de canal são transportados no conduto pelas correntes e posteriormente depositados onde o fluxo diminui, sendo sua litologia dependente do material de origem disponível (Herman *et al.*, 2012).

As fácies de talvegue (*Thalweg Facies*) são definidas pelos sedimentos grossos como seixos e matacões às margens dos córregos no interior das cavernas. Para estabelecer esta configuração é necessário que existam condições de fluxo intenso para mover os clastos maiores e fluxos moderados para extrair partículas menores como areia e silte, restando apenas os primeiros (Herman *et al.*, 2012). Segundo White (2007), as fácies de águas paradas (*Slackwater Facies*) são formadas por sedimentos suspensos de granulação fina como silte e argila que frequentemente são depositados até o topo das passagens. São desenvolvidas a partir de altos fluxos que colocam vários tipos de materiais em suspensão, no qual ocorre inicialmente a deposição de sedimentos mais grossos, em seguida as águas de inundação recuam lentamente e as partículas mais finas depositam (Herman *et al.*, 2012). Springer e Kite (1997) comprovam que tais fácies correspondem a sedimentos deixados nas cavernas rasas durante processos de inundações catastróficas.

As fácies diamictito (*Diamicton Facies*), primeiramente descritas por Gillieson (1986), são massas sedimentares caóticas com partículas de vários tamanhos, desde argila a pedregulhos. São interpretadas como fluxo de detritos de alta energia, capaz de mover e arrastar a massa de sedimentos como carga suspensa e depositá-la sem realizar qualquer tipo de seleção (Bosch e White, 2007). Geralmente são associadas a eventos de derretimento glacial ou inundações catastróficas (Herman *et al.*, 2012). Por fim, as “fácies pantanosas” (*Backswamp Facies*) cujo nome faz referência ao comportamento hidráulico semelhante aos pântanos, constituem-se especialmente de resíduos do intemperismo de rochas

do embasamento e infiltração do material de solos sobrejacentes com pouco ou inexistente transporte lateral (Bosch e White, 2007). São formadas por percolação lenta de água, na qual as velocidades não atingiram os valores necessários para o transporte de sedimentos clásticos (Herman *et al.*, 2012).

Outras associações de fácies são encontradas na literatura e utilizam de características próprias para distinção (por exemplo, Ford e William (2007) se baseiam na localização dos sedimentos na entrada ou no interior da caverna, presença de fluxo d'água ativo ou inativo resultando em comportamento diferente dos sedimentos à medida que se distancia da entrada da caverna. No trabalho de Springer e Kite (1997) em *Cheat River Canyon* em *West Virginia*, sedimentos de caverna são divididos em zonas vadosa, freática e residual. As duas primeiras zonas foram subdivididas em quatro fácies cada, sendo elas: zona vadosa representada pelas fácies diamictito, areia laminada, ritmito de silte e argila e marga argilo arenosa; zona freática correspondendo à fácies de gravidade, travertino, *overbank* e fluxo de caverna. Laureano e Karmann (2013) agruparam as fácies, tendo como principal parâmetro o controle do nível d'água sobre processos sedimentares, organizadas em: fácies na zona vadosa (com predomínio de processos gravitacionais, eólico, glaciais e movimento de massa), zona de oscilação do nível d'água (com transporte de sedimento em suspensão e cargas de fundo, contemplando as quatro fácies descrita por Bosch e White (2007), de canal, talvegue, águas paradas e “pantanosas”) e zona freática (sedimentos depositados em ambientes constantemente inundados).

3. ESTUDOS PALEOAMBIENTAIS

Sedimentos clásticos em cavernas constituem bons alvos para estudos paleoambientais, no entanto, requerem uma abordagem *multiproxy* para evitar conclusões equivocadas, devido à sua dinâmica na qual longos períodos de

sedimentação estão relacionados a múltiplos eventos de entrada de sedimentos e erosão (Haddad-Martim *et al.*, 2017). Osborne (1986) afirma que, para uma interpretação confiável dos depósitos de cavernas, é necessária uma compreensão de toda a história deposicional, além de uma descrição detalhada das pequenas alterações das fácies laterais, inconformidades e inversões estratigráficas.

A descrição e classificação apropriada dos sedimentos em cavernas é uma etapa crucial e fundamental para a reconstrução adequada da gênese e evolução dos depósitos, evitando suposições inadequadas (Farrand, 2001; Goldberg e Sherwood, 2006; Haddad-Martim *et al.*, 2017; White, 2007). Os resultados obtidos poderão fornecer informações sobre a história do transporte e ambiente de deposição (proporção entre tamanho e textura dos sedimentos), bem como refletir os processos pós deposicionais (mudança no tamanho do grão) (Hubbe *et al.*, 2011; Nichols, 2009).

As mudanças de fácies são resultados de alterações climáticas e tectônicas em nível regional que influenciam na produção, transporte e deposição de sedimentos (Springer, 2005). O interesse em depósitos de cavernas como arquivos paleoclimáticos surge devido a métodos bem desenvolvidos e confiáveis para atribuir datas aos depósitos (White, 2007). A sequência estratigráfica dos depósitos sedimentares pode estabelecer uma correlação cronológica que geralmente é obtida utilizando métodos de datação como paleomagnetismo, isótopos radiométricos, cosmogênicos e demais técnicas relacionadas (Springer, 2005).

Para além de fornecer uma cronologia para sedimentos clásticos e sua fauna e flora, as datações em cavernas são importantes para inferir taxas de evolução da paisagem, a partir de sequências de passagens e depósitos sedimentares (Gillieson, 1996). Isso é possível devido à preservação das evidências de desenvolvimento da paisagem no passado que foram suprimidas das áreas

emersas por processos superficiais. No entanto, os resultados obtidos devem ser usados de forma cautelosa, uma vez que a idade revelada limita-se a depósitos mais jovens que a própria caverna (Stock *et al.*, 2005). Bosák (2002) também alerta para o fato do registro cárstico tornar-se irreconhecível com reativações de processos que misturam materiais de diferentes idades.

3.1 Métodos De Datação

Atualmente várias técnicas de datação são conhecidas, possuidoras de vantagens e limitações a depender da idade e material utilizado. Os principais métodos aplicados em caverna, de acordo com White (2007), são: Carbono 14 (^{14}C), paleomagnetismo, isótopos cosmogênicos e séries de urânio. Este último aplica-se a sedimentos químicos como espeleotemas, mas são comumente utilizados em conjunto com sedimentos clásticos, motivo este de sua abordagem neste trabalho. Bosák (2002), em uma revisão para aplicação de datações em ambientes cársticos, inclui outros métodos como termoluminescência (TL), luminescência opticamente estimulada (LOE), traço de fissão dentre outros.

Segundo Noller *et al.* (2000), os métodos de datações podem ser divididos entre sideral (determinam as datas do calendário ou contam os eventos anuais), químico e biológico (medem os resultados de processos químicos ou biológicos dependentes do tempo), correlação (que estabelecem equivalência de idade usando propriedades independentes do tempo), geomórfico (medem os resultados cumulativos de processos complexos, inter-relacionados, físicos, químicos e biológicos na paisagem), isotópico (medem as alterações na composição isotópica devido ao decaimento e/ou crescimento radioativo) e radiogênico (que medem os efeitos cumulativos do decaimento radioativo, como dano de cristal e elétron) - Figura 5.

		TÉCNICA	IDADE	MATERIAL ADEQUADO
TIPO DE MÉTODO	ISOTÓPICO	Radiocarbono (Carbono 14)	0.3-30 (55) mil anos	Matéria orgânica, turfa, húmus, ossos, tecidos, conchas de carbonato, corais, travertinos, espeleotemas, solos, águas subterrâneas, gelo
		Série de Urânio 238U/206Pb 235U/207Pb 232Th/208Pb	< 0.1 - > 100 Ma	Minerais U e Th em rochas ígneas e metamórficas (ex. Zircão e monazita), U em opala, calcita de paleocarste
		Isótopos Cosmogênicos 26Al/10Be	0,1 - 10 Ma	Gelo, sedimentos marinhos e lacustres, corais, matéria orgânica, nódulos de manganês
TIPO DE MÉTODO	RADIAGÊNICO	Termoluminescência (TL)	< 500 mil anos	Objetos arqueológicos, quartzo e feldspatos, ferramentas de pedra, conchas, dentes de ossos, amostras poliminerálicas de grãos finos, lava (plagioclásio), tectitos, vidro vulcânico, loess, travertino e espeleotemas, conchas de calcita fóssil
		Luminescência Opticamente Estimulada (OSL)	1-700 mil anos	Eólicos, fluviais, sedimentos glaciais, quartzo, zircão
		Ressonância de Spin Eletrônico (ESR)	25-50 ka to > 1 Ma (?100 Ma)	Fósseis, espeleotemas, travertino, caliche e veios preenchidos, sedimentos pelágicos, cerâmicas, quartzo, feldspatos, silicatos, vidro, apatita etc.,
TIPO DE MÉTODO	CORRELAÇÃO	Paleomagnetismo	10 ⁵ -10 ⁶ mil anos	Sedimentos clásticos finos contidos em seqüências sedimentar contínua
		Estratigrafia	-	Seqüências sedimentares

Figura 5 - Quadro comparativo com principais tipos de datações em caverna. Adaptado de Bosák (2002) e Noller *et al.* (2000).

O método de datação por Carbono 14 é provavelmente o mais conhecido, tendo aplicações diversas (Nichols, 2009). O isótopo radioativo de carbono 14 é produzido durante o bombardeamento cósmico de ¹⁴N na atmosfera. Os organismos vivos incorporam continuamente ¹⁴C até sua morte, que em seguida passa a decair radioativamente a uma taxa de aproximadamente 5730±40 anos. Apesar de baixa, as taxas conseguem detectar com precisão materiais em até 50000 anos, podendo em alguns casos chegar a 70000 anos (Tarbuck *et al.*, 2005). São comumente utilizados para datação de matéria orgânica, fragmentos de carvão, guano (fezes de morcego), ossos, dentre outros

Datação das séries de urânio é o principal método usado em espeleotemas, com meias vidas longas na faixa de milhões de anos conseguindo marcar o fechamento do sistema geoquímico, anteriormente perturbado pelo fracionamento químico (Corrêa *et al.*, 2016). As idades dos espeleotemas são empregadas para datar episódios de sedimentação clástica e erosão nas fácies

no interior da caverna, uma vez que marcam o momento de incorporação de urânio nos depósitos minerais autigênicos (Ford e Williams, 2007; Ku, 2000). A estimativa da medição é baseada no urânio (^{238}U e ^{235}U) e tório (^{232}Th) e seus respectivos nuclídeos filhos, cujos membros finais são chumbo estáveis (Bosák, 2002; Ku, 2000). O isótopo de urânio ^{238}U cujo decaimento alcança o ^{206}Pb , tem dois isótopos intermediários com longas meia vidas ^{234}U (meia vida 248.000 anos) e ^{230}Th (meia vida 75.200 anos). O cálculo da idade é realizado pela medida da relação $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ e $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, partindo da premissa que não existe concentrações de tório.

Nuclídeos cosmogênicos possuem idades calculadas a partir do acúmulo de determinados nuclídeos em materiais expostos a radiação cósmica (Zreda e Phillips, 2000). Os principais isótopos radioativos são o ^{14}C , ^{36}Cl , ^{10}Be e ^{26}Al , sendo estes dois últimos mais importantes no estudo cársticos pois são criados na proporção fixa de 1:6 em quartzo, abundante em seixos e areais no interior de cavernas (Ford e Williams, 2007). As taxas de acumulação são proporcionais à intensidade dos raios cósmicos e as concentrações de nuclídeos no material. Desse modo, as quantidades de isótopos cosmogênicos presentes podem relacionar-se ao período que o material foi exposto (Zreda e Phillips, 2000). Essa é uma das técnicas mais recentes e promissoras para sedimentos em caverna, abrangendo uma escala de tempo de aproximadamente 5 milhões de anos que compreende a maioria dos sistemas cársticos (White, 2007).

Analisando o método radiogênico, três principais técnicas podem ser destacadas: termoluminescência (TL), luminescência opticamente estimulada (LOE) e ressonância de spin eletrônico (ESR). Ambas partem do princípio que materiais sedimentares expostos a uma radiação ionizante a partir do decaimento radiativo liberam elétrons que ficam presos nos defeitos (“armadilhas”) dos cristais (Ford e Williams, 2007; Forman *et al.*, 2000). O sedimento exposto

à luz solar provoca a liberação de energia armazenada (“branqueamento”) e a acumulação de luminescência apenas inicia quando o mesmo é enterrado (Nichols, 2009). Na TL as armadilhas contendo os elétrons são esvaziadas por aquecimento, para a LOE utiliza-se um feixe a laser e na ESR o número de defeitos é medido a partir do sinal paramagnético da amostra (Gillieson, 1996). Este método utiliza grãos de quartzo e feldspato para o cálculo de intervalo de tempo que varia entre 100 anos até 1 milhão de anos (Ma), a depender da saturação do material analisado (Aitken, 1998). As idades de luminescência fornecem para o sedimento uma medida do tempo desde o último evento de exposição ao sol ou aquecimento (Forman *et al.*, 2000).

O paleomagnetismo é um método de correlação baseado nas variações na declinação polar, intensidade e campo magnético da Terra (Bosák, 2002). Esse campo reverte, em intervalos regulares, o polo norte e polo sul magnético entre 10^5 - 10^6 anos e estabelece uma unidade de tempo principal, os *chrons* (Ford e Williams, 2007). Os materiais geológicos, como rochas e sedimentos, em condições apropriadas podem registrar e preservar a direção do campo magnético da Terra (Verosub, 2000). Sedimentos clásticos finos possuem pequenas quantidades de minerais magnéticos, e durante a deposição ou cristalização são orientados com o campo magnético da Terra, de acordo com o evento exposto (Bosák, 2002; White, 2007). Para determinar uma idade de unidade geológica, os registros devem ser correlacionados com um padrão geral conhecido ou um período aproximado sendo que reversões paleomagnéticas fornecem marcadores de tempo (Verosub, 2000; White, 2007). No entanto, a aplicação deste método geralmente necessita de uma sequência sedimentar contínua, muitas vezes interrompida em cavernas ou com alterações pós deposicionais (Ford e Williams, 2007). As melhores amostras são obtidas a partir da fácies de águas subterrâneas, onde os grãos de sedimentos assentam em águas calmas (White, 2007).

A estratigrafia fundamenta-se na lei de superposição, onde em condições tectônicas normais as camadas sobrejacentes são mais jovens que as subjacentes (Bosák, 2002). No entanto, em ambiente cársticos, os registros sedimentares podem ser danificados pelos processos sedimentares como redeposição, queda, intrusão de fluxo, escavação, dentre outros (Bosák, 2002; Ford e Williams, 2007). Conforme define Nichols (2009), as técnicas litoestratigráficas informam a idade relativa das unidades mostrando quais são mais jovens ou mais antigas com base nas características litológicas, não fornecendo, portanto uma estrutura temporal. Bosák (2002) acrescenta, ainda, a importância do uso de fósseis para uma correlação bioestratigráfica, que se baseia na subdivisão vertical do tempo geológico de acordo com a fauna e flora fósseis.

3.2 Outros Métodos

Outros métodos podem ser empregados para enriquecer os estudos paleoambientais em cavernas, como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que fornece informações sobre a composição ou a estrutura do sedimento (Dedavid *et al.*, 2007). Em ambientes cavernícolas tal método pode auxiliar a identificar a natureza do agente consolidante e feições autigênicas nos pacotes argilosos, como no trabalho de Laureano (1998). Para obter composições mineralógicas, a Difração de Raio X auxilia na identificação de minerais e argilo-minerais (Foos *et al.*, 2000; Martini, 2011). Já análises químicas como a Fluorescência de Raio X fornece avaliação quantitativa dos elementos na forma de óxidos e são usualmente empregadas nas pesquisas para caracterizar a proveniência dos sedimentos (ex: Darrénougué *et al.*, 2009; Friedrich e Catalano, 2012; Haddad-Martim *et al.*, 2017). Por fim, as análises físicas dos sedimentos como análise granulométrica e a micromorfologia do grão auxiliam na divisão de fácies e compreensão do ambiente de sedimentação (Haddad-Martim *et al.*, 2017; Hubbe *et al.*, 2011; Martini, 2011).

Fitólitos podem ser definidos como partículas ou depósito de sílica hidratada, formados durante o crescimento (polimerização) das plantas que são liberadas após sua morte (Luz *et al.*, 2015; Shillito, 2013). São bons indicadores ambientais e ótima ferramenta para compreender ambientes passados, variabilidade climática e atividades antrópicas (Madella *et al.*, 2013; Osterrieth *et al.*, 2009). O trabalho de Wang *et al.* (2003) exemplifica a utilização do método ao realizar uma correlação dos fitólitos com características climáticas na China. Para estabelecer essas associações são consideradas as vias fotossintéticas e padrões distribuição no território que são correlacionados ao clima.

O objeto de estudo da palinologia são os palinomofos (poléns e esporos de plantas) que, através da reconstrução da vegetação, auxiliam nos estudos paleoclimáticos (Suguo, 2010). São amplamente utilizados em ambientes carvernícolas, mas suas interpretações requerem prudência, como adverte Hunt e Fiacconi (2018) em uma revisão dos fatores que afetam a tafonomia do polén, interferindo na confiabilidade dos registros palinológicos dos sedimentos no interior de caverna.

Complementarmente, para se estudar a extensão vertical e a disposição geométrica dos sedimentos pode-se utilizar técnicas de geofísica rasa, das quais se destaca o uso do GPR (*Ground Penetration Radar*- Radar de penetração no solo). O método fornece visualização detalhada das fácies e preenchimentos de canais (Noller *et al.*, 2000). Em cavernas são aplicados no estudo da geometria e volumetria de canais, direção dos fluxos, diferenças laterais de fácies, espessura das camadas, dentre outros como nos trabalhos recentes de Teja Čeru *et al.* (2018a) e T. Čeru *et al.* (2018b).

4. ESTUDOS BRASILEIROS E SUAS POTENCIALIDADES

A pesquisa na Plataforma Capes retornou diversos trabalhos nos quais os sedimentos foram empregados para marcar a contemporaneidade da deposição com aspectos arqueológico/paleontológico (Auler *et al.*, 2006; Faure *et al.*, 1999; Fontugne, 2013; Kinoshita *et al.*, 2014; Michab *et al.*, 1998; Oliveira *et al.*, 2014; Peyre *et al.*, 1998; Piló *et al.*, 2005; Roosevelt *et al.*, 1996; Santos *et al.*, 2003). Para esses trabalhos são empregadas técnicas como datação de Carbono 14, luminescência opticamente estimulada e termoluminescência. A quantidade expressiva de trabalhos demonstra a ampla utilização dos sedimentos clásticos em cavernas mesmo que com outras finalidades.

O resultado para pesquisa em território brasileiro pode ser observado na Figura 6. Em um primeiro momento é notória a disparidade entre o número de cavernas já mapeadas e a quantidade de trabalhos que utilizam os sedimentos clásticos cavernícolas em uma perspectiva paleoambiental. Mesmo partindo da premissa que nem toda caverna possuirá depósitos sedimentares, esperava-se um quantitativo maior de estudos, conclusão sustentada, por exemplo, pelos estudos de Auler *et al.* (2009), que postula ser comum encontrar sedimentos antigos nas cavernas do leste brasileiro. Mesmo sendo poucos, os dados possuem alto valor científico devido às dificuldades impostas a esse tipo de estudo, frente a necessidade de obtenção de licenças perante órgãos competentes, materiais e profissionais adequados para o interior de caverna e instrumentos inerentes ao próprio ambiente cársticos.

Apesar desse cenário, o resultado também demonstra uma maior atenção aos sedimentos clásticos na última década comparada à inexistência de trabalhos anteriores. Isso pode ser atrelado à existência de novas abordagens metodológicas, como análises *multiproxy* que conferem maior possibilidade de correlação dos dados entre si e com outras pesquisas. A quantidade baixa de

trabalhos permite a caracterização das pesquisas realizadas bem como abordar a metodologia e os resultados a fim de demonstrar as possibilidades de aplicação e estabelecer o contexto atual, realizada a seguir.

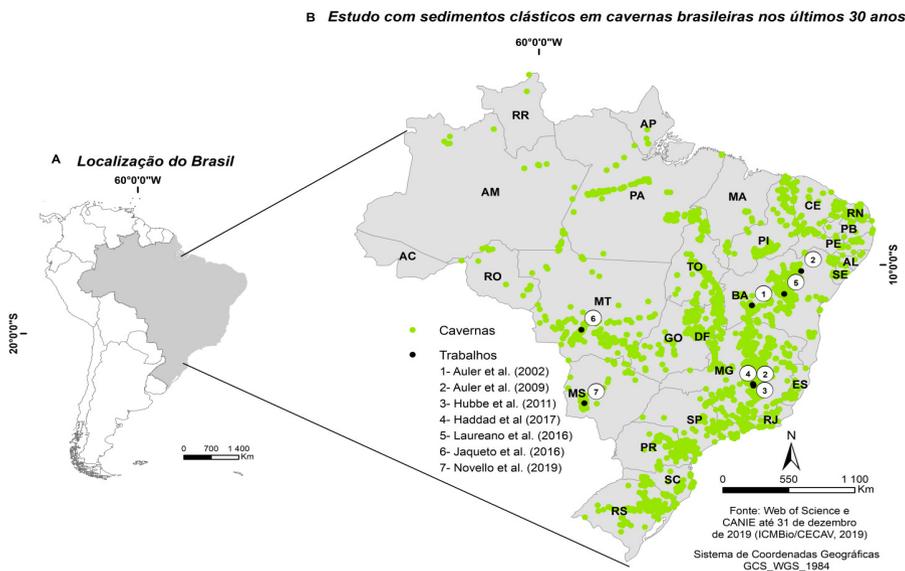


Figura 6 A - Localização do Brasil na América do Sul. B- Cavernas mapeadas no Brasil e localização dos trabalhos com sedimentos clásticos em cavernas com uma perspectiva paleoambiental.

O primeiro trabalho a se destacar realizou-se na Gruta do Padre/BA. Os sedimentos foram utilizados em análises paleomagnéticas, primeira aplicação no leste do Brasil, cujo objetivo era calcular a taxa de incisão fluvial no Cráton São Francisco (Auler *et al.*, 2002). Como advertem os autores, a avaliação quantitativa nessas áreas pode ser essencialmente problemática, uma vez que são tectonicamente estáveis com ausência de marcadores temporais. Os sedimentos depositados em passagens superiores antigas abandonadas podem registrar o rebaixamento do nível de base. Os resultados obtidos foram satisfatórios com

idades variando entre 0,99 – 1,95Ma contemplando o *chrons* Brunhes ao Matuyama e seus respectivos *subchrons*. Os dados permitiram uma determinação das taxas de incisão fluvial de 25-34 m Ma⁻¹ para o Cráton São Francisco e estão de acordo com demais dados calculados por outros métodos. Esse trabalho demonstra como os sedimentos em caverna são fontes potenciais de estudo para evolução da paisagem, em áreas onde as características superficiais não são muito favoráveis.

Ainda em áreas cratônicas do leste brasileiro, no entanto em cavernas localizadas nas regiões semi-áridas de Campo Formoso e sub-úmida de Lagoa Santa/MG, Auler *et al.* (2009) realiza um estudo com finalidade de compreender a ligação entre os mecanismo de entrada de sedimentos, mudanças paleoambientais e a evolução da paisagem cárstica. Amostras sedimentares são coletadas de 15 cavernas e analisadas por fluorescência de raio X além da descrição sedimentar. A cronologia das camadas superiores e inferiores com precipitação química, quando possível, é obtida por meio do método de datação por série de urânio. A pesquisa oferece uma explanação detalhada sobre o carste nessas áreas bem como sobre os processos de deposição e erosão sedimentar em cavernas. Além disso são comparados dados paleoclimáticos utilizando de espeleotemas e variação de $\delta^{18}\text{O}$. Ademais é discutida a natureza cíclica de mudanças climáticas que implicara na precipitação química e erosão ou entrada de sedimentos clásticos na caverna. Por fim, conclui-se que na área de Campo Formoso os períodos mais úmidos que os atuais são responsáveis pela precipitação de espeleotemas e seu processo de aporte sedimentar ativo está condicionada ao clima semi-árido uma vez que a vegetação escassa permite a erosão de sedimentos e o preenchimento de cavernas. Já em Lagoa Santa o processo atual de transporte do sedimento para dentro das cavernas está atrelado a condições climáticas intermediárias ou em transição no qual a precipitação favorece o escoamento nas encostas e consequentemente a inserção do sedimento na caverna.

Embora o trabalho iniciado por Hubbe *et al.* (2011) na Caverna Cuvieri em Lagoa Santa/MG tenha objetivo inicial de contextualizar restos paleontológicos em depósitos fossilíferos apresenta uma ótima abordagem deposicional para os sedimentos clásticos. Chama atenção a identificação das fácies sedimentares que abarca os sedimentos de caverna, oriundos do epicarste e solos e sedimentos de dolina. De forma contínua Haddad-Martim *et al.* (2017) a partir das fácies anteriormente denominadas procura compreender a dinâmica da evolução destas com paisagens próximas. A abordagem *multiproxy* detalhada inclui descrição dos sedimentos, análises granulométricas, composição química, conteúdo paleontológico, ^{14}C (ossos e dentes) e datação de ^{230}Th . No total, 12 fácies (11 fácies de sedimentos clásticos e uma química) foram identificadas por uma combinação de cor da matriz, grau de cimentação e características sedimentológicas. Os resultados permitiram entender a complexa evolução da sedimentação ocorrida ao longo dos últimos 300 mil anos em que aberturas da caverna permitiram a entrada de animais e sedimentos.

Utilizando nuclídeos cosmogênicos que é uma abordagem inédita para a datação de sedimentos clásticos cavernícolas nos estudos brasileiros, a pesquisa na chapada Diamantina (Laureano *et al.*, 2016) realizou-se no sistema de cavernas Lapa Doce e Torrinha, tendo como objetivo fornecer informações geocronológica e caracterizar os registros sedimentares da região. Amostras foram coletadas em seis trincheiras e depois utilizadas técnicas de petrografia e granulometria dos sedimentos, descrição de fácies, datação de urânio (*flowstone*) e datação a partir de quartzo cosmogênico. Cabe ressaltar que um estudo de fácies foi anteriormente realizado e apresentou resultados interessantes como a associação dos sedimentos com a evolução do relevo externo no qual os eventos de sedimentação subterrânea foram associados ao entalhamento de uma superfície de erosão e ao sistema de evolução das cavernas (Laureano, 1998). As idades resultantes de nuclídeos cosmogênicos forneceram resultados

animadores, na ordem de 2 milhões de anos. As datações das séries de urânio demonstraram um aumento do nível de base com sucessivos eventos de variação do lençol freático entre 115-12 mil anos atrás, indicando um clima úmido.

No estudo de Jaqueto *et al.* (2016), realizado no Centro Oeste brasileiro, os sedimentos clásticos cavernícola foram utilizados em conjunto com solos externos para comparação com o sinal magnético de uma estalagmite da Caverna Pau d'Alho/MT (Figura 6). Os dados magnéticos obtidos são comparados aos isótopos de carbono e oxigênio em diferentes escalas de tempo sugerindo um controle climático para entrada de minerais magnéticos na caverna. Dessa forma conclui-se que a concentração de tais minerais está condicionada a erosão do solo e cobertura vegetal. Portanto, períodos de seca resultariam em solos menos estáveis e maior aporte mineralógico em contrapartida a períodos chuvosos que se associam a uma vegetação mais densa capaz de reter tais minerais e diminuir o fluxo detrítico para o interior da caverna. Desse modo o estudo estabelece um novo emprego dos sedimentos para apoiar e validar técnicas magnéticas ambientais com a finalidade de reconstrução paleoclimática.

Pesquisa mais recente, o trabalho desenvolvido na Caverna do Jaraguá/MS utiliza-se de uma abordagem *multiproxies* a fim de realizar estudos paleoclimáticos e paleoambientais ocorridas entre o Último Máximo Glacial (UMG) e o Holoceno na América do Sul e Central (Novello *et al.*, 2019). A metodologia aplicada aos sedimentos clásticos consiste em uma combinação de GPR, fluorescência de raio X, isótopos de matéria orgânica e teor de carbono além de cronologia de matéria orgânica por meio de ^{14}C . Os dados do perfil sedimentar são analisados em conjuntos com informações de estalagmite bem como do solo adjacente. Como resultado obtém-se implicações para a mudança no ambiente na transição do UMG e do Holoceno fornecendo três possíveis causas: variabilidade hidrológica, mudanças de temperatura e mudanças de

CO₂ atmosférico. Destaca-se o resultado concordante dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ de estalagmite e do perfil sedimentar para um tipo de vegetação (dominada por C₄) do UMG ser diferente daquelas no Holoceno (dominada por C₃). O interessante da pesquisa consiste na correlação de dados usualmente obtidos em sedimentos químicos (estalagmite) e sua associação a sedimentos clásticos em um estudo que envolve também análise de paleovegetação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sedimentos clásticos no interior de caverna são importante fonte de estudos paleoambientais que podem fornecer resultados da ordem das centenas até os milhões de anos. A condição presente nos ambientes carvenícolas permite a preservação das condições de deposição, diferente dos ambientes superficiais que estão sujeitos a ações intempéricas e erosivas de forma mais incisiva. A dinâmica sedimentar presente nas cavernas implica em uma análise mais criteriosa considerando diversos métodos analíticos. Conforme observado na revisão bibliográfica, existe uma variedade de métodos cronológicos e outros não cronológicos que utilizados de forma conjunta permitem obter bons resultados, como observado em trabalhos brasileiros.

Mesmo que o número de trabalhos seja pequeno frente ao potencial investigativo e a quantidade de cavernas mapeadas, as pesquisas realizadas demonstram um caráter promissor quanto aos estudos paleoambientais e paleoclimáticos no Brasil. Para além de um marcador de contemporaneidade arqueológica ou paleontológica, os sedimentos clásticos fornecem várias oportunidades de aplicação constituindo ótima ferramenta de estudos. Diante do panorama de degradação ambiental crescente no território nacional ressalta-se a necessidade de mais estudos para compreensão os ambientes cársticos, garantindo melhor gestão e proteção dessas áreas.

REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITKEN, M.J. (1998) *An Introduction to Optical Dating*. New York: Oxford University Press. 267p.
- ANDERTON, R. (1985) *Clastic facies models and facies analysis*. Geological Society, London, Special Publications, v.18, p.31–47.
- AULER, A.S.; SMART, P.; TARLING, D.H.; FARRANT, A.R. (2002) Fluvial incision rates derived from magnetotratigraphy.pdf. *Zeitschrift für Geomorphologie*, v.46, p.391–40.
- AULER, A.S.; PILÓ, L.B.; SMART, P.L.; WANG, X.; HOFFMANN, D.; RICHARDS, D.A.; EDWARDS, R.L.; NEVES, W.A.; CHENG, H. (2006) U-series dating and taphonomy of Quaternary vertebrates from Brazilian caves. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v.240, p.508–522.
- AULER, A.S.; SMART, P.L.; WANG, X.; PILÓ, L.B.; EDWARDS, R.L.; CHENG, H. (2009) Cyclic sedimentation in Brazilian caves: Mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology*, v.106, p.142–153.
- BOSÁK, P. (2002) Karst processes from the beginning to the end: How can they be dated? *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, v.1, p.1–24.
- BOSCH, R.F.; WHITE, W.B.(2007) Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. *Studies of Cave Sediments: Physical and Chemical Records of Paleoclimate*, p.1–22.
- BRIDGE, J.S.; DEMICO, R. V. (2008) *Earth surface processes, landforms and sediment deposits*. New York: United States of America by Cambridge University Press, p835.
- CAMPAÑA, I.; BENITO-CALVO, A.; PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; ORTEGA, A.I.; BERMÚDEZ DE CASTRO, J.M.; CARBONELL, E. (2017) Pleistocene sedimentary facies of the Gran Dolina archaeo-paleoanthropological site (Sierra de Atapuerca, Burgos, Spain). *Quaternary International*, v.433, p.68–84.

- ČERU, T.; DOLENEC, M.; GOSAR, A. (2018a) Investigating karst cave sediments of unroofed caves with GPR, XRF and XRD. In: 17TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUND PENETRATING RADAR, GPR, Rapperswil, Switzerland. Anais. Rapperswil, Switzerland. ISBN 978-1-5386-5777-5.
- ČERU, T.; DOLENEC, M.; GOSAR, A. (2018b) Application of ground penetrating radar supported by mineralogical-geochemical methods for mapping unroofed cave sediments. *Remote Sensing*, v.10, p.1–25.
- CHAZAN, M.; AVERY, D.M.; BAMFORD, M.K.; BERNA, F.; BRINK, J.; FERNANDEZ-JALVO, Y.; GOLDBERG, P.; HOLT, S.; MATMON, A.; PORAT, N.; RON, H.; ROSSOUW, L.; SCOTT, L.; HORWITZ, L.K. (2012) The Oldowan horizon in Wonderwerk Cave (South Africa): Archaeological, geological, paleontological and paleoclimatic evidence. *Journal of Human Evolution*, v.63, p.859–866.
- CORRÊA, A.C.B.; TAVARES, B. DE A.C.; MONTEIRO, K. DE A.; FONSÊCA, D.N. (2016) The Application of Geochronometric Techniques in Geomorphology : a methodological updating. *Espaço Aberto*, v.6, p.45–74.
- DARRÉNOUGUÉ, N.; DECKKER, P. DE; FITZSIMMONS, K.E.; NORMAN, M.D.; REED, L.; KAARS, S. VAN DER; FALLON, S. (2009) A late Pleistocene record of aeolian sedimentation in Blanche Cave, Naracoorte, South Australia. *Quaternary Science Reviews*, v.28, p.2600–2615.
- DEDAVID, B.A.; GOMES, C.I.; MACHADO, G. (2007) MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA - Aplicações e preparação de amostras - Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores. Porto Alegre: EDIPUCRS, 60p.
- FARRAND, W.R. (2001) Sediments and Stratigraphy in Rockshelters and Caves: A Personal Perspective on Principles and Pragmatics. *Geoarchaeology - An International Journal*, v.16, p.537–557.
- FARRANT, A.R.; SMART, P.L. (2011) Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and paragenesis. *Geomorphology*, v.134, p.79–93.

- FAURE, M.; GUÉRIN, C.; PARENTI, F. (1999) Découverte d'une mégafaune holocène do Serrote do Artur (aire archéologique de Sao Raimundo Nonato, Piauí, Brésil). C. R. Acad. Sci. Paris, p.443–448.
- FEATHERS, J.; KIPNIS, R.; PILÓ, L.; ARROYO-KALIN, M.; COBLENTZ, D. (2010) How old is Luzia? luminescence dating and stratigraphic integrity at lapa Vermelha, Lagoa Santa, Brazil. *Geoarchaeology*, v.25, p.395–436.
- FONTUGNE, M. (2013) New Radiocarbon Ages of Luzia Woman, Lapa Vermelha IV Site, Lagoa Santa, Minas Gerais, Brazil. *Radiocarbon*, v.55, p.1187–1190.
- FOOS, A.M.; SASOWSKY, I.D.; LAROCK, E.J.; KAMBESIS, P.N. (2000) Detrital origin of a sedimentary fill, Lechuguilla Cave, Guadalupe Mountains, New Mexico. *Clays and Clay Minerals*, v.48, p.693–698.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. (2007) *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley: Chichester p.562
- FORMAN, S.L.; PIERSON, J.; LEPPER, K. (2000) Luminescence Geochronology. In: *Quaternary Geochronology: Methods and Applications* AGU. 1.ed. American Geophysical Union, Washington, D: p.157–176.
- FRIERDICH, A.J.; CATALANO, J.G. (2012) Distribution and speciation of trace elements in iron and manganese oxide cave deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v.91, p.240–253.
- GEER, A.A.E. VAN DER; DERMITZAKIS, M.D. (2013) Caves And Fossils: Palaeontology In Greek Caves And Fissures. In: MAVRIDIS F., J.J.T. (Ed.). *Stable Places and Changing Perceptions: Cave Archaeology in Greece*. Oxford: Archaeopress, p.83–98. .
- GHILARDI, A.M.; FERNANDES, M.A.; BICHUETTE, M.E. (2011) Megafauna from the Late Pleistocene-Holocene deposits of the Upper Ribeira karst area, southeast Brazil. *Quaternary International*, v.245, p.369–378, 2011.

- GHINASSI, M.; COLONESE, A.C.; GIUSEPPE, Z. DI; GOVONI, L.; VETRO, D. LO; MALAVASI, G.; MARTINI, F.; RICCIARDI, S.; BENEDETTO, S. (2008) The Late Pleistocene clastic deposits in the Romito Cave, southern Italy: a proxy record of environmental changes and human presence. *Journal of Quaternary Science*, v.24, p.383–398.
- GILLIESON, D. (1986) Cave sedimentation in the new Guinea highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.11, p.533–543.
- GILLIESON, D. (1996) *Caves: Processes, Development and Management*. 1o ed. Massachusetts: Blackwell, 324p..
- GOLDBERG, P.; SHERWOOD, S.C. (2006) Deciphering human prehistory through the geoarcheological study of cave sediments. *Evolutionary Anthropology*, v.15, p.20–36.
- HADDAD-MARTIM, P.M.; HUBBE, A.; GIANNINI, P.C.F.; AULER, A.S.; PILÓ, L.B.; HUBBE, M.; MAYER, E.; WANG, X.; CHENG, H.; EDWARDS, R.L.; NEVES, W.A. (2017) Quaternary depositional facies in cave entrances and their relation to landscape evolution: The example of Cuvieri Cave, eastern Brazil. *Catena*, v.157, p.372–387.
- HERMAN, E.K.; TORAN, L.; WHITE, W.B. (2012) Clastic sediment transport and storage in fluviokarst aquifers: An essential component of karst hydrogeology. *Carbonates and Evaporites*, v.27, p.211–241.
- HUBBE, A.; HADDAD-MARTIM, P.M.; HUBBE, M.; MAYER, E.L.; STRAUSS, A.; AULER, A.S.; PILÓ, L.B.; NEVES, W.A. (2011) Identification and importance of critical depositional gaps in pitfall cave environments: The fossiliferous deposit of Cuvieri Cave, eastern Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v.312, p.66–78.
- HUNT, C.O.; FIACCONI, M. (2018) Pollen taphonomy of cave sediments: What does the pollen record in caves tell us about external environments and how do we assess its reliability? *Quaternary International*, v.485, p.68–75.

- ICMBIO/CECAV; (2019). Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas
In : <<http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/potencialidade-de-ocorrencia-de-cavernas.html>>.
- JAQUETO, P.; TRINDADE, R.I.F.; HARTMANN, G.A.; NOVELLO, V.F.; CRUZ, F.W.; KARMANN, I.; STRAUSS, B.E.; FEINBERG, J.M. (2016) Linking speleothem and soil magnetism in the Pau d'Alho cave (central South America). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, v.121, p.7024–7039.
- KARKANAS, P.; BAR-YOSEF, O.; GOLDBERG, P.; WEINER, S. (2000) Diagenesis in prehistoric caves: The use of minerals that form in situ to assess the completeness of the archaeological record. *Journal of Archaeological Science*, v.27, p.915–929.
- KINOSHITA, A.; SKINNER, A.R.; GUIDON, N.; IGNACIO, E.; FELICE, G.D.; BUCO, C. DE A.; TATUMI, S.; YEE, M.; FIGUEIREDO, A.M.G.; BAFFA O. (2014) Dating human occupation at Toca do Serrote das Moendas, São Raimundo Nonato, Piauí-Brazil by electron spin resonance and optically stimulated luminescence. *Journal of Human Evolution*, v.77, p.187–195.
- KU, T.-L. (2000) Uranium-series methods. In: *Quaternary Geochronology: Methods and Applications*. 1.ed. Washington, DC: American Geophysical Union. p.101–114.
- LAUREANO, F. V.; KARMANN, I.; GRANGER, D.E.; AULER, A.S.; ALMEIDA, R.P.; CRUZ, F.W.; STRÍCKS, N.M.; NOVELLO, V.F. (2016) Two million years of river and cave aggradation in NE Brazil: Implications for speleogenesis and landscape evolution. *Geomorphology*, v.273, p.63–77.
- LAUREANO, F.V. (1998) O registro sedimentar clástico associado aos sistemas de cavernas Lapa Doce e Torrinha, município de Iraquara, Chapada Diamantina (BA). 113p. Dissertação. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- LAUREANO, F.V. (2014) Idades de Soterramento $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ em grão de quartzo e o assoreamento de sistema de Cavernas Na Região Iraquara (Ba): 2 Milhões de anos de registro sedimentar Quaternário. 86p. Tese de Doutorado. Universidade de São

Paulo, São Paulo.

- LAUREANO, F.V.; KARMANN, I. (2013) Sedimentos clásticos em sistemas de cavernas e sua contribuição em estudos geomorfológicos: uma revisão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.14, p.23–33.
- LUZ, L.D.; KALINOVSKI, E.C.Z.; PAROLIN, M.; SOUZA FILHO, E.E. DE. (2015) Estágio Atual do Conhecimento sobre Fitólitos no Brasil. *Terrae Didática*, v.11, p.52–64.
- MADELLA, M.; LANCELOTTI, C.; OSTERRIETH, M.(2013) Comprehensive perspectives on phytolith studies in Quaternary Research. *Quaternary International*, v.287, p.1–2.
- MALLOL, C.; CABANES, D.; BAENA, J. (2010) Microstratigraphy and diagenesis at the upper Pleistocene site of Esquilleu Cave (Cantabria, Spain). *Quaternary International*, v.214, p.70–81.
- MARTINI, I. (2011) Cave clastic sediments and implications for speleogenesis: New insights from the Mugnano Cave (Montagnola Senese, Northern Apennines, Italy). *Geomorphology*, v.134, p.452–460.
- MARTINI, I.; RONCHITELLI, A.; ARRIGHI, S.; CAPECCHI, G.; RICCI, S.; SCARAMUCCI, S.; SPAGNOLO, V.; GAMBASSINI, P.; MORONI, A. (2018) Cave clastic sediments as a tool for refining the study of human occupation of prehistoric sites: insights from the cave site of La Cala (Cilento, southern Italy). *Journal of Quaternary Science*, v.33, p.586–596.
- MICHAB, M.; FEATHERS, J.K.; JORON, J.L.; MERCIER, N.; SELO, M.; VALLADAS, H.; VALLADAS, G.; REYSS, J.L.; ROOSEVELT, A.C. (1998) Luminescence dates for the paleoindian site of Pedra Pintada, Brazil. *Quaternary Science Reviews*, v.17, p.1041–1046.
- NEWITT, D.; RICHARDSON, J.; ABBOUTT, M.; TURTLE, R.. (1955) Hydraulic

- conveying of solids in horizontal pipes. *Transactions Institute of Chemical Engineers*, v.33, p.93–110.
- NICHOLS, G. (2009) *Sedimentology and Stratigraph*. 2o ed. Oxford: Blackwell, 432p.
- NOLLER, J.S.; SOWERS, J.M.; COLMAN, S.M.; PIERCE, K.L. (2000) Introduction to Quaternary geochronology. In: *Quaternary Geochronology: Methods and Applications*. 1.ed. Washington, DC: American Geophysical Union, p.1–10.
- NOVELLO, V.F.; CRUZ, F.W.; MCGLUE, M.M.; WONG, C.I.; WARD, B.M.; VUILLE, M.; SANTOS, R.A.; JAQUETO, P.; PESSENDA, L.C.R.; ATORRE, T.; RIBEIRO, L.M.A.L.; KARMANN, I.; BARRETO, E.S.; CHENG, H.; EDWARDS, R.L.; PAULA, M.S.; SCHOLZ, D. (2019) Vegetation and environmental changes in tropical South America from the last glacial to the Holocene documented by multiple cave sediment proxies. *Earth and Planetary Science Letters*, v.524, p.1–11.
- OLIVEIRA, P. V.; RIBEIRO, A.M.; OLIVEIRA, É. V.; VIANA, M.S.S. (2014) The dasypodidae (mammalia, xenarthra) from the urso fóssil cave (quaternary), parque nacional de ubajara, state of ceará, Brazil: Paleoecological and taxonomic aspects. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, v.86, p.147–158.
- OSBORNE, R.A.L.(1984) Lateral facies changes, unconformities and stratigraphic reversals: their significance for cave sediment stratigraphy. *Cave Science*, v.11, p.175–184.
- OSBORNE, R.A.L. (1986) Sedimentation in caves- a review. *Publications of the Geological Society of Australia*, v.2, p.189–217.
- OSBORNE, R.A.L.(2001) Petrography of Lithified Cave Sediments. In: 13TH INTERNATIONAL CONGRESS OF SPELEOLOGY; 4TH SPELEOLOGICAL CONGRESS OF LATIN AMÉRICA AND CARIBBEAN; 26TH BRAZILIAN CONGRESS OF SPELEOLOGY2001, Brasilia. *Anais. Brasilia*.
- OSTERRIETH, M.; MADELLA, M.; ZURRO, D.; FERNANDA ALVAREZ, M. (2009)

- Taphonomical aspects of silica phytoliths in the loess sediments of the Argentinean Pampas. *Quaternary International*, v.193, p.70–79.
- PEYRE, E.; GUÉRIN, C.; GUIDON, N.; COPPENS, Y. (1998) Des restes humains pléistocènes dans la grotte du Garrincho, Piauí, Brésil. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences, Serie II. Sciences de la Terre et des Planetes*, v.327, p.335–360.
- PILÓ, L.B.; AULER, A.S.; NEVES, W.A.; WANG, X.; CHENG, H.; EDWARDS, R.L.(2005) Geochronology, sediment provenance, and fossil emplacement at Sumidouro Cave, a classic Late Pleistocene/Early Holocene paleoanthropological site in eastern Brazil. *Geoarchaeology*, v.20, p.751–764.
- ROOSEVELT, A.C.; COSTA, M.L.; MACHADO, C.L.; MICHAB, M.; MERCIER, N.; VALLADAS, H.; FEATHERS, J.; BARNETT, W.; SILVEIRA, M.I.; HENDERSON, A.; SLIVA, J.; CHERNOFF, B.; REESE, D.S.; HOLMAN, J.A.; TOTH, N.; SCHICK, K.(1996) Paleoindian Cave Dwellers in the Amazon : The Peopling of the Americas. *Science*, v.272. p.373–384 .
- SANTOS, G.M.; BIRD, M.I.; PARENTI, F.; FIFIELD, L.K.; GUIDON, N.; HAUSLADEN, P.A. (2003) A revised chronology of the lowest occupation layer of Pedra Furada Rock Shelter, Piauí, Brazil: The Pleistocene peopling of the Americas. *Quaternary Science Reviews*, v.22, p.2303–2310.
- SASOWSKY, I.D. (2007) Clastic sediments in caves - Imperfect recorders of processes in karst. *Acta Carsologica*, v.36, p.143–149.
- SHILLITO, L.M. (2013) Grains of truth or transparent blindfolds? A review of current debates in archaeological phytolith analysis. *Vegetation History and Archaeobotany*, v.22, p.71–82.
- SPRINGER, G.S. (2005) Clastic Sediments in Caves. In: CULVER, DAVID C; WHITE, W.B. (Ed.). *Encyclopedia of Caves*. 1° ed. San Diego: Elsevier Academic Press . p.102–108. .

- SPRINGER, G.S.; KITE, J.S. (1997) River-derived slackwater sediments in caves along Cheat River, West Virginia. *Geomorphology*, v.18, p.91–100, 1997.
- STOCK, G.M.; GRANGER, D.E.; SASOWSKY, I.D.; ANDERSON, R.S.; FINKEL, R.C. (2005) 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.
- SUGUIO, K. (2010) *Geologia do Quaternário e Mudanças Ambientais*. São Paulo: Oficina de Texto, 408p.
- TARBUCK, E.J.; LUTGENS, F.K.; TASA, D.; AMR TRADUCCIONES CIENTÍFICAS; J, T.E.; LUTGENS, F.K. (2005) *Ciencias de la tierra una introducción a la geología física*. 8° ed. Madrid: Pearson Educación, 736p.
- VEROSUB, K.L. (2000) Paleomagnetic Dating. In: *Introduction to Quaternary Geochronology*. 1o ed. Washington, DC: American Geophysical Union p.339–356. .
- WANG, W.; JINLING, L.; XIADON, Z. (2003) Climate indexes of phytoliths from *Homo erectus*? cave deposits in Nanjing. *Chinese Science Bulletin*, v.48, p.2005–2006.
- WHITE, W.B. (2007) Cave sediments and paleoclimate. *Journal of Cave and Karst Studies*, v.69, p.76–93.
- ZREDA, M.G.; PHILLIPS, F.M. (2000) Cosmogenic Nuclide Buildup in Surficial Materials. In: *Introduction to Quaternary Geochronology*. 1.ed. Washington, DC: American Geophysical Union, p.61–76.