

CARACTERIZAÇÃO ESPELEOLÓGICA E SEDIMENTAR DE UMA CAVERNA DO MACIÇO QUARTZÍTICO SERRA SÃO JOSÉ, MINAS GERAIS

SPELEOLOGICAL AND SEDIMENTARY CHARACTERIZATION OF A CAVE IN THE SERRA SÃO JOSÉ QUARTZITE MASSIF, MINAS GERAIS

Autora

Liliane de Jesus Brandão

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM
e-mail: brandao.liliane@ufvjm.edu.br

Coautores

Rafael Costa Cardoso; Roberto Franco; Diego Tassinari; Camila Rodrigues Costa;
Alexandre Christóforo Silva; Rodrigo Lopes Ferreira

RESUMO

As cavernas são consideradas “armadilhas” naturais de sedimentos e outros materiais externos que normalmente são transportados e depositados em seu interior, podendo ser acumulados em um ambiente relativamente estável por muitos anos, proporcionando condições adequadas para estudos sedimentológicos e paleoambientais. Estudos sobre a estratigrafia e cronologia de sedimentos presentes em cavernas quartzíticas são escassos e podem contribuir para a reconstituição paleoambiental. Este estudo teve como objetivos mapear a Caverna do Galo, situada no reverso do maciço quartzítico Serra São José (MG) e caracterizar física, química e cronologicamente um pacote de sedimentos de seu interior. A caverna foi mapeada e o pacote de sedimentos com 2,5 m de comprimento, 0,47 m de altura e 0,5 m de espessura foi descrito e amostrado in situ, com base em atributos morfológicos (textura e cor de suas camadas). Foram coletadas 17 amostras, caracterizadas por meio de análises granulométrica, geoquímica e do teor de carbono orgânico. Destas, três amostras foram selecionadas, em função da posição no

ABSTRACT

Caves are considered natural traps for sediments and other external materials that are usually transported and deposited inside them. This material can be accumulated in a relatively stable environment for many years, which provides suitable conditions for sedimentological and paleoenvironmental studies. Stratigraphic and chronological studies of sediments present in quartzite caves can contribute to paleoenvironmental reconstitution, yet those are scarce. This study aimed to map the Galo Cave, located in the dip slope of the Serra São José quartzite massif (MG) as well as to characterize the cave sediment, physically, chemically and chronologically. The cave was mapped and the 2.5 m long, 0.47 m high and 0.5 m thick sediment package was described in situ, based on morphological attributes, and then sampled. Seventeen samples were collected and characterized by granulometric, geochemical and organic carbon content analyses. Three of these samples were selected for radiocarbon dating according to their position in the package

pacote (base, centro e topo) e do teor de carbono orgânico, para datações radiocarbônicas. Os resultados foram utilizados na análise de componentes principais para a visualização conjunta das variáveis (resultados das análises laboratoriais) e das observações (camadas amostradas). A Caverna do Galo foi formada pelas águas meteóricas e sua morfologia foi influenciada pelo falhamento NNW/SSE e pela diferença de dureza entre as rochas componentes (quartzito e filito). O pacote de sedimentos foi depositado preenchendo da base ao teto de uma curva convexa da lateral norte da caverna, onde o fluxo d'água encontra um obstáculo, diminuindo sua velocidade e favorecendo a sedimentação. A morfologia e as composições granulométricas e químicas dos sedimentos e a idade radiocarbônica variam ao longo do pacote, evidenciando oscilações na intensidade e duração de eventos de precipitação, que podem estar associados a mudanças climáticas holocênicas.

PALAVRAS-CHAVE: pacote de sedimentos, morfologia, granulometria, geoquímica, datações radiocarbônicas, mudanças climáticas holocênicas.

INTRODUÇÃO

As cavernas são consideradas “armadilhas” naturais de sedimentos e outros materiais externos que normalmente são transportados e depositados em seu interior, podendo ser acumulados em um ambiente relativamente estável por muitos anos (Ford & Williams, 2007). Tais ambientes possuem, portanto, condições muitas vezes adequadas para estudos sedimentológicos e paleoambientais (Twenhofel, 1961; Bögli, 1980; Jennings, 1985).

Os sedimentos em cavernas são normalmente compostos por depósitos clásticos, os quais se caracterizam por serem fragmentos de rochas preexistentes que foram transportadas e redepositadas no ambiente subterrâneo. A maioria das partículas que compõe este tipo de sedimento em cavernas correspondem a grãos detríticos erodidos da paisagem epígea circundante e carregados para ambiente hipógeo, principalmente por ação de riachos e movimentos de massa (Springer, 2019).

Mudanças ambientais e geomorfológicas no entorno das cavernas são responsáveis pela varia-

(base, center and top) and their organic carbon content. The results were used in principal component analysis for the joint visualization of the variables (laboratory analysis results) and observations (sampled layers). Galo Cave was formed by meteoric waters and its morphology was influenced by the NNW/SSE faulting and the hardness difference between the component rocks (quartzite and phyllite). The sediment package was deposited on a convex curve of the northern side of the cave, where the water flow meets an obstacle, slowing its velocity and favoring sedimentation, filling the space from the base to the ceiling. The morphology, granulometric and chemical compositions of the sediments and the radiocarbon age vary throughout the package, evidencing oscillations in the intensity and duration of precipitation events, which may be associated with Holocene climatic changes.

KEYWORDS: *sediment package, morphology, grain size, geochemistry, radiocarbon dating, Holocene climate change.*

INTRODUCTION

Caves are considered natural traps for sediments and other external materials that are transported and deposited inside, accumulating in a relatively stable environment for many years (Ford & Williams, 2007). Therefore, such environments often have suitable conditions for sedimentological and paleoenvironmental studies (Twenhofel, 1961; Bögli, 1980; Jennings, 1985).

Cave sediments are usually composed of clastic deposits, which are fragments of pre-existing rocks that were transported and redeposited in the underground environment. Most of the particles that make up this type of sediment in caves correspond to detrital grains eroded from the surrounding epigeic landscape and carried into the hypogeous environment, mainly by the action of streams and mass movements (Springer, 2019).

Environmental and geomorphological changes in the surroundings of the caves are respon-

bilidade das características de seus depósitos sedimentares (Bosch & White, 2007), bem como pela arquitetura estratigráfica de seu preenchimento, os quais também são influenciados pelas características físicas de cada caverna (Šušteršič et al., 2009). Os processos de intemperismo e a quantidade de sedimentos fornecidos estão condicionados ao controle climático oriundo das taxas de deposição e da natureza dos sedimentos. Dessa maneira, qualquer mudança climática é capaz de alterar o fluxo sedimentar, com diminuição ou aumento da quantidade e da granulometria do material disponível para o transporte e sedimentação (Farrant & Smart, 2011). Além disso, sedimentos podem também ser removidos do interior das cavernas por meio de diferentes processos, o que faz com que certas cavernas tenham uma intrincada e complexa história deposicional (Auler et al., 2009; O'Connor et al., 2017). Portanto, os sedimentos clásticos das cavernas são fundamentais para entender os processos que moldam as cavernas e paisagens, podendo fornecer informações importantes a respeito de mudanças paleoambientais, além de registros paleontológicos e arqueológicos.

A maior parte das informações existentes sobre sedimentologia de cavernas refere-se a cavernas carbonáticas (especialmente calcários e dolomitos), de modo que a literatura referente à sedimentologia de cavernas não-carbonáticas é muito escassa (Butzer, 1973; Schulz et al., 2002). Para cavernas quartzíticas, estudos tendem a focar mais em processos espeleogenéticos (Fabri et al., 2015, Sauro et al. 2014; Auler & Sauro, 2019), de modo que a sedimentologia acaba sendo muitas vezes negligenciada. A exemplo disso, a maior parte dos estudos sobre sedimentos em cavernas siliciclásticas foi realizada como parte de estudos arqueológicos (Butzer, 1973; Brook et al., 2011; Tribolo et al., 2016).

Tendo em vista a escassez de estudos sobre a sedimentologia em cavernas quartzíticas e da consequente importância de informações sobre estratigrafia e cronologia de sedimentos presentes neste tipo de caverna, este estudo teve como objetivos mapear a Caverna do Galo, situada no reverso da Serra São José (MG), caracterizar um pacote de sedimentos de seu interior por meio de análises granulométrica, geoquímica e do teor de carbono orgânico de suas camadas e identificar a cronologia da deposição por meio de datações radiocarbônicas.

sible for the variability of their sedimentary deposits (Bösch & White, 2007). Furthermore, they also affect the stratigraphic architecture of their filling, which is also influenced by the physical characteristics of each cave (Šušteršič et al., 2009). The weathering process and the amount of sediments supplied are conditioned to climatic controls, which affect the deposition rates and the nature of the sediments. Therefore, climatic changes are capable of altering sediment fluxes, decreasing or increasing the amount and grain size of the material available for transport and sedimentation (Farrant & Smart, 2011). In addition, sediments can also be removed from the cave interior through different processes, which results in certain caves having an intricate and complex depositional history (Auler et al., 2009; O'Connor et al., 2017). Consequently, clastic cave sediments are critical to understanding the processes that shape caves and landscapes, and can provide important information regarding paleoenvironmental changes, as well as paleontological and archaeological records.

Existing information on cave sedimentology refers mostly to carbonate caves (especially limestones and dolomites), thus literature concerning non-carbonate caves sedimentology is very scarce (Butzer, 1973; Schulz et al., 2002). Quartzitic caves studies tend to focus on speleogenetic processes (Fabri et al., 2015, Sauro et al. 2014; Auler & Sauro, 2019), with sedimentology often being neglected. For example, most siliciclastic caves sediments studies have been conducted as part of archaeological studies (Butzer, 1973; Brook et al., 2011; Tribolo et al., 2016).

Taking into account the scarcity of sedimentology studies in quartzite caves and the consequent importance of information on stratigraphy and chronology of the sediments present in this type of cave, this study aimed to map Galo Cave, situated in the dip slope of Serra São José (MG), to characterize a package of sediments from its interior by means of granulometric, geochemical and organic carbon content analyses of its layers. In addition to identifying the chronology of the deposition by means of radiocarbon dating.

ÁREA DO ESTUDO

A Serra São José se situa no centro-sul do estado de Minas Gerais, entre as coordenadas geográficas de 21° 03' e 21° 07' de latitude sul e de 44° 06' e 44° 14' de longitude oeste, com altitudes variando de 1.000 a 1.430 m. Possui 13 km de extensão, na direção SW/NE e em média 1,2 km de largura, abrangendo terras dos municípios de Prados, São João Del Rei, Tiradentes, Santa Cruz de Minas e Coronel Xavier Chaves (Figura 1). Passou a compor a Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra de São José em 16 de fevereiro de 1990, pelo Decreto Estadual nº 30.934.

Está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes, pertencente ao curso superior do Rio Grande, um dos formadores do Rio Paraná e que se destaca nacionalmente pela geração de energia elétrica. Na área da APA, existem importantes locais de recarga hídrica, cabeceiras de diversos cursos d'água de pequeno e médio porte, dentre os quais se pode citar os córregos Santo Antônio, Caracol, Areias, Mangue e Pedras (FABRANDT, 2000).

Esta serra é formada por um maciço quartzítico que se ergue a uma altitude máxima de 1.430 m, destacando-se da paisagem circundante, onde predominam altitudes de cerca de 900 m. Em uma região de seu reverso, conhecida como 'Serra Nova', desenvolve-se um sistema de cavernamentos em quartzito, no qual se tem observado um grande potencial espeleológico, com destaque para as cavernas Lapa do Jair, Caverna do Canhão e a Caverna do Galo, sendo que esta última abriga um destacado pacote sedimentar. Estas cavernas são epigênicas, ou seja, formadas pelas águas meteóricas que, com o tempo, adquirem a capacidade de dissolver a rocha e formar cavidades "de cima para baixo" (Travassos, 2019).

A Caverna do Galo, local deste estudo, se situa no reverso e tem sua entrada principal nas coordenadas 21° 03' 36,40" sul e 44° 07' 08,49" oeste, onde a altitude é de 1315 m (Figura 1).

STUDY AREA

Serra São José is located in the center-south of Minas Gerais state, between geographical coordinates 21° 03' and 21° 07' South and 44° 06' and 44° 14' West, with altitudes ranging from 1,000 to 1,430 m. It is 13 km long, in the SW/NE direction and on average 1.2 km wide. It covers land in the municipalities of Prados, São João Del Rei, Tiradentes, Santa Cruz de Minas and Coronel Xavier Chaves (Figure 1). It became part of the Environmental Protection Area (Área de Proteção Ambiental - APA) of Serra de São José on February 16, 1990, by State Decree nº 30,934.

It is inserted in the Hydrographic Basin of the Mortes River, which belongs to the upper course of the Grande River, one of the tributaries of the Paraná River, which is nationally known for its generation of electric energy. In the APA there are important places of hydric recharge, headwaters of several small and medium water courses, among which we can mention the Santo Antônio, Caracol, Areias, Mangue and Pedras streams (FABRANDT, 2000).

This mountain range is formed by a quartzite massif that rises to a maximum altitude of 1,430 m, surrounded by land where 900 m altitudes predominate. In a region of its dip slope, known as 'Serra Nova', there is a system of quartzite caves with great speleological potential, especially the Lapa do Jair, Caverna do Canhão and Galo caves, the latter of which shelters an outstanding sedimentary package. These caves are epigenetic, i.e., formed by meteoric waters that, over time, acquire the ability to dissolve the rock and form "top-down" cavities (Travassos, 2019).

Galo Cave, is located on the dip slope side and has its main entrance at coordinates 21° 03' 36.40" south and 44° 07' 08.49" west, at 1315 m altitude (Figure 1).

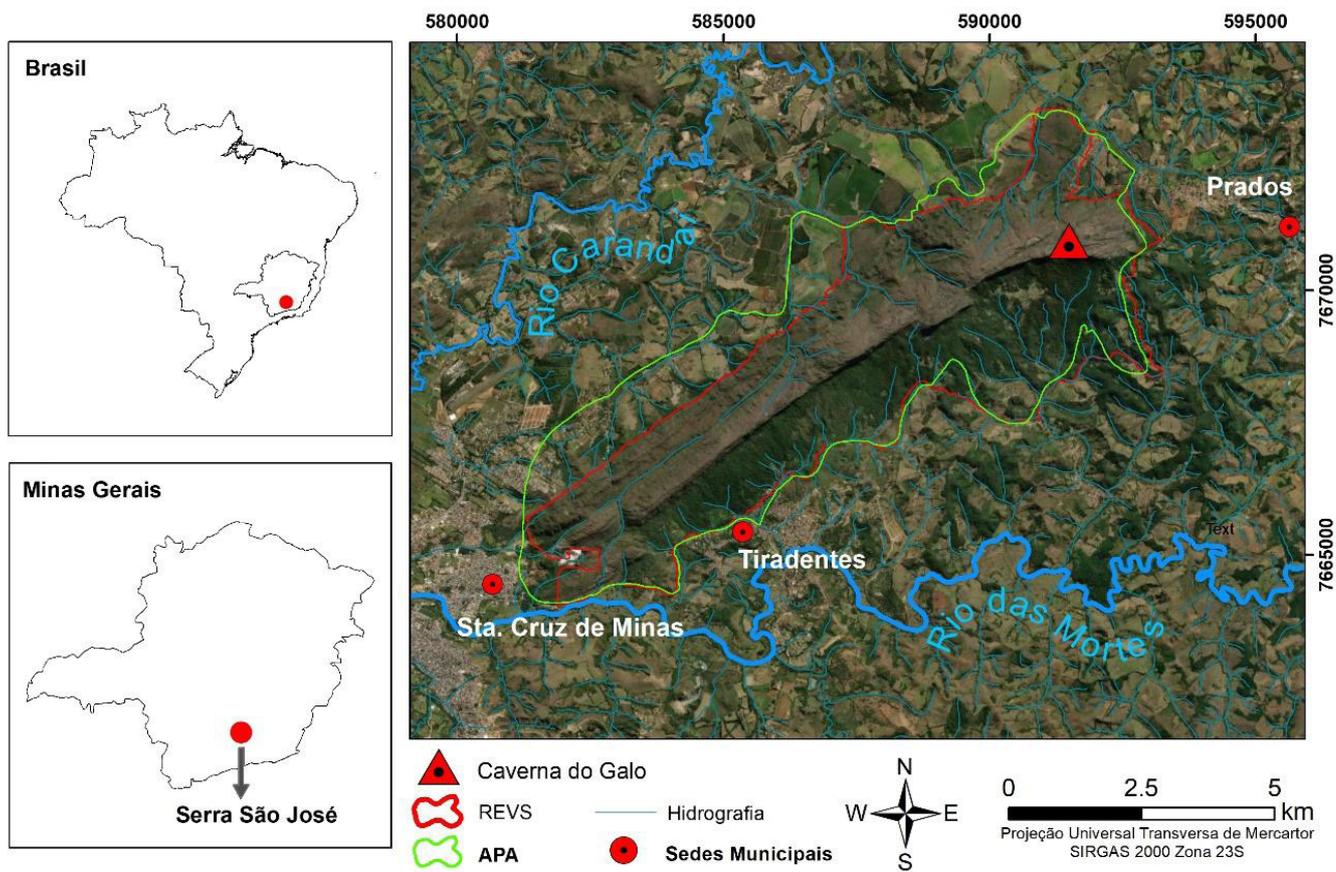


Figura 1 – Localização da Caverna do Galo, na Serra São José (MG).

Figure 1 – Galo Cave Location at Serra São José (MG).

O arcabouço geológico que mantém a paisagem na região da Serra São José faz parte de uma discordância regional que separa duas grandes unidades geoambientais: i) o embasamento arqueano-paleoproterozóico do Sul do Cráton São Francisco, e ii) sucessões metassedimentares proterozóicas incluída a Megassequência São João del Rei (COMIG, 2003), a qual compreende a Sequência Tiradentes (Psjr1), onde desenvolve o complexo de cavidades da Serra Nova, a área de estudo (Figura 2).

The geological framework that maintains the landscape in the Serra São José region is part of a regional discordance that separates two large geological units: i) the Archean-Paleoproterozoic basement of the southern São Francisco craton, and ii) Proterozoic Metasedimentary Sequences including the São João Del Rei mega-sequence (COMIG, 2003). This one comprises the Tiradentes sequence (Psjr1), where the Serra Nova cavity complex develops (Figure 2).

As estruturas geológicas que delimitam e criam as unidades paisagísticas da Serra São José são conformadas por um eixo de falha preferencial sentido SW/NE (Figura 2) associada à deformação Brasileira (COMIG, 2003). A linha de falha preferencial SW/NE é cortada por falhas subverticais e fraturas preferenciais em sentido SSE/NNW, onde desenvolve um sistema acentuado de dissecação, com formação de drenagens de vários portes, acanalados, grandes fendas e cavidades (Figura 3).

The geological structures that delimit and create the landscape units of Serra São José are conformed by a SW/NE preferential fault axis (Figure 2) associated with the Brasiliano deformation (COMIG, 2003). The SW/NE preferential fault line is cut by subvertical faults and preferential fractures in SSE/NNW direction. Along these structures, develops an accentuated system of dissection, with formation of drainages of various sizes, channeled, large cracks and cavities (Figure 3).

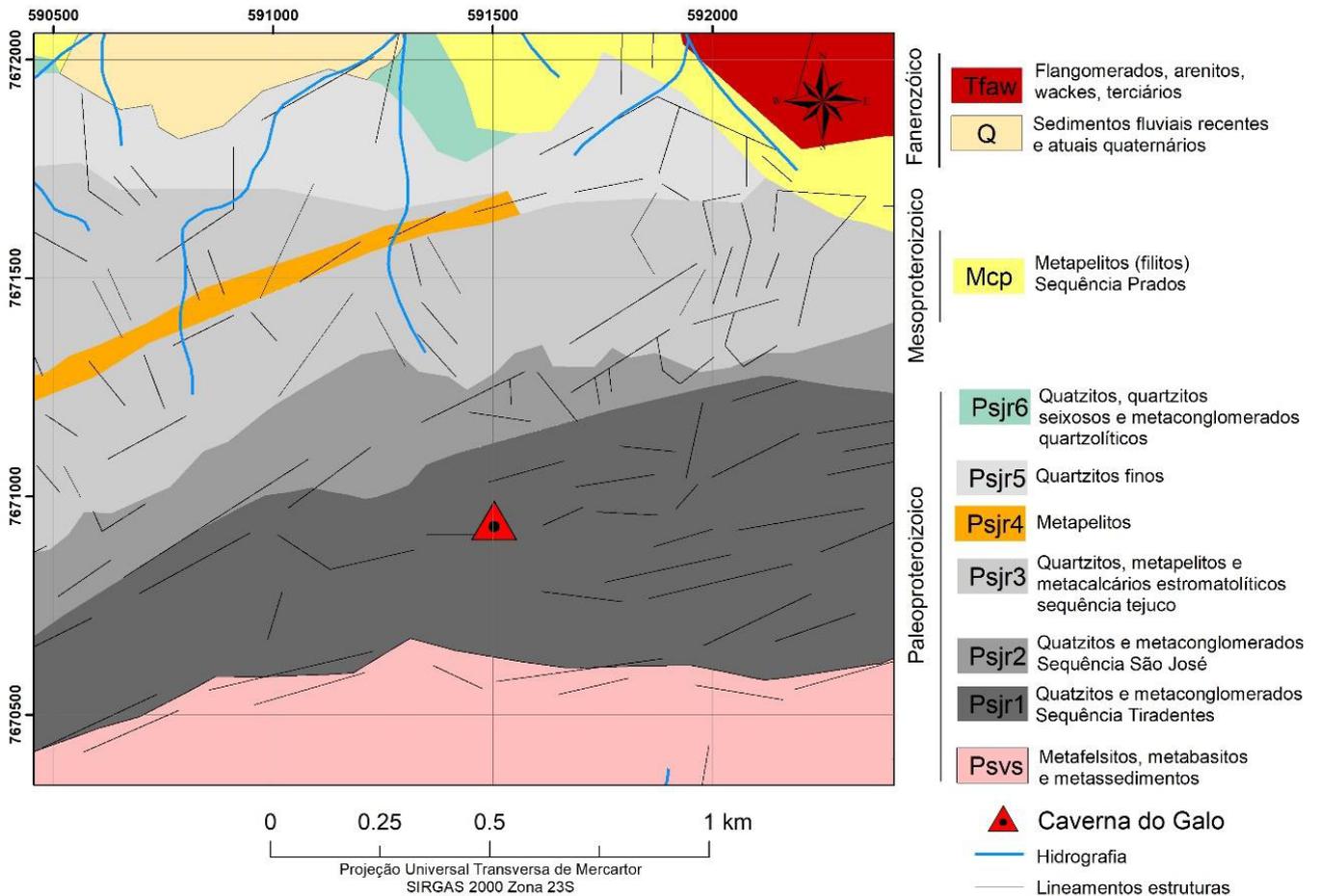


Figura 2 – Mapa geológico da área de estudo.

Figure 2 – Geological map of the study area.



Figura 3 – (A) Escarpa de linha de falha, face sul da Serra São José, visada NE/SW. (B) Drenagem desenvolvida sobre falhamento SSE/ NNE, no reverso da face norte da Serra São José.

Figure 3 – (A) Fault line scarp, south face of Serra São José, view NE/ SW. (B) Drainage developed on SSE/NNE fault, on the dip slope of the north face of Serra São José.

A escarpa e o reverso desta elevação quartzítica teriam surgido pela ação da tectônica ressurgente, que formou um graben no contato entre a Megassequência São João del Rei e os metapelitos e filitos da Formação Prados, no limite leste/nordeste da serra (Saadi *et al.*, 1991).

The escarpment and the dip slope of this quartzite elevation would have arisen due to the action of the resurgent tectonics, which formed a graben at the contact between the São João del Rei Megasequence and the metapelites and phyllites of the Prados Formation, at the east/northeast limit of the mountain range (Saadi *et al.*, 1991).

Os solos predominantes, os Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos, foram formados, em sua maioria, a partir de um único material de origem, quartzitos com resistências variáveis ao intemperismo (COMIG, 2003). São solos arenosos, que apresentam matéria orgânica lentamente humificada, dada à resiliência da vegetação local. Estes solos constituem a fonte dos sedimentos que circulam no interior das cavernas, juntamente com os produtos da dissolução dos quartzitos.

A vegetação da Serra São José pertence ao bioma Cerrado e as fitofisionomias predominantes são o Campo Rupestre e o Cerrado Rupestre, cujas espécies são a fonte de matéria orgânica encontrada nos sedimentos. Abaixo da escarpa, fora do maciço quartzítico, predominam espécies do bioma Mata Atlântica. A vegetação a montante da entrada principal da Caverna do Galo apresenta indivíduos arbóreos de médio porte, com epífitas em abundância, pertencentes a espécies típicas de matas de galeria do bioma Cerrado (Figura 4).

The predominant soils, Litholic Neosols and Quartz Neosols, were formed mostly from a single source material, quartzite with variable resistance to weathering (COMIG, 2003). These are sandy soils, which present organic matter slowly humified, given the resilience of the local vegetation. Along with the products of the dissolution of the quartzite, these soils are the source of the sediments that circulate inside the caves.

The vegetation of Serra São José belongs to the Cerrado Biome and the predominant phytophysiognomies are Campo Rupestre and Cerrado Rupestre, whose species are the source of organic matter found in the sediments. Below the escarpment, outside the quartzite massif, Atlantic Forest Biome species predominate. The upstream vegetation from Galo Cave main entrance presents medium-sized arboreal individuals, with abundant epiphytes, of typical gallery forests species of the Cerrado Biome (Figure 4).



Figura 4 - Entrada principal da Caverna do Galo. Ao fundo, a vegetação arbórea, a montante da entrada. No primeiro plano, a forma prismática da entrada principal: cruzamento entre pontos de fraqueza horizontal em acamamento (traço vermelho), e vertical em fraturamento (traço amarelo).

Figure 4 - Galo cave main entrance. In the background the arboreal vegetation, upstream of the entrance. In the foreground, the prismatic shape of the main entrance: intersection between horizontal points of weakness in bedding (red trace), and vertical in fracturing (yellow trace)..

METODOLOGIA

Mapeamento da Caverna do Galo

A metodologia de mapeamento consistiu de duas etapas, uma de escritório e a segunda, realizada em campo. A etapa de escritório consistiu no levantamento de dados bibliográficos e confecção de mapas base utilizando-se de imagens de satélite e mapas topográficos, momento em que foram definidas as áreas alvo para a prospecção na região da Serra São José conhecida como “Serra Nova”, onde são encontradas cavidades naturais.

Para a etapa de campo, foi necessário prospectar e explorar as áreas alvo, percorrendo preferencialmente drenagens e zonas de fraturas bem desenvolvidas, exercendo o devido cadastramento, mapeamentos de feições subterrâneas e da geologia estrutural, que conduz este geoambiente.

A Caverna do Galo foi mapeada em escala de 1:250, utilizando-se bússola Brunton e trena laser, seguindo o método de bases fixas (Day, 2002; Rubbioli & Moura, 2005) com grau de precisão BCRA 4C.

Coleta e análise dos sedimentos

O pacote de sedimentos foi descrito dentro da caverna, com base em atributos morfológicos, representados pela textura, composição mineralógica e cor das amostras e amostrado em janeiro de 2020. As 17 amostras coletadas foram secas ao ar e analisadas quanto à granulometria, teor de carbono orgânico, elementos maiores e traços (análise geoquímica).

A análise granulométrica foi realizada para obtenção dos teores de argila + silte e das frações de areia muito grossa, grossa, média, fina e muito fina, conforme metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

A análise geoquímica foi realizada por meio de espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva, do modelo Shimadzu EDX-720. Para a calibração do equipamento, foi utilizado o padrão A-720 de composição conhecida. Foi utilizado suporte de polietileno, tendo ao fundo filme Mylar® de 6 µm

METODOLOGY

Galo Cave Mapping

The mapping methodology consisted of two stages, one in the office and a second one carried out in the field. The office stage consisted of a bibliographic survey and the formulation of base maps using satellite images and topographic maps. Subsequently, the target areas for prospecting were defined in the “Serra Nova” region on Serra São José, where natural cavities are found.

For the field stage, it was necessary to prospect and explore the target areas, going through drainages and well-developed fracture zones, making records, mapping of underground features and structural geology.

The Galo Cave was mapped on a scale of 1:250, using a Brunton compass and laser tape measure, following the fixed bases method (Day, 2002; Rubbioli & Moura, 2005) with precision grade BCRA 4C.

Sediment collection and analysis

The sediment package was described within the cave based on morphological attributes, represented by texture, mineralogical composition and color and then sampled in January 2020. The 17 samples collected were air-dried and analyzed for grain size, organic carbon content, major and trace elements (geochemical analysis).

*Particle size analysis was performed to obtain the clay + silt content and the very coarse, coarse, medium, fine and very fine sand fractions, according to the methodology proposed by Teixeira *et al.* (2017).*

The geochemical analysis was performed using a Shimadzu EDX-720 model energy dispersive X-ray fluorescence spectrometer. To calibrate the equipment, the A-720 standard of known composition was used. A polyethylene support was used, with a 6 µm thick Mylar® film of known composition at the bottom. This is a

de espessura de composição conhecida. Esta é uma técnica não destrutiva que pode ser aplicada diretamente à amostra sólida, sem exigir nenhum pré-tratamento químico (Guild *et al.*, 2017). Os teores de carbono orgânico (C) foram determinados pelo método Walkley-Black (Defelipo & Ribeiro, 1981) a partir da oxidação da matéria orgânica.

Três das amostras (amostras 14, 9 e 1, coletadas, respectivamente, a 37, 25 e 2 cm da base do pacote), foram selecionadas em função de sua posição no pacote de sedimentos e do conteúdo de carbono orgânico, e posteriormente datadas por ^{14}C . O pré-tratamento das amostras consistiu na remoção manual de fragmentos contaminantes (Pessenda *et al.*, 2009). As amostras foram enviadas ao Laboratório ^{14}C (CENA/USP), onde foram submetidas à combustão na linha de síntese de benzeno para obtenção do CO_2 , o qual foi encapsulado a vácuo e encaminhado para datação pela técnica de Accelerator Mass Spectrometry. Os resultados foram corrigidos para o fracionamento isotópico natural (-25‰) e apresentados em idade ^{14}C convencional em anos antes do presente (AP) e em idade calibrada em anos de calendário, em intervalos com erro de 2σ .

Análises estatísticas

Os teores das frações granulométricas foram analisados empregando-se o pacote G2Sd (Fournier *et al.*, 2014) no software R (R Core Team, 2021). A granulometria foi caracterizada pelo método dos momentos, sendo determinados o diâmetro médio geométrico, o desvio padrão geométrico, o coeficiente de assimetria e a curtose, a partir das distribuições granulométricas obtidas em cada camada.

Os resultados das análises granulométrica, geoquímica e o teor de C obtidos para as camadas amostradas foram empregados na análise de componentes principais para a visualização conjunta das variáveis (resultados das análises laboratoriais) e das observações (camadas amostradas). A análise de componentes principais também foi realizada no software R, empregando-se o pacote factoextra (Kassambara & Mundt, 2020) para construção da representação gráfica do biplot.

As datações radiocarbônicas e as profundidades das respectivas camadas foram utilizadas

*non-destructive technique that can be applied directly to the solid sample without requiring any chemical pretreatment (Guild *et al.*, 2017). Organic carbon (C) contents were determined by the Walkley-Black method (Defelipo & Ribeiro, 1981) from the oxidation of organic matter.*

*Three of the samples (samples 14, 9, and 1, collected at 37, 25, and 2 cm from the base of the package, respectively), were selected based on their position in the sediment package and organic carbon content, and subsequently dated by ^{14}C . Pretreatment of the samples consisted of manual removal of contaminating fragments (Pessenda *et al.*, 2009). The samples were sent to the ^{14}C Laboratory (CENA/USP), where they were combusted in the benzene synthesis line to obtain CO_2 , which was encapsulated in vacuum and forwarded for dating by the Accelerator Mass Spectrometry technique. The results were corrected for natural isotopic fractionation (-25‰) and presented in calibrated ^{14}C age in years before present (cal yr BP) in intervals with 2σ error.*

Statistical Analysis

*Granulometric fractions contents were analyzed by employing the G2Sd package (Fournier *et al.*, 2014) in R software (R Core Team, 2021). The granulometry was characterized by the method of moments, and the geometric mean diameter, geometric standard deviation, asymmetry coefficient, and kurtosis were determined from the granulometric distributions obtained in each layer.*

The granulometric and geochemical analyses results and the C content obtained for the sampled layers were used in the principal components analysis for the joint visualization of the variables (laboratory analysis results) and the observations (sampled layers). The principal components analysis was also performed in R software, employing the factoextra package (Kassambara & Mundt, 2020) to build the graphical representation of the biplot.

The radiocarbon dates and the depths of the respective layers were used to obtain the

para obtenção do modelo idade x profundidade empregando-se o pacote rbacon (Blaauw *et al.*, 2021) no software R. com a curva de calibração SHCal20 (Hogg *et al.*, 2020).

*age x depth model by employing the rbacon package (Blaauw *et al.*, 2021) in R software with the SHCal20 calibration curve (Hogg *et al.*, 2020).*

RESULTADOS E DISCUSSÃO

RESULTS AND DISCUSSION

A Caverna do Galo e seu desenvolvimento

The Galo Cave and its development

A estrutura geológica delimitadora da Caverna do Galo é conduzida por falhamentos SSE/NNW, condutores do desenvolvimento uma gama de cavernas e abrigos ao longo desta porção do reverso da Serra São José. Os planos estratigráficos preferencialmente mergulham em 30° no sentido NNW, formando uma rampa parcialmente contínua que embasa uma série de canais intermitentes, que por sua vez são agentes de dissolução e abatimento de blocos do maciço quartzítico.

The geological structure delimiting Galo Cave is guided by SSE/NNW faults, which influence the development of a range of caves and shelters along this portion of the dip slope of Serra São José. The stratigraphic planes dip preferentially 30° in the NNW direction, forming a partially continuous ramp. These planes, underlie a series of intermittent channels, which in turn are agents of dissolution and subsidence of blocks of the quartzite massif.

A Caverna do Galo faz parte de um sistema cárstico em rochas siliciclásticas e outras cavidades naturais, que foram identificadas no entorno. Sua entrada principal está localizada em média-alta vertente, desenvolvendo-se na base de um anfiteatro em uma altitude de 1315 metros (Figura 4). Possui 142 m de projeção horizontal e 23 metros de desnível. Seu volume é de 1452 m³ e sua área mapeada é de 538 metros quadrados (Figura 5). Seu desenvolvimento inicial parte do sentido S/N por cerca de 20 metros, até que seu sentido muda para L/O, quando a resistência do acamamento barra o fluxo, mudando a direção no desenvolvimento da caverna.

The Galo cave, alongside other natural cavities identified in the surroundings, is part of a karstic system in siliciclastic rocks. Its main entrance is located on a medium-high slope, developing at the base of an amphitheater at an altitude of 1,315 meters (Figure 4). It has 142 m of horizontal projection and 23 m vertical projection. Its volume is 1,452 m³ and it has a 538 m² mapped area (Figure 5). Its initial development starts from the S/N direction for about 20 meters, until its direction changes to E/W, when the resistance of the bedding obstructs the flow, changing the direction in the development of the cave.

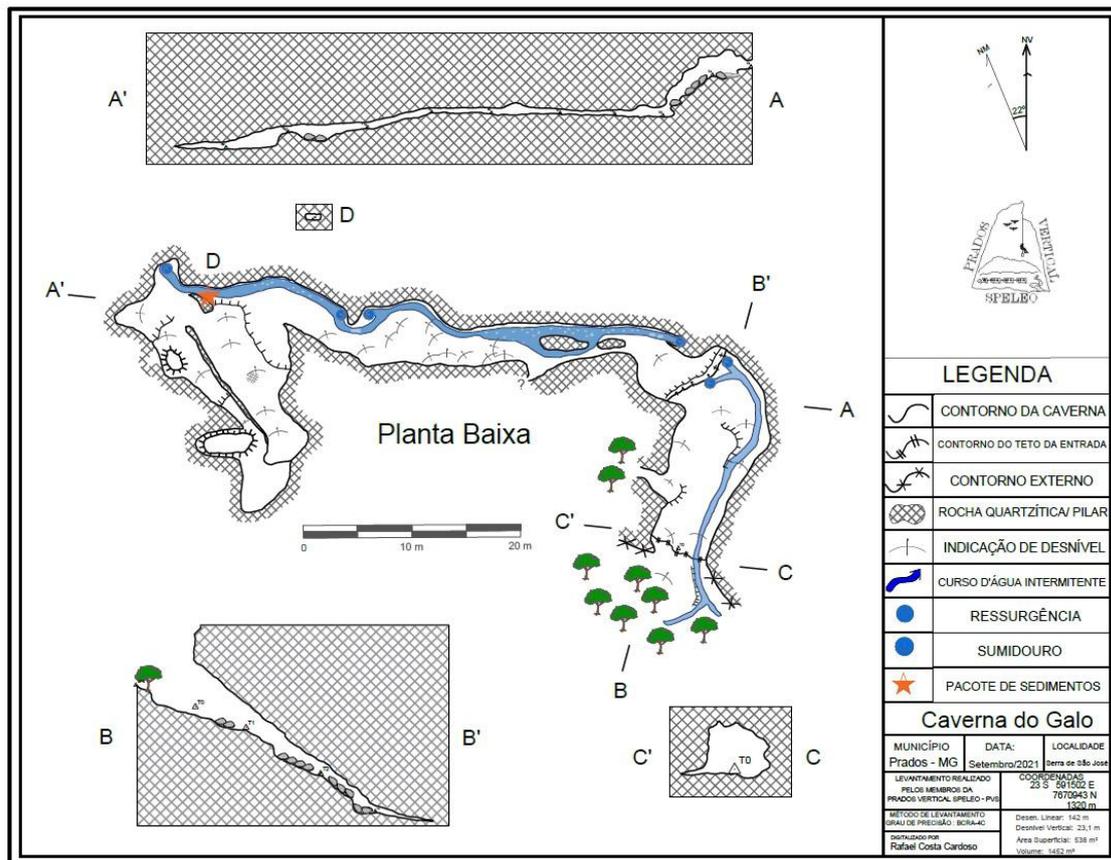


Figura 5 – Mapa da Caverna do Galo.

Figure 5 – Galo Cave Map.

É uma caverna epigênica, formada pelas águas meteóricas que, com o tempo, adquirem a capacidade de dissolver a rocha e formar cavidades “de cima para baixo” (Travassos, 2019). De acordo com Ford & Williams (2007), o quartzito, por ser uma rocha monominerálica, também é capaz de desenvolver feições cársticas apesar da alta resistência do quartzo ao intemperismo e baixa solubilidade da sílica. De acordo com esses autores, essas rochas podem desenvolver feições cársticas quando há presença de planos de acamamento associados a fraturas e quando não há competição com outras formas de erosão (como ciclos de congelamento e degelo), permitindo que a água do escoamento superficial e subsuperficial exerça o trabalho de dissolução da rocha. A drenagem, que desenvolve as feições subterrâneas no interior da caverna, é bem marcada e muito ativa no período chuvoso, com fluxo de água durante cerca de 7 a 9 meses do ano. A Figura 6 apresenta a drenagem ativa no mês de maio de 2015 e o mesmo local com a drenagem inativa, em setembro de 2021.

The cave is epigenetic, formed by meteoric waters that, over time, acquire the ability to dissolve the rock and form “top down” cavities (Travassos, 2019). According to Ford & Williams (2007), despite the high resistance of quartz to weathering and low solubility of silica, quartzite is also capable of developing karst features. According to these authors, these rocks can develop karstic features when there is the presence of bedding planes associated with fractures and when there is no competition with other forms of erosion (such as freeze-thaw cycles), allowing the surface and subsurface water flow to dissolve the rock. The drainage, which develops the underground features inside the cave, is well marked and very active in the rainy season, with water flowing for about 7 to 9 months of the year. Figure 6 shows the active drainage in May 2015 and the same location with the inactive drainage in September 2021.



Figura 6 – Interior da Caverna do Galo. A) Drenagem ativa registrada entre estações topográficas T5 e T6 em maio de 2015 (esquerda); B) Drenagem inativa registrada entre estações topográficas T5 e T6 em setembro de 2021 (direita).



Figure 6 – Galo Cave Interior. A) Active drainage recorded between topographic stations T5 and T6 in May 2015 (left); B) Inactive drainage recorded between topographic stations T5 and T6 in September 2021 (right).

As dinâmicas erosivas e hídricas formam vários abrigos ao longo de toda a Serra São José. No entanto, estas feições são maiores no sistema onde a Caverna do Galo está localizada, em função da intensidade do fluxo das águas superficiais e subterrâneas, aliada à fragilidade geológica atribuída ao falhamento NNW/SSE. Na ampla entrada principal da caverna do Galo, (Figura 4) um grande vazio se projeta em forma prismática, uma característica clássica para formações cársticas, onde a água, aliada a fraturamentos e contatos litológicos distintos (diferença de dureza) possibilita a dissolução da rocha e abertura desses grandes vazios, muitas vezes em locais de quebras de relevo, tal qual o local onde a Caverna do Galo se inicia.

Uma característica observada na entrada da caverna é a presença de lentes centimétricas de filito entre espessos acamamentos de quartzito (Figura 7). Também foi observada mineralização nesse contato, com presença de quartzo e alteração da rocha matriz, quando há essa interação.

A diferença de dureza entre as rochas no acamamento possibilita que a água assuma um comportamento mais destrutivo, ganhando velocidade no material mais duro (quartzito) e erodindo o material mais fraco (filito). Esta característica, aliada a uma fratura vertical, induz a formação de uma entrada ampla com forma prismática, desenvolvendo a partir de onde os planos de fraqueza se cruzam (Figura 4).

The hydric and erosive dynamics form several shelters along the entire Serra São José. However, these features are greater in the system where Galo Cave is located, due to the intensity of surface and groundwater flow, coupled with the geological fragility attributed to the NNW/SSE fault. In the wide main entrance of Galo's Cave (Figure 4) a large void is projected in prismatic form. This is a classic characteristic for karst formations, where water, allied to fractures and distinct lithological contacts (difference in hardness), enables the dissolution of the rock and the opening of these large voids, often in escarpments, such as the place where Galo Cave begins.

A characteristic observed at the cave entrance is the presence of centimetric lenses of phyllite between thick beds of quartzite (Figure 7). Mineralization was also observed in this contact, with the presence of quartz and alteration of the matrix rock.

The difference in hardness between the rocks in the bedding enables the water to assume a more destructive behavior, gaining speed in the harder material (quartzite) and eroding the weaker material (phyllite). This attribute, coupled with vertical fracturing, induces the formation of a wide prismatic shape entrance, developed in the intersection of weakness planes (Figure 4).



Figura 7 – A) Detalhe da parede à direita da entrada da caverna, com acamamento mais espesso composto por quartzito e acamamento mais estreito e erodido remontado à parede composta por filito; B) Detalhe do material silteoso disposto em lentes centimétricas. Materiais com durezas diferentes (quartzo/silte) permitem a erosão remontante da camada siltosa, abrindo caminho para dissolução da caverna.

Caracterização do pacote de sedimentos

Um pacote de sedimentos preenchendo da base ao teto de uma curva convexa da lateral norte da Caverna do Galo, foi encontrado a 137 m da entrada principal, onde o fluxo d'água encontra um obstáculo, diminuindo sua velocidade e favorecendo a sedimentação (Figuras 5 e 8). Este pacote, de dimensões correspondentes a 2,5 m de comprimento, 0,47 m de altura (média) e 0,50 m de espessura (média), está bem fixado no local onde foi gradualmente depositado, uma vez que fluxos de água que o deixam submerso não são suficientes para perturbá-lo fisicamente. A Figura 8 apresenta espuma e fragmentos orgânicos no pacote de sedimentos e no teto da caverna, comprovando que o ambiente ficou submerso pouco tempo antes da realização de trabalho de campo (janeiro de 2020). Visitas posteriores (setembro de 2021) comprovaram que o pacote de sedimentos não foi perturbado, permanecendo com a mesma morfologia, podendo, assim, fornecer informações para estudos sedimentológicos e paleoambientais (Twenhofel, 1961; Bögli, 1980; Jennings, 1985).



Figure 7 – A) Detail of the wall to the right of the cave entrance, with thicker quartzite bedding and narrower and eroded bedding composed by phyllite; B) Detail of the silty material arranged in centimetric lenses. Materials with different hardness (quartz/phyllite) allow reassembled erosion of the silty layer, paving the way for dissolution of the cave.

Characterization of the sediment package

The sediment package was deposited on a convex curve of the northern side of the cave 137 m from the main entrance, where the water flow meets an obstacle, slowing its velocity and favoring sedimentation, filling the space from the base to the ceiling. (Figures 5 and 8). This package, with dimensions corresponding to 2.5 m in length, 0.47 m in height (average) and 0.50 m in thickness (average), is well fixed in the place where it was gradually deposited, since the water flows that leave it submerged are not enough to physically disturb it. Figure 8 shows foam and organic fragments in the sediment package and on the cave ceiling, proving that the environment was submerged shortly before fieldwork was conducted (January 2020). Subsequent visits (September 2021) demonstrated that the sediment package was undisturbed, remaining with the same morphology. Therefore, it can provide information for sedimentological and paleoenvironmental studies (Twenhofel, 1961; Bögli, 1980; Jennings, 1985).

Caracterização morfológica

O pacote de sedimentos foi subdividido em 17 camadas, em função de sua cor, granulometria, plasticidade e teor de matéria orgânica. A caracterização morfológica das camadas está apresentada na Tabela 1 e na Figura 11. Três camadas (1, 9 e 14), escolhidas em função de seus teores de matéria orgânica e posição no pacote (base, centro e topo), foram datadas por radiocarbono, conforme já mencionado.

Morphological characterization

The sediment package was subdivided into 17 layers, according to their color, granulometry, plasticity, and organic matter content. The morphological characterization of the layers is presented in Table 1 and Figure 8. Three layers (1, 9, and 14), chosen according to their organic matter content and position in the package (base, center, and top), were radiocarbon dated.

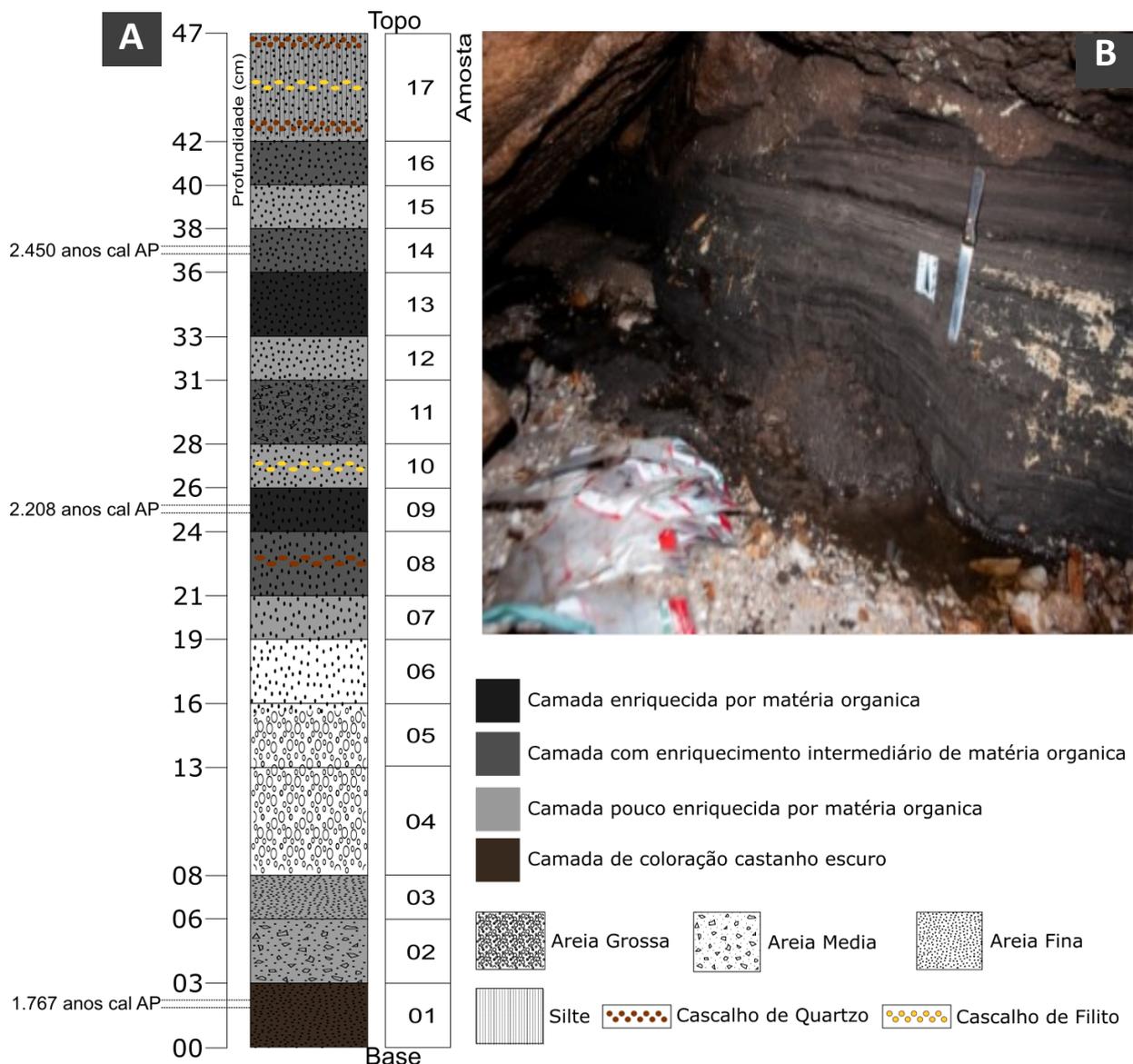


Figura 8 - A) Coluna estratigráfica com idades radiocarbônicas; B) Pacote de sedimentos da Caverna do Galo. Foto de janeiro de 2020 (drenagem ativa). A espuma (branco), indica que o nível da água alcançou o teto da caverna pouco tempo antes do registro fotográfico.

Figure 8 - A) Stratigraphic column with radiocarbon ages; B) Galo Cave sediment package. Photo from January 2020 (active drainage). The white foam indicates that the water level reached the ceiling of the cave shortly before the photographic record.

Granulometria dos sedimentos

Os sedimentos apresentaram composição granulométrica dominada por areia fina e média, com cerca de 67% do material entre 0,125 e 0,5 mm, em média (Tabela 2). As camadas superiores (36 a 47 cm) apresentaram maiores teores de areia grossa e muito grossa (média de 22,4% de material entre 0,5 e 2 mm nessas camadas contra 7,3% nas demais) e de cascalho (média de 8,6% de material acima de 2 mm nessas camadas contra 1,2% nas demais). Pela classificação de Folk (1954), quase todas as camadas se enquadram na classe de areia, exceto a camada de 24 a 26 cm, de granulometria mais fina e classificada como areia lamosa. O predomínio dessas frações no sedimento é explicado pelas características dos solos epígeos, que apresentam teores de areia de cerca de 90% ao longo de todo o perfil (Silva *et al.*, 2004).

Sediment granulometry

*The sediments presented a granulometric composition dominated by fine and medium sand, with about 67% of the material between 0.125 and 0.5 mm (Table 2). The upper layers (36 to 47 cm) showed higher contents of coarse and very coarse sand (average of 22.4% of material between 0.5 and 2 mm in these layers against 7.3% in the others) and gravel (average 8.6% of material above 2 mm against 1.2% in the others layers). According to Folk's classification (1954), most of the layers fall into the sand class, except for the layer from 24 to 26 cm, which is finer grained and classified as muddy sand. The predominance of these fractions in the sediment is explained by the characteristics of the epigeous soils, which present roughly 90% sand contents throughout the profile (Silva *et al.*, 2004).*

Tabela 1 - Características morfológicas das camadas sedimentares descritas no pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Coord.	Alt.	Amostra	Prof. (cm)	Cor úmida (Munsell)	Cor seca (Munsell)	Aspecto
21°03'36,40"S 44°07'08,49" W; 23k 591525E 7670937S	1315 m.s.m	17	42-47	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Presença de cascalho (anguloso < 3 cm diâmetro, quartzo e filito); silte; areia fina. Pouca matéria orgânica.
		16	40-42	Gley 1 2,5/N	Gley 1 4/N	Maior teor de matéria orgânica e maior plasticidade quando comparado ao anterior.
		15	38-40	Gley 1 2,5/N	Gley 1 3/N	Areia fina com presença de matéria orgânica.
		14	36-38	Gley 1 2,5/N	Gley 1 3/N	Material plástico, rico em matéria orgânica. Presença de areia fina.
		13	33-36	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Presença de areia fina, com enriquecimento de matéria orgânica, em relação a camada anterior.
		12	31-33	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Predomínio de areia fina, com empobrecimento de matéria orgânica.
		11	28-31	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Presença de areia fina e média, com o enriquecimento de matéria orgânica, em relação à camada anterior.

Coord.	Alt.	Amostra	Prof. (cm)	Cor úmida (Munsell)	Cor seca (Munsell)	Aspecto
21°03'36,40"S 44°07'08,49" W; 23k 591525E 7670937S	1315 m.s.m	8	21-24	Gley 1 4/N	Gley 1 5/N	Material mais claro que a camada anterior. Presença de areia fina e cascalho.
		9	24-26	Gley 1 2,5/N	Gley 1 4/N	Material plástico com alto teor de matéria orgânica, quando comparado a todas as camadas anteriores. Presença de areia muito fina.
		8	21-24	Gley 1 4/N	Gley 1 5/N	Material mais claro que a camada anterior. Presença de areia fina e cascalho.
		7	19-21	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Predomínio de areia fina. Material mais fino que a camada anterior
		6	16-19	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia fina. Material mais fino que a camada anterior
		5	13-16	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia grossa. Cor mais clara
		4	8-13	Gley 1 4/N	Gley 1 6/N	Predomínio de areia grossa. Cor mais clara
		3	6-8	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia média e fina, com presença de matéria orgânica. Cor mais clara que a primeira camada.
		2	3-6	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia média e fina, com presença de matéria orgânica. Cor mais clara que a camada anterior.
		1	0-3	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predomínio de areia média e fina, com presença de matéria orgânica. Cor castanha escura.

Cores Munsell - Gley 1 2,5/N: preta; Gley 1 3/N: cinza muito escura; Gley: 1 4/N: cinza escura; Gley 1 5/N: cinza.

Table 1 - Morphological characteristics of the sediment layers described in the Galo Cave sediment package.

Coord.	Alt.	Sample	Depth (cm)	Humid color (Munsell)	Dry color (Munsell)	Aspect
21°03'36,40"S 44°07'08,49" W; 23k 591525E 7670937S	1315 m.s.m	17	42-47	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Presence of gravel (angular < 3 cm diameter, quartz and phyllite); silt; fine sand. Low organic matter.
		16	40-42	Gley 1 2,5/N	Gley 1 4/N	Higher organic matter content and greater plasticity when compared to the previous.
		15	38-40	Gley 1 2,5/N	Gley 1 3/N	Fine sand with organic matter presence.
		14	36-38	Gley 1 2,5/N	Gley 1 3/N	Plastic material, rich in organic matter. Presence of fine sand.
		13	33-36	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Presence of fine sand, enriched in organic matter, in relation to the previous layer.

Coord.	Alt.	Sample	Depth (cm)	Humid color (Munsell)	Dry color (Munsell)	Aspect
21°03'36,40"S 44°07'08,49" W; 23k 591525E 7670937S	1315 m.s.m	12	31-33	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Predominance of fine sand, with depletion of organic matter.
		11	28-31	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Presence of fine and medium sand, with the enrichment of organic matter, in relation to the previous layer.
		10	26-28	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Presence of gravel (phyllite < 2 cm). Lighter color than the previous layer
		9	24-26	Gley 1 2,5/N	Gley 1 4/N	Plastic material with high organic matter content, compared to all previous layers Presence of very fine sand
		8	21-24	Gley 1 4/N	Gley 1 5/N	Lighter colored material than the previous layer Presence of fine sand and gravel
		7	19-21	Gley 1 3/N	Gley 1 4/N	Predominance of fine sand. Finer material than the previous layer
		6	16-19	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Fine sand predominates. Finer material than previous layer
		5	13-16	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	Predominantly coarse sand. Lighter color
		4	8-13	Gley 1 3/N	Gley 1 6/N	<i>Predominance of coarse sand. Lighter color</i>
		3	6-8	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	<i>Predominance of medium and fine sand, with presence of organic matter. Lighter color than the first layer.</i>
		2	3-6	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	<i>Predominance of medium and fine sand, with presence of organic matter. Lighter color than the previous layer.</i>
		1	0-3	Gley 1 3/N	Gley 1 5/N	<i>Predominance of medium and fine sand, with the presence of organic matter. Dark brown color.</i>

Cores Munsell - Gley 1 2,5/N: preta; Gley 1 3/N: cinza muito escura; Gley: 1 4/N: cinza escura; Gley 1 5/N: cinza.

A distribuição dos valores de diâmetro médio geométrico, desvio padrão, coeficiente de assimetria e curtose ressaltou diversas diferenças entre as camadas sedimentares (Figura 9). O diâmetro médio geométrico apresentou apenas ligeira variação ao longo de quase todas as camadas da base e do centro do pacote, com diferenças mais marcantes somente nas camadas superiores, de 36 a 47 cm, onde os valores foram mais elevados, conforme indicado anteriormente pelos maiores teores de areia grossa e cascalho (Tabela 2). Essas camadas apresentaram também valores mais altos de desvio padrão geométrico (DPG), indicando mudanças

The distribution of the geometric mean diameter, standard deviation, asymmetry and kurtosis coefficient values highlighted several differences among the sedimentary layers (Figure 9). The geometric mean diameter (GMD) showed only slight variation along almost all layers in the base and center of the package. Greater differences were shown in the upper layers, from 36 to 47 cm, where the values were higher, indicated by the higher contents of coarse sand and gravel (Table 2). These layers also presented higher geometric standard deviation (GSD) values, indicating changes in the sedimentation process, possibly related to origin or transport (Nichols,

no processo de sedimentação, possivelmente relacionadas à origem ou ao transporte (Nichols, 2009). Valores mais elevados do DPG foram observados também nas camadas de 8 a 13 cm e de 24 a 26 cm. Todas as camadas apresentaram coeficientes de assimetria negativos, indicando distribuição de frequência assimétrica à esquerda, ou seja, com predomínio de menores valores, já que as frações predominantes foram de areias média e fina (Tabela 2).

2009). Higher GSD values were also observed in the 8 to 13 cm and 24 to 26 cm layers. All layers showed negative asymmetry coefficients, indicating left-symmetric frequency distribution, i.e., with predominance of lower values, since the predominant fractions were medium and fine sands (Table 2).

Tabela 2 – Distribuição granulométrica (%) das camadas de sedimento amostradas no pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Camada (cm)	Cascalho	Areia muito grossa	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Areia muito fina		Silte + argila
	> 2 mm	2 a 1 mm	1 a 0,5 mm	0,5 a 0,25 mm	0,25 a 0,125 mm	0,125 a 0,106 mm	0,106 a 0,053 mm	< 0,053 mm
42 a 47	10,6	6,9	11,3	20,9	26,6	4,9	11,4	7,4
40 a 42	12,2	13,0	18,5	23,6	19,0	3,3	7,8	2,7
38 a 40	6,2	3,7	7,3	27,0	38,0	5,2	10,2	2,4
36 a 38	5,6	12,8	16,2	24,3	25,2	4,2	8,7	2,9
33 a 36	0,1	0,3	1,6	24,8	56,1	6,0	9,5	1,8
31 a 33	0,2	1,3	4,1	31,6	48,9	5,1	7,6	1,3
28 a 31	0,7	2,3	8,5	37,5	40,9	3,7	5,4	1,0
26 a 28	2,7	0,5	1,9	31,0	51,0	4,6	7,1	1,1
24 a 26	2,0	10,8	12,0	13,1	23,8	6,5	22,4	9,3
21 a 24	2,5	0,6	2,1	23,3	50,2	6,5	12,5	2,4
19 a 21	1,1	1,6	5,9	33,8	43,5	5,0	7,8	1,2
16 a 19	0,4	1,3	4,6	30,7	50,4	4,8	7,0	0,9
13 a 16	0,3	1,3	7,8	32,8	46,0	4,2	6,4	1,1
8 a 13	3,5	2,8	8,1	22,8	36,9	6,2	13,9	5,8
6 a 8	0,4	0,8	2,6	20,6	53,9	6,4	11,6	3,7
3 a 6	0,6	2,0	4,3	22,1	42,9	7,5	17,2	3,2
0 a 3	0,8	1,4	4,8	26,4	46,2	6,4	10,9	3,2

Table 2 –Particle size distribution (%) of the sediment layers sampled from the Galo Cave sediment package.

Layer (cm)	Gravel	Very Coarse Sand	Coarse Sand	Medium Sand	Fine Sand	Very fine sand		Silt + clay
	> 2 mm	2 a 1 mm	1 a 0.5 mm	0.5 a 0.25 mm	0.25 a 0.125 mm	0.125 a 0.106 mm	0.106 a 0.053 mm	< 0.053 mm
42 a 47	10,6	6,9	11,3	20,9	26,6	4,9	11,4	7,4
40 a 42	12,2	13,0	18,5	23,6	19,0	3,3	7,8	2,7
38 a 40	6,2	3,7	7,3	27,0	38,0	5,2	10,2	2,4
36 a 38	5,6	12,8	16,2	24,3	25,2	4,2	8,7	2,9
33 a 36	0,1	0,3	1,6	24,8	56,1	6,0	9,5	1,8
31 a 33	0,2	1,3	4,1	31,6	48,9	5,1	7,6	1,3
28 a 31	0,7	2,3	8,5	37,5	40,9	3,7	5,4	1,0
26 a 28	2,7	0,5	1,9	31,0	51,0	4,6	7,1	1,1
24 a 26	2,0	10,8	12,0	13,1	23,8	6,5	22,4	9,3
21 a 24	2,5	0,6	2,1	23,3	50,2	6,5	12,5	2,4
19 a 21	1,1	1,6	5,9	33,8	43,5	5,0	7,8	1,2
16 a 19	0,4	1,3	4,6	30,7	50,4	4,8	7,0	0,9
13 a 16	0,3	1,3	7,8	32,8	46,0	4,2	6,4	1,1
8 a 13	3,5	2,8	8,1	22,8	36,9	6,2	13,9	5,8
6 a 8	0,4	0,8	2,6	20,6	53,9	6,4	11,6	3,7
3 a 6	0,6	2,0	4,3	22,1	42,9	7,5	17,2	3,2
0 a 3	0,8	1,4	4,8	26,4	46,2	6,4	10,9	3,2

A distribuição granulométrica de todas as camadas apresentou curvas leptocúrticas, com valores de curtose positivos, já que a fração areia fina apresentou amplo predomínio (41% em média) e o diâmetro médio geométrico situou-se justamente nessa fração para a maioria das camadas, originando curvas de distribuição com picos aguçados (Figura 10). Para as camadas superiores (36 a 47 cm) e para as camadas de 8 a 13 cm e de 24 a 26 cm, que também apresentaram maior desvio, a curtose foi menor, com curvas de distribuição granulométrica mais suavizadas, ou seja, maior frequência de frações mais finas (8 a 13 cm e 24

The particle size distribution of all layers presented leptokurtic curves, with positive kurtosis values. That is because the fine sand fraction presented a wide predominance (41% on average) and the GMD was in this fraction for most layers, which originated distribution curves with sharp peaks (Figure 9). The kurtosis was lower, with smoother distribution curves for the upper layers (36 to 47 cm) and from the 8 to 13 cm and 24 to 26 cm layers, which also showed higher deviation, i.e., higher frequency of finer (8 to 13 cm and 24 to 26 cm) or coarser (upper layers) fractions. The asymmetry coefficient was markedly distinct only in the layers

a 26 cm) ou mais grosseiras (camadas superiores). O coeficiente de assimetria foi marcadamente distinto apenas nas camadas de 6 a 8 cm e de 33 a 36 cm, que apresentaram teores mais baixos de areia grossa e muito grossa e cascalho (Figura 9).

from 6 to 8 cm and 33 to 36 cm, which presented lower contents of coarse and very coarse sand and gravel (Figure 9).

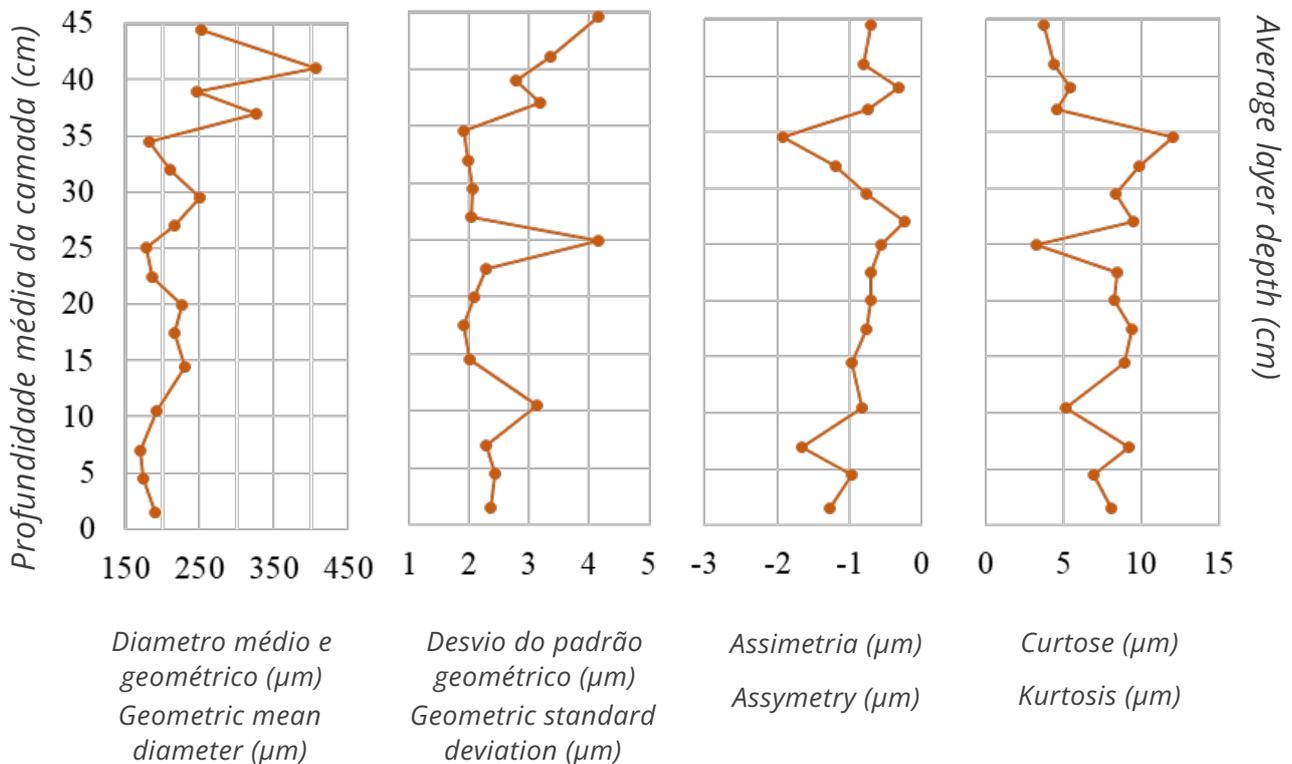


Figura 9 - Variação do diâmetro médio geométrico, do desvio padrão geométrico, do coeficiente de assimetria e da curtose para as camadas do pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Figura 9 - Variation of the geometric mean diameter, geometric standard deviation, asymmetry coefficient and kurtosis for the layers of the Galo Cave sediment package.

A granulometria dos sedimentos (predomínio de areia, cascalho e silte) e o grau de seleção (em geral moderado) indicam que o pacote de sedimentos corresponde à faces de canal, cujas características do material dependem fortemente do regime de fluxo e da fonte dos sedimentos, que são transportados predominantemente como carga de fundo (Bosch & White, 2007). O diâmetro médio geométrico da maioria das camadas (entre 150 e 250 µm) corresponde em geral à faixa de menores tensões críticas de cisalhamento no diagrama de Hjulstrom, possivelmente indicando que os solos epígeos arenosos (Silva et al., 2004) sofreram ação erosiva de baixa intensidade, já que velocidades de fluxo de 0,2 m s⁻¹ seriam suficientes para a remoção dessas partículas, enquanto sua deposição ocorreria em velocidades inferiores a 0,02 m s⁻¹ (Nichols, 2009).

The sediments grain size (predominantly sand, gravel and silt) and degree of selection (generally moderate) indicate that the sediment package corresponds to a channel facies, whose material characteristics strongly depend on the flow regime and the source of the sediments, which are predominantly transported as bottom load (Bosch & White, 2007). The geometric mean diameter of most layers (between 150 and 250 µm) generally corresponds to the range of lowest critical shear stresses in the Hjulstrom diagram. This may indicate that the sandy epigeous soils (Silva et al., 2004) suffered low intensity erosive action, since flow velocities of 0.2 m s⁻¹ would be sufficient for the removal of these particles, while their deposition would occur at velocities lower than 0.02 m s⁻¹ (Nichols, 2009).

Os parâmetros relacionados à granulometria dos sedimentos indicaram mudanças no processo de sedimentação ao longo das camadas. As camadas do topo apresentaram granulometria mais grossa e menor grau de seleção (maior desvio e menor curtose), o que poderia indicar transporte por fluxos de água com maior velocidade (Nichols, 2009) e a menores distâncias, como pela mobilização de sedimentos de granulometria mais grossa já presentes no leito da caverna. De acordo com Bögli (1980), os materiais de granulometria mais grossa, como cascalho e calhaus, são comumente autóctones. Já as camadas de 8 a 13 cm e de 24 a 26 cm também apresentaram menor grau de seleção, porém marcada pela maior presença de sedimentos com granulometria mais fina. Essa mudança no processo de sedimentação poderia estar relacionada ao escoamento superficial com menor velocidade ou maior tempo de permanência da água no leito de sedimentação (Nichols, 2009).

Geoquímica dos sedimentos

A variação da composição geoquímica ao longo das camadas indicou a contribuição de diferentes materiais (Figura 10), sendo bastante marcante a associação entre os picos de Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 e Fe_2O_3 nas camadas de 6 a 8 cm, de 24 a 26 cm, de 33 a 36 cm e de 42 a 47 cm. Nessas camadas, os teores de SiO_2 , Al_2O_3 e K_2O foram em média 56%, 33% e 5,9% contra 70,7%, 23,3% e 3,5% nas demais camadas. Essas diferenças provavelmente se devem à maior contribuição de filito, uma vez que esta rocha apresenta elevados teores de moscovita [$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$], cuja composição química ideal seria 45,2% SiO_2 , 38,4% Al_2O_3 e 11,8% K_2O (Radoslovich, 1960).

Os teores de C acompanharam as tendências observadas na distribuição granulométrica e na composição geoquímica (Figura 11). Nas camadas superiores do pacote de sedimentos, que apresentaram maiores teores de C, a variação acompanhou o diâmetro médio geométrico. Nessas camadas, os maiores teores de C estiveram associados ao material de granulometria mais grossa. Eventos mais intensos de precipitação e escoamento superficial teriam transportado e depositado sedimentos de granulometria mais grossa e

Parameters related to sediment grain size indicated changes in the sedimentation process along the layers. The top layers showed coarser granulometry and lower degree of selection (higher deviation and lower kurtosis). This could indicate transport by higher velocity water flows (Nichols, 2009) and at shorter distances, as by the mobilization of coarser-grained sediments already present in the cave bed. According to Bögli (1980), coarser grained materials, such as gravel and pebbles, are commonly autochthonous. The 8 to 13 cm and 24 to 26 cm layers also presented a lower degree of selection, but were marked by the presence of more fine-grained sediments. This change in the sedimentation process could be related to surface runoff with lower velocity or longer time of water residence in the sedimentation bed (Nichols, 2009).

Sediment Geochemistry

The geochemical composition variation along the layers indicated the contribution of different materials (Figure 10). In the layers from 6 to 8 cm, from 24 to 26 cm, from 33 to 36 cm and from 42 to 47 cm it is quite remarkable the association between the peaks of Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 . In these layers, the SiO_2 , Al_2O_3 and K_2O contents average 56%, 33% and 5.9% against 70.7%, 23.3% and 3.5% in the other layers. These differences are probably due to the higher contribution of phyllite, since this rock presents high contents of muscovite [$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$], whose ideal chemical composition would be 45.2% SiO_2 , 38.4% Al_2O_3 and 11.8% K_2O (Radoslovich, 1960).

The C contents followed the trends observed in particle size distribution and geochemical composition (Figure 11). In the upper layers of the sediment package, which showed higher C contents, the variation followed the geometric mean diameter. In these layers, the higher C contents were associated with coarser grained material. More intense precipitation events and surface runoff could have transported and deposited coarser grained sediments and organic fragments, which were later humified. The layer from 24 to 26 cm showed the highest

fragmentos orgânicos, que posteriormente foram humificados. A camada de 24 a 26 cm apresentou o maior teor de C (30 g kg^{-1}). Essa camada apresentou maior contribuição de material de granulometria fina, possivelmente associado à inundação mais duradoura do local, porém provavelmente sob influência de eventos de precipitação de menor intensidade e maior duração.

C content (30 g kg^{-1}). This layer showed a greater contribution of fine-grained material, possibly associated with the longer-lasting flooding of the site, but probably under the influence of precipitation events of lower intensity and longer duration.

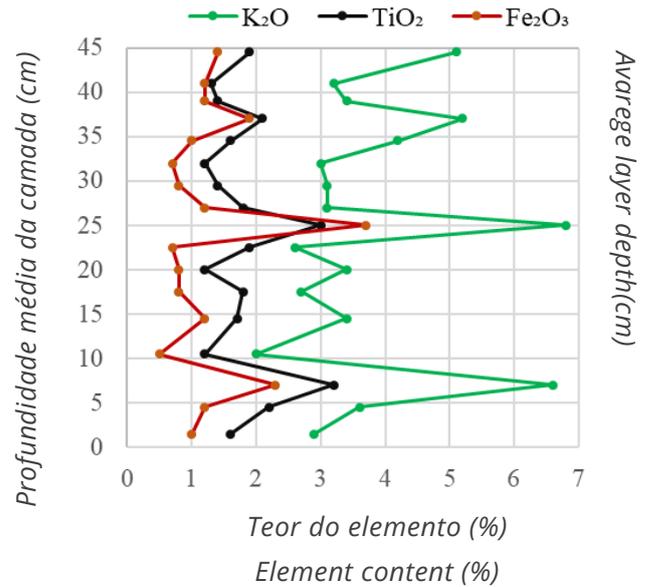
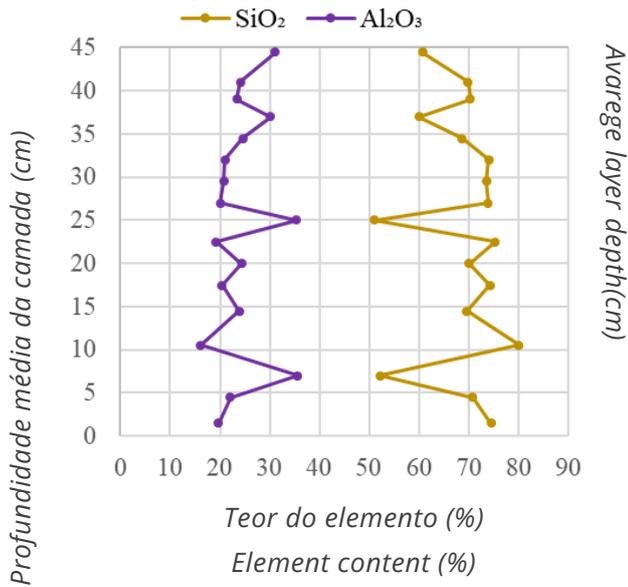


Figura 10 – Composição geoquímica das camadas do pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Figure 10 – Geochemical composition of the layers on Galo Cave sediment package.

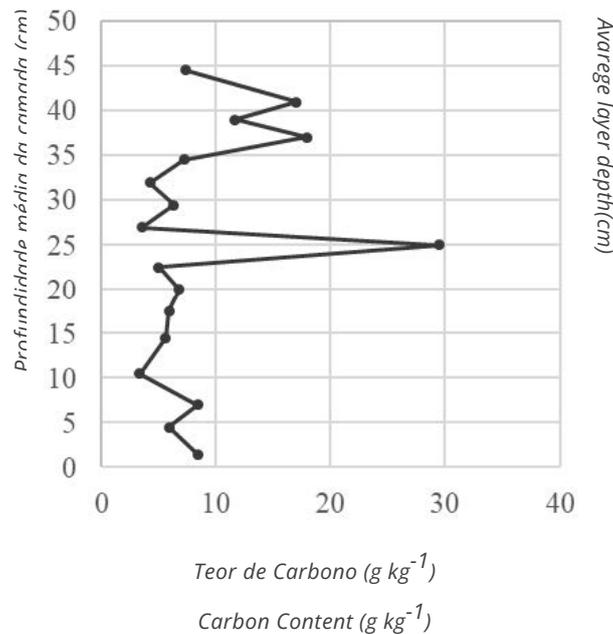


Figura 11 – Variação do teor de carbono ao longo das camadas do pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Figure 11 – Variation in carbon content along the layers of the Galo Cave sediment package.

A distribuição dos pontos no biplot da análise de componentes principais (Figura 12) indica períodos de instabilidade na deposição de sedimentos, com mudanças marcantes tanto na composição geoquímica quanto na distribuição granulométrica. As quatro camadas superiores localizaram-se em um mesmo quadrante, associado a maiores teores de cascalho (todas as camadas de 36 a 47 cm), menores teores de areia fina e, conseqüentemente, menor curtose e maior desvio padrão. Contudo, mesmo as camadas mais homogêneas em relação às demais em termos de granulometria apresentaram diferenças na composição geoquímica, com maior contribuição de filito (maiores teores de Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 e Fe_2O_3), como nas camadas de 36 a 38 cm e de 42 a 47 cm. Essas diferenças podem indicar ciclos de deposição afetados principalmente por material proveniente de locais próximos ou do próprio leito da caverna, com transporte ora de material mais quartzoso, ora mais rico em filito.

The distribution of the points in the principal components analysis biplot (Figure 12) indicates periods of instability in sediment deposition, with marked changes in both geochemical composition and particle size distribution. The top four layers were located in the same quadrant, associated with higher gravel contents (all layers from 36 to 47 cm), lower fine sand contents, and consequently lower kurtosis and higher standard deviation. However, even the layers that were more homogeneous in terms of grain size showed differences in geochemical composition, with a higher contribution of phyllite (higher Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 contents), as in the layers from 36 to 38 cm and from 42 to 47 cm. These differences may indicate deposition cycles mainly affected by material coming from nearby sites or from the cave bed itself, with quartz and phyllite-rich material transport.

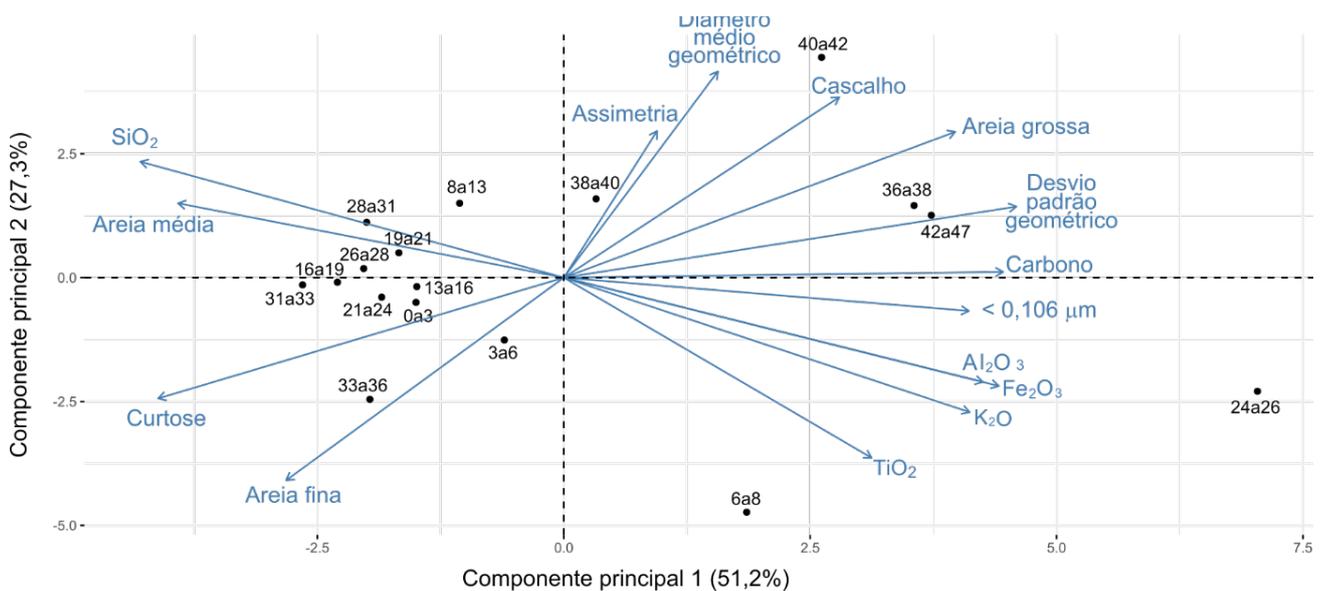


Figura 12 – Biplot da análise de componentes principais para distribuição granulométrica, composição geoquímica e teor de C (variáveis indicadas por setas) nas diferentes camadas de sedimento (profundidades, em cm, indicadas junto aos pontos das observações) da Caverna do Galo. Areia fina: 0,106-0,25 mm. Areia média: 0,25-0,5 mm. Areia grossa: 0,5-2 mm.

Figure 12 – Biplot of the principal component analysis for particle size distribution, geochemical composition, and C content (variables indicated by arrows) in the different sediment layers (depths, in cm, indicated next to the observation points) of Galo Cave. Fine sand: 0.106-0.25 mm. Medium sand: 0.25-0.5 mm. Coarse sand: 0.5-2 mm.

As camadas abaixo de 36 cm apresentaram em geral maior homogeneidade entre si, permanecendo agrupadas em decorrência do amplo predomínio de areia média e fina e dos teores mais elevados de SiO_2 em detrimento dos demais elementos. Essa estabilidade dos ciclos de sedimentação, em termos de fontes e dinâ-

The layers below 36 cm presented in general more homogeneity among themselves. They remained grouped due to the wide predominance of medium and fine sand and to the higher SiO_2 content in detriment of the other elements. This stability of the sedimentation cycles, in terms of sources and transport and

mica de transporte e deposição, foi marcadamente alterada apenas nas camadas de 6 a 8 cm e de 24 a 46 cm. A camada de 6 a 8 cm diferenciou-se principalmente pela maior contribuição de filito (maiores teores de Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 e Fe_2O_3), porém a distribuição granulométrica não foi tão distinta, indicando mudanças principalmente na fonte de sedimentos e não tanto no processo de transporte (velocidade do escoamento superficial e dinâmica de sedimentação). Já a camada de 24 a 26 cm foi marcadamente distinta das demais tanto na composição geoquímica (maiores teores de Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 e Fe_2O_3) quanto na distribuição granulométrica (granulometria mais fina, com 31,7% das partículas com diâmetro inferior a 0,106 mm). Essa camada possivelmente foi depositada sob condições com maior tempo de residência da água nessa porção da caverna, possibilitando a deposição de partículas mais finas.

Datações radiocarbônicas e dinâmica da sedimentação

A datação das amostras (Tabela 3) indicou ocorrência de contaminação, uma vez que, de acordo com Springer (2019), os sedimentos são depositados em leitos sedimentares, de forma plana, de baixo para cima. Devido às características da caverna, a deposição dos sedimentos mais recentes se dá pela inundação do local e sedimentação sobre as camadas mais antigas. Como o escoamento superficial carrega matéria orgânica em solução e suspensão, ao infiltrar-se no material arenoso essa carga orgânica é depositada. Assim, essa deposição é muito mais frequente nas camadas inferiores, que não dependem da ocorrência de eventos de precipitação tão intensos para receberem esse aporte orgânico. Com isso, a camada mais profunda apresentou menor idade (1.767 anos cal AP), enquanto a camada superior apresentou maior idade (2.450 anos cal AP).

deposition dynamics, was notably altered only in the 6 to 8 cm and 24 to 46 cm layers. The 6 to 8 cm layer was differentiated mainly by the higher contribution of phyllite (higher Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 contents). However, the particle size distribution was not so distinct, indicating changes mainly in the sediment source and not so much in the transport process (runoff velocity and sedimentation dynamics). The 24 to 26 cm layer was markedly different from the others both in geochemical composition (higher Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 and Fe_2O_3 contents) and in particle size distribution (finer particle size, with 31.7% smaller than 0.106 mm in diameter). This layer was possibly deposited under longer water residence time in this portion of the cave, allowing the deposition of finer particles.

Radiocarbon dating and sedimentation dynamics

Samples dating (Table 3) indicated occurrence of contamination, since, according to Springer (2019), sediments are deposited in sedimentary beds in a flat, bottom-up fashion. Due to the cave characteristics, deposition of the more recent sediments occurs by flooding the site and sedimentation over the older layers. As the surface runoff, carrying organic matter, infiltrates the sandy material, this organic load is deposited. Therefore, this deposition is much more frequent in the lower layers, because it does not depend on the occurrence of such intense precipitation events to receive this organic input. Thus, the deeper layer showed a lower age (1,767 cal yr BP), while the upper layer showed a higher age (2,450 cal yr BP).

As taxas de sedimentação (Tabela 3), mesmo negativas, mostram claramente que há necessidade de eventos de precipitação mais intensos para que os sedimentos fossem depositados nas camadas superiores. Estes resultados estão de acordo com a granulometria mais grossa destas camadas (Tabela 2) e com a análise de componentes principais, que agrupou em um quadrante as camadas acima de 36 cm (Figura 12).

The negative sedimentation rates (Table 3), clearly show that more intense precipitation events are needed for sediments to be deposited in the upper layers. These results are in agreement with the coarser granulometry of these layers (Table 2) and with the principal component analysis, which grouped in a same quadrant the layers above 36 cm (Figure 12).

Tabela 3 - Datações radiocarbônicas de amostras coletadas na Caverna do Galo.

Prof. (cm)	CENA/Amostra	Idade (anos AP)	Idade calibrada (anos cal AP)	Idade média calibrada (anos cal AP)	Taxa de sedimentação (mm ano ⁻¹)
37	CENA 1325/01*	2.481 ± 28	2.356 – 2.543	2.450	-0,50
25	CENA 1326/09	2.274 ± 28	2.139 – 2.276	2.208	-0,52
2	CENA 1327/14	1.869 ± 33	1.699 – 1.834	1.767	

*Laboratório 14C – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

Table 3 - Radiocarbon dating of samples collected in Galo Cave.

Depth (cm)	CENA/Sample	Age (yr BP)	Calibrated age (cal yr BP)	Average calibrated age (cal yr BP)	Sedimentation rate (mm yr ⁻¹)
37	CENA 1325/01*	2.481 ± 28	2.356 – 2.543	2.450	-0,50
25	CENA 1326/09	2.274 ± 28	2.139 – 2.276	2.208	-0,52
2	CENA 1327/14	1.869 ± 33	1.699 – 1.834	1.767	

*Laboratory 14C – CENA (Center for Nuclear Energy in Agriculture at the University of São Paulo).

Silva et al. (2004) dataram por 14C camadas de 2 perfis de solos do topo da Serra São José, situados a cerca de 200 m da entrada da Caverna do Galo, a 1.360 m de altitude. Um dos perfis, classificado como Neossolo Flúvico Psamítico típico (Santos et al., 2018), apresentou várias camadas arenosas entremeadas a camadas arenosas enriquecidas com matéria orgânica, resultado de sucessivos ciclos de deposição laminar, com morfologia semelhante ao pacote de sedimentos deste estudo.

Silva et al. (2004) dated by 14C layers of two soil profiles from the top of Serra São José, located about 200 m from the entrance of Galo Cave, at 1,360 m altitude. One of the profiles, classified as typic Psammitic Fluviic Neosol (Santos et al., 2018) or Typic Ustifluvents (Soil Survey Staff, 2014), showed several sandy layers interspersed with organic matter enriched sandy layers. This is the result of successive cycles of laminar deposition, with morphology similar to the sediment

As taxas de sedimentação deste perfil variaram de 1,8 a 3,6 mm ano⁻¹ e a idade radiocarbônica da camada situada a 105 cm foi de 390 anos AP. O outro perfil, um Paleossolo (Neossolo Flúvico Psamítico típico) apresentou idade radiocarbônica da camada de 175 cm de 24.165 anos cal AP e taxas de sedimentação muito variadas, entre 0,02 e 3,5 mm ano⁻¹, porém os valores mais elevados foram obtidos nas camadas mais superficiais, mais recentes. Estes dados nos permitem inferir que as taxas de sedimentação na superfície da Serra São José também estão relacionadas com a intensidade e duração de eventos de precipitação.

Em estudos de reconstituição ambiental realizados na Serra do Espinhaço Meridional (MG), a 300 km do local deste estudo, utilizando análises multi-proxy (isótopos de C e N, fitólitos, polens, geoquímica, estratigrafia), foram obtidas várias evidências de mudanças climáticas durante o Holoceno (Horák-Terra et al., 2015; 2020; Costa, 2018; Machado et al., 2021), com períodos de maior umidade e temperaturas mais elevadas ou mais baixas e períodos mais secos com temperaturas mais elevadas.

O D10 médio calculado foi de 91 μm (D10 corresponde ao diâmetro médio abaixo do qual passam apenas 10% das partículas). Assim, o tempo de sedimentação para 90% das partículas seria inferior a um minuto, em média, de acordo com a Lei de Stokes. Então, o tempo de residência da água no final da Caverna do Galo precisaria ser bem pequeno para possibilitar a deposição dos sedimentos. Nesse caso, o que provavelmente exerce maior influência no processo de sedimentação é a vazão de entrada do escoamento superficial, que deve superar a vazão de saída no sumidouro ao final da caverna para preencher o fundo da cavidade, onde o pacote de sedimentos se localiza. Supondo um tempo de concentração de 10 minutos para a bacia de contribuição da caverna e um volume de 230 m³ para a seção final, onde o pacote de sedimentos se assenta, seria necessária uma chuva com intensidade de 88.8 mm h⁻¹ para preencher essa cavidade final da Caverna do Galo e submergir completamente o pacote de sedimentos. De acordo com a equação de chuvas intensas estimada por Bello (2018) para o município de São João Del Rei, essa chuva teria tempo de retorno de apenas 1 ano, ou seja, o pacote de

package of this study. The sedimentation rates of this profile varied from 1.8 to 3.6 mm yr⁻¹ and the radiocarbon age of the layer at 105 cm was 390 yr BP. The other profile, a Paleosol (typical Psammitic Fluvic Neosol or Typic Ustifluvents) showed a radiocarbon age of the 175 cm layer of 24,165 cal yr BP and varied sedimentation rates, between 0.02 and 3.5 mm yr⁻¹, but the highest values were obtained in the upper, most recent layers. These data allow us to infer that sedimentation rates at the surface of Serra São José are also related to the intensity and duration of precipitation events.

Several evidences of Holocene climatic changes were obtained in environmental reconstitution studies conducted in the Serra do Espinhaço Meridional (MG), 300 km from the site of this study (Horák-Terra et al., 2015; 2020; Costa, 2018; Machado et al., 2021). Those studies used multi-proxy analyses (C and N isotopes, phytoliths, pollens, geochemistry, stratigraphy), and showed periods of higher humidity and higher or lower temperatures and drier periods with higher temperatures.

The calculated average D10 was 91 μm (D10 corresponds to the average diameter below which only 10% of the particles pass). Thus, according to Stokes' Law the sedimentation time for 90% of the particles would be on average less than one minute. Therefore, the residence time of the water at the end of Galo Cave would need to be very short to allow the deposition of the sediments. In this case, what probably has the greatest influence on the sedimentation process is the inflow of surface runoff, which must exceed the outflow of the cave in order to fill the bottom of the cavity. Assuming a concentration time of 10 minutes for the contribution basin of the cave and a volume of 230 m³ for the final section, an 88.8 mm h⁻¹ rainfall would be necessary to fill this final cavity of the Galo Cave and completely submerge the sediment package. According to the equation of intense rainfall estimated by Bello (2018) for the municipality of São João Del Rei, this rainfall would have a return time of only 1 year, i.e., the sediment package could be submerged annually by surface runoff. This hypothesis is corroborated by the observations made in loco of the presence of foam and signs

sedimentos poderia ser submerso anualmente pelo escoamento superficial. Essa hipótese é corroborada pelas observações feitas *in loco* da presença de espuma e sinais de passagem de água indo até a porção superior do pacote de sedimentos (Figura 8).

Supondo que a camada superior não tenha sofrido contaminação por matéria orgânica mais recente e que sua idade seja de fato de 2.450 anos, pode-se estimar a "idade real" das demais camadas considerando uma taxa de contaminação uniforme (linear) ao longo de todo o pacote, uma vez que que o modelo idade x profundidade (Figura 13) indica essa tendência linear de distribuição das idades.

of water passing up to the upper portion of the sediment package (Figure 8).

Assuming that the upper layer has not been contaminated by more recent organic matter and that its age is in fact 2,450 years, and since the age x depth model (Figure 13) indicates this linear trend of age distribution, one can estimate the "real age" of the other layers by considering a uniform (linear) contamination rate throughout the package.

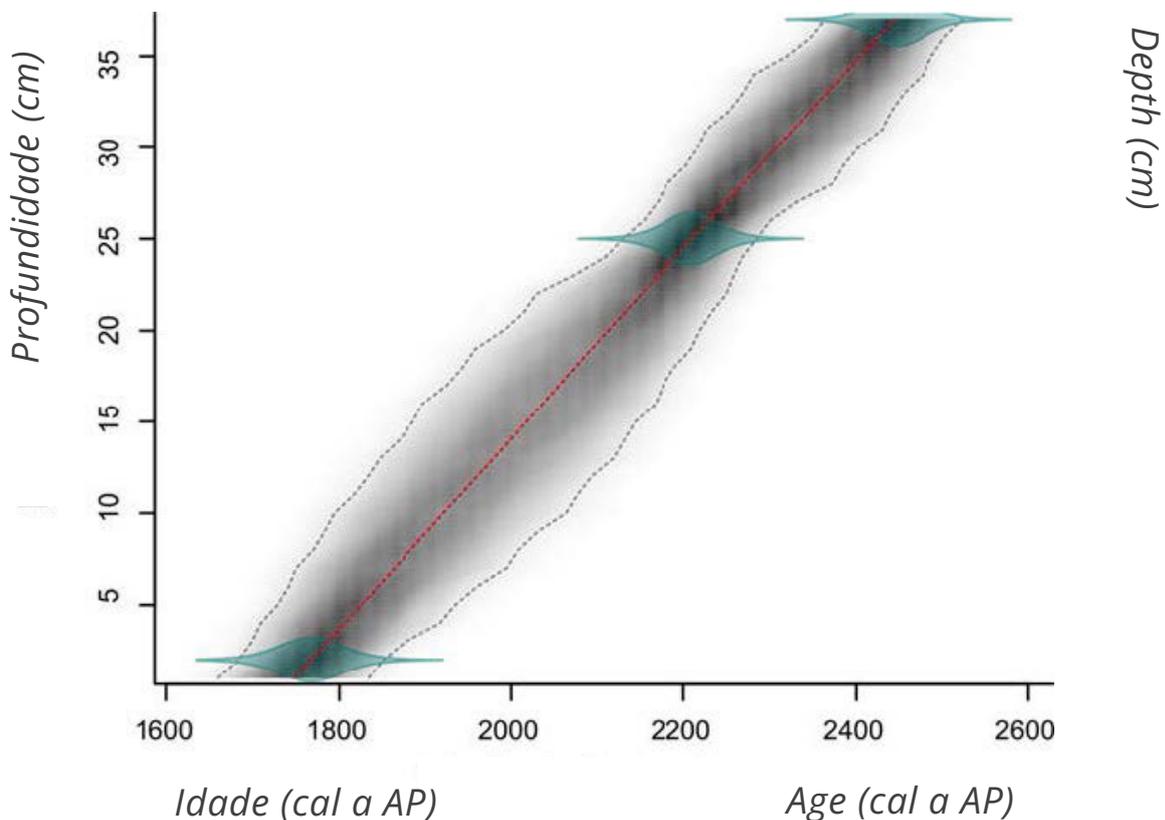


Figura 13 – Modelo idade x profundidade para o pacote de sedimentos da Caverna do Galo.

Figure 13 – Age x depth model for Galo Cave sediment package.

Supondo que chuvas com intensidade de 20 mm h⁻¹, 30 mm h⁻¹ e 40 mm h⁻¹ seriam suficientes para submergir as camadas de 2, 25 e 37 cm e considerando a distribuição de eventos de precipitação obtidos na Estação Meteorológica Automática de São João Del Rei para o período 2007-2020 (Tabela 4), as camadas de 37, 25 e 2 cm teriam sofrido respectivamente 1.750 (10 eventos em 14

Assuming that rainfall with intensity of 20 mm h⁻¹, 30 mm h⁻¹ and 40 mm h⁻¹ would be enough to submerge the layers of 2, 25 and 37 cm and considering the distribution of precipitation events obtained from the Automatic Weather Station of São João Del Rei for the period 2007-2020 (Table 4). The layers of 37, 25 and 2 cm would have suffered respectively

anos, 1.750 em 2.450 anos), 4.416 (28 eventos em 14 anos, 4.416 eventos em 2.208 anos) e 12.631 eventos de inundação (100 eventos em 14 anos e 12.621 eventos em 1.767 anos). Considerando o Método Racional de estimativa do escoamento superficial (com coeficiente de escoamento igual a 0,3 e área da bacia de 5,18 ha), esses eventos seriam capazes de drenar para o interior da caverna 51,8, 77,7 e 103,6 m³ de água, que seriam capazes de inundar uma área de 2.590 m² com 2 cm de profundidade, 311 m² com 25 cm de profundidade e 280 m² com 37 cm de profundidade.

1,750 (10 events in 14 years, 1,750 in 2,450 years), 4,416 (28 events in 14 years, 4,416 events in 2,208 years) and 12,631 flood events (100 events in 14 years and 12,621 events in 1,767 years). Considering the Rational Method of estimating surface runoff (with runoff coefficient equal to 0.3 and basin area of 5.18 ha), these events would be able to drain into the cave 51.8, 77.7 and 103.6 m³ of water. This volume would be able to flood an area of 2,590 m² with 2 cm depth, 311 m² with 25 cm depth and 280 m² with 37 cm depth.

Tabela 4 – Ocorrência de eventos de precipitação de acordo com a intensidade na Estação Meteorológica Automática de São Joao Del Rei (A514).

Intensidade da precipitação	Eventos (2007-2020)	Eventos/ano
>50 mm/h	3	0,2
40-50 mm/h	7	0,5
30-40 mm/h	18	1,4
20-30 mm/h	72	5,5
Soma	100	7,7

Table 4 – Occurrence of precipitation events according to intensity at the Automatic Weather Station of São Joao Del Rei (A514).

Precipitation Intensity	Events (2007-2020)	Events/year
>50 mm/h	3	0,2
40-50 mm/h	7	0,5
30-40 mm/h	18	1,4
20-30 mm/h	72	5,5
Total	100	7,7

Considerando a proporção de eventos entre camadas igual a 1:2,52:7,21 (1.750 eventos a 37 cm, 4.416 eventos a 25 cm e 12.631 eventos a 2 cm) e a idade de 2.450 anos cal AP para a camada de 37 cm, a idade das demais camadas foram estimadas em 5.554 anos cal AP para a camada de 25 cm e 12.740 anos para a camada de 2 cm, com taxas de sedimentação de 0,032 mm ano⁻¹ (entre 2 e 25 cm) e de 0,039 mm ano⁻¹ (entre 25 e 37 cm). Essas idades e taxas de sedimentação estão em consonância com os valores encontrados por Silva et al. (2004) para solos da Serra São José.

Considering the ratio of events between layers equal to 1:2.52:7.21 (1,750 events at 37 cm, 4,416 events at 25 cm, and 12,631 events at 2 cm) and the age of 2,450 cal yr BP for the 37 cm layer. The ages of the other layers were estimated at 5.554 cal yr BP for the 25 cm layer and 12,740 cal yr BP for the 2 cm layer, with sedimentation rates of 0.032 mm yr⁻¹ (between 2 and 25 cm) and 0.039 mm yr⁻¹ (between 25 and 37 cm). These ages and sedimentation rates are in agreement with values found by Silva et al. (2004) for Serra São José soils.

As idades inferidas podem estar relacionadas às mudanças climáticas holocênicas. A elevação das temperaturas e o aumento da umidade na transição Pleistoceno/Holoceno (Horak-Terra et al., 2015; Costa, 2018; Machado et al., 2021) teriam propiciado o início da formação do pacote dos sedimentos (idade estimada na base de 12.740 anos AP). Um período mais úmido e com temperaturas mais baixas no Holoceno Médio (Horak-Terra et al., 2015; 2020; Costa, 2018) poderia ter proporcionado a ocorrência de eventos de precipitação não tão intensos, mas de longa duração, induzindo a formação da camada mais rica em matéria orgânica e de granulometria mais fina (camada de 24 a 26 cm, com idade estimada de 5.554 anos cal AP). Períodos mais secos e de grande instabilidade na bacia hidrográfica, sugerindo extremos de precipitação, como os encontrados entre 2.400 e 2.100 anos cal AP por Costa (2018), poderiam conter energia o suficiente para transportar sedimentos mais grosseiros e formar as camadas superiores (camadas entre 36 e 47 cm, com idade de 2.450 anos cal AP), fechando o pacote de sedimentos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Caverna do Galo foi formada pelas águas meteóricas e sua morfologia foi influenciada pelo falhamento NNW/SSE e pela diferença de dureza entre as rochas componentes (quartzito e filito).

Um pacote de sedimentos foi depositado preenchendo da base ao teto de uma curva convexa da lateral norte da caverna, onde o fluxo d'água encontra um obstáculo, diminuindo sua velocidade e favorecendo a sedimentação.

A morfologia e as composições granulométrica e química dos sedimentos e a idade radiocarbônica variam ao longo do pacote, evidenciando oscilações na intensidade e duração de eventos de precipitação, que podem estar associados a mudanças climáticas holocênicas.

The inferred ages may be related to Holocene climate change. Rising temperatures and increasing humidity in the Pleistocene/Holocene transition (Horak-Terra et al., 2015; Costa, 2018; Machado et al., 2021) would have provided the onset of sediment package formation (estimated base age 12,740 cal yr BP). A wetter period with lower temperatures in the Middle Holocene (Horak-Terra et al., 2015; 2020; Costa, 2018) could have provided the occurrence of not so intense but long-lasting precipitation events, inducing the formation of the more organic-rich and finer-grained layer (24 to 26 cm layer, with an estimated age of 5,554 cal yr BP). Drier and highly unstable periods in the watershed, suggesting extreme precipitations, such as those found between 2,400 and 2,100 cal yr BP by Costa (2018), could contain enough energy to transport coarser sediments and form the upper layers (layers between 36 and 47 cm, with an age of 2,450 cal yr BP), closing the sediment package.

FINAL CONSIDERATIONS

Meteoric waters formed Galo Cave and the NNW/SSE faulting influenced its morphology, in addition to the difference in hardness between the component rocks (quartzite and phyllite).

The sediment package was deposited on a convex curve of the northern side of the cave, where the water flow meets an obstacle, slowing its velocity and favoring sedimentation, filling the space from the base to the ceiling.

The morphological, granulometric and chemical compositions of the sediments and the radiocarbon age vary throughout the package. This indicated oscillations in the intensity and duration of precipitation events, which may be associated with Holocene climatic changes.

REFERÊNCIAS / REFERENCES

- AULER, A. S., SAURO, F. Quartzite and quartz sandstone caves of South America. In *Encyclopedia of Caves*. Academic Press, p. 850-860, 2019.
- AULER, A. S., SMART, P. L., WANG, X., PILÓ, L. B., EDWARDS, R. L., CHENG, H. Cyclic sedimentation in Brazilian caves: mechanisms and palaeoenvironmental significance. *Geomorphology*, 106(1-2), p.142-153, 2009.
- BELLO, I. P. Regionalização de chuva intensa para o estado de Minas Gerais. 2018. 71 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas. Lavras: Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- BLAAUW, M., CHRISTEN, A., LOPEZ, M. A. A., et al. rbacon: Age-Depth Modelling using Bayesian Statistics. R package version 2.5.6. 2021. <https://CRAN.R-project.org/package=rbacon>
- BÖGLI, A. Endokarst and Karst Hydrology. In: *Karst Hydrology and Physical Speleology* Springer, Berlin, Heidelberg, p. 73-76, 1980.
- BOSCH, R. F., WHITE, W. B. Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. In: *Studies of cave sediments*. Springer, Boston, MA, p. 1-22, 2007.
- BROOK, G. A., RAILSBACK, L. B., CAMPBELL, A. C., ROBBINS, L. H., MURPHY, M. L., HODGINS, G., MCHUGH, J. Radiocarbon ages for coatings on cupules ground in quartzite bedrock at Rhino Cave in the Kalahari Desert of Botswana, and their paleoclimatic significance. *Geoarchaeology*, 26(1), p.61-82, 2011.
- BUTZER, K. W. Geology of Nelson Bay Cave, Robberg, South Africa. *The South African Archaeological Bulletin*, 28(111/112), p. 97-110, 1973.
- COMIG - MAPA GEOLÓGICO - COMIG. Mapa Geológico Projeto Sul de Minas – Etapa I, Folha São João Del Rei, SF-23-X-C-II. Convênio; COMIG-UFMG-UFRJ-UERJ, 2003.
- COSTA C. R. Reconstituição paleoambiental utilizando uma abordagem multi-proxy em um registro de turfeira tropical de montanha, Minas Gerais, Brasil. 2018. 130p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal. Diamantina: Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.
- DAY, A. Cave surveying. *Cave Studies Series*, v. 11, p. 40, 2002.
- DEFELIPO, B.V., RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 17p, 1981. (Boletim de Extensão, 29)
- FABRI, F. P., AULER, A. S., CALUX, A. S., CASSIMIRO, R., AUGUSTIN, C. H. Cave morphology and controls on speleogenesis in quartzite: the example of the Itambè do Mato Dentro area in southeastern Brazil. *Acta Carsologica*, p.44(1), 2015.
- FARRANT, A. R., SMART, P. L. Role of sediment in speleogenesis; sedimentation and paragenesis. *Geomorphology*, v. 134, n. 1-2, p. 79-93, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.006>

FOLK, R.L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 62: p.344-359, 1954.

FORD, D., WILLIAMS, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, 2007.

FOURNIER, J., GALLON, R. K., PARIS, R. G2Sd: a new R package for the statistical analysis of unconsolidated sediments. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, v. 20, n. 1, p. 73-78, 2014. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10513>

FUNDAÇÃO ALEXANDER BRANDT - FABRANDT. Zoneamento Ecológico-Econômico da Área de Proteção Ambiental (APA) São José, MG. Belo Horizonte: Convênio FNMA/FABRANDT (008/98), p. 117, 2000.

GUILD, G. E., PALTRIDGE, N. G., ANDERSSON, M. S., STANGOULIS, J. C. An energy-dispersive X-ray fluorescence method for analysing Fe and Zn in common bean, maize and cowpea biofortification programs. *Plant and Soil*, p. 1-10, 2017.

HOGG AG, HEATON TJ, HUA Q et al. SHCal20 Southern Hemisphere calibration, 0-55,000 years cal BP. *Radiocarbon* 62, 2020. doi: 10.1017/RDC.2020.59

HORÁK-TERRA I., CORTIZAS A.M., LUZ C.F.P., et al. Late Quaternary vegetation and climate dynamics in central-eastern Brazil: insights from a ~35k cal a bp peat record in the Cerrado biome. *J. Quat. Sci.* 35, 664–676, 2020. <https://doi.org/10.1002/jqs.3209>

HORÁK-TERRA I., MARTÍNEZ CORTIZAS A., LUZ C.F.P., et al. Holocene climate change in central-eastern Brazil reconstructed using pollen and geochemical records of Pau de Fruta mire (Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 437, p.117–131, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2015.07.027>

JENNINGS, J. N. *Karst geomorphology*. Oxford: Basil Blackwell Ltd., 1985.

KASSAMBARA, A., MUNDT, F. Package 'factoextra'. Extract and visualize the results of multivariate data analyses, v. 76, R package version 1.0.7, 2020. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>

MACHADO DOBF, CHUENG KF, COE HHG et al. Paleoenvironmental reconstruction of the headwaters of the preto river, Minas Gerais state, Brazil, through siliceous bioindicators. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, p.103349, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103349>

NICHOLS, G. *Sedimentology and stratigraphy*. John Wiley & Sons, 2009.

O'CONNOR, S., BARHAM, A., APLIN, K., MALONEY, T. Cave stratigraphies and cave breccias: Implications for sediment accumulation and removal models and interpreting the record of human occupation. *Journal of Archaeological Science*, 77, p.143-159, 2017.

PESSENDA L. C., DE OLIVEIRA P. E., MOFATTO M., et al. The evolution of a tropical rainforest/grassland mosaic in southeastern Brazil since 28,000 14C yr BP based on carbon isotopes and pollen records. *Quat. Res.* 71, p. 37–452, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.01.008>

R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. URL <https://www.R-project.org/>

RADOSLOVICH, E. W. The Structure of Muscovite, $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$. Acta Crist. 13, p. 919-932, 1960. <https://doi.org/10.1107/S0365110X60002259>

RUBBIOLI, E., MOURA, V. Mapeamento de Cavernas - Guia Prático. Redespeleo Brasil, p. 93, 2005.

SAADI, A., MAGALHÃES Jr., A.P., MARQUES, M.R. UHE IRAPÉ. Etapa 1-Estudos de viabilidade: Meio ambiente Geomorfologia-Relatório Final. ENERCONSULT/CEMIG, VIR-3473, 1991

SANTOS, G.S, JACOMINE, P.K.T, ANJOS, L.H.C, et al. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF: Embrapa, 5. ed., rev. e ampl., 2018.

SAURO, F., DE WAELE, J., ONAC, B. P., GALLI, E., DUBLYANSKY, Y., BALDONI, E., SANNA, L. Hypogenic speleogenesis in quartzite: the case of Corona'e Sa Craba Cave (SW Sardinia, Italy). Geomorphology, 211, p.77-88, 2014.

SCHULZ, H. P., ERIKSSON, B., HIRVAS, H., HUHTA, P., JUNGNER, H., PURHONEN, P., UKKOMEN, P., RANKAMA, T. Excavations at Susiluola Cave. Suomen Museo, p. 5-45, 2002.

SILVA A. C. Solos do topo da serra de São José (Minas Gerais) e suas relações com o paleoclima no sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo - V28: p. 455 - 466. 2004.

SILVA, A. C, VIDAL-TORRADO, P., MARTINEZ-CORTIZAS, A., GARCIA RODEJA, E. Solos do topo da serra de São José (Minas Gerais) e suas relações com o paleoclima no sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo - V28: p. 455 - 466. 2004.

TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A., TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. Brasília: Embrapa, p. 573, 2017.

TRAVASSOS, L. E. P. Princípios de carstologia e geomorfologia cárstica. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio, p. 246. 2019.

TRIBOLO, C., MERCIER, N., LEFRAIS, Y., MILLER, C. E., PARKINGTON, J., VALLADAS, H., PORRAZ, G. Chronology of the Pleistocene deposits at Elands Bay Cave (South Africa) based on charcoals, burnt lithics, and sedimentary quartz and feldspar grains. Southern African Humanities, 29(1), p.129-152, 2016.

TWENHOFEL, W.H. Treatise on sedimentation. New York: Dover Publications, 1961.