



ESPELEO-TEMA

REVISTA BRASILEIRA DEDICADA AO ESTUDO DE CAVERNAS E CARSTE

ISSN 0102-4701 (impresso)
ISSN 2177-1227 (on-line)

Volume 28 Número 1
Ano 2017



Furna do Fim do Morro do Parafuso (BA-712), Paripiranga BA. Foto: Ricardo Fraga Pereira - vide artigo na página 35

EDIÇÃO ESPECIAL:
GEOLOGIA DO CARSTE E GEOESPELEOLOGIA

Artigos Originais

Tempo de trânsito da água no carste: Colombo (PR, Brasil)

Paulo Cesar Soares & Daniel Fabian Bettu

Morfodinâmica no carste de contato da planície do Rio das Velhas e a Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais

Leandro Cosme Oliveira Couto & Luiz Eduardo Panisset Travassos

O carste e as cavernas de Paripiranga (BA)

Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira, Thiago dos Santos Gonçalves & Miguel Reis

Caracterização de cavidades naturais no Parque Estadual do Ibitipoca (Minas Gerais) por meio da pesquisa geológico-geofísica

Andréa Alves Ferreira, Pablo Lopes, Marcelo dos Santos Salomão, Miguel Angelo Mane, Mauro Cesar Gerales & Heitor Cintra

Aspectos petrográficos e mineralógicos da caverna S11D-0047, Unidade Espeleológica Carajás – sudeste do Pará

Ana Karita da Cunha Sousa, Daniele Freitas Gonçalves & Joel Buenano Macambira

Cavernas de Tasso Fragoso – MA: mapeamento e registro das ocorrências espeleológicas como subsídio à preservação da geodiversidade

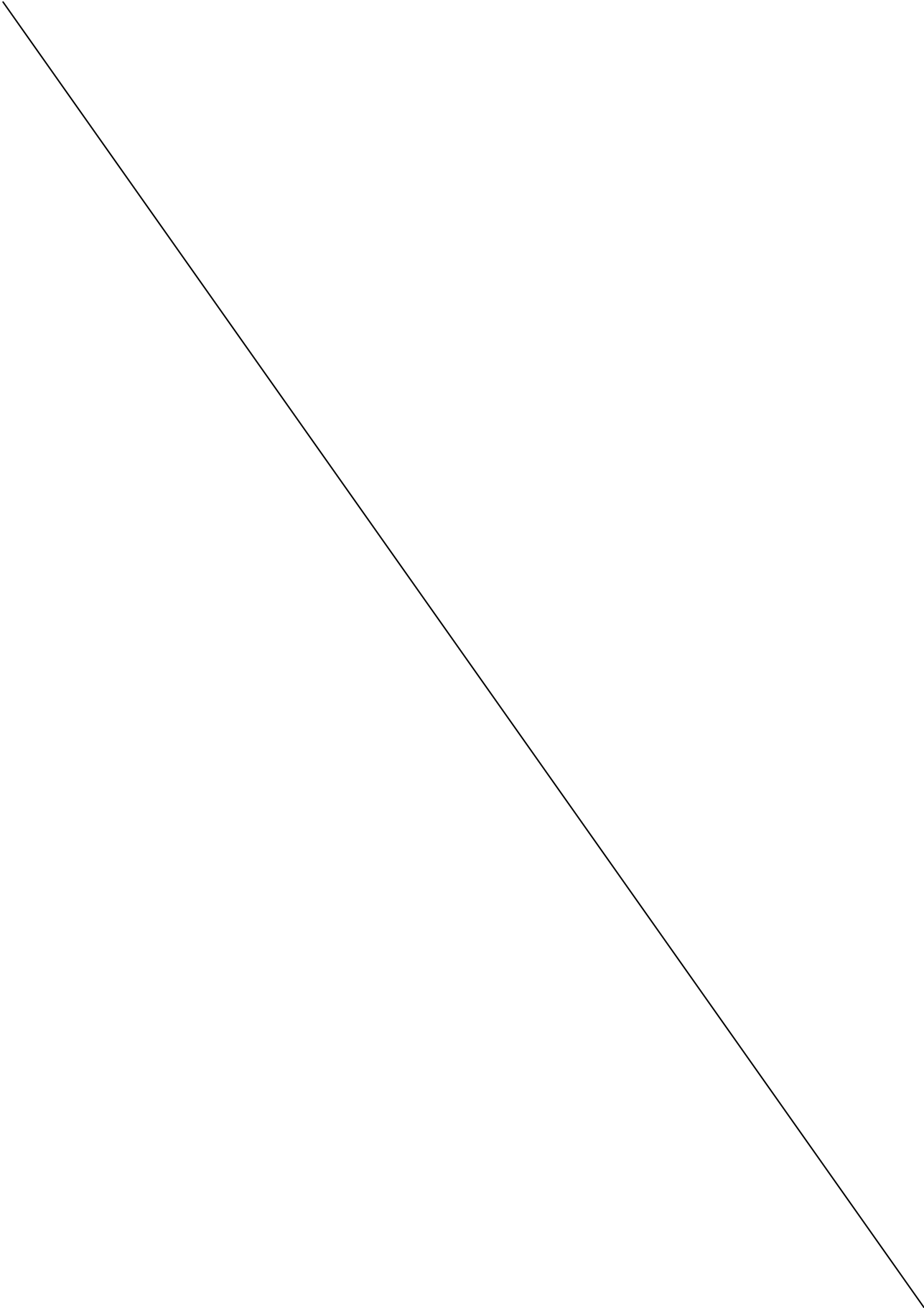
Antonia Rejane Cavalcante Moraes & Claudio Eduardo de Castro

A classificação Schiner-Racovitza dos organismos subterrâneos: uma análise crítica, dificuldades para aplicação e implicações para conservação

Eleonora Trajano & Regina Bessi

Sociedade Brasileira de Espeleologia

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp



EXPEDIENTE



Sociedade Brasileira de Espeleologia
(Brazilian Speleological Society)

Endereço (Address)

Caixa Postal 7031 – Parque Taquaral
CEP: 13076-970 – Campinas SP – Brasil

Contatos (Contacts)

+55 (19) 3296-5421
espeleo-tema@cavernas.org.br

Gestão 2015-2017 (Management Board 2015-2017)

Diretoria (Direction)

Presidente: Marcelo Augusto Rasteiro
Vice-presidente: Pavel Carrijo Rodrigues
Tesoureiro: Luciano Emerich Faria
1º Secretário: Teresa Maria da Franca Moniz de Aragão
2º Secretário: Érica Nunes

Conselho Fiscal (Supervisory Board)

Heitor de Brito Cintra
Eduardo Gomes de Assis
Delci Kimie Ishida
Jose Antonio Basso Scaleante – suplente (*alternate*)
José Eduardo Teixeira de Alarcão – suplente (*alternate*)

ESPELEO-TEMA

Editores-Chefes (*Chief Editor*)

Dra. Maria Elina Bichuette
Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR

Dr. William Sallun Filho
Instituto Geológico do Estado de São Paulo – IG/SMAS

Editor Convidado (*Guest Editors*)

Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Editor Assistente (*Assistant Editor*)

Esp. Marcelo Augusto Rasteiro
Sociedade Brasileira de Espeleologia – SBE

Conselho Editorial (*Editorial Board*)

Dr. Luiz Eduardo Panisset Travassos
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC/Minas

Dr. Heros Augusto Santos Lobo
Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR

Conselho Consultivo (*Consulting Board*)

Dr. Astolfo Gomes de Mello Araujo
Universidade de São Paulo – USP

Msc. Elvis Pereira Barbosa
Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC

Dra. Eleonora Trajano
Universidade de São Paulo – USP
Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR

Dr. Emerson Galvani
Universidade de São Paulo – USP

Dra. Emília Mariko Kashimoto
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS

Ezio Rubbioli
Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas – GBPE

Dr. Fernando Morais
Universidade Federal do Tocantins - UFT

Dr. Francisco Sekiguchi de Carvalho e Buchmann
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Dr. Gilson Burigo Guimarães
Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG

Dr. Gilson Rodolfo Martins
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS

Dr. Luis Enrique Sánchez
Universidade de São Paulo – USP

Dr. Luiz Afonso Vaz de Figueiredo
Fundação Santo André – FSA

Dr. Maurício de A. Marinho
M&P Cons. Est. Amb.

MSc. Mylène Luíza Cunha Berbert-Born
Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM

Dr. Nicolás Misailidis Stríkis
Universidade Federal Fluminense - UFF

Dr. Paulo César Boggiani
Universidade de São Paulo – USP

Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira
Universidade Federal da Bahia – UFBA

Apoio à Tradução (*Translation support*)

Dra. Linda Gentry El-Dash
Universidade Estadual de Campinas - Unicamp

SUMÁRIO (CONTENTS)

Editorial	4
------------------	----------

ARTIGOS ORIGINAIS

Tempo de trânsito da água no carste: Colombo (PR, Brasil) <i>Transit time of water in karst: Colombo (PR, Brazil)</i> Paulo Cesar Soares & Daniel Fabian Bettu	5
---	----------

Morfodinâmica no carste de contato da planície do Rio das Velhas e a Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais <i>Morphodynamics in the contact karst of the Velhas River plain and the Southern Espinhaço Ridge, Minas Gerais</i> Leandro Cosme Oliveira Couto & Luiz Eduardo Panisset Travassos	25
--	-----------

O carste e as cavernas de Paripiranga (BA) <i>The karst and the caves of Paripiranga (BA)</i> Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira, Thiago dos Santos Gonçalves & Miguel Reis	35
--	-----------

Caracterização de cavidades naturais no Parque Estadual do Ibitipoca (Minas Gerais) por meio da pesquisa geológico-geofísica <i>Characterization of natural cavities in Ibitipoca State Park (Minas Gerais) by means of geological-geophysical research</i> Andréa Alves Ferreira, Pablo Lopes, Marcelo dos Santos Salomão, Miguel Angelo Mane, Mauro Cesar Geraldes & Heitor Cintra	49
---	-----------

Aspectos petrográficos e mineralógicos da caverna S11D-0047, Unidade Espeleológica Carajás – sudeste do Pará <i>Petrographic and mineralogical aspects of S11D-0047 cave, Speleological Carajás Unit - southeast Pará</i> Ana Karita da Cunha Sousa, Daniele Freitas Gonçalves & Joel Buenano Macambira	61
--	-----------

Cavernas de Tasso Fragoso – MA: mapeamento e registro das ocorrências espeleológicas como subsídio à preservação da geodiversidade <i>Caves of Tasso Fragoso - MA: mapping and registration of speleology occurrences as a subsidy to the preservation of geodiversity</i> Antonia Rejane Cavalcante Morais & Claudio Eduardo de Castro	73
--	-----------

A classificação Schiner-Racovitza dos organismos subterrâneos: uma análise crítica, dificuldades para aplicação e implicações para conservação <i>The Schiner-Racovitza classification of subterranean organisms: a critical analysis, difficulties of application and conservation</i> Eleonora Trajano & Regina Bessi	87
--	-----------

EDITORIAL

Tradicionalmente, os terrenos cársticos são definidos pela abertura de vazios subterrâneos em rochas solúveis, que resulta na formação de feições peculiares de relevo. Estima-se que estes terrenos ocupem cerca de 20% das terras emersas do nosso planeta. Contudo, nesta estimativa é considerado apenas o carste clássico ou convencional, desenvolvido exclusivamente sobre as rochas solúveis.

Hoje sabemos que as feições cársticas não se resumem aos terrenos instalados sobre as rochas solúveis e o carste não convencional pode ampliar, sobremaneira, a área de ocorrência dos terrenos dotados de feições cársticas espalhados pelo planeta. Consequentemente, isso aumenta o número de populações que vivem e dependem destes elementos peculiares da geodiversidade, tendo implicações sobre a vida de um número maior de indivíduos.

Nesta Edição Especial da Revista Espeleo-Tema, com foco em Geologia do Carste e Goepeleologia, são apresentados seis artigos que tratam da ocorrência e caracterização de feições e processos cársticos, em diferentes tipos de substratos geológicos. A compreensão dos fenômenos e processos, vinculados com o desenvolvimento das feições particulares, que caracterizam os diferentes tipos de terrenos cársticos, ainda é palco de algumas controvérsias e carente de pesquisas e desenvolvimento no território brasileiro, com muito para ser descoberto e descrito.

A convite dos editores, a edição também traz um artigo importante e de amplo interesse sobre o meio biótico subterrâneo, que faz uma revisão e análise crítica da classificação ecológico-evolutiva usualmente aplicada para os organismos que habitam este ambiente. A reflexão sobre a classificação de Schiner-Racovitza para os organismos subterrâneos, empregada em larga escala, é uma necessidade, inclusive para aprimorar o sistema de análise de relevância das cavidades naturais subterrâneas, vigente atualmente no nosso país.

Para além de promover e ampliar o conhecimento, a reflexão e o debate sobre temas relevantes para o avanço da espeleologia em nosso país, os assuntos reunidos neste volume são importantes para planejar a conservação e o uso dos terrenos cársticos brasileiros, respeitando suas suscetibilidades e potencialidades intrínsecas, perante a crescente demanda por territórios e recursos naturais neste século que se inicia.

Deste modo, a Revista Espeleo-Tema segue contribuindo para a difusão da produção técnico-científica sobre o carste, cavernas e temas associados em nosso país. Agradecemos à colaboração dos autores e revisores, e aproveitamos para incentivar a publicação de artigos inéditos, sempre divulgando e promovendo o fortalecimento da ciência espeleológica nacional.

Boa leitura!

Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira
Editor Convidado
(volume especial)

Maria Elina Bichuette
William Sallun Filho
Editores-Chefe



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp

TEMPO DE TRÂNSITO DA ÁGUA NO CARSTE: COLOMBO (PR, BRASIL)**TRANSIT TIME OF WATER IN KARST: COLOMBO (PR, BRAZIL)****Paulo Cesar Soares (1) & Daniel Fabian Bettu (2)**

(1) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba PR.

(2) Depto. Engenharia de Petróleo, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Balneário Camboriú, SC.

Contatos: p_soares@terra.com.br; daniel.bettu@udesc.br.**Resumo**

O tempo de trânsito da água em terrenos cársticos é extremamente variável e relevante para o aproveitamento deste recurso. Para esta estimativa, a técnica do correlograma foi testada, comparando duas séries temporais descontínuas: precipitação atmosférica e produção de poços em terrenos cársticos de elevada complexidade. A situação investigada ocorre no interflúvio Alto Iguaçu-Ribeira (Paraná, sul do Brasil), a norte de Curitiba, em áreas de ocorrência do Grupo Açungui. Duas séries temporais pré-existent de medidas de precipitação e de nível dinâmico (ND) e vazão em poços foram investigadas para avaliar o tempo de trânsito da água neste terreno. O caráter metamórfico dos calcários dolomíticos organizados em faixas NE, confinados por filitos e interceptados por diques de direção NW, o fraturamento e um epicarste encoberto são particularidades, os que tornam singular o carste desta região. A comparação da precipitação e de variação do ND (em vazão constante) em poços não revela correlação. Uma série de transformações é investigada, obtendo-se resultados satisfatórios e robustos, que indicam pulsos de recarga relacionados aos picos de precipitação, com retardo variável. O procedimento revela poços afetados imediatamente pela precipitação, com retardo de 1 a 5 dias; poços dependentes no médio prazo (5 a 10 dias) e outros dependentes no longo prazo (até 90 dias). No primeiro caso, interpretam-se entradas diretas ao aquífero no epicarste, provavelmente, por cavidades conectadas com a superfície. Outros poços mostram que o ND reage de imediato com a chuva e, adicionalmente, recebem contínuo e progressivo afluxo de água. Correlações com elevado retardo implicam no afluxo difuso de outras fontes do carste, através de zonas de fratura.

Palavras-Chave: carste; recarga de aquífero; séries temporais; Grupo Açungui.**Abstract**

The transit time of water in karst systems is extremely variable and relevant for their exploitation. To estimate this property, the correlogram technique was tested, comparing some discontinuous time series, precipitation and well yield, in karst terrain of high complexity. The investigated area is the karst of the Alto Iguaçu-Ribeira watershed (southern Brazil, north of Curitiba). The metamorphic character and intense fracture is a peculiar condition of dolomite limestone occurring in narrow northeast strips. They are confined by phillite and intercepted by northwest diabase dykes. The existence of an epikarst, hidden by superficial formations, adds particularities which give unique character to the karst of this region. The comparison of the precipitation and variation of the dynamic (piezometric) level curves for a constant productivity in four wells investigated does not reveal an evident correlation. Variable transformations and methodological adjusting were adopted reaching robust results, which indicate pulses of recharge lags with reference to the precipitation picks: short lags (1 to 5 days), medium lags (5 to 10 days), and long lags were discriminated. Wells productivity immediately dependent from precipitation been interpreted as direct entrances to the aquifer in the epikarst, probably through surface connected cavities. Others wells show that dynamic level reacts immediately with the rain event, but maintain continuous and progressive intake of water. Long term flow lags, up to 90 days, reflect entrances and diffuse flow from others sources of karst related to fractured zones.

Key-Words: karst; aquifer recharge; time series correlation; Açungui Group.**1. INTRODUÇÃO**

O tempo de trânsito da água em terrenos cársticos é significativo em termos de

aproveitamento dos recursos hídricos do sistema, tanto pela capacidade de depuração da água ao longo do subsistema de fluxo subterrâneo, como pela relação com zonas de recarga (FORD; WILLIAMS,

2007). Diversos métodos têm sido utilizados para determinação do tempo de trânsito da água em diferentes meios. Dentre os mais frequentes situa-se a comparação de duas séries temporais (BOX; JENKINS, 1976): uma correspondente à entrada no sistema aquífero (como a precipitação) e outra correspondente à saída (como, por exemplo, a produção em poço ou fonte). Para estes estudos, duas técnicas têm sido utilizadas: a da análise estatística de covariância e correlação cruzada no domínio tempo (DROGUE, 1972; HURST et al, 1975; NETO et al, 2015); e a da análise espectral no domínio frequência (LAROCQUE et al, 1998; PADILLA; PULIDO-BOSCH, 1995).

As investigações do tempo de residência da água em aquíferos e no solo também tem se beneficiado, há várias décadas, das investigações isotópicas, tanto de isótopos radioativos, como o trítio e carbono 14, para águas recentes (CLARK; FRITZ 1997; AGGARWAL et al, 1998), como de comparação com séries temporais de variações da razão entre isótopos estáveis leves e pesados ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e Hidrogênio/Deutério) (Jordan; Froehlich 1990).

No carste de Colombo, HARUM et al, (2000) utilizaram isótopos de trítio para determinar o tempo de residência da água do terreno cárstico aqui investigado, encontrando valores de 13 a 20 anos, contraditório com o fato das águas não estarem saturadas em carbonatos (baixo índice de saturação da calcita e da dolomita). Este tipo de contradição foi considerado o paradoxo da idade das águas subterrâneas (Bethke & Johnson 2001), pois uma idade isotópica elevada pode resultar da mistura de

águas providas dos aquíferos, com um volume muito superior ao dos aquíferos, mas com uma taxa de transferência, mistura e renovação muito lenta, comparativamente à dos aquíferos e seus meios de recarga. Esta presença de águas com elevado tempo de residência e trânsito poderia explicar as contradições do balanço hídrico, conforme sugerido por VESTENA; KOBIYAMA (2007).

Por outro lado, métodos de comparação entre a disponibilidade hídrica superficial e a recarga dos aquíferos, tanto no domínio “tempo” como no domínio “frequência”, apresentam resultados diretos de indicadores de recarga e, então, do tempo de trânsito da água, desde que se trate de meios homogêneos, como verificado por Neto et al, 2015. As técnicas do correlograma ou do variograma cruzados apresentam bons resultados na comparação de duas séries temporais ou espaciais contínuas (Fig. 1) e homólogas. Tais técnicas têm sido usadas para correlacionar também simples variações na temperatura da água na superfície e na saída do sistema (BAILLY-COMTE et al, 2011). São utilizadas também para comparar variações nos padrões químicos e em traçadores naturais, neste caso utilizando procedimentos mais trabalhosos e custosos de aquisição de dados. Considerando que os sistemas aquíferos do carste são complexos, em especial em carste de terrenos metamórficos, em virtude de diferentes meios de percolação (solo, sedimentos e cavernas do epicarste e fraturas no endocarste), é esperada a emergência de dificuldades incomuns nos meios heterogêneos anisotrópicos e fraturados, diferentemente dos meios porosos homogêneos.

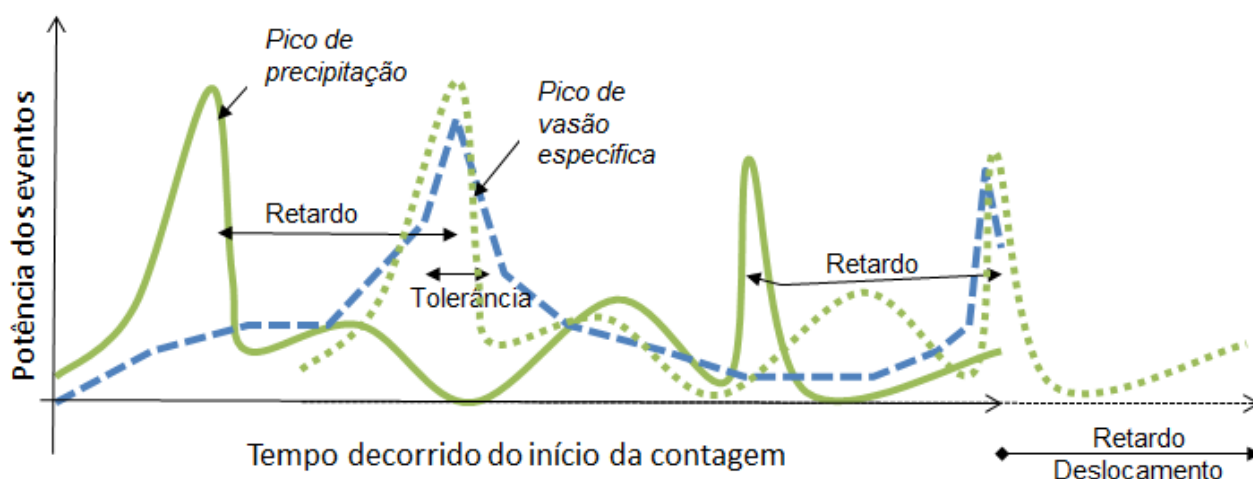


Figura 1 – Representação conceitual da relação esperada na comparação das séries temporais de vazão com precipitação para um sistema, com deslocamento da série entrada (precipitação, verde pontilhado) até encontrar o retardo (passo de deslocamento) que apresenta melhor ajuste com a série saída (vazão), ou seja com maior correlação entre a potência dos eventos. A correlação convencional é medida pelo coeficiente r dado pela razão entre a covariância das variáveis P e V e o produto dos desvios padrões de P e de V.

Tem sido considerado conveniente que o período de observação envolva diversos ciclos, pelo menos três, em virtude da existência de uma estação seca e outra chuvosa. No caso investigado, dispõe-se de pouco mais de um ano, apenas. Entretanto, considera-se um período suficiente em vista da condição climática regional de elevada pluviosidade em todas as estações (clima Cfb de Köppen). De qualquer, forma o intervalo de correlação cruzada máximo considerado foi de 100 dias, inferior a um terço do período.

A tomada e registro de medidas de variação temporal do nível dinâmico (ND) e da vazão (Q) em poços do terreno cárstico de Colombo (Rosa Filho *et al.*, 2002), permitiu avaliar a funcionalidade do correlograma na estimativa do tempo de trânsito da água neste tipo de terreno. Entretanto, as medidas não foram tomadas de forma contínua, intercalando períodos longos sem valor. Esta periodicidade na leitura constitui um problema a mais na análise e na interpretação das séries temporais para comparação com séries regulares de dados pluviométricos, pois neste caso não se trata de amostragem regular, nem aleatória, exigindo procedimentos de regularização. Esta característica dos dados de vazão é impeditiva para o uso de análise espectral, no domínio "frequência". Entretanto, no domínio "tempo", procedimentos diversos da geoestatística como o de regularização fornecem resultados robustos.

Por outro lado, embora de leitura periódica, os dados pluviométricos apresentam excepcional irregularidade na distribuição temporal e na amplitude, exigindo um esforço investigativo para comparar as duas séries, tendo em vista:

- Ω A elevada variabilidade dos dados de pluviometria;
- Ω O tipo de distribuição dos dados, tendendo para log-normal no caso da pluviometria;
- Ω As possíveis tendências sazonais presentes nas séries pluviométricas;
- Ω As tendências presentes nas séries de dados de nível dinâmico ou de vazão;
- Ω A existência de valores anômalos, inesperados, ou gerados operacionalmente durante a produção.

Entretanto, em casos reais, diversas características do terreno e propriedades dos eventos geram perturbações na relação entre entrada e saída de sistemas naturais, de tal forma que a comparação das curvas reais de precipitação (P, mm/dia) e da vazão específica (VE, m³/(h.m)), não revela uma evidente correlação entre si. Isto se torna bem evidente no caso estudado, com aparente ausência de

relação entre precipitação e vazão, em virtude das particularidades das variáveis, das complexidades do terreno cárstico, em especial sobre rochas metamórficas, e da forma de coleta dos dados disponíveis. Diante desta aparente contradição, o problema que se coloca é o da aplicabilidade da correlação cruzada na estimativa do tempo de trânsito da água no epicarste coberto e no endocarste, ou seja, como revelar e validar esta relação, se existente.

Em virtude destas dificuldades, o objetivo deste trabalho é testar e avaliar transformações realizáveis e válidas nas duas variáveis de forma tal que a comparação estatística permita identificar o tempo de retardo como sendo aquele para o qual ocorre maior correlação significativa, considerando este como o tempo de transito da água entre a superfície e a entrada de água no poço, a uma profundidade conhecida.

2. O CARSTE DE COLOMBO-FERVIDA

Os terrenos cársticos do interflúvio Alto Iguaçu-Ribeira (Açungui), Estado do Paraná (Fig. 2), ocorrem ao longo de estreitas faixas SW-NE, pouco a norte de Curitiba, incluindo os municípios de Colombo, Almirante Tamandaré e Bocaiuva do Sul. Estes municípios fazem parte da região metropolitana de Curitiba e estão envolvidos em extensivo processo de ocupação urbana e suburbana. Em Colombo (distrito sede e bairro Fervida) e Almirante Tamandaré, os terrenos cársticos são bastante peculiares, pois estão localizados em áreas de interflúvio entre uma bacia endorreica (Iguaçu), de longa história evolutiva e preservada em paisagens reliquiárias, e uma bacia exorreica (Ribeira, Fig. 2B), em estágio de entalhamento extremamente ativo, capturando e destruindo paleosuperfícies desenvolvidas na bacia do Iguaçu. Um intenso aproveitamento dos recursos hídricos desta região vem sendo feito por órgãos públicos, empresas privadas e particulares, com registro de diversos eventos de instabilização do relevo e de redução da disponibilidade da água superficial. Detalhes sobre as características dos sistemas aquíferos cársticos na região podem ser obtidos em ROSA FILHO; GUARDA (2008).

Os diversos terrenos são caracterizados por cinco aspectos distintivos (Fig. 2):

- (1) A região situa-se na junção dos atuais arqueamentos (Ponta Grossa e da Serra do Mar). Desde o Mioceno (cerca de 10 Ma) está sujeita a uma das mais altas taxas de soerguimento no Brasil, só comparável à de áreas de montanhas

orogenéticas (SOARES; LANDIM 1975; FRANCO-MAGALHAES et al, 2010);

- (2) Efeito de mudanças climáticas. O sistema se desenvolveu sob clima variando entre tropical e temperado, semiárido e úmido, cuja história é ainda pouco caracterizada (SOARES et al, 2002; SOARES et al, 2011). O clima passou de quente e úmido (Mioceno, >6 Ma), para quente e semiárido (Plioceno, ~2 Ma); quente e seco (savana, Pleistoceno, ~1 Ma); frio e seco durante a última glaciação (20.000 a 10.000 anos) e subtropical úmido (nos últimos 6.000 anos) com floresta, e sem estação seca.
- (3) As rochas que sustentam os diversos sistemas são calcários dolomíticos e dolomitos (raramente calcíticos), falhados e dobrados, com direção ENE a NNE, intercalados com rochas siliciclásticas, com metamorfismo de baixo grau (Fig. 2) significando que não têm permo-porosidade primária e apresentam uma solubilidade baixa, ocorrendo infiltração apenas através de descontinuidades estruturais não seladas (FIORI, 1992; LISBOA; BONACIM, 1995);
- (4) A bacia hidrográfica apresenta uma taxa de denudação por erosão remontante excepcionalmente elevada, com elevado gradiente hidráulico, na bacia do Ribeira, com desníveis regionais de quase mil metros e locais de centenas de metros;
- (5) Ocorrem faixas de mais intensa presença de diques de diabásio com espessura variada, em média 15 m, mas chegando até 200 m, com orientação N70W a N45W, quase ortogonais à direção das faixas de calcários, que constituem barreiras ao fluxo no carste (ROSA FILHO et al, 2002);

Estas condições constituem particularidades que dão o caráter único ao carste do interflúvio Iguaçu-Ribeira. Também implicam no papel preponderante das descontinuidades estruturais na infiltração e dissolução dos carbonatos, na coexistência de formas cársticas encobertas ou preenchidas, formas exumadas ou denudadas, e formas em construção, em evidente desequilíbrio processo-resposta.

Em faixas ainda preservadas da erosão remontante atual, como é o caso do interflúvio na região de Colombo, estão presentes remanescentes de relevos mais antigos, ou paleosuperfícies, com suas formações superficiais e de subsuperfície

(NASCIMENTO et al, 2012). O relevo cárstico preexistente foi apenas parcialmente dissecado, permanecendo encoberto sob formações superficiais e parcialmente preenchidos por sedimentos. Esta cobertura apresenta depósitos de cascalho, areia e argila, paleossolos e alteritos residuais, com espessuras de até 40 m, na maioria dos casos preenchendo as cavidades prévias do relevo epicárstico. Nestas condições, e sob um clima úmido e temperado, vem evoluindo o processo de carstificação superposto a um carste polifásico parcialmente soterrado. Na bacia do Açungui-Ribeira, ocorrem diferentes faixas de transição entre um relevo cárstico polifásico (caso de Colombo) e um relevo cárstico inteiramente dissecado (caso de Bocaiuva).

Pelo menos quatro sítios com características diferentes podem ser identificados na região, com características similares de carste polifásico (LISBOA, BONACIM, 1995; ANDREOLLI et al, 1999): Colombo (sede), Fervida (bairro), Boichininga e Tranqueira. Os sítios de Colombo e Fervida situam-se nas maiores altitudes das cabeceiras do rio da Onça, afluente do Ribeira, no divisor de águas com o Alto Iguaçu. Os outros dois situam-se nas cabeceiras do Barigui, afluente do Iguaçu.

Colombo e Fervida são considerados juntos neste trabalho. Na cidade de Colombo, na área do interflúvio, o relevo cárstico encontra-se entre 950-1050 m de altitude; a jusante, no bairro Fervida, as altitudes são menores, entre 900 e 950 m. As formas de relevo de superfície e as formações de subsuperfície são bastante diversas nas paisagens dissecadas e preservadas, com a principal diferença decorrente do desequilíbrio das formas cársticas antigas com os processos atuais. A área de Colombo-Fervida constitui um caso de carste encoberto por formações superficiais de elevada permo-porosidade, que protegem o sistema cárstico e, eventualmente, são submetidas a eventos catastróficos de colapso.

Na paisagem preservada, boa parte das formas superficiais de relevo de carste úmido prévio está recoberta e preenchida por formações superficiais de clima mais seco e mais frio; nas paisagens dissecadas ocorre exposição das formas antigas pela remoção acelerada das formações superficiais não consolidadas, rebaixamento do nível de base, expondo cavernas e condutos, gerando abundantes fontes superficiais e aumentando a velocidade de fluxo subterrâneo.

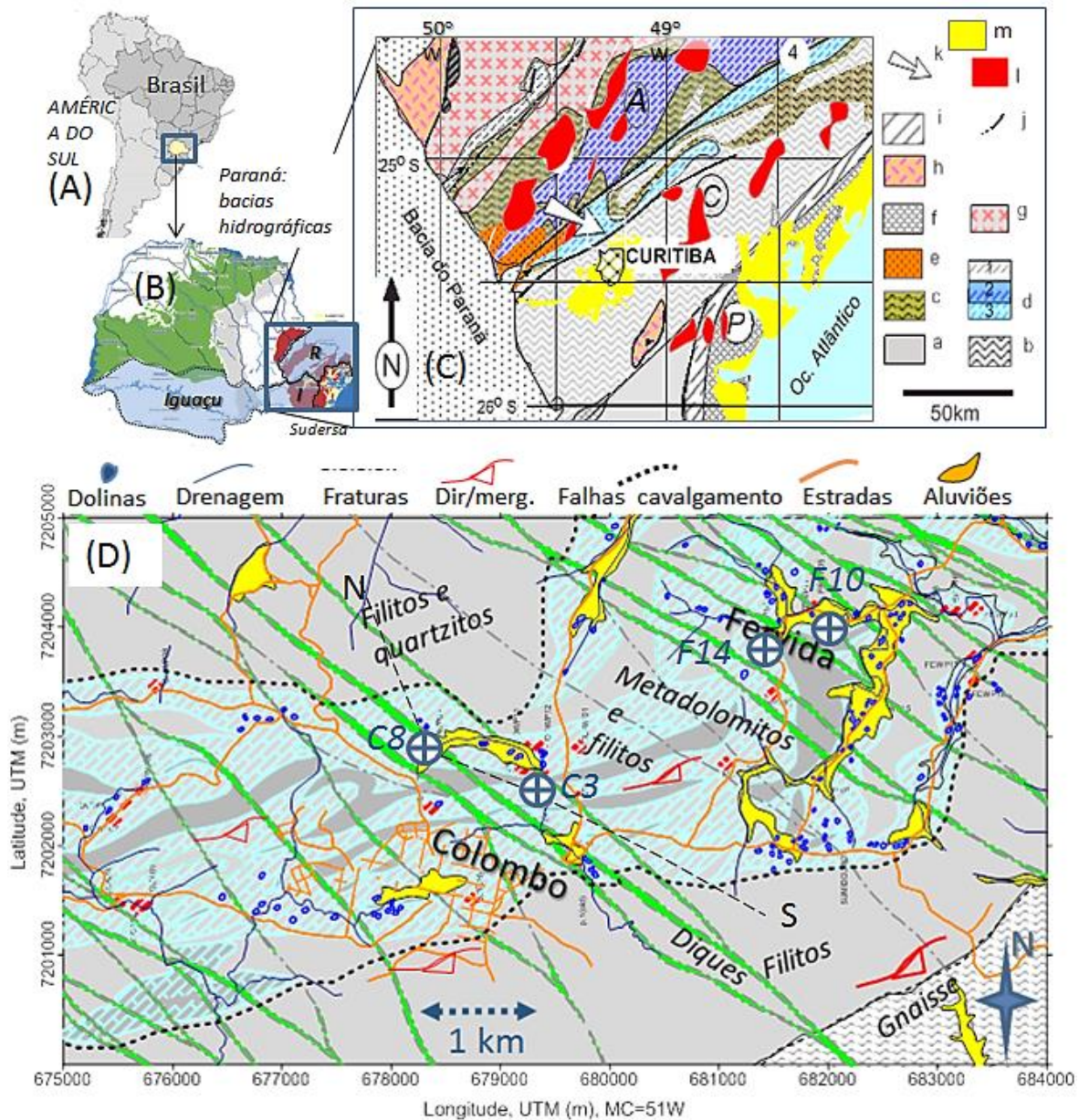


Figura 2 – Localização e contexto geológico regional e local do terreno cárstico de Colombo-Fervida. (A) Localização geográfica. (B) Localização do divisor de águas entre bacias dos rios Iguazu (I) e ribeira (R). (C) Contexto geológico regional dos terrenos cársticos no leste do Paraná: P – Bloco costeiro; C – Bloco Curitiba; A – Faixa Apiaí; I – Faixa Itaiacoca. Litologias: a – granitos, gnaisses e granulitos; b – gnaisses, granulitos e migmatitos; c – Xistos, quartzitos e mármore; d – terrenos cársticos em metadolomitos e filitos: 1 – Itaiacoca; 2 – Votuverava; 3 – Capiru; e metassedimentos terrígenos (Camarinha); f – granitos e gnaisses do complexo Paranaçu; g – Complexos batolíticos de granitos; h – Vulcânicas continentais (Castro, Guaratubinha); i – milonito-gnaisses; j – falhas; k – localização da área de investigação; l – granitos; m – rochas sedimentares cenozoicas (Guabirotuba) e aluviões recentes. (C) - Geologia local: metadolomitos e filitos em faixas descontínuas falhadas e dobradas, interrompidas por diques de diabásio. N-S: localização da seção da Fig. 3 e dos poços estudados (CO03; CO08, FE10 e FE14) (compilado de várias fontes: UFPR, SANEPAR, MINEROPAR; FIORI, 2005).

Pelo menos três faixas com ocorrência extensiva de rochas carbonáticas ocorrem na região. Foram submetidas a processos deformacionais policíclicos intensos com metamorfismo de grau fraco, além de intrusões de batólitos e plutões de granitos (Fig. 2B). O carste do sítio de Colombo foi desenvolvido dentro de uma faixa de metadolomitos com intercalações de filitos com 20 km de extensão por 2 km de largura, margeada por falhas de

cavalcamento (Fig. 2D), filitos e quartzitos, e interceptada obliquamente por diques de diabásio (FIORI, 1992; SOARES et al, 2005). O conjunto está dobrado em sinclinais e anticlinais fechados, inclinados, falhados e mergulhantes com ângulos em torno de 50° para SE. É esperado que os canais principais tenham se desenvolvido nas linhas de charneira e falhas longitudinais e que estejam interrompidos nos diques de diabásio (LISBOA;

BONACIM, 1995). Nestas barreiras, o escoamento é retardado o suficiente para manter o epicarste inteiramente saturado, com o nível freático a apenas alguns metros da superfície e inúmeras fontes de pequena vazão. Nestas condições, diversos *poljes* na forma de lagoas ou brejos e dolinas pouco desenvolvidas são mantidos, enquanto sumidouros, ou *sinkholes*, são quase ausentes. Entretanto, o rebaixamento do nível da água pelo bombeamento em poços provoca uma reabertura e ativação do epicarste, com aceleração do fluxo e desestabilização do sistema, reativando os eventos catastróficos.

As formações superficiais recobrem paleosuperfícies, rampas e terraços pré-atuais, constituindo um importante fator na recarga dos aquíferos, pois estabelecem um manto de maior permo-porosidade e um padrão de fluxo mais lento, tanto do fluxo superficial como subterrâneo (escoamento laminar nas rampas, infiltração nos terraços); o escoamento subterrâneo se faz neste manto inconsolidado que preenche o epicarste e apresenta propriedades de um aquífero, permitindo a filtragem das águas de superfície antes de entrarem na zona de circulação principal. Entretanto, a abertura de fendas ou estruturas de colapso desta cobertura sobre cavidades subsuperficiais altera inteiramente este regime de infiltração, provocando uma aceleração desenfreada do fluxo e a conseqüente entrada de águas superficiais não depuradas no aquífero. São referidos casos de entrada quase imediata de água da superfície durante testes de bombeamento (SANEPAR, 1998; HARUM et al, 2000).

3. DADOS, MEIOS E MÉTODOS

3.1. Dados

A área de estudo (cerca de 50 km²) possui mais de 70 poços para aproveitamento hídrico (SANEPAR, 1998; HARUM et al, 2000), muitos inativos por problemas operacionais ou ambientais. Quatro poços foram selecionados para investigação: CO-03, CO-08, FE-10 e FE-14 (Tabela 1 e Fig. 2). Os dois primeiros na cidade de Colombo, a uma altitude de 1050 m, e o terceiro e quarto na localidade de Fervida, cerca de três quilômetros a leste, a 940 m. Nestes poços, foi realizado pelas equipes da SANEPAR e SUDERHSA (convênio UFPR/Joaneum Institute, ROSA FILHO et al, 2002; HARUM et al, 2000) o monitoramento da vazão e do nível dinâmico por meio de leituras locais com frequência bastante regular (entre 3 e 9 dias), durante um período superior a um ano e meio, permitindo incluir na análise observações das quatro estações climáticas (dezembro de 1998 a maio de 2000).

Medidas do nível dinâmico (ND) em metros e da vazão (Q) em metros cúbicos/hora foram tomadas em intervalos diferentes para cada poço e para cada medida, variando entre duas realizações em um dia até uma em 15 dias, porém, predominando o intervalo de 3 dias (Fig. 3). As medidas foram convertidas em vazão específica (VE, m³/(h.m)). Dados de precipitação foram fornecidos pelo SIMEPAR, para a estação pluviométrica de Colombo (PR), constituídos por planilhas mensais com anotação diária do total da precipitação em milímetros por dia. Ambas as séries foram convertidas em dias corridos a partir de 01/12/1998 até 15/05/2000 (Fig. 3).

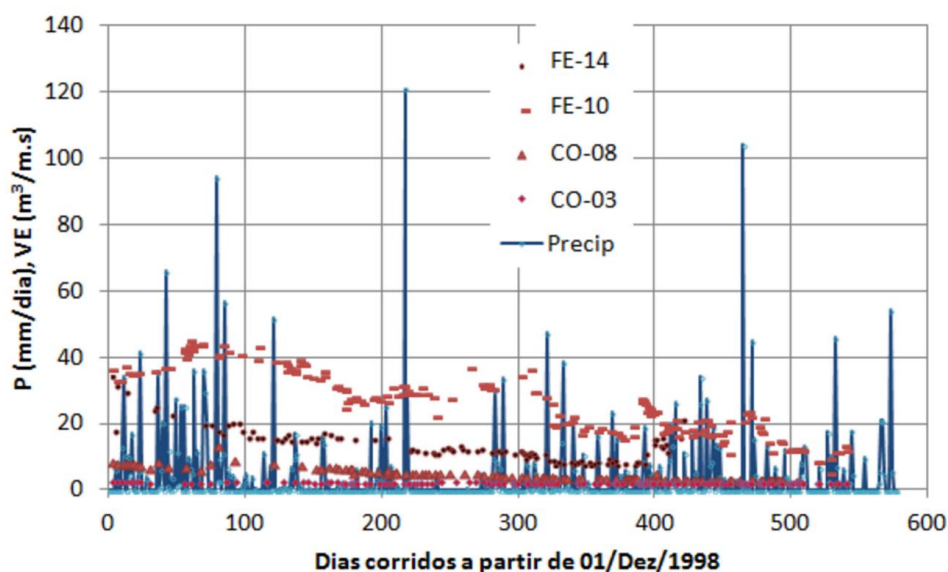


Figura 3 – Representação das séries temporais de precipitação (P) e vazão específica (VE) para os quatro poços selecionados, mostrando a variabilidade, a aparente ausência de correlação e a tendência para decaimento da vazão específica.

3.2. Poços investigados

Para facilitar a avaliação e interpretação hidrogeológica e geológica dos resultados, uma breve descrição geológica dos poços investigados é apresentada abaixo, destacando aqueles elementos com os quais se espera uma relação com o comportamento da vazão:

Poço CO-03 - Está situado a 988 m de altitude, em um paleovale preenchido, na borda do epicarste encoberto (30 m de formações superficiais). Em subsuperfície, corta metadolomitos, próximo à terminação de um sinforme, limitado por filitos e junto a um dique de diabásio a leste. Foi perfurado até 66 m em metadolomitos, com entrada de água em zona de fratura na base. A vazão durante o período de monitoramento foi mantida em 90 m³/h, variando o ND em torno de 42 m.

Poço CO-08 - Está situado em área de epicarste encoberto por formações superficiais (27 m de espessura), em um pequeno sinforme inclinado para sudeste, alcançando 68 m de profundidade. Entradas de água ocorrem por cavidades em torno de 50 m (2 m de altura); 52 m (6 m de altura) e 63 m (2 m de altura). Danos superficiais como o esgotamento de fontes e recalque foram relacionados ao bombeamento deste poço. Durante o período de monitoramento, a vazão foi mantida entre 43 e 112 m³/h, rebaixando continuamente o ND, e a VE mostrou tendência de redução progressiva (Fig. 5A). Dada a irregularidade nas médias até o centésimo dia, estes dados iniciais não foram usados, trabalhando-se com a janela de 100 a 500 dias de observações.

Poço FE-10 - Está localizado a 949 m de altitude, com 30 m de profundidade, em zona de epicarste encoberto (cerca de 9 m de sedimentos), numa zona de baixo terraço esculpido sobre rampa de colúvio. As entradas de água ocorrem em zonas de fratura nos metadolomitos, a 22 e 26 m de profundidade. A vazão foi mantida entre 29 e 150 m³/h, com média de 95, e o ND entre 2 e 6 m, com

média 4, sendo progressivamente rebaixado. A VE resultante mostra tendência decrescente nos 539 dias de monitoramento, considerados em 180 eventos de observação (Fig. 3). Diversos impactos superficiais, como esgotamento de fontes, recalque e reversão de fluxo foram relacionados ao bombeamento

Poço FE-14 - Situa-se na planície de epicarste encoberto, a 946 m de altitude (profundidade de 153 m, com 35 m de formações superficiais), a norte do sinforme de Fervida (inclinado para sudeste), limitado por filitos e junto a um dique de diabásio (a oeste). As entradas de água ocorrem em uma cavidade a 34 m, e, possivelmente, em zona de fratura a 123 m. Impactos superficiais, como esgotamento de fontes e recalque foram relacionados ao bombeamento. A vazão durante o período de monitoramento variou entre 0 e 134, com média de 62 m³/h, com ND em torno de 4,5 m e declínio contínuo

Estas principais características são resumidas e comparadas na Tabela 1.

Como as cinco séries não são homólogas, foram necessárias diversas formas de transformação, tomando-se o cuidado de preservar a representatividade dos dados originais e evitar a geração de artefatos de processamento.

Os valores de precipitação diária (P, mm/dia) são muito inconstantes (Fig. 4), tendo ultrapassado 100 mm em um dia, sucedido por valores nulos nos dias seguintes. Ajustam-se a uma distribuição log-normal, o que torna a série de tipo diferente daquela dos valores de vazão específica (VE) ou nível dinâmico (ND), com distribuição normal. Este fato torna a correlação direta entre as duas séries de difícil interpretação, mesmo buscando o pareamento de valores para intervalos regulares de dias anteriores, em virtude do fato da distribuição log-normal ter uma média dependente da variância. Para superar este problema buscou-se transformar a variável P. Por outro lado, como muitos dias não apresentam precipitação, a adoção do logaritmo implicaria em perda de informação.

Tabela 1 – Algumas características dos poços investigados (dados SANEPAR, 1998).

POÇO	Altitude (m)	Prof. (m)	Espessura Cobertura (m)	Entrada água (m)	Esp. (m) Conduto	Vazão (m ³ /h)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Num. Dados
CO-08	1018	68	24	47	3	43-111	1,5	8 a 15	119
CO-03	988	66	30	59	<1	~90	-	42	147
FE-10	949	30	9	22 e 26		97	2,66	2,5 a 4	152
FE-14	939	88	31	48 e 135	<1	0-134	2,55	4,5	161

3.3. Transformação dos dados

Os procedimentos metodológicos utilizados para transformação e adequação das variáveis foram os seguintes:

1. Filtragem por meio de médias móveis;
2. Abandono de valores extremos;
3. Corte de seções das séries;
4. Transformação logarítmica e log-normalização com terceiro parâmetro m ;
5. Normalização: transformação para média zero e valores em unidades de desvio padrão (reduzida Z);
6. Adoção de valores incrementais para tolerância no passo;
7. Uso de tolerância temporária para valores acumulados de precipitação.

As medidas se referem sempre a unidades de tempo, como mm/d para a precipitação pluviométrica, ou m^3/h para vazão e $m^3/(h.m)$ para vazão específica. Desta forma, a utilização de valores acumulados ou médios não provoca interferência nos resultados e, ao mesmo tempo, tende a normalizar a distribuição e eliminar os valores nulos.

Dada a elevada variabilidade da precipitação, com média em torno de 4 mm/dia, porém, com valores acima de 50 e outro acima de 100 mm/d, a primeira transformação foi a adoção de uma média móvel da precipitação (P , variável independente). Observou-se que a distribuição tende para a normal para médias envolvendo três dias ou mais (Fig. 3). Na correlação, foram usados apenas os valores da meia-janela anterior aos dias de medição de ND, para a variável VE. Esta meia-janela variou entre 1 e 6 dias. Este procedimento corresponde a considerar o volume de precipitação diária média no período anterior ao evento testado como correlato na série VE.

Uma segunda transformação foi a adoção do logaritmo natural dos valores médios de P , trabalhando-se, então, com uma distribuição dos logaritmos, aproximadamente normal. A terceira transformação testada foi a adição de um valor calculado (terceiro parâmetro) à série, de forma que a ajustasse a uma distribuição log-normal. Os resultados não foram apropriados e o procedimento foi rejeitado. Para reduzir os valores às médias e variâncias comparáveis, as duas séries foram transformadas em variáveis reduzidas, ou seja, uma variação em torno de média zero e em unidades de desvio-padrão. As diversas séries de medidas de

nível dinâmico ou de vazão específica mostram tendências a diminuir gradativamente com o tempo, razões pelas quais foram testadas as comparações com as séries de valores residuais, retirando as tendências tanto de variação linear (grau 1) como parabólica (grau 2).

Para os quatro poços examinados foram testados os diferentes procedimentos, tendo dois cuidados metodológicos básicos: (1) apenas ressaltar os efeitos, sem gerar artefatos; e (2) que os procedimentos mais simples prevalecessem, no caso do mais complexo não resultar em melhorias significativas e esclarecedoras nos resultados. O efeito mais comum nos resultados analíticos foi a elevada instabilidade dos valores obtidos quando as séries comparadas não recebiam nenhuma preparação prévia. Ao mesmo tempo, as séries mostravam valores baixos de correlação, com pouca confiabilidade. Os procedimentos foram explorados exaustivamente, buscando melhorar os resultados de correlação e ressaltar os intervalos de baixa covariância.

3.4. Comparação e correlação entre séries

A concepção básica que envolve a análise das relações entre entrada e saída em sistemas é a de que há um retardo no pico de correlação entre as duas séries. Este retardo, no caso de sistemas aquíferos, entre precipitação e vazão específica (VE ou ND, em alguns casos com Q constante) corresponde ao tempo de trânsito mais frequente entre a precipitação e o acesso das águas ao poço no aquífero. Desta forma, pode-se calcular o grau de associação via coeficiente de correlação (r , de Pearson) entre as duas séries temporais, para uma defasagem zero, ou seja, sem retardo entre as séries. Num passo seguinte, adota-se uma defasagem (*lag*) entre as séries (uma diferença de tempo), calculando-se novamente a correlação entre esta nova posição, considerando os novos pares; depois para uma defasagem maior e, assim, sucessivamente. Compara-se, então, para qual defasagem ou deslocamento ocorre melhor correlação, plotando-se o coeficiente de correlação contra o tempo de defasagem, ou passo, e compondo a função correlograma. Alternativamente, foi usada a função semivariograma, onde o coeficiente de associação estimado é a média dos desvios quadráticos entre os pares, para cada passo.

Esta defasagem, dada pelo passo no qual ocorre melhor correlação, corresponde ao retardo para o qual um período de maior ou menor precipitação implica num valor maior ou menor, respectivamente, de vazão específica. Tendo em

vista que nas duas séries não houve observação contínua, nem em datas coincidentes, adotou-se uma tolerância para a defasagem, como é comumente utilizado para construção de variogramas e correlogramas em geoestatística. As experiências de correlação foram feitas tanto usando ferramentas convencionais (LANDIM, 2011), como a covariância, o variograma e o coeficiente de correlação de Pearson. Naturalmente, o correlograma tende a repetir valores, embora um pouco menores, para períodos múltiplos de eventos anteriores, o que exige atenção na sua avaliação.

Diversas rodadas foram executadas alterando parâmetros, especialmente eliminação de diferentes valores espúrios de intervalos iniciais ou finais muito diferentes, retirada de tendência, média móvel com várias dimensões de janela, tamanho do passo, tolerância. Na avaliação dos resultados destas rodadas foram considerados alguns critérios, como: (a) variabilidade x consistência dos picos de correlação; (b) repetição de valores elevados no mesmo pico de correlação; (c) ausência de efeito deriva (tendência para aumentar ou diminuir sistematicamente os valores no correlograma); e (d) persistência dos picos em diferentes procedimentos.

3.5. Confiabilidade dos resultados

Os resultados de coeficientes de correlação obtidos para cada ponto são bastante variados e podem ser considerados suspeitos de serem apenas amostrais (circunstanciais), obtidos dentro de um conjunto possível de valores, cuja média seria zero, ou seja, não teriam um significado consistente de correlação entre os eventos, na medida em que se tem elevada variabilidade dos sucessivos valores. Valores de correlação podem ser fortemente influenciados por oscilações artificiais coincidentes, mas como isto não ocorreria sistematicamente com um mesmo intervalo de recorrência pouco influiria no valor final, no caso de serem muitos os pares comparados.

Para avaliar a validade dos resultados, ou contrariamente a possibilidade dos picos serem resultados circunstanciais, foram realizados testes de significância, utilizando a estatística *t* de Student. A hipótese H_1 é a de que os resultados são significativos, para o conjunto de pares no intervalo considerado. A hipótese alternativa testada, H_0 , é a de que o valor obtido é um dos possíveis valores de uma população cuja média é zero e, portanto, não tem significado de correlação, tanto positiva como negativa. Tendo-se os valores de *t* calculados maiores que *t* previstos, a um nível de confiança de 0,95, rejeitou-se a hipótese H_0 e se aceitou a hipótese

H_1 , de que os valores de correlação obtidos são significativos.

O aumento do tamanho da amostra, ou seja, número de pares em cada passo na comparação entre as séries, como estratégia para reduzir a possibilidade de ser cometido um erro de avaliação, foi feito com a adoção de maior tolerância no passo, embora neste caso deva se admitir que se introduz a possibilidade de juntar no mesmo passo eventos conexos e eventos excludentes.

Aplicativos - Para facilitar a repetição na análise dos dados, foi desenvolvido um aplicativo simples, com o compilador TurboBasic^{MR} (Borland 1987), de forma a se ajustar o tipo de dados e calcular tanto a função correlação cruzada como a função variograma entre duas séries X e Y não coincidentes de dados temporais, adotando-se relações convencionais para as funções:

$$\text{Correlação } XY = r = \text{covariância } XY / \text{raiz}[\text{variância } X_{(t)} \times \text{variância } Y_{(t+\Delta t)}]$$

$$\text{Variograma} = \gamma = (1/2N) \times \text{Somatório } [X_{(t)} - Y_{(t+\Delta t)}]^2$$

$$\text{Covariância} = \text{variância} - \text{variograma}$$

A relação entre covariância e variograma se refere a séries normalizadas, com média zero e desvio padrão unitário.

O valor de Δt foi tomado desde zero até um terço da série e corresponde à defasagem ou passo (*lag*), para o qual são plotados os valores do coeficiente de correlação cruzada e do covariograma, os quais são referidos no texto apenas como correlação (*r*) e variograma (γ). Os valores $r=f(\Delta t)$ e $\gamma=f(\Delta t)$ são computados, considerando uma tolerância ou intervalo de aceitação em torno de Δt .

O programa trabalha a partir da leitura dos dados de duas séries temporais, com os dados observados, em um único ou em dois arquivos distintos. Tem a opção de normalizar (Z) e log-normalizar as variáveis dependentes, estimar as médias móveis, retirar tendências e trabalhar com resíduos, excluir intervalos espúrios, filtrar valores, com janela móvel descentrada e tolerância variável no passo. Calcula as funções variograma bruto e normalizado e a correlação, com o número de pares em cada passo e a distância média no passo. Salva nos formatos .txt ou .bln. Os diversos tipos de procedimentos foram testados. A adoção do resíduo de tendência e da média móvel foi uma forma de reduzir o efeito da excessiva flutuação dos valores de uma variável (como a precipitação) e aproximar sua distribuição a uma curva normal. A coluna de tempo é independente nos dois arquivos, porém, a contagem corrida para os dias de eventos medidos é a partir da mesma data, tomada com 01/12/1998.

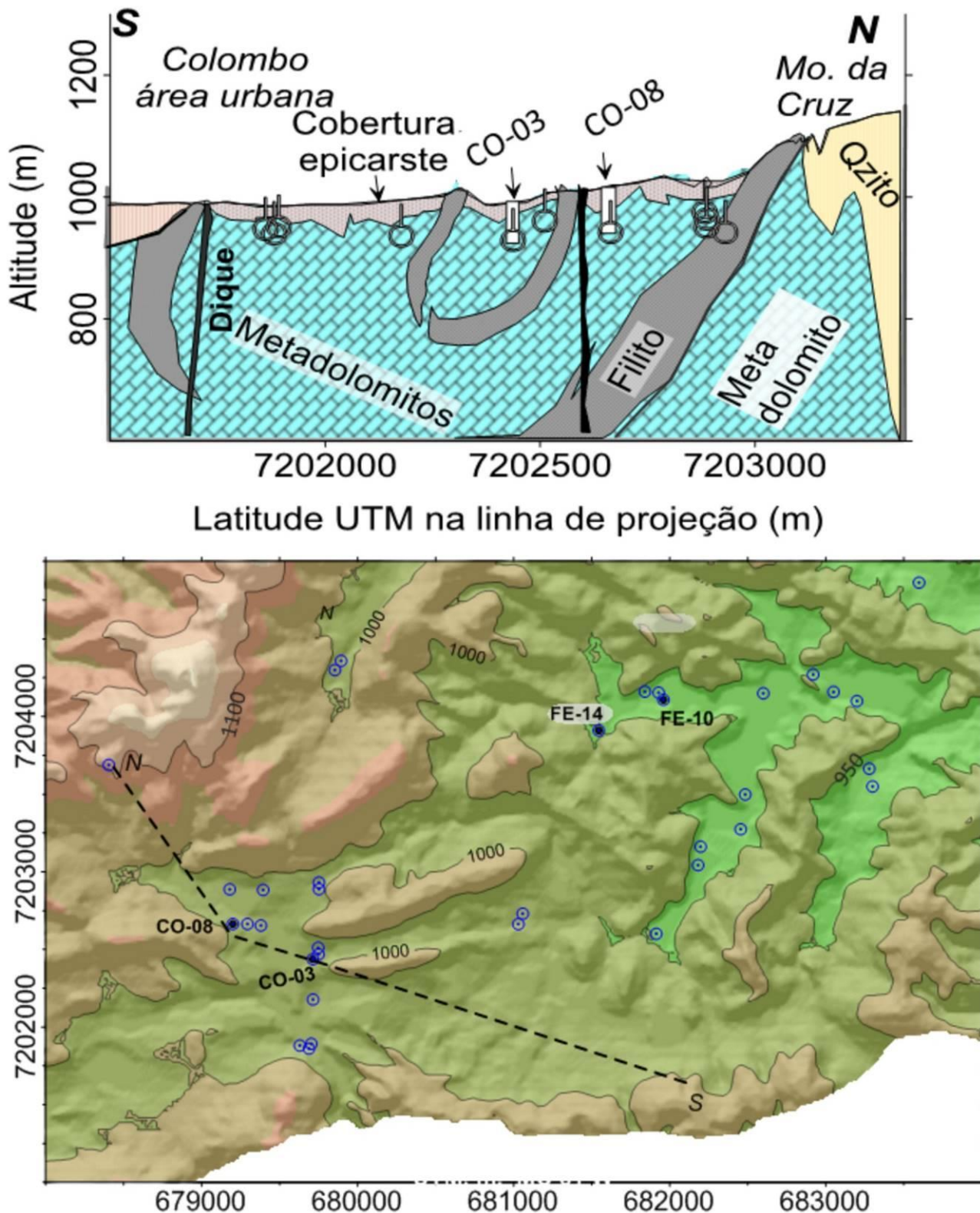


Figura 4 - (A) Seção geológica norte-sul (localização NS no mapa abaixo) cortando o carste de Colombo, com localização dos poços CO03 e 08, entre outros. Nota-se a organização estrutural, a presença de diques (traço preto espesso) e a forma geral do pediplano, a partir do Morro da Cruz, na paleosuperfície em que se desenvolveram o carste e a cobertura de epicarste em pedimentos menores. (B) Compartimentação do relevo dada pelas cristas em filito (NE-SW) e em diques de diabásio (NW-SE). Estão locados os diversos poços da área (em azul vazado), com designação e destaque para os investigados (CO-03, CO-08, FE-10 e FE-14).

4. RESULTADOS OBTIDOS, ANÁLISE E AVALIAÇÃO

Poço CO-03

A vazão específica (VE) mostra progressiva depressão no período (Fig. 5A). Das diversas variações de parâmetros para estimação da correlação cruzada mais robusta, algumas são mostradas nos quatro quadros da Fig. 5. O correlograma com dados originais mostra grande variabilidade, com alguns conjuntos de picos de correlação positiva (21, 78, 90 dias de retardo) e o efeito deriva dado pelo progressivo aumento da correlação. Adotando-se alguns procedimentos como a eliminação de valores extremos de P e da tendência de VE, e aceitando uma tolerância na composição dos pares, o correlograma torna-se mais robusto (Fig. 5C); a covariância, estimada pelo covariograma com diferença entre variância (unitária) das variáveis normalizadas, equivalente à correlação (1-Gz), mostra uma correção do efeito “deriva” melhorando o resultado em relação ao cálculo convencional da correlação (Cor). Adotando ainda a média móvel de dois dias em P, sem correção do efeito “deriva” (Fig. 5D), ressalta-se a maior correlação em 78 dias. Corrigindo esse efeito, com média móvel de 3 dias anteriores de P e tolerância também de 3 dias (Fig. 5E), os picos aparecem mais consistentes (22, 56, 80 dias).

Os dados brutos mostram alta instabilidade, com destaque para picos de correlação em 23 e 80 dias de retardo, com valores inferiores a 0,15. Retirando a tendência da VE, não ocorre melhora na estimativa do correlograma. Usando a função variograma das variáveis normalizadas para estimar a correlação, corrige-se o efeito deriva, alterando a hierarquia de picos. Aplicando média móvel de 2 dias na P (MM=2) e com tolerância de 1 e 2 dias no retardo, os resultados ficam notavelmente mais estáveis e significativos, com picos aos 45, 56 e 79 dias de retardo (Fig. 5B e 5H). Retirando as tendências, mantêm-se os picos, com um melhor coeficiente de correlação após 45 dias de retardo (Fig. 5D e 5F), constatou-se que: (1) a série de dados de ND, base de determinação da VE, é muito interrompida por falta de leitura; e (2) a série de dados de P é naturalmente muito flutuante, com valores excepcionais (> 100 mm/dia) e muitos valores zero. A média móvel com janela de 6 dias, embora lidos apenas os 3 dias anteriores, suavizou os resultados. Os valores de correlação nos picos são baixos (entre 0,1 e 0,2), embora significativos, pois o número de pares é superior a 300, para tolerância 2 ou maior.

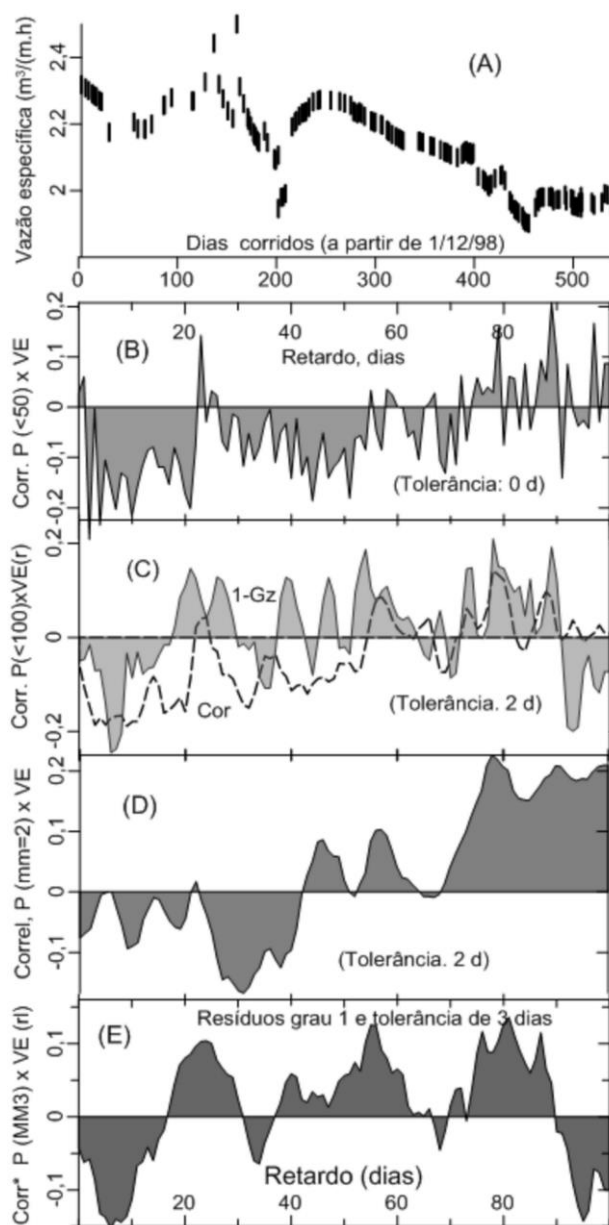


Figura 5 - Poço CO-03, resultados do processamento: (A) dados originais de VE [(m³/h)/m] aos quais foi ajustada a função linear para retirada da tendência, ou efeito deriva;

(B) correlograma com valores originais de VE e tolerância zero; (C) correlograma entre P (excluídos os valores maiores que 100 mm) e valores residuais de VE (m³/(h/m)), com tolerância de dois dias: 1-Gz se refere à correlação obtida com o complemento do variograma normalizado e Cor ao coeficiente de correlação; (D) correlograma usando a média móvel de P para dois dias e a VE, com tolerância de dois dias; (E) correlograma calculado pela função variograma normalizado, com média móvel de três dias prévios de P e resíduos de grau 1 dos valores de VE, com tolerância de 3 dias. Observar um pico frágil de correlação entre 20 e 25 dias, mais significativo quando se retira a tendência (C e E), ficando mais confiáveis e robustos a 23, 55 e máximo em 80 dias.

Nos primeiros dias após as chuvas, o ND (para vazão constante) do poço CO-03 não muda seu comportamento descendente: a correlação é negativa, pelo menos até 10 dias de retardo, quando ocorre reversão. O primeiro pulso de recarga significativa no aquífero, a partir das águas de chuvas, ocorre com pico em 22 dias de retardo, depois em 56 dias e, mais significativo, a partir de 75 dias. Pode-se considerar que não ocorre infiltração direta no epicarste e que existem pelo menos três caminhos diferentes percorridos pelas águas da superfície até o poço, provavelmente por fraturas.

Poço CO-08

Os quatro correlogramas apresentados (Fig. 6) mostram os resultados da adoção de diferentes parâmetros em busca de maior robustez no correlograma. O correlograma dos valores de P, menores que 100 mm/d, com os resíduos de primeira ordem de VE (Fig. 6B), mostra elevada variabilidade e picos frágeis de correlação em 1 a 10 dias, 20 a 30 e 70-80 dias. Adotando-se média móvel em P (chuvas de 2 dias passados) e tolerância de 1 dia, aparece o efeito deriva (Fig. 6C), mantém-se o pico inicial e a correlação significativa em torno de 30 e 80 dias de retardo. Utilizando os valores residuais de VE com função linear, corrige-se o efeito deriva. A correlação torna-se estável desde os primeiros dias e crescente até o 35º dia de retardo. Com média móvel de P de dois ou três dias, o pico inicial desaparece. Com resíduos da função quadrática de VE, os valores continuam consistentes com elevada correlação, crescente desde o passo inicial, com máximo em 32 dias. Com tolerância zero, ao invés de 3, a correlação melhora. O desvio da média zero parece realmente indicar um dependência positiva contínua das chuvas, com máximo após 35 dias. Os intervalos persistentes de correlação situam-se no retardo inicial de 1 e 10 dias, entre 20 e 30 e entre 60 e 80 dias.

O poço CO-08 recebe afluxos de água no segundo dia após a precipitação, depois em 10 dias, seguindo-se os retardos entre 20-32 e 75-80 dias. Os dois primeiros afluxos têm curto intervalo de duração, desaparecendo quando se adota tolerância de 3 dias, e devem corresponder ao acesso da água às duas primeiras cavidades cortadas pelo poço. As recorrências de correlação positiva a 30 e a 70 dias, com duração prolongada por mais de 10 e 20 dias, respectivamente, indicam o aporte de água por fluxo relativamente lento.

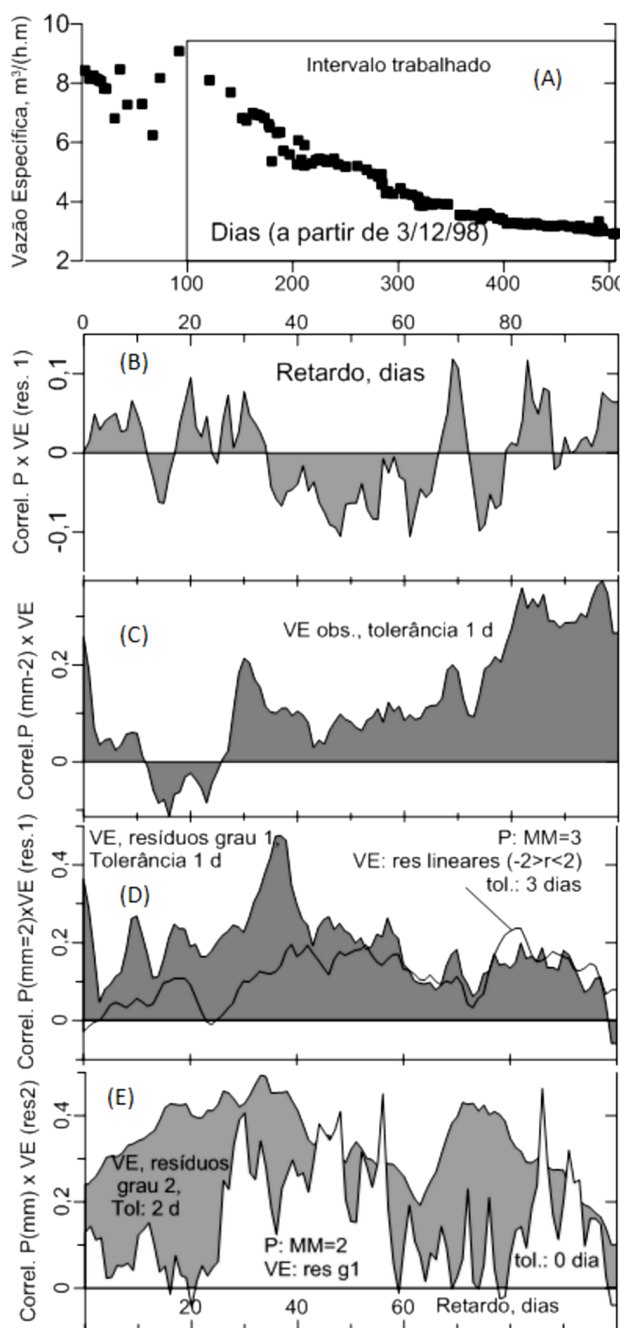


Figura 6 – Poço CO-08, resultados de diferentes procedimentos, com melhoria da correlação: (A) dados originais de VE [(m³/h)/m]; e intervalo trabalhado (B) correlograma cruzado entre P (mm/dia) e valores residuais de grau 1 de VE (sem tolerância); (C) correlograma, usando média móvel de dois dias de P com valores de VE, com tolerância de 1 dia, mostrando o forte efeito deriva; (D) correlograma com valores médios de precipitação para dois e três dias anteriores, e tolerância de 1 e três dias, notando-se o efeito da retirada da tendência de VE; (E) correlograma com valores médios de precipitação para dois e três dias anteriores, e tolerância de 1 e 0 dia, notando-se o efeito da retirada da tendência de ordem 1 e 2 de VE e da tolerância de 0 para 3 dias. Observar a melhoria nos valores de correlação, porem com perda de discriminação dos picos de correlação na aplicação da tendência quadrática em VE (res 2), com tolerância de dois dias.

Poço FE-10

Da série de vazão deste poço foram retirados os dados iniciais e finais (Fig. 7A) por apresentarem problemas operacionais de aquisição. O correlograma com os valores brutos (P x VE), sem tolerância, apresenta elevada variabilidade (Fig. 7B) e média positiva.

Adotando-se para os valores de P a média móvel dos 3 dias anteriores e tolerância de 1 dia, os resultados melhoram, porém ainda com muita variabilidade: evidencia-se uma correlação significativa de curto prazo, fraca, crescente, nos primeiros 4 dias de retardo; outros picos ocorrem em torno de 40 e com retardos maiores que 70 dias, porem bastante instáveis. A retirada da tendência (Fig. 7D) não melhora os resultados, permanecendo a instabilidade. Adotando os valores residuais da tendência linear na vazão (VE) e a média móvel com 2 dias anteriores na precipitação (P), com tolerância de 2 dias, o correlograma (Fig. 6E) fica robusto, com picos estáveis de correlação superior a 0,2: crescente até 15 dias, depois em torno de 40 dias e de 70 a 80 dias.

A correlação de curto prazo deve ser associada à percolação vertical no epicarste, no entorno do poço, enquanto as de médio e longo prazo (42 e 80 dias) podem ser associadas ao afluxo lateral em duas diferentes zonas de fratura.

Poço FE-14

Os intervalos inicial e final da série VE apresentam dados espúrios relacionados a questões operacionais e foram descartados (Fig. 8A), utilizando-se a série entre 60 e 390 dias.

No correlograma com precipitação P (retirados valores > 100 mm/dia), tolerância nula (Fig. 8B) não se verifica estabilidade na correlação entre as variáveis (valores positivos junto a negativos, inferiores a 0,13, mínimo para 150 pares); adotando a tolerância de 1 dia (Fig. 8C) ocorre melhora na estabilidade, com valores ainda baixos de correlação, excessivamente positivos, ressaltando o efeito deriva.

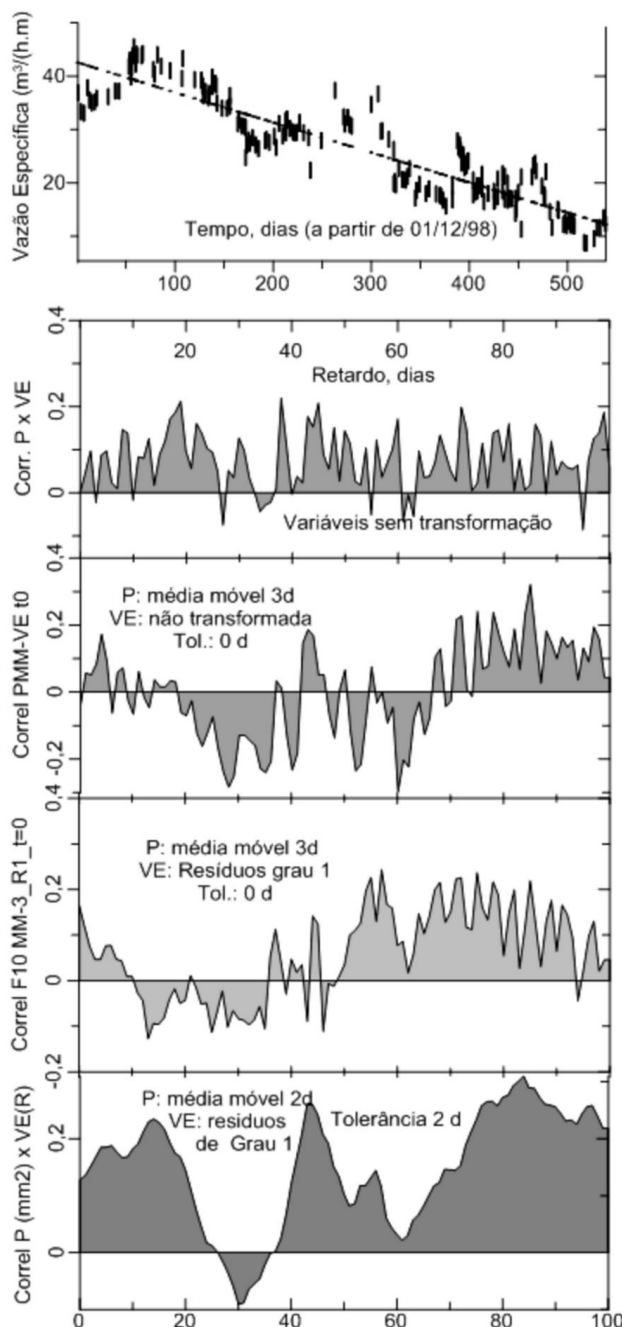


Figura 7 – Poço FE-10, resultados de diferentes procedimentos, com melhoria da correlação: (A) dados originais de VE [(m³/h)/m] e tendência linear negativa; (B) correlograma cruzado entre P (mm/dia) e valores naturais de VE (sem tolerância), com elevada variabilidade; (C) correlograma, usando média móvel de 3 dias de P com valores naturais de VE, sem tolerância, mostrando o efeito deriva; (D) valores médios de precipitação para 3 dias anteriores, com valores residuais de VE, tolerância de 2 dias, observando o efeito da retirada da tendência de VE, com variação linear e quadrática.(E) valores médios de precipitação, para dois dias anteriores, com valores residuais de VE e tolerância de 1 dia, observando o efeito da retirada da tendência de VE, e suavização com a tolerância. Observar a melhoria na estabilidade dos valores de correlação.

Usando $P < 50\text{mm}$, valores médios de P de dois dias (o homólogo e o anterior) e tolerância de 1 dia, obtêm-se os melhores resultados de correlação (Fig. 8D). Os picos são confiáveis e são similares para MP de 3 dias e T de dois dias. A correlação com valores incrementais ou variação de VE mostra boa definição dos picos de correlação, especialmente para retardos pequenos, contrariamente à correlação com os valores naturais. De forma similar à correlação com os resíduos de tendência de 1º grau, há ausência de deriva e média em torno de zero, porém com valores muito baixos ($< 0,1$), com tolerância de 1 ou 2 dias. Os campos em que os valores de correlação podem ser rejeitados ($n.c.=0,95$) estão mascarados com hachuras, para tolerância de um (>300 pares) e dois (>400 pares) dias.

Os picos ocorrem em torno de 11-12, 25-28, 60 e 80 dias de retardo, A 67 e 79-90 dias de retardo os picos são mais consistentes. Com a média móvel de 5 dias anteriores na série P e usando tolerância de 2 dias (Fig. 8E) preservam-se os picos de correlação mais consistentes: 25, 65 e 80

Observa-se que o aumento da tolerância e/ou da janela da média móvel reduz o valor obtido para o coeficiente de correlação, porém, tende a dar mais consistência, provocando a repetição agrupada de pontos de alta correlação. Da mesma forma, o uso de valores incrementais e de valores residuais de VE reduz o valor numérico do coeficiente, entretanto, delimita melhor o que são valores anômalos, uma vez que transfere a correlação média para uma base zero.

Tais resultados indicam que o aquífero não recebe recarga nos primeiros dias após as chuvas; porém entre 9 e 11 dias recebe fraco pulso de recarga, que desaparece para janelas de pluviosidade de 5 dias, indicando uma sensibilidade elevada para chuvas de um ou dois dias. Revela-se o aporte em torno de 25 dias, como um pico persistente, porém destaca-se o aporte entre 60 e 80 dias de retardo.

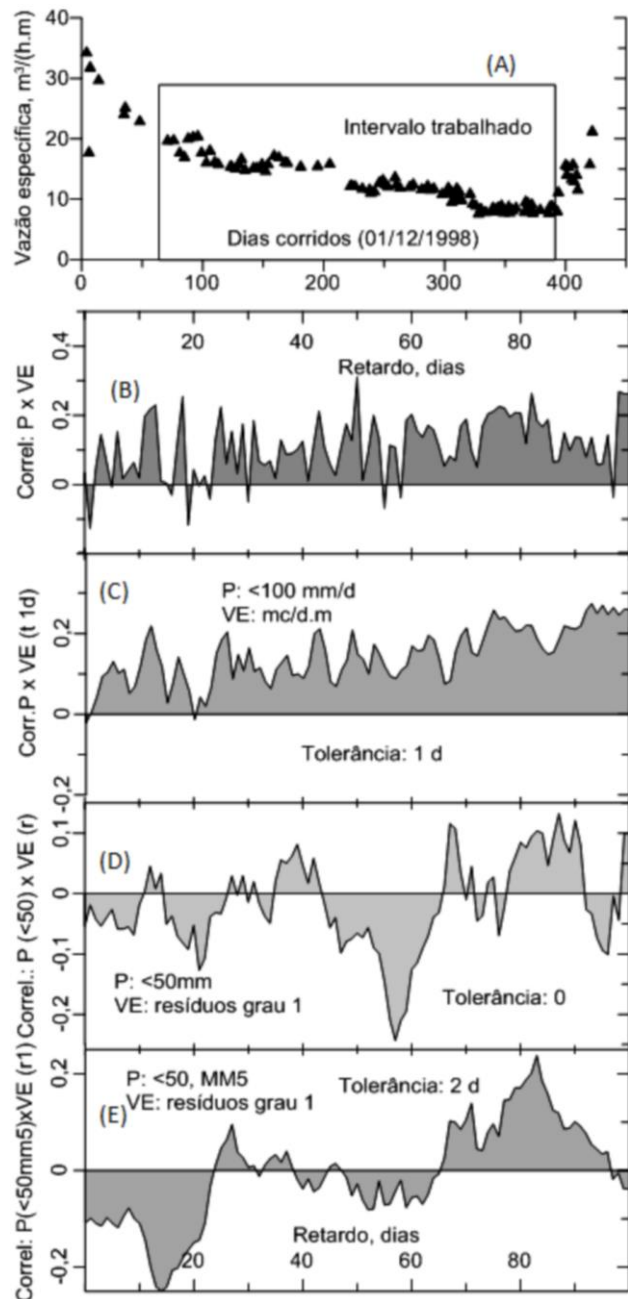


Figura 8 – Poço FE-14, resultados de diferentes procedimentos, com melhoria da correlação: (A) dados originais de VE [$(\text{m}^3/\text{h})/\text{m}$], intervalo trabalhado e tendência negativa; (B) correlograma cruzado entre P (mm/dia) e valores naturais de VE (sem tolerância), com elevada variabilidade; (C) correlograma, usando média móvel de 3 dias de P com valores naturais de VE , com tolerância de 1 dia, mostrando frágil poder de discriminação; (D) valores de precipitação, com valores residuais lineares de VE , sem tolerância, observando o efeito da retirada da tendência de VE . (E) valores médios de precipitação, para 3 dias anteriores, com valores residuais lineares de VE e tolerância de 2 dias, observando o efeito de suavização e maior robustez na correlação.

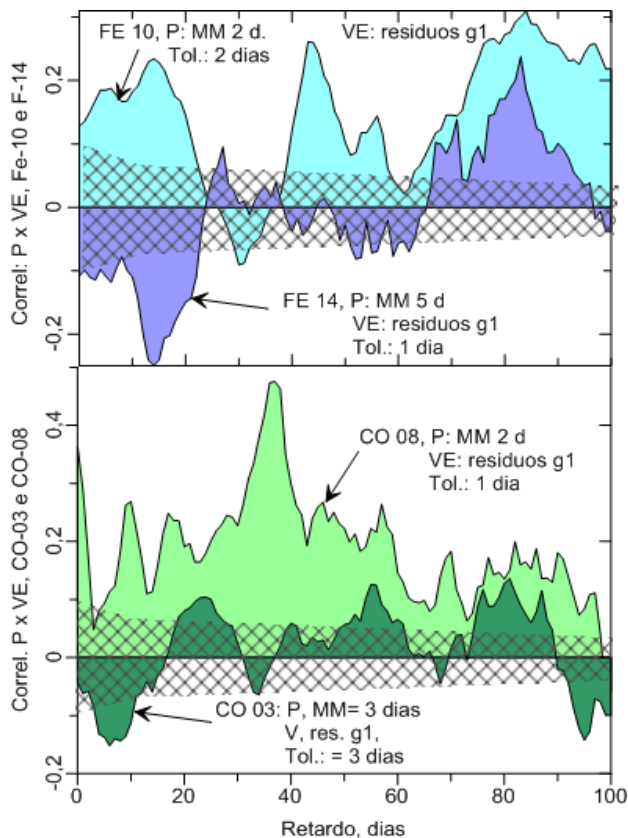


Figura 9 – Comparação entre os correlogramas com resultados mais consistentes de intervalo de retardo no aporte de água das chuvas para os quatro poços analisados, usando os valores da série pluviométrica menores que 50 mm/dia, média de chuvas de dois dias, o homólogo e o anterior, e tolerância de dois ou três dias: (A) Poço CO-03: sem correlação no curto prazo (até 20 dias) e correlação significativa no longo prazo (>70 dias), com pequena correlação no retardo médio (40-60 dias); (B) Poço CO-08: Diversos intervalos com boa correlação da variável VE representada pelos resíduos, destacando-se o de médio prazo (25 a 60 dias) e no longo prazo (80-90 dias), com correlação baixa mas significativa nos primeiros dias (1 a 3 e 10 a 12 dias de retardo); (C) Poço FE-10: forte correlação já no retardo inicial (primeiros 15 dias), no médio (40 a 50) e no longo prazo (70 a 100 dias); (D) Poço FE-14: Correlação com a variável VE representada pelos resíduos (cinza claro e branco) e pelos incrementos (cinza escuro), indicando picos consistentes de correlação no curto prazo, 10 a 12 e 25 dias, e no longo prazo (maior que 75 dias). Hachuras indicam zona de correlação não confiável no nível de 95% de probabilidade.

5. DISCUSSÃO

Na primeira avaliação dos procedimentos, foi feito um teste de significância dos resultados (*t Student*). Para todos os casos analisados, adotando tolerância zero, os valores obtidos se referem a número de pares entre 80-100 (FE-14, CO-08) e 120-150 (FE-10, CO-03), enquanto que adotando tolerância de 1 dia, o número de pares passa de 300; e com tolerância de 2 dias, o número de pares foi

superior a 400. Os resultados finais apresentados tratam de valores com número de pares superior a 200 e superior a 400, para os quais os valores de correlação acima de 0,1 e de 0,078, respectivamente, são confiáveis. Para o primeiro passo, o número de casos é próximo da metade, o que implica que, para ser significativo, o coeficiente de correlação neste passo deve alcançar 0,14 e 0,1, respectivamente.

Os resultados obtidos e que serviram de base para as conclusões mostraram uma probabilidade inferior a 5% de que a hipótese nula (de que os resultados não sejam significativos) seja verdadeira. Apesar desta coerência e da significância do ponto de vista estatístico, deve ser ressaltado que em muitas simulações não existiu uma relação não ambígua entre as séries temporais correlacionadas. Picos positivos e negativos de correlação não se mantêm em diferentes correlogramas, obtidos com diferentes transformações ou diferentes parâmetros. Os procedimentos adotados, especialmente na tolerância, permitiram lidar com estas dificuldades e alcançar resultados consistentes e significativos, com prejuízo da precisão da determinação do valor do retardo.

A tendência ao decréscimo de VE, bem como as variações sazonais na pluviosidade imprimem uma tendência no correlograma, com correlação predominantemente positiva e progressivamente maior, pois a variância nos passos maiores será maior, relativamente à variância média. O uso de resíduos e variações incrementais na VE reduz parcialmente este efeito, porém reduz bastante o valor numérico do coeficiente, porém, melhora os resultados para os passos menores do correlograma. O aumento da média móvel, especialmente na série pluviométrica, considerando apenas a metade anterior da janela, mostra bom resultados, eliminando a flutuação eventual.

Comparando-se os resultados mais consistentes para os quatro poços, e tendo em vista variações de curto e médio prazo (Fig. 8), verifica-se que a produtividade dos poços é dependente da precipitação no intervalo de 100 dias anteriores. É notável a divisão do retardo em três domínios temporais: curto prazo, 0 a 20 dias; médio, 20 a 60 dias e longo, acima de 60 dias. O poço CO-03 é o menos dependente no curto e médio prazo, indicando que a água não tem acesso direto por dutos à zona produtora. O CO-08 responde imediatamente aos eventos de chuva, indicando entradas diretas e imediatas ao aquífero aberto no epicarste e sucessiva dependência no médio e no longo prazo. Também os dois poços de Fervida mostram reação imediata da produtividade com a chuva, mas nestes dois casos, ocorre um contínuo e

progressivo afluxo de água, posteriormente ao período de chuvas de até 15 dias de retardo, no FE-14, recorrente no médio e no longo prazo. No FE-10, ocorre um pico de aporte de água cerca de 10 dias após a chuva e no longo prazo a cerca de 75-90 dias de retardo. Os poços CO-08, FE-10 e FE-14 são alimentados por cavidades, que devem estar conectadas com a superfície, explicando a relação imediata com as chuvas (Tabela 2) e o esgotamento de fontes e recalques associado ao bombeamento.

Nos eventos de médio prazo, destaca-se a pouca importância deste retardo de 20 a 60 dias nos poços CO-03 e FE-14 e sua forte presença nos poços CO-08 e FE-10. Os quatro poços mantêm relação com precipitação no longo prazo, para o período analisado, significando um aproveitamento do afluxo de outras fontes hídricas do carste. A presença do início de intervalo de correlação positiva, entre 25 e 45 dias, no médio prazo, indica ser este o retardo mínimo de trânsito da água no epicarste. Eventos com maior retardo devem estar relacionados à entrada d'água apenas em zona de fratura. Os poços de Fervida mostram seu comportamento diferenciado: o FE-10 com imediata entrada d'água após as chuvas perde esta relação em 15-20 dias, passando a receber afluxo por outra fonte a cerca de 40-50 dias. Tanto o FE-10 como o FE-14 mantêm a relação com a precipitação mais forte entre 75 e 85 dias, possivelmente abastecido pelo carste profundo.

Para os poços trabalhados e, considerando a espessura do epicarste encoberto como 30 metros, com um tempo de trânsito variável entre 10 e 35 dias, pode se estimar um valor de velocidade vertical

entre 1 e 3 m/dia. Neste caso, não se consideram os picos de curtíssimo prazo (1 a 5 dias), pois são interpretados como fluxo por condutos, com velocidade superior a 10 m/dia. Considerando os picos de correlação persistentes no longo prazo, em 70 dias ou mais, e associando-os ao fluxo em meio fraturado e a entradas abaixo do epicarste, ou seja, profundidades em torno de 60 metros (30 metros abaixo do epicarste), e 60 dias de trânsito, resulta em uma velocidade de 0,5 a 1 m/dia, o que pode ser considerado um valor elevado para meio fraturado, porém, compatível com o endocarste.

Ocorrência de maior correlação com a média móvel prévia mostra uma relação da recarga do aquífero com o avanço da frente de saturação do solo. Um pequeno ou médio episódio de precipitação provoca um avanço da zona úmida com a saturação do meio poroso que, para eventos individuais, não alcançaria a saturação de toda a coluna porosa. Entretanto, sucessivos eventos de precipitação provocam a saturação, decorrente de um determinado volume acumulado de água; com a saturação, ocorre o fluxo determinado pela energia gravitacional e pela permeabilidade do meio poroso, alimentando as zonas de depleção formadas pelo bombeamento. Uma espessura de solo não saturado de 2 m, com uma porosidade de 10% exigirá uma coluna líquida de água de 20 mm, o que significa alguns dias de chuva, para que passe a ocorrer recarga dos condutos, vazios ou zonas de fratura do carste. Desta forma, mesmo um evento isolado de chuva intensa, pode não apresentar relação com recarga do aquífero, o que fica evidenciado pela melhora da correlação com médias móveis.

Tabela 2 – Situação dos poços e resultados obtidos. (*) Média, +/- 2 desvios-padrões.

Poço profund.	Espessura da formação superficial	Profundidade da entrada de água registrada na perfuração	Vazão m ³ /h (*) e N.D. (m)	Retardo no afluxo, dias			
				Curtíssimo Até 5 dias	Curto 5 a 20 dias	Médio 20 a 55 dias	Longo >50 dias
CO-08 69 m	27 m	47-49 m, 52-58 m, 63-65 m, cavidades	66+/-40 11+/-4	2	9	28- 55	85 96
CO-03 66 m	30 m	66 m zona de fraturas	90+/-30 42+/-10	Ausente	Ausente	Incipiente	75
FE-10 64 m	10 m	26-27 m, cavidade	95+/-60 4+/-1,5	1-5	10-20	40-55	75-
FE-14 150 m	30 m	34-40 m, cavidades	62+/-34 4,5+/-2		5-10	25?	67? 75-80

De forma semelhante, a retirada de valores excepcionais de eventos de precipitação e a consequente melhora nos valores de correlação, revela um fenômeno conhecido, que é o fato da condutividade hidráulica ser limitada, exigindo tempo para a infiltração. Um excepcional volume de chuva num evento gera, então, um excedente hídrico na superfície que passa a escoar na superfície até alcançar as linhas de drenagem e seu fluxo para fora do sistema. Desta forma, um evento excepcional não teria correlação com a recarga excepcional, entretanto, reduziria em muito o coeficiente de correlação por implicar no aumento da variância que constitui um divisor no cálculo deste coeficiente.

A correlação de longo prazo se verifica em torno de 80 dias, mostrando que existem outros mecanismos de abastecimento, além da circulação no epicarste, correspondendo a afluxos muito lentos, com velocidades entre 10^{-1} a 10^{-2} m/d. É mais provável tratar-se de fluxo difuso (Atkinson 1977), em zonas de micro-fraturamento.

6. CONCLUSÕES

A análise por correlograma e variograma constitui um método apropriado para avaliação do tempo de trânsito da água da superfície até a profundidade de entrada de água no poço em aquífero não confinado e das condições de afluxo de água, bastando ter disponíveis séries temporais de medidas de precipitação, produção e nível dinâmico, superior a um ano.

Alguns procedimentos e cuidados metodológicos são necessários, especialmente em virtude do caráter não homólogo das séries e assíncrono das tomadas de medidas: (1) restrição a valores excepcionais, (2) retirada de tendência, (3) utilização de correlação com valores incrementais de passo, (4) uso de média móvel da pluviosidade nos dias anteriores, (5) a regularização com tolerância.

Com relação ao tempo de trânsito da água, verifica-se que ocorre uma diversidade de situações

geológicas que influenciam este tempo e, conseqüentemente, a produtividade e estabilidade da produção:

- Ω Os poços FE-10 e CO-08 têm as relações mais imediatas com as águas das chuvas, enquanto o CO-03 tem a relação distintamente mais remota.
- Ω No caso dos poços de Fervida, também a relação é imediata, no FE-14, já com um pico em 11 dias e outro em 25 dias, enquanto no FE-10 é progressiva já a partir do 1º dia até o 15º dia após as chuvas, indicando acesso da água por dutos e cavernas.

Os poços de Fervida têm uma dependência mais imediata das águas de superfície, enquanto os poços em Colombo mostram uma relação mais remota. A velocidade de trânsito em ambos os casos, mais comum no epicarste, situa-se na faixa de 1 a 3 m/dia.

Os quatro poços mostram um retardo comum entre 80 e 100 dias, o que indica uma propriedade do sistema cárstico da região, respondendo à elevação generalizada do nível d'água, com retardo quase sazonal.

Esta diversidade de situações é resultado dos diferentes componentes do sistema aquífero presentes na área e pelas relações entre estes componentes com o aquífero e com seu abastecimento a partir de águas da superfície, do epicarste, ou águas já hospedadas nas microfraturas das rochas, no endocarste.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SANEPAR, pela disponibilização dos dados e aos colegas João Nogueira Filho, Alberto Fiori, Marcos Guarda e Elaine A. Bonacim, por acompanhamento no campo e discussões. Ao revisor anônimo da Espeleotema pela atenta revisão e contribuição para a qualidade do trabalho e clareza do texto.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, P.K.; FROELICH, K.; KULKARNI, K.M. **GROUNDWATER – Vol. II – Environmental Isotopes in Groundwater Studies**. ©Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Disponível em: <http://www.eolss.net/Eolss-sampleAllChapter.aspx>. Acesso em: jan/2017.
- ANDREOLI, C.V.; DALARMI, O.; LARA, A.I.; RODRIGUES, E.M.; ANDREOLI, F.N. Os Mananciais de Abastecimento do Sistema Integrado da Região Metropolitana de Curitiba – RMC. **Sanare**; Curitiba; **12 (12)**: p. 19-29, 1999.

- ATKINSON, T.C. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills; Somerset; U.K. **Journal of Hydrology**. 35: p. 93–110, 1977.
- BAILLY, V.; MARTIN, J; SCREATON, E.; LANGSTON, A. A methodology for assessing water transit time using temperature as a natural tracer. *Geol. Soc. Am. Abstracts with Programs* Vol. 41, N 7, 2011.p. 468.
- BETHKE, C.M.; JOHNSON, T.M. Paradox of groundwater age: Correction. **Geology**. 30 (4): p. 386–387, 2001.
- BORLAND. **TurboBasic – Basic compiler**. Borland International Inc., 1987.
- BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. Holden Day, San Francisco, CA, 1976. 575 p.
- CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. New York, Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. 328 p.
- DROGUE, C. Analyse statistique des hydrogrammes de décrue des sources karstiques. **J. Hydrol.**, 15, p.49-68.1972.
- FIORI, A.P. Tectônica e Estratigrafia do Açungui no Paraná. **Boletim IG–USP**. 23, 1992. P.55-74.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. 2.ed. rev. e atual, 2007. 601p.
- FRANCO-MAGALHAES, A. O. B.; HACKSPACHER, P. C.; GLASMACHER, U. A.; SAAD, A. R. Rift to post-rift evolution of a “passive” continental margin: the Ponta Grossa Arch, SE Brazil. **International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)** 99, p.1599–1613, 2010.
- HARUM,T.; LEDITZKY, H.P.; REINSDORFF, S.; SACCON, P.; ZOJER, H.; LISBOA, A.A.; VAINE, J.L.; ROSA FILHO, E.F. da; GIUSTI, D.A.; MONASTIER, M.S.; RIBAS, A. Projeto Carste: Water Balance and Isotope Investigations in the Compartment Carste Aquifer of Colombo-Fervida (Curitiba/Pr). *In: XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*. Fortaleza. **Anais**, 2000. p.10-22.
- HURST, H.E.; BLACK, R.P.; SIMAIKA, Y.M. **Long-Term Storage: An Experimental Study**. London, UK: Constable & Co,1965, 145 p.
- JORDAN, H.; FROEHLICH, K. Groundwater dating in monitoring groundwater resources. *Groundwater Monitoring and Management*. **IAHS Publ.** 173, 1990. p.139–151.
- LANDIM, P.M.B. **Análise Estatística de Dados Geológicos Multivariados**. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2011. 208 p.
- LAROCQUE, M.; MANGIN, A.; RAZACK, M.; BANTON, O. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large Karst aquifer (Charente, France). **Journal of Hydrology**. 205, n. 3–4, 1998. p.217–231.
- LISBOA, A. A.; BONACIM, E. A. Sistema aquífero cárstico: reservatório elevado da região metropolitana de Curitiba. **Sanare**. 4,, p. 26-30, 1995.
- NASCIMENTO, E. R.; REIS NETO, J. M.;REBELO, A. M. A. Parâmetros geomorfométricos do relevo no entendimento do nível de exposição dos sistemas cársticos na região limítrofe das bacias hidrográficas do Alto Iguau e do Alto Ribeira - Região norte de Curitiba - PR. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42p. 81-90 , 2012.
- NETO, D. C.; CHANG, H.K.; GENUCHTE. A Mathematical View of Water Table Fluctuations in a Shallow Aquifer in Brazil. **Groundwater** 54(1), p. 82 – 91, 2015.

- PADILLA, A.; PULIDO-BOSCH, A. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. **Journal of Hydrology**, 168, p. 73-89, 1995.
- ROSA FILHO E.F. da; GUARDA, M.J. Compartimentação hidrogeológica da Formação Capiru na região Norte de Curitiba--PR, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**. 22 (1), p. 67-74, 2008.
- ROSA FILHO, E.F.; POLIDORO, G.; HARUM, T.; LISBOA, A.A.; RIBAS, A.; ZOJER, H. **Projeto Carste. Relatório Conclusivo Final**. Instituto Joanneum Research/SANEPAR/SUDERHSA /UFPR/COMEC, 2002. 34p.
- SANEPAR. Companhia de Saneamento do Paraná. **Banco de Dados Hidrogeológico da Região de Colombo – PR**. 1998.
- SOARES, P.C.; BETTÚ, D.F.; FIORI, A.P. Complexidades de uma terminação de nappe: o sinforme de Colombo (PR), Brasil. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos - Curitiba. **Anais**, v. X, 2005. p. 447-450.
- SOARES, P. C.; NOGUEIRA FILHO, J.; BONACIM, E. A. Um olhar geológico para a paisagem: Curitiba a Vila Velha (PR, Brasil). In: SIMPOSIO DE ROTEIROS GEOLÓGICOS DO PARANÁ, Ponta Grossa. **Anais do I Simpósio de Roteiros Geológicos do Paraná**. Curitiba: Soc. Bras. Geol - Núcleo do Paraná, v. 1, 2002. p. 87-96.
- SOARES, P.C.; RIFFEL, S.B.; FIORI, A.P. Geomorphological and Geophysical Evidences for Neotectonics, Central and Southern Brazil. In: 13 SNET/7th International Symposium on Tectonics, SBG. Campinas. **Anais**. 2011. p. 400-404
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B. Depósitos cenozóicos na região centro-sul do Brasil. **Notícia Geomorfológica**. 16 (31), p. 17-39, 1975.
- VESTENA, L.R.; KOBAYAMA, M. 2007. Water Balance in Karst: Case Study of the Ribeirão da Onça Catchment in Colombo City, Paraná State – Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology** 50(5), p. 905-912, 2007.

Fluxo editorial:

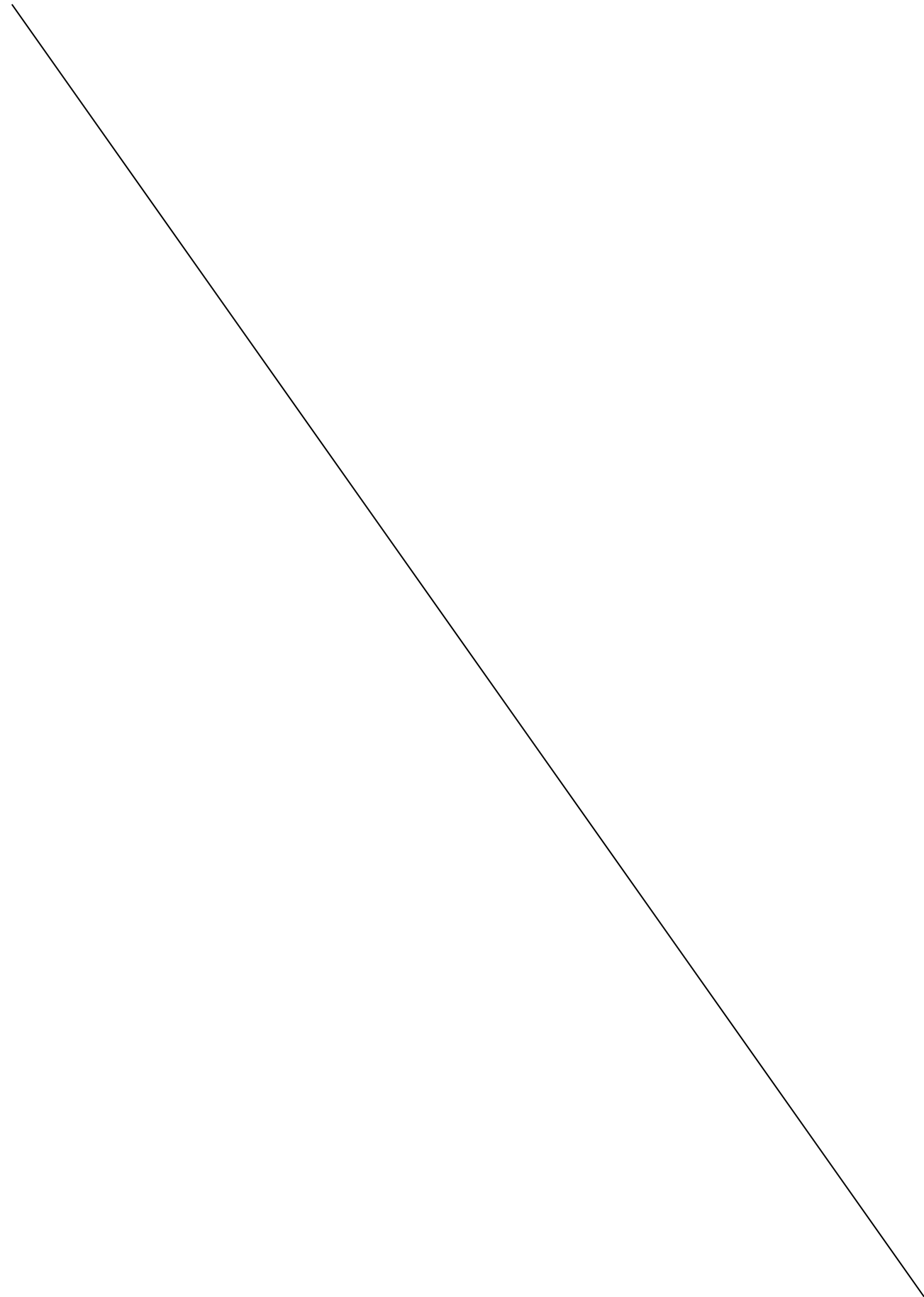
Recebido em: 27.01.2017

Aprovado em: 12.04.2017



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp



MORFODINÂMICA NO CARSTE DE CONTATO DA PLANÍCIE DO RIO DAS VELHAS E A SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL, MINAS GERAIS

MORPHODYNAMICS IN THE CONTACT KARST OF THE VELHAS RIVER PLAIN AND THE SOUTHERN ESPINHAÇO RIDGE, MINAS GERAIS

Leandro Cosme Oliveira Couto (1) & Luiz Eduardo Panisset Travassos (2)

(1) Mestrando em Geografia - Tratamento da Informação Espacial, PUC Minas, Belo Horizonte MG.

(2) Dr. em Geografia e Dr. em Carstologia, Professor do Programa de Pós-Graduação em Geografia da PUC Minas, Belo Horizonte MG.

Contatos: leandro.cosme@gmail.com; luizepanisset@gmail.com.

Resumo

Esta pesquisa realiza a aplicação de modelagem da paisagem no contato entre a planície do Rio das Velhas e a Serra do Espinhaço Meridional. Esta área surge como amostra representativa de ampla diversidade geocológica em razão de sua localização. O trabalho baseou-se nos conceitos de paisagem e de geossistemas e permitiu a aplicação da modelagem morfodinâmica. De oeste para leste, partindo do município de Corinto até Diamantina, tem-se a Planície do Rio das Velhas, o Carste de Monjolos, a Serra do Cabral e a Serra do Espinhaço Meridional, sendo este último compartimento composto por 3 geofácies (Face Oeste, Interflúvio e Face Leste). Estes geossistemas confirmam a diversidade geocológica existente no contato entre a planície do Rio das Velhas, onde o Carste de Monjolos é o geossistema mais frágil e susceptível a impactos, e a Serra do Espinhaço Meridional, cujos atributos físicos são resistentes.

Palavras-Chave: Morfodinâmica; Carste; Serra do Espinhaço Meridional.

Abstract

This research realize the application of a model in the landscape in the contact between the Rio das Velhas Plain and the western edge of the Southern Espinhaço Ridge. This area is a representative sample of wide geoecological diversity due to its location. The research was based on the concepts of landscape and geosystems and allowed the morfodinamic model's application. From west to east, from the municipality of Corinto to Diamantina, there is the Rio das Velhas Plain, the Karst of Monjolos, the Serra do Cabral and the Southern Espinhaço Ridge, the latter compartment is made of 3 geofacies (West Face, Interfluve and East Face). These geosystems confirm the geoecological diversity that exists in the contact between the Rio das Velhas Plain and the western edge of the Southern Espinhaço Ridge. The Karst of Monjolos is the most fragile geosystem and susceptible to impacts, while the Southern Espinhaço Ridge has the most resistant physical attributes.

Key-Words: *Morphodynamics; Karst; Southern Espinhaço Ridge.*

1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa foi realizada com o objetivo principal de identificar o aspecto morfodinâmico existente na região da paisagem circunscrita pelos limites das Cartas Topográficas SE-23-Z-A-II (Corinto, MG) e SE-23-Z-A-III (Diamantina, MG), localizada na borda oeste do Espinhaço Meridional e corresponde a uma amostra do contato geológico entre o Supergrupo Espinhaço e o Grupo Bambuí. A região tem demonstrado ser um campo fértil para novas pesquisas, abarcando considerável diversidade geológica, geomorfológica, pedológica e biogeográfica.

Por ser uma região que apresenta um contato entre um tipo de carste tradicional e um não-tradicional, realizou-se a análise da paisagem de acordo com Tricart (1977), bem como apoiou-se nos trabalhos de Travassos et al. (2008), Guimarães, Travassos; Linke (2011), Rodrigues (2011), Guimarães (2012), Rodrigues; Travassos (2013), Jansen (2013; 2015) e Couto; Travassos (2016).

2. METODOLOGIA

O objetivo proposto foi alcançado por meio de método predominantemente dedutivo, conforme sequência de etapas propostas por Christofolletti

(1999): 1) trabalho de campo para experiências perceptivas e imagem da estrutura do mundo; 2) modelagem *a priori* por meio da compilação de enfoques e modelagens de sistemas ambientais pertinentes, conforme Tricart (1977), Bertrand (2004) e Couto; Travassos (2016); 3) coleta de dados para consolidação de base de dados digital; 4) projeto experimental¹ viabilizado pela modelagem morfodinâmica baseada em Tricart (1977) e procedimento de álgebra de mapa executada no *software* ArcGis 10.2; 5) verificação e validação do projeto experimental por intermédio de comparação com as experiências perceptivas e imagem da estrutura do mundo; 6) explicação através das análises dos resultados.

Conforme Bertrand (2004), o geossistema surge não por imposição de categorias pré-estabelecidas e sim, pelas discontinuidades objetivas da paisagem, reconhecidas no potencial ecológico (condições geológicas, geomorfológicas, pedológicas, climáticas e hidrológicas), exploração biológica (comunidades vivas de plantas e animais em dinâmica ecossistêmica) e ação antrópica (atividades socioeconômicas). No interior de um geossistema há relativa continuidade ecológica,

embora este não se apresente necessariamente com grande homogeneidade fisionômica, com destaque para a morfodinâmica. Couto; Travassos (2016) utilizam o enfoque geossistêmico através de amostragens realizadas por transectos na região de estudo, identificando 04 geossistemas, a saber: *Planície do Rio das Velhas, Carste de Monjolos, Serra do Cabral e Serra do Espinhaço Meridional*, sendo o último composto por 03 geofácies (*Face Oeste, Interflúvio e Face Leste*).

Através de 5 pontos de controle ao longo do trajeto de campo foram registradas as variações da distribuição litológica no contato geológico entre o Supergrupo Espinhaço e o Grupo Bambuí, das feições geomorfológicas entre os compartimentos de relevo denominados Depressão São Franciscana e Serra do Espinhaço e, por fim, da distribuição das coberturas pedológica e vegetal no contato fitogeográfico entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica. Três trechos da área de estudo foram selecionados para os trabalhos de campo, servindo como amostras de diferentes geossistemas identificados por Couto; Travassos (2016) com base em Bertrand (2004), conforme figura 1.

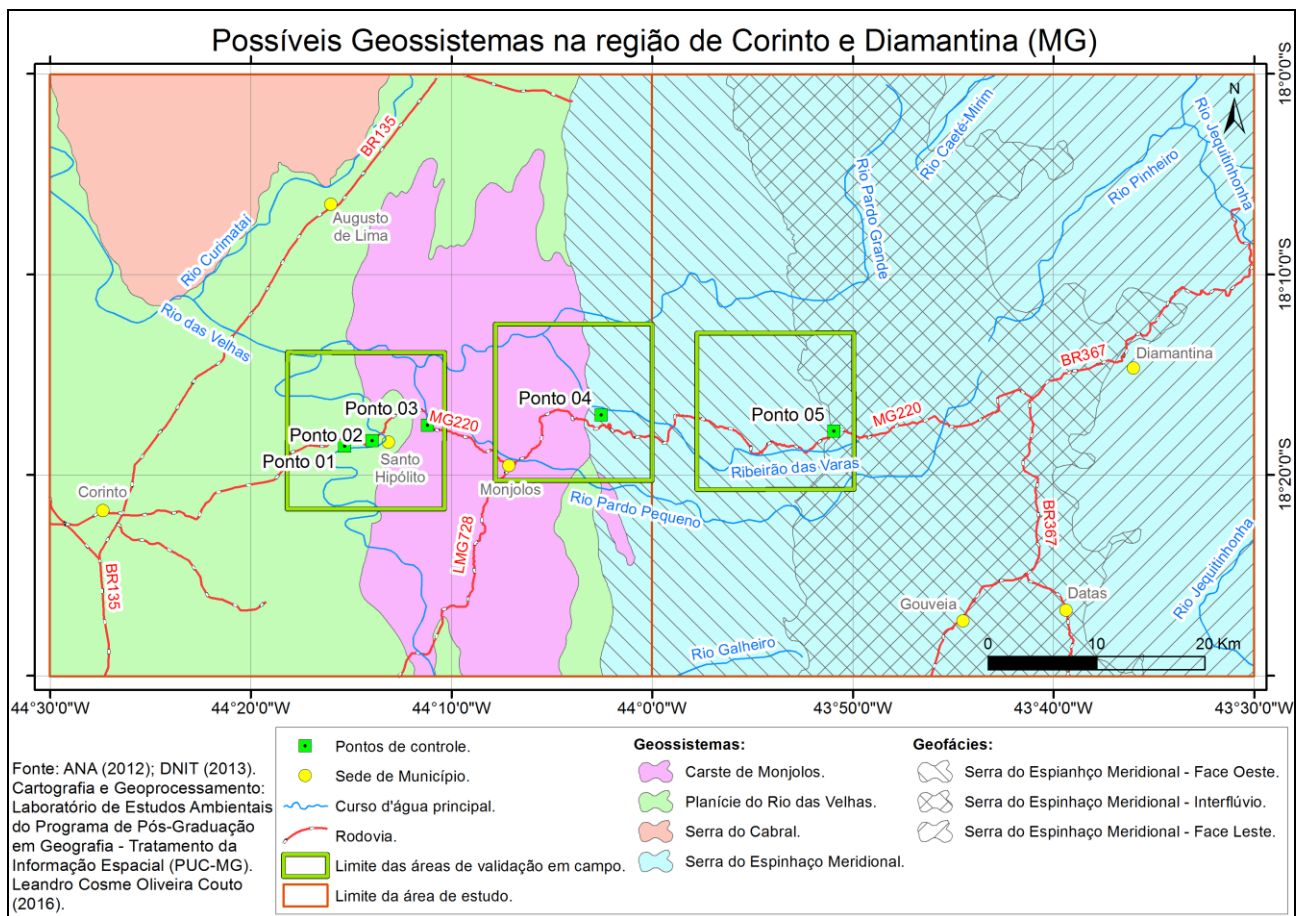


Figura 1: Mapa de Geossistemas na área de estudo (Couto; Travassos; 2016).

Os dados digitais vetoriais (*shapefile*) utilizados na modelagem morfodinâmica e na álgebra de mapas foram, em grande parte, produzidos e disponibilizados por entidades governamentais via Internet: 1) *dados planialtimétricos*: Departamento de Serviço Geográfico (DSG) do Exército Brasileiro e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), na escala 1:100.000, Agência Nacional de Águas (ANA) e Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes (DNIT), na escala 1:1.000.000; 2) *dados geológicos* (litologia/estrutura): Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMIG), ambos em escala 1:100.000; 3) *dados pedológicos* (tipologia de solos): Departamento de Solos (DPS) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na escala 1:650.000.

3. CARACTERIZAÇÃO E IMPORTÂNCIA DA ÁREA

A área ocupada pelo recorte espacial das Cartas Topográficas SE-23-Z-A-II (Corinto, MG) e SE-23-Z-A-III (Diamantina, MG) é atravessada longitudinalmente pela cumeada da Serra do Espinhaço Meridional. Este interflúvio separa a bacia do Rio das Velhas (sub-bacia do Rio São Francisco) e o Alto Jequitinhonha (porção montante da bacia do Rio Jequitinhonha, integrante das chamadas Bacias do Atlântico Leste).

Outros contatos que ocorrem na área são: a) *geológico* entre o Supergrupo Espinhaço e o Grupo Bambuí; b) entre uma região cárstica tradicional (litologia predominante de calcarenitos) e outra região cárstica não tradicional² (litologia predominante de quartzitos); c) *geomorfológico* entre a Depressão São Franciscana e a Serra do Espinhaço, implicando em elevado gradiente altimétrico; d) *fitogeográfico* entre os Biomas Cerrado e Mata Atlântica, implicando em uma cobertura vegetal anastomosada com fitofisionomias campestres, savânicas e florestais.

A figura 2 ilustra estes contatos: à direita na foto (leste), em primeiro plano, formação de relevo serrana com vegetação campestre sobre rochas do Supergrupo Espinhaço (carste não tradicional); no

centro, planície cárstica tradicional ocupada por atividades agropecuárias e mata de galeria; e à esquerda na foto (oeste) afloramentos de rochas do Grupo Bambuí (carste tradicional) compondo relevo com escarpas e maciços rochosos recobertos por vegetação de matas secas.

A região da área de estudo é uma porção do espaço mineiro de extrema representatividade no cenário internacional e nacional, com extensas áreas recobertas por rochas carbonáticas do Grupo Bambuí estudadas no século XIX pelo naturalista dinamarquês Peter Wilhelm Lund (1801-1880), bordeada pela porção ocidental da Serra do Espinhaço, ao mesmo tempo em que se situa no início da região dos sertões mineiros, retratada na literatura do escritor mineiro João Guimarães Rosa (1908-1967) (RODRIGUES, 2011; RODRIGUES; TRAVASSOS, 2013).

4. ENFOQUE MORFODINÂMICO

O enfoque morfodinâmico trata da atuação do componente morfogênico na dinâmica da superfície terrestre e foi introduzido formalmente no Brasil pelo francês Jean Tricart (1977) por meio do estudo da ecodinâmica das paisagens. Processos morfogênicos produzem a instabilidade da superfície terrestre, sendo necessário se estabelecer uma taxonomia dos tipos de ambientes fundamentada no grau de estabilidade-instabilidade morfodinâmica.

Nesse cenário, Tricart (1977) propõe metodologia baseada no estudo da dinâmica dos ecótopos (meio ambiente de um ecossistema), a qual denomina de *ecodinâmica*, e que distingue três grandes tipos de meios morfodinâmicos em função da intensidade dos processos naturais atuantes de morfogênese e pedogênese: 1) os *meios estáveis* (onde predomina a pedogênese) e 2) os *meios fortemente instáveis* (onde predomina a morfogênese), com comportamentos opostos. Além disso, propõe a existência de *meios intergrades*, com comportamento intermediário aos outros dois. Cada um dos três tipos de meios engloba diversos espaços da superfície terrestre que se assemelham quanto ao comportamento morfodinâmico (motivo pelo qual se utiliza o termo no plural).



Figura 2 - Visada NNW das coordenadas 18,28° S e 44,04° W.

Esta taxonomia permite a modelagem geocológica da paisagem em três domínios morfodinâmicos diferentes. Considerando-se especialmente a estrutura e o conteúdo do quadro síntese apresentado por Tricart (1977) utilizam-se como pressupostos:

- a) O desempenho da morfogênese, dentre outras variáveis, pode ser aferido pela inclinação do relevo, parametrizada através do agrupamento das 06 classes apresentadas pelo IBGE (2007) em 03: 0 a 08% (classes plano e suave ondulado), em relevos pouco entalhados com características geomorfológicas estáveis, 08,01 a 45% (classes ondulado e forte ondulado), em relevos com rejuvenescimento permanente devido à interferência recíproca entre pedogênese e morfogênese, e maior que 45% (classes montanhoso e escarpado), denotando relevos acidentados com dissecação vigorosa;
- b) O desempenho da pedogênese pode ser aferido pela variável maturidade do solo, parametrizada através do agrupamento dos 14 tipos de solos apresentadas pelo IBGE (2007) em 3 grupos, conforme adaptação da proposta de Crepani et al. (2001): recente (afloramento rochosos, gleissolos, neossolos, organossolos, plintossolos e vertissolos), rejuvenescido (argissolos, cambissolos, chernossolos, espodossolos, luvisolos, nitossolos e planossolos) e envelhecido (latossolos);
- c) A influência da litologia é aferida pela variável coesão das rochas, parametrizada através do agrupamento da *Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns* (CREPANI et al., 2001; JANSEN, 2013) em 3 grupos: reduzida (1 a 1,6), mediana (1,7 a 2,3) e elevada (2,4 a 3,0).

(...) “O grau de coesão das rochas é a informação básica da Geologia a ser integrada a partir da Ecodinâmica, uma vez que em rochas

pouco coesas podem prevalecer os processos erosivos, modificadores das formas de relevo (morfogênese), enquanto que nas rochas bastante coesas devem prevalecer os processos de intemperismo e formação de solos (pedogênese). (CREPANI et al., 2001, p.73)

Cada uma destas três variáveis é valorada entre 1, para o parâmetro mais estável, 2, para o intermediário, e 3, para o mais instável (Tabela 1).

A modelagem digital ocorre através do cálculo da soma entre os valores das três variáveis em cada pixel³, resultando nos valores 3, 6 e 9 respectivamente para os domínios morfodinâmicos, por excelência, estável, *intergrade* e fortemente instável.

$$MM = IR + MS + GCR$$

Onde:

MM = Meio morfodinâmico;

IR = Inclinação do relevo;

MS = Maturidade do solo;

GCR = Grau de coesão das rochas.

Correspondendo a este contínuo transicional (passagem gradual entre os meios estáveis e os meios instáveis), bem como às variações existentes dentro de um mesmo meio morfodinâmico, os eventuais resultados com valores 5 e 7 denotam áreas *intergrades* mais estáveis ou mais instáveis, ao passo que os resultados com valores 4 e 8 denotam áreas estáveis e instáveis, conforme variação A na figura 3. Já a variação B, outra interpretação da gradação dos valores modelados, reconhece os meios *intergrades* como limiar entre a estabilidade e a instabilidade, variantes em níveis de intensidade entre fraco e forte, conforme TABELA 2

Tabela 1 – Parâmetros e valores para modelagem morfodinâmica da paisagem com base em Tricart (1977).

VARIÁVEL	PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
Inclinação do relevo (%)	0 a 8	1	8 a 45	2	> 45	3
Maturidade do solo	Envelhecido	1	Rejuvenescido	2	Recente	3
Vulnerabilidade à denudação das rochas	Reduzida	1	Mediana	2	Elevada	3
Domínio morfodinâmico	Estável	3	<i>Intergrade</i>	6	Fortemente Instável	9

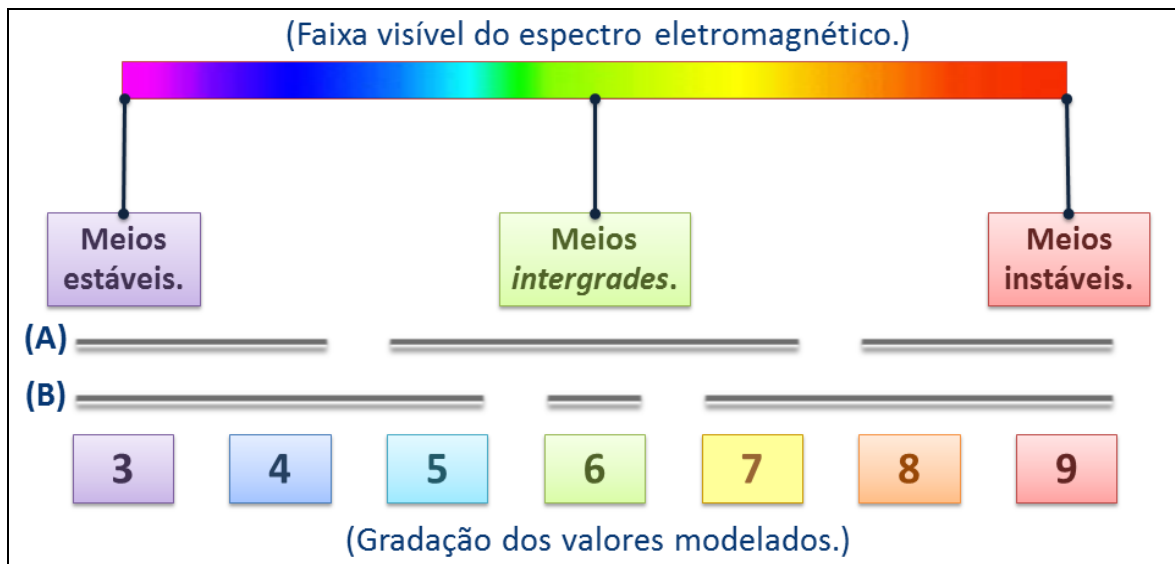


Figura 3: Graduação dos valores modelados no contínuo morfodinâmico.

Tabela 2 – Variações de intensidade no contínuo morfodinâmico.

VALORES MODELADOS	MEIOS MORFODINÂMICOS	VARIAÇÕES DE INTENSIDADE NO CONTÍNUO
3	Estáveis	Forte
4		Médio
5		Fraco
6	<i>Intergrade</i>	Fragilmente estável, no limiar da instabilidade
7	Instáveis	Fraco
8		Médio
9		Forte

5. MODELAGEM MORFODINÂMICA NA REGIÃO DE CORINTO E DIAMANTINA

A aferição dos meios morfodinâmicos na região de Corinto e Diamantina, através da variação B na graduação de valores do contínuo morfodinâmico, identificou a ocorrência de todas as sete classes possíveis. A Figura 4 apresenta um gráfico com a contagem percentual dos pixels, a qual indica maior ocorrência de meio *intergrade* na área de estudo, seguida respectivamente do nível fraco para estabilidade e para instabilidade. Também ocorrem estabilidade e instabilidade no nível médio e, em quantidade ínfima, no nível forte.

Assim como há diferenças de quantidades entre as classes morfodinâmicas, também há diferenças na localização, demonstrando uma distribuição espacial variada. A Figura 5 apresenta o mapa do modelo morfodinâmico sobreposto pelos limites dos possíveis geossistemas.

A delimitação dos geossistemas na área de estudo permite localizar alguns padrões na distribuição espacial (em zonas ou em mosaicos) dos meios morfodinâmicos (Tabela 3).

Sobre rochas sedimentares do Grupo Bambuí, a *Planície do Rio das Velhas* é estável, abarcando trechos em condições *intergrade* e estáveis nos níveis fraco e médio; o *Carste de Monjolos* é instável, abarcando trechos nos níveis fraco, médio e forte, além de trechos *intergrade*.

Sobre rochas metassedimentares do Supergrupo Espinhaço, a *Serra do Espinhaço Meridional* apresenta variações morfodinâmicas em suas geofácies: *Face Oeste* com morfodinâmica mais complexa, caracterizada por mosaico de trechos *intergrades* e estáveis e instáveis em nível fraco, ocorrências pontuais de trecho com instabilidade média e ocorrências de trechos mais expressivos com estabilidade média e forte; *Interflúvio* com morfodinâmica estável, predominando tanto o nível fraco, com ocorrências em nível médio, quanto do meio *intergrade*, encravado por ocorrências pontuais instáveis fracas; *Face Leste* no limiar da estabilidade morfodinâmica, com o predomínio do meio *intergrade* encravado por ocorrências pontuais dos meios estável e instável em nível fraco, com ocorrência no vale do Rio Jequitinhonha de trechos expressivos de estabilidade, a montante, e instabilidade, a jusante, em níveis médio e forte.

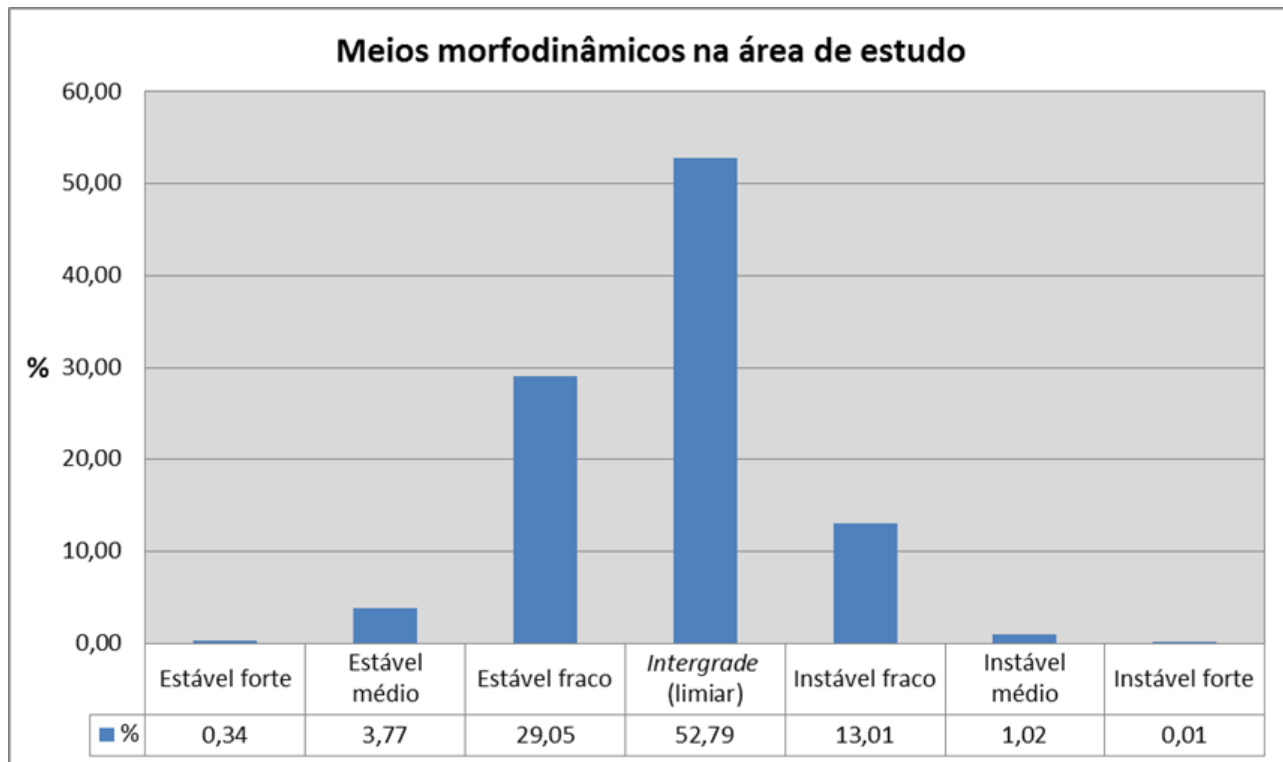


Figura 4: Distribuição percentual dos pixels em níveis morfodinâmicos.

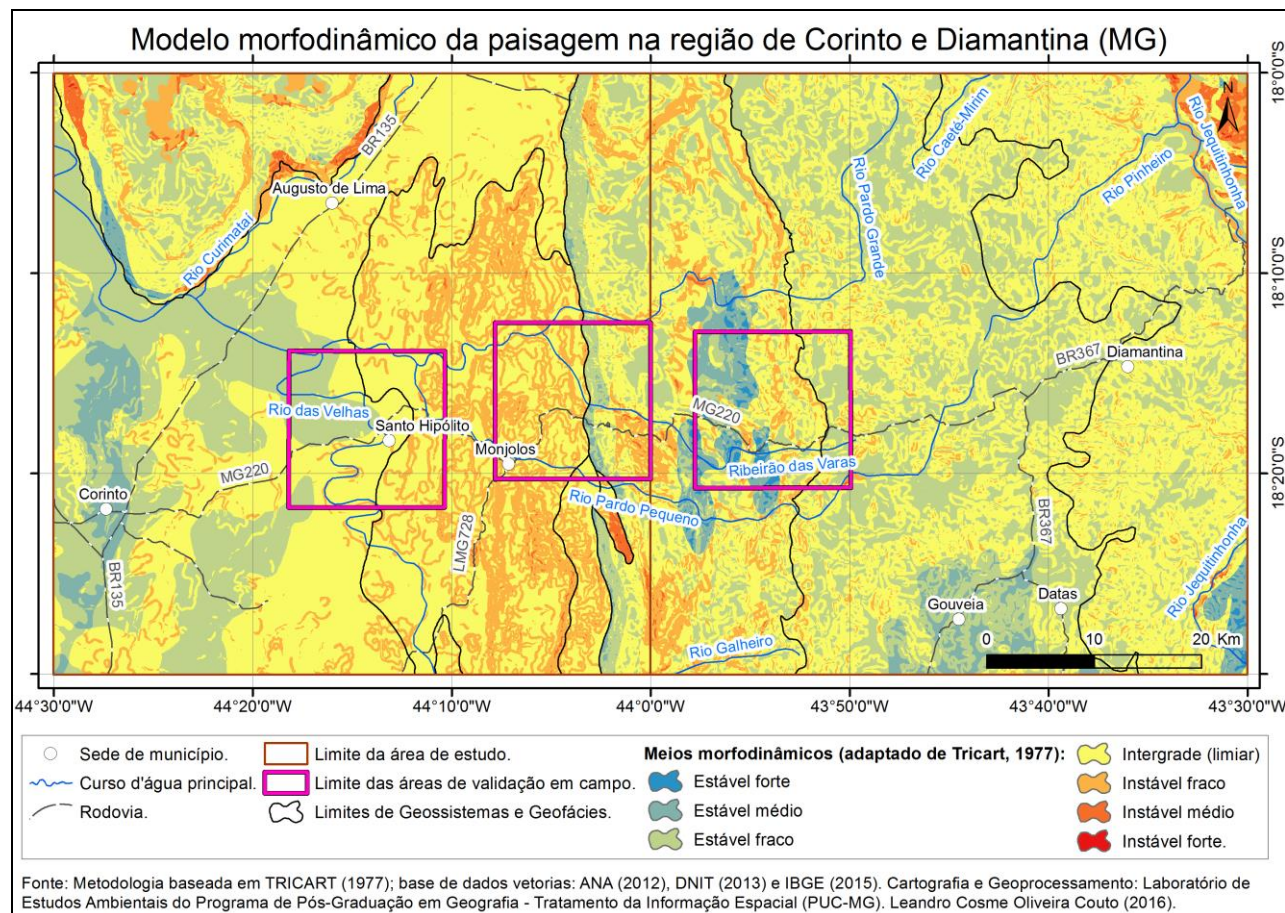


Figura 5: Mapa do modelo morfodinâmico na área de estudo.

Tabela 2 – Distribuição espacial e meios morfodinâmicos predominante nos geossistemas.

GEOSSISTEMA	GEOFÁCIES	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL	MEIOS MORFODINÂMICOS PREDOMINANTE
Planície do Rio das Velhas	-	Zonal	<i>Intergrade</i> e estável médio
Carste de Monjolos	-	Mosaico	Instável fraco
Serra do Espinhaço Meridional.	Face Oeste.	Mosaico	Eclética, predomínio <i>intergrade</i> ; possível instável
	Interflúvio.	Mosaico	Estável fraco
	Face Leste.	Mosaico	<i>Intergrade</i>
Serra do Cabral	-	Mosaico	Eclética, predomínio <i>intergrade</i> ; possível instável

Todos os geossistemas identificados na área de estudo apresentam trechos em meios *intergrades*, onde há concorrência permanente e interferência recíproca entre pedogênese e morfogênese, com uma sobrepujando a outra em locais com circunstâncias específicas. Conforme sistematização de Tricart (1977), solos e formas de relevo neste meios são de idade relativamente intermediária, compondo paisagens que, quando sem cobertura vegetal, são facilmente susceptíveis à compactação do solo pelo pisoteio de gado. A conservação ambiental demanda a presença da cobertura vegetal para inibir escorregamentos e ravinamentos, tanto que a manutenção da cobertura vegetal de porte herbáceo é condição mínima adequada ao uso agropastoril, desde que simultâneo ao manejo hidráulico do escoamento para se evitar diferentes processos erosivos⁴.

6. MEIOS MORFODINÂMICOS NA REGIÃO DE CORINTO E DIAMANTINA

A congruência entre os resultados da modelagem morfodinâmica realizada e as constatações feitas em trabalho de campo permite distinção de análises por geossistema:

Ω *Planície do Rio das Velhas*: em consonância à análise de Tricart (1977), a estabilidade morfodinâmica da *Planície do Rio das Velhas* está associada à existência de solos e formas de relevo envelhecidas (antigos). Ao uso agropastoril é necessário o estudo específico do solo *in loco* para identificação de melhoramentos e adubações. A conservação ambiental satisfatória demanda manutenção da cobertura vegetal savânica em densidade de clímax.

Ω *Carste de Monjolos*: a instabilidade morfodinâmica do *Carste de Monjolos* está associada à considerável predominância da morfogênese sobre a pedogênese, com influência decisiva das condições litológicas de

calcarenitos. O relevo é acidentado, com formas dissecadas e vales entulhados, e os solos são recentes ou ao menos rejuvenescidos. Embora não discutido neste trabalho, o potencial espeleológico existente (COUTO; TRAVASSOS, 2015) demonstra que, além de instabilidade manifesta no exocarste, também o endocarste se apresenta instável. Trata-se de um meio com risco de degradação ambiental irreversível, o que torna os usos agropastoris questionáveis. No mínimo, a conservação ambiental demanda não apenas a manutenção da cobertura vegetal, mas também manejo do escoamento superficial. O *Carste de Monjolos* apresenta a morfodinâmica mais instável da área de estudo, ainda que em nível fraco.

Ω *Serra do Espinhaço Meridional – Face Oeste*: na modelagem da *Face Oeste* a influência da litologia nos meios morfodinâmicos instáveis é nítida, ocorrendo meios instáveis em níveis fraco e médio sobre Metarligilitos, Metassiltios e Filitos, bem como meios *intergrade* e estável fraco sobre Quartzitos. Todavia, trechos com declividade montanhosa ou escarpada foram modelados como instáveis no nível fraco, ou mesmo como estáveis fracos, ao invés de instáveis no nível forte. Isso ocorreu respectivamente em razão do tipo de litologia conjugada ao tipo de cobertura pedológica (latossolos). Ante o mosaico morfodinâmico, a elevada amplitude altimétrica em reduzida distância espacial sugere a condição de meio instável nos diferentes níveis (fraco, médio e forte) na *Face Oeste*, no qual os usos agropastoris são inibidos e a conversação ambiental necessária para proteção de terrenos e cursos d'água situados à jusante.

Ω *Serra do Espinhaço Meridional – Interflúvio*: o meio morfodinâmico predominante na geofácies *Interflúvio* é o estável fraco, que ocorre em razão das declividades plana e suave ondulada sobre afloramentos rochosos de Quartzitos ou

neossolos litólicos; a estabilidade em nível médio ocorre em trechos localizados quando associada a solos rejuvenescidos. Meios *intergrades* ocorrem pontualmente e resultam da declividade ondulada e forte ondulada sobre afloramentos rochosos de Quartzitos ou neossolos litólicos.

- Ω *Serra do Espinhaço Meridional – Face Leste*: em condição inversa ao *Interflúvio*, o meio morfodinâmico com ocorrência majoritária na geofácies *Face Leste* é o *intergrade*, que se dá em razão das declividades ondulada e forte ondulada sobre afloramentos rochosos de Quartzitos ou neossolos litólicos ou quartzarênicos. Neste geofácies litologia e cobertura pedológica se distribuem uniformemente, ocorrendo variações apenas na declividade, que condiciona a ocorrência de enclaves de meios estáveis fracos em caso de declividade plana ou suave ondulada, bem como ocorrências pontuais de meios instáveis fracos em declividade montanhosa ou escarpada. Todavia, já na margem direita do Rio Jequitinhonha variações na litologia, com metadiamicctitos, e na cobertura pedológica, com solos envelhecidos (latossolos), resultam respectivamente em ocorrências de meios instáveis e estáveis, ambos em níveis médio e forte.
- Ω A *Serra do Cabral*, enclave metassedimentar no Grupo Bambuí, possui complexidade morfodinâmica semelhante à geofácies *Face Oeste*, porém com contatos diretos mais abruptos entre trechos estáveis e instáveis em níveis fraco e médio. Os Rios Curimataí, a leste e sudeste, e Velhas, a sudoeste e oeste, entalham

seus cursos ladeando a faixa Metadiamicctitos que bordejia a *Serra do Cabral*. Nos trechos próximos ao Rio Curimataí, onde esta faixa é relativamente mais alargada, há instabilidade morfodinâmica em níveis fraco e médio. Avançando da borda para o cume da Serra, ocorrem meios *intergrade* com enclaves instáveis, em maior extensão na face drenada pelo Rio Curimataí, sugerindo o paulatino avanço erosivo de leste para oeste.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A álgebra de mapas com as 3 variáveis (inclinação do relevo, maturidade do solo e grau de coesão das rochas) mostrou resultados modelados mais homogêneos para os geossistemas *Planície do Rio das Velhas* e *Carste de Monjolos*, aliados aos geofácies *Interflúvio* e *Face Leste* do geossistema *Serra do Espinhaço Meridional*, do que para as geofácies *Serra do Espinhaço Meridional – Face Oeste* e geossistema *Serra do Cabral*.

Tomando-se o conjunto integrado das geofácies do geossistema *Serra do Espinhaço Meridional*, o *Interflúvio* se apresenta com morfodinâmica estável fraca, não obstante a localização em cotas altimétricas elevadas, e está sujeito aos avanços remontantes da morfodinâmica das *Faces Oeste e Leste*. Todavia, há diferenças nas morfodinâmicas da *Face Oeste*, mais complexa da área de estudo e aparentemente mais agressiva ao *Interflúvio*, e da *Face Leste*, *intergrade* e menos agressiva ao *Interflúvio*.

REFERÊNCIAS

- ANA-Agência Nacional de Águas. **Shapefile da rede hidrográfica nacional**. 2012. Escala original: 1:1.000.000. Disponível em: <http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home>. Acesso em: jan. de 2016.
- ANDREYCHOUK, V. et al. **Karst in the Earth's Crust: its distribution and principal types**. Poland: University of Silesia/Ukrainian Academy of Sciences/Tavrishesky National University-Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. Tradução: Olga Cruz. **RA' E GA**. Editora UFPR. Curitiba, n. 8, p. 141-152. 2004.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- CODEMIG-Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. **Shapefile da litologia da Carta Topográfica de Diamantina (MG)**. Escala original: 1.100.000. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#downloads-tab>. Acesso em: jan. de 2016.

- COUTO, L.C.O.; TRAVASSOS, L.E.P. De Corinto a Diamantina: morfodinâmica no contato entre a Planície do Rio das Velhas e a Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, v.26, número especial 1, p. 61-76, 2016.
- CPRM-Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Serviço Geológico do Brasil. **Shapefile da litologia da Carta Topográfica de Corinto (MG)**. Escala original: 1.100.000. Disponível em: http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.download.downloadVetoriais?p_webmap=N&p_usua_rio=1. Acesso em: jan. de 2016.
- CREPANI, E. et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- DNIT-Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte. **Shapefile das rodovias nacionais**. 2013. Escala original: 1:1.000.000. Disponível em: <http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/shapefiles>. Acesso em: out. de 2015.
- DPS/UFV-Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. **Shapefile da distribuição dos solos em Minas Gerais**. 2006. Escala original: 1:650.000. Disponível em: http://www.dps.ufv.br/?page_id=742. Acesso em: jan. de 2016.
- DSG-Departamento de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Carta Topográfica Corinto, SE-23-Z-A-II (MI 2422)**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. Escala 1:100.000.
- ESRI-Environmental Systems Research Institute. **ArcGis 10.2**. Software comercial. Disponível no Laboratório de Estudos Ambientais do Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial (PUC-MG). Acesso em: 2015 e 2016.
- GUIMARAES, R.L. **Mapeamento geomorfológico do carste da região de Monjolos, Minas Gerais**. 2012. 157f.. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- GUIMARAES, R.L., TRAVASSOS, L.E.P.; LINKE, V. A Geografia Cultural do carste tradicional carbonático de Monjolos, MG: uma primeira aproximação. In.: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 31, Ponta Grossa (PR). **Anais...** Ponta Grossa: SBE/UEPG, 2011. p. 327-336. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais31cbe/31cbe_327-336.pdf.
- IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Carta Topográfica Diamantina, SE-23-Z-A-III. (MI 2423)**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977. Escala 1:100.000.
- JANSEN, D.C. **Análise ambiental da área de proteção ambiental do Morro da Pedreira e do Parque Nacional da Serra do Cipó para a proteção do patrimônio espeleológico**. 2013. 150f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- JANSEN, D.C. **Análise ambiental para a proteção do patrimônio espeleológico: Área de Proteção Ambiental do Morro da Pedreira e do Parque Nacional da Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil**. Saarbrücken: Novas Edições Acadêmicas, 2015.
- RODRIGUES, B.D. **Identificação e mapeamento das matas secas associadas ao carste carbonático de Santo Hipólito e Monjolos, Minas Gerais**. 2011. 110f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- RODRIGUES, B.D.; TRAVASSOS, L.E.P. Identificação e mapeamento das matas secas associadas ao carste carbonático de Santo Hipólito e Monjolos. **Mercator**, Fortaleza, v.12, n.29, p. 233-256, set./dez. 2013.

TRAVASSOS, L.E.P.; GUIMARÃES, R.L.; VARELA, I.D. Áreas cársticas, cavernas e a Estrada Real. **Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas**, Campinas, v.1, n.2, p. 107-120, 2008. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/ptpc/ptpc_v1_n2_107-120.pdf.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

Fluxo editorial:

Recebido em: 21.01.2017

Aprovado em: 17.03.2017



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp

-
- ¹ Definição das variáveis dos aspectos ambientais, classificação por meio da distinção qualitativa das tipologias de cada variável e, por fim, mensuração das variáveis através de parametrizações das respectivas tipologias.
 - ² Terminologia utilizada por Andreychouk et al. (2009), Guimarães, Travassos e Linke (2011) e por Jansen (2013; 2015)
 - ³ Executada no *software* ArcGis 10.2 através da ferramenta: *ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator*.
 - ⁴ Devido ao fato do artigo focar, especialmente, nos aspectos relativos ao carste e por causa da limitação de páginas pelas normas do periódico, os autores optaram por não apresentar e discutir as informações de um mapa de solos e de uso da terra.

O CARSTE E AS CAVERNAS DE PARIPIRANGA (BA)

THE KARST AND THE CAVES OF PARIPIRANGA (BA)

Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira (1), Thiago dos Santos Gonçalves (2) & Miguel Reis (3)

- (1) Doutor em Geologia, Universidade do Minho; Professor Adjunto do Instituto de Geociências (IGeo) da Universidade Federal da Bahia (UFBA); Pesquisador no Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA), Sócio diretor da TERRAQUATRO Geologia & Meio Ambiente Ltda. Salvador BA.
- (2) Mestre no Programa de Pós Graduação em Geologia do Instituto de Geociências (IGeo) da Universidade Federal da Bahia (UFBA); Pesquisador no Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente (NEHMA). Salvador BA.
- (3) Mestre em Geoquímica e Meio Ambiente, Instituto de Geociências (IGeo) da Universidade Federal da Bahia (UFBA); Coordenador de Meio Ambiente da Cimento Bravo S.A. Salvador BA.

Contatos: ricardo@terraquatro.com.br; thiagogeology2009@yahoo.com.br; miguel.reis@cimentobravo.com.br.

Resumo

Paripiranga é um município situado no nordeste baiano, próximo do limite entre os Estados da Bahia e Sergipe. No local afloram calcários cinzentos, com idades neoproterozóicas e que fazem parte da formação Olhos D'água, uma associação de fácies de ambiente deposicional marinho raso, constituída de metassedimentos carbonáticos. Estas rochas ocorrem no contexto geotectônico da Faixa de Dobramentos Sergipana, marcada por um conjunto de estruturas rúpteis e dúcteis, além de zonas de cisalhamento instaladas neste pacote rochoso. O carste de Paripiranga foi compartimentado, morfologicamente, nos domínios do Platô de Paripiranga, dos Morros e colinas e Rampa de colúvios. Os dois primeiros estão instalados nas rochas carbonáticas da formação Olhos D'Água e o último domínio em um pacote formado, possivelmente no Cenozóico, a partir do intemperismo e erosão das rochas carbonáticas existentes a montante, gerando pacotes colúvio aluvionares acumulados na margem direita da planície do rio Vaza Barris. Conforme dados do Cadastro Nacional de Informação Espeleológicas – CANIE, dentro dos limites municipais estão registradas 82 cavidades naturais subterrâneas, parte delas desenvolvidas nos calcários neoproterozóicos, além de algumas ocorrências registradas em calcários de idades mais recentes. Foram realizadas prospeções espeleológicas, seguidas da espeleotopografia de um total de 32 cavidades naturais subterrâneas inseridas nos limites municipais de Paripiranga. De modo geral, constatou-se que até o momento, a maioria das cavidades encontradas apresenta projeção horizontal inferior a 70 m. Dentre o conjunto mapeado, destacam-se a Gruta do Bom Pastor, a Furna do Fim do Morro do Parafuso, a Caverna da Ponte e a Caverna das Borboletas que apresentam projeção linear superior a 100 m. Os resultados obtidos são aqui apresentados e discutidos, permitindo uma análise do patrimônio espeleológico local e fornecendo subsídios para a sua gestão futura. O trabalho resultou dos estudos ambientais realizados para avaliar os impactos da instalação de uma fábrica de cimento na região.

Palavras-Chave: Carste; Espeleologia; Paripiranga.

Abstract

Paripiranga is a municipality located in northeast Bahia, near the border between the States of Bahia and Sergipe. In the area outcrops gray limestones, with Neoproterozoic ages that are included in the Olhos D'água formation, an association of facies of marine depositional environment, composed of carbonate metasediments. These rocks occur in the geotectonic context of the Sergipe thrust belt, marked by a set of ductile and brittle structures, as well as the shear zones. The karst of Paripiranga was morphologically compartmentalized in the domains of the Plateau of Paripiranga, hills and the colluvial deposits. The first two are installed in the carbonate rocks of the Olhos D'Água formation and the last domain in a package formed, possibly in the Cenozoic, from the weathering and erosion of the upstream carbonaceous rocks, followed by accumulation in the right margin of the Vaza Barris river plain. According to official data, disposed by the brazilian authorities (CANIE), there are 82 natural subterranean cavities in Paripiranga, some of them developed in the rocks of the Olhos D'água formation, in addition to some occurrences found in the more recent limestones. Prospection of caves was carried out, followed by the speleotopography of a total of 32 natural subterranean cavities. In general, it was verified that most of the cavities found have a

horizontal projection of less than 70 m. Among the mapped set, stand out the Bom Pastor cave, the Furna do Fim do Morro do Parafuso, the Ponte cave and the Borboletas cave that present linear projection superior to 100 m. Part of the results obtained are presented and discussed here, allowing an analysis of the local speleological heritage and providing subsidies for its future management. The work resulted from environmental studies conducted to assess the impacts of the installation of a cement facility in the region.

Key-Words: Karst; Speleology; Paripiranga.

1. INTRODUÇÃO

O município de Paripiranga está situado na porção nordeste do Estado da Bahia, próximo da divisa com Sergipe, e faz parte da bacia hidrográfica do rio Vaza Barris. Conforme dados do Cadastro Nacional de Informação Espeleológicas – CANIE, dentro dos limites municipais foram registradas 82 cavidades naturais subterrâneas. Estas cavidades estão instaladas nas rochas carbonáticas da formação olhos D'Água, que são cortadas por zonas de cisalhamento transpressionais, com vergência para sudoeste, e planos de falha subverticais, no domínio orogênico da faixa de dobramentos sergipana.

A formação Olhos D'Água consiste em metassedimentos carbonáticos, com idade neoproterozóica, incluídos no Grupo Vaza Barris e que representa uma associação de fácies indicativa de um sistema deposicional marinho raso. Estas rochas estão depositadas sobre metassedimentos siliciclásticos da formação Capitão-Palestina, que tem uma associação de fácies característica de ambiente marinho profundo, e sotoposta à formação Frei Paulo-Ribeirópolis, que consiste em metassiltitos laminados e metarritimitos carbonáticos.

Em função da presença marcante de estruturas disruptivas, com atitudes subverticais, formadas na colisão entre o maciço Pernambuco – Alagoas e o cráton do São Francisco, durante o evento brasileiro, ocorrido no Proterozóico superior, há, aproximadamente, 600 Ma atrás, a maior parte das cavidades encontradas no município apresentam desenvolvimento preferencialmente vertical, sendo qualificadas, em sua maioria, como abismos.

As cavidades estão distribuídas em três domínios geomorfológicos distintos. Na área do Platô de Paripiranga se concentra a maior diversidade de geformas cársticas. Entretanto, consistem em feições discretas, sem expressão na imagem de satélite e que, mesmo em campo, se encontram de maneira difusa. Por outro lado, o maior número de cavidades naturais subterrâneas é registrado no domínio dos Morros e colinas, ficando concentradas na porção centro Leste deste compartimento, em uma lente de metacalcário cinzento. No domínio das Rampa de colúvios foi

também registrada a presença de cavernas, desenvolvidas em tufas calcárias e brechas carbonáticas.

De um modo geral, o patrimônio espeleológico nesta região, apesar de apresentar um número representativo de cavidades mapeadas, ainda é carente de estudos evolutivos, com datações isotópicas e de ações sistemáticas de conservação. Ainda assim, o município aparece em posição de destaque no cenário espeleológico baiano, ocupando a quarta posição dentre os municípios com maior número de cavidades registradas, conforme consulta realizada em Nov/2016 no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE.

Os dados espeleométricos obtidos para um conjunto de cavernas mapeadas no carste Paripiranga indicam que as cavernas da Gruta do Bom Pastor e a Furna do Fim do Morro do Parafuso se destacam neste conjunto, sendo enquadradas na categoria de máxima relevância, conforme critérios estabelecidos na Instrução Normativa – IN no. 02, do Ministério do Meio Ambiente – MMA. Serão aqui apresentados os discutidos os resultados obtidos em trabalhos de prospecção e mapeamento de cavidades naturais subterrâneas, realizado em Paripiranga, por ocasião dos estudos realizados para o licenciamento de uma fábrica de cimentos que será instalada no município.

2. MÉTODOS E TÉCNICAS

Para a realização dos levantamentos espeleológicos no município de Paripiranga foram empregados os métodos e as técnicas apresentadas e comentadas a seguir:

Interpretação de imagens de satélite e mapas topográficos com a finalidade de identificar, caracterizar e interpretar indícios espeleológicos e/ou feições cársticas, rede hidrográfica, divisores de águas, padrões estruturais e geomorfológicos, contextos geológicos, além de se verificar estradas e caminhos existentes na região. Em todo o processo realizado, utilizaram-se ferramentas de geoprocessamento com integração de mapas geológicos, geomorfológicos, topográficos e imagens de satélite.

A partir dos materiais cartográficos levantados, foram elaborados um Modelo Digital de Elevação – MDE e um mapa de sombreamento, que foram analisados em conjunto com o mapa geológico da área, permitindo a identificação das áreas com alto, médio e baixo potencial espeleológico. As áreas de alto potencial consistem nos locais com ocorrência de rochas carbonáticas e que apresentam feições cársticas, tais como alinhamento de dolinas, sumidouros, ressurgências, lapiás e/ou paredões escarpados.

Uma vez identificadas as áreas com maior potencial de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas foi realizada a prospecção em campo e feito o levantamento *in loco* das feições cársticas. Todas as ocorrências foram registradas em campo com Dispositivo de GPS e descritas através de ficha cadastral proposta pela FEAM (2005). Foram realizados caminhamentos de malha fechada dentro da Área Diretamente Afetada – ADA do empreendimento a ser instalado no município e nas áreas com potencial alto e médio de ocorrências cársticas. Na Área de Influência Direta – AID e áreas com baixo potencial espeleológico foram realizadas e caminhamento de malha aberta.

Depois da identificação das cavidades em campo, foram mapeadas todas aquelas que estavam situadas na AID. Os mapas foram elaborados utilizando-se de bússola e clinômetro da SUNTON e trena digital. Considerando as normas e convenções espeleométricas da *British Cave Research Association* - BCRA, os mapas espeleométricos tiveram precisão mínima 4C.

Paralelamente, foi também consultado o Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, disponível na página de Internet do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – CECAV, com o objetivo de conhecer a base de dados disponível para a região estudada.

Foram também feitos levantamentos bioespeleológicos, que, na fase de trabalhos de gabinete, permitiram a definição do grau de relevância das cavidades encontradas, considerando os critérios estabelecidos na Instrução Normativa - IN n.º. 02, publicada em 20/Ago/2009, pelo MMA. Conforme estabelecido nesta IN a valoração das cavernas inclui atributos relacionados com os meios físico, biótico e sócio econômico. Sendo assim, esta valoração foi realizada de maneira integrada com as demais equipes. Contudo, não serão aqui apresentados dados relativos à bioespeleologia ou valoração das cavidades.

Considerando o que está estabelecido no artigo 14, parágrafos 1º e 2º da IN no. 02, publicada

em 20/Ago/2009, pelo MMA, o enfoque regional levou em consideração a área de ocorrência da formação Olhos D'Água e o enfoque local levou em consideração as unidades geomorfológicas definidas no mapa geomorfológico elaborado no presente estudo, a partir dos levantamentos de campo e interpretação de imagens de satélite.

3. CONTEXTO AMBIENTAL DO CARSTE DE PARIPIRANGA

Na figura 1 apresenta-se as áreas de ocorrência das rochas carbonáticas no Estado da Bahia, onde estão situados os principais terrenos cársticos do Estado. Conforme registrado nesta figura, observa-se que, em comparação com os demais terrenos desta natureza, o carste de Paripiranga apresenta uma pequena expressão área. Contudo, a despeito da sua área limitada, o município consiste apresenta um número expressivo de cavidades registradas no CANIE, com um total de 82 cavidades cadastradas até Nov/2016.

Do ponto de vista geológico, o município de Paripiranga está instalado sobre rochas metassedimentares do domínio orogênico denominado faixa de dobramentos sergipana (SILVA FILHO et al., 1977). Segundo Almeida (1977) *apud* Brito Neves et al. (2000), este orógeno formou-se em decorrência da colisão entre o maciço Pernambuco – Alagoas e o cráton do São Francisco, durante o evento brasileiro ocorrido há, aproximadamente, 600 Ma. A Faixa Sergipana pode ser subdivida em seis domínios litotectônicos, denominados de Sul para Norte por: Estância, Vaza Barris, Macururé, Marancó, Poço Redondo e Canidé (SILVA FILHO et al., 1977; DAVISON e SANTOS, 1989; SANTOS et al., 1998; D'EL-REY SILVA 1999; OLIVEIRA et al., 2010). Estes domínios apresentam características estruturais, litoestratigráficas e metamórficas diferentes, no entanto, eles coincidem na vergência que ocorre para Sudoeste.

O contexto ambiental carste estudado se insere no domínio Vaza Barris, no âmbito da área de ocorrência da formação Olhos D'Água. Neste domínio, conforme literatura geológica consultada (HUMPHREY & ALLARD, 1969; SILVA FILHO et al., 1979; D'EL-REY SILVA, 1995, 1999, SIAL et al., 2010), o embasamento cristalino é representado pelos domos gnáissicos-migmatíticos de Itabaiana e Simão Dias e tem idade arqueana ou paleoproterozóica. Na figura 2 apresenta-se um Mapa Geológico da área, adaptado a partir da literatura consultada.

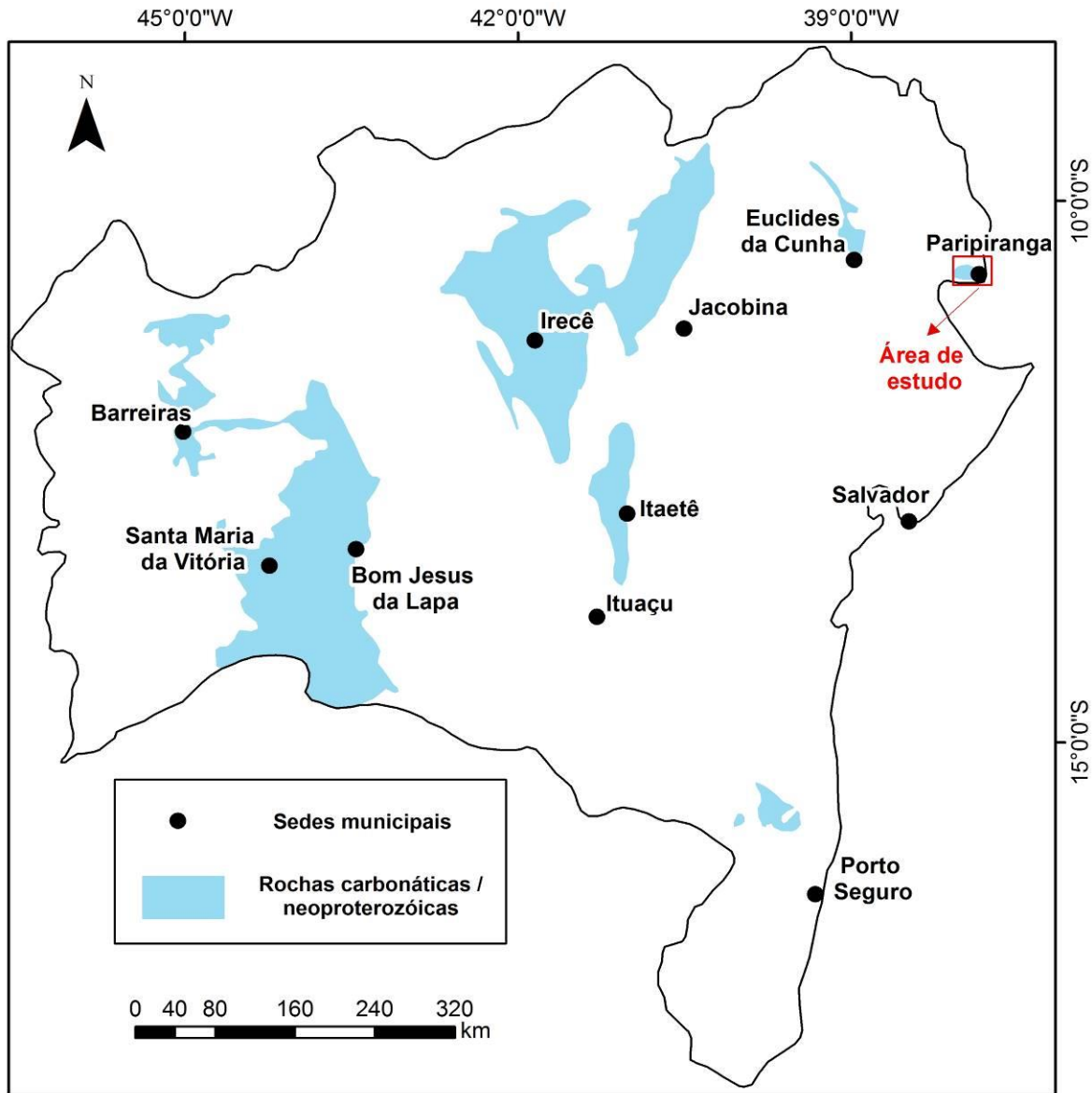


Figura 1: Distribuição das rochas carbonáticas, com idades proterozóicas, no Estado da Bahia e localização da área estudada.

As seqüências metassedimentares neoproterozóicas estão divididas, da base para o topo, nos grupos Miaba e Vaza Barris). Oliveira et al. (2010), divide o Grupo Miaba nas seguintes formações: Itabaiana, Jacarecica / Ribeirópolis e Jacoca; e o Grupo Vaza Barris nas Formações Capitão – Palestina, Olhos d’Água e Frei Paulo – Ribeirópolis, tendo como base idades U – Pb, obtidas em zircão detritífico, e espessuras variando de 2 a 4 km.

Uhlein et al. (2011) caracteriza o domínio Vaza Barris, da base para o topo, como:

Grupo Miaba

Ω Formação Itabaiana- Representa a base do Grupo Miaba com espessuras variando de 20 até 600

metros. É constituída por quartzitos arcossianos de granulometria média a grossa, com estratificações cruzadas, onde são raras as intercalações com metapelitos. A associação dos fácies citados indicam uma sedimentação em sistema fluvial entrelaçado;

Ω Formações Jacarecica e Jacoca – Apresentam espessuras variando de 200 – 400 metros, compostas por metadiamicitios, metagrauvaca, filitos e carbonatos. Esta faciologia é indicativa de um ambiente glacial para esta formação.

Grupo Vaza Barris

Ω Formação Capitão - Corresponde a unidade basal do Grupo Vaza Barris, é constituído por metadiamicitito, metapelito, metarenito

arcosiano e metagrauvaca. Apresenta espessuras variando entre 1.000 e 1.500 metros. A associação de fácies indica um sistema deposicional marinho profundo do tipo leque submarino

Ω Formação Olhos D'Água – Está sobreposta à formação Capitão-Palestina através de contatos erosivo e por falha. É constituída por intercalações de metacalcarenito médio a fino, calcítico, maciço, de coloração cinza azulada, e metacalcilutilo, com laminação plano-paralela bem evidente. A associação de fácies indica um sistema deposicional marinho raso.

Ω Formação Frei Paulo-Ribeirópolis- Sobrepõe os calcários da formação Olhos D'Água, apresentando variação de litofácies, onde há um predomínio de metassiltitos laminados, carbonáticos intercalados com metarritimitos. Diante da associação de fácies representa um sistema deposicional marinho raso.

Segundo D'el Rey Silva (1995), o domínio Vaza-Barris é estruturado sob um sistema de *fold-and-thrust belt*, representado pelas foliações S1 e S2, onde a segunda é predominante e é definida como a principal foliação plano axial destes dobramentos. O contato entre os domínios tem como marcadores

principais, as estruturas do tipo: zonas de cisalhamento transpressionais, de caráter predominantemente sinistral e vergência para sudoeste.

No que se refere aos recursos hídricos, o carste de Paripiranga encontra-se completamente inserido na bacia hidrográfica do rio Vaza Barris, que é constituída por um sistema de drenagens intermitentes, com geometria subparalela e, em determinados locais, geometria poligonal. Este sistema de drenagens apresenta um *trend* preferencial Nordeste – Sudoeste, além de um *trend* subordinado com orientação Leste-Oeste. Estas orientações preferenciais refletem um controle estrutural das drenagens.

Em relação à hidrogeologia, a área apresenta dois domínios aquíferos principais, quais sejam: a) aquíferos cársticos - ocupam cerca de 97% da área estudada e estão associados à área de ocorrência dos metacarbonatos da formação Olhos D'Água e b) aquíferos fissurais - ocupam os cerca de 3% restantes da área estudada e estão associados aos demais pacotes metassedimentares que compõem o Grupo Vaza Barris.

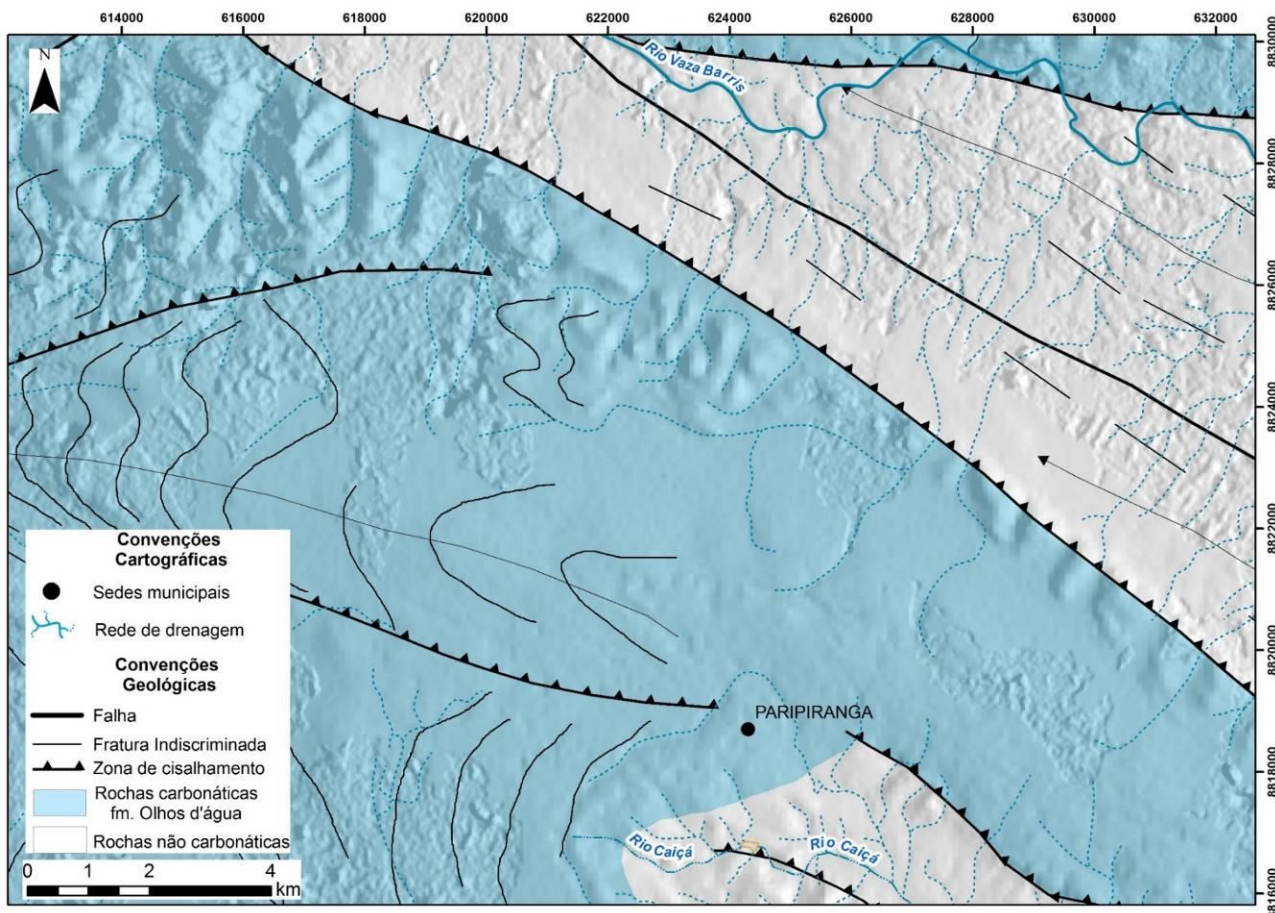


Figura 2: Mapa Geológico do carste de Paripiranga. Elaborado a partir de CPRM (1977).

4. GEOMORFOLOGIA CÁRSTICA

No intuito de compreender o relevo cárstico da área de estudo foi elaborado um mapa geomorfológico, que apresenta a compartimentação observada em campo para as formas e domínios de relevo (figura 3). No contexto local da área de estudo, foram definidas quatro unidades geomorfológicas, que são descritas a seguir:

Ω **Platô de Paripiranga** – superfície aplainada, com altitude máxima de 419 m, desenvolvida sobre metacalcários cinzentos (figura 4 A e B) que ora se apresentam maciços e ora se apresentam dobrados, exibindo dobras abertas e com dimensões métricas. Nesta unidade se concentram as principais feições cársticas encontradas na região, manifestadas na forma de dolinas, lapias, bacias poligonais, cavernas e abismos. As cavernas ocorrem, preferencialmente, na base de paredões escarpados, exibindo afloramentos rochosos, como é o caso das cavernas da Presa I e II e caverna do Encanto. Já os abismos ocorrem em ondulações da superfície aplainada, como foi observado no abismo do Márcio, Fenda da Costura e abismo Entupido.

Ω **Morros e colinas** - superfície ondulada, constituída de morros com vertentes côncavas, de contorno convexo, e altitudes máximas de até 430 m, cujo substrato consiste em filito carbonático com cores variando entre ocre, cinza esverdeado ou arroxeados (cores variegadas), que se apresentam intensamente cisalhados (figura 4 C e D). Neste domínio podem também ocorrer os metacalcários cinzentos, que estão em contato tectônico com o filito carbonático. Em um dos pontos onde este contato foi observado constatou-se que trata-se de uma zona de cisalhamento dextral, com atitude N145°/40°NE. Consiste na zona de relevo mais movimentado, com morros e colinas. Alguns morros chegam a apresentar formato ligeiramente cônico, que lembra um cone cárstico. Apesar da presença de rochas carbonáticas neste domínio, não há uma ocorrência expressiva de feições cársticas no mesmo. Todavia, no local conhecido como Morro do Parafuso, situado na porção centro Leste da área estudada, constatou-se a presença de uma lente de metacalcário cinzento, onde se registra a ocorrência de um número expressivo de cavidades, representando a zona de maior adensamento na ocorrência de cavernas e abismos em toda a área estudada.

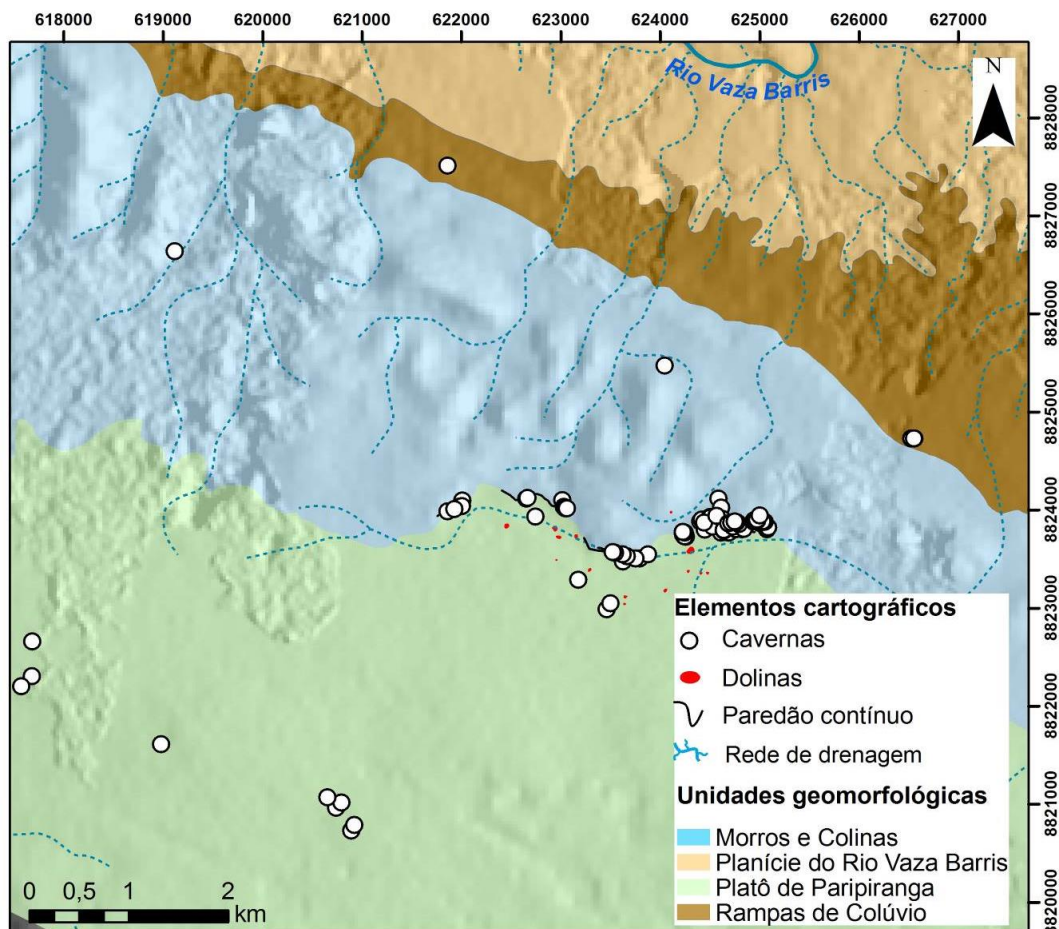


Figura 3: Mapa Geomorfológico do carste de Paripiranga.



A



B



C



D



E



F



G



H

Figura 4: **A** – Aspecto geral da superfície do Platô de Paripiranga. **B** – Detalhe de pavimento rochoso de metacalcário cinzento no Platô de Paripiranga. **C**- Aspecto geral da superfície ondulada da unidade dos Morros e colinas. **D** – Detalhe do substrato rochoso de filito carbonático na unidade dos Morros e colinas. **E** – Aspecto de uma vertente escarpada, na unidade das Rampa de colúvios, onde está situada a caverna da Salamanta. **F**- Esta vertente, na unidade das Rampa de colúvios, é sustentada por Tufas carbonáticas. **G** – Aspecto geral da Planície do rio Vaza Barris. **H** – Leito do rio Vaza Barris, em momento de cheia (Nov/2014), ilustrando o entalhamento vertical do vale deste rio.

Ω **Rampa de colúvios** – superfície com ondulações suaves, com altitudes de até 262 m, cujo substrato é constituído por material transportado, resultante da erosão e desmonte dos relevos de montante, apresentando naturezas distintas, a saber: colúvios - material areno argiloso, podendo conter clastos, nas frações calhau e blocos, ambos de calcário cinzento, além de tufas calcárias – rochas constituídas de calcita secundária, com estruturas de bioturbação e quantidade expressiva de folhas e materiais de origem vegetal fossilizados. Em muitos locais este pacote rochoso sustenta uma escarpa, podendo apresentar cavernas, como é o caso da caverna da Salamanta (figura 4 E e F).

Ω **Planície do rio Vaza Barris** – superfície com caimento suave (gradiente $i=0,0514$) em direção à calha do rio Vaza Barris. O leito deste rio, com elevação de 123 m, está instalado em um corte desta superfície, com um desnível de 25m (figura 4 G e H). Na planície predomina um relevo suavemente ondulado, com substrato constituído de filito cinzento, sobre o qual, por vezes, ocorre uma cobertura sedimentar detrítica, com espessura inferior a 5 m. Neste domínio não foram encontradas cavidades ou demais geoformas cársticas.

No carste de Paripiranga constatou-se que as geoformas cársticas apresentam-se de maneira discreta e dispersa, ocorrendo em maior número e

variedade no domínio do Platô de Paripiranga, onde foi observada a presença de dolinas, lajedos e paredes rochosos, que marcam a separação deste domínio com o domínio dos Morros e colinas. Neste último domínio, para além dos abismos e cavernas, foram encontradas lapiás de maneira localizada.

Na figura 5 apresenta-se uma seção geológico geomorfológica esquemática, onde se pode observar um corte com orientação SW/NE, com modelo conceitual do relevo cárstico na área de estudo. Este modelo é representativo do aspecto e das relações existentes entre as unidades de relevo mapeadas, o substrato geológico e a superfície piezométrica.

Observa-se que o carste de Paripiranga está dividido, na área mapeada, em três domínios geomorfológicos distintos, quais sejam: Platô de Paripiranga, Morros e Colinas e Rampas de Colúvio (figura 5). Na área do Platô de Paripiranga se concentra a maior diversidade de geoformas cársticas. Entretanto, consistem em feições discretas, sem expressão na imagem de satélite e que, mesmo em campo, se encontram de maneira dispersa. Por outro lado, o maior número de cavidades naturais subterrâneas é registrado no domínio dos Morros e colinas. Estas cavidades se concentram em uma área situada na porção centro Leste da área mapeada, em uma lente de metcalcário cinzento, inserida neste domínio geomorfológico. No domínio das Rampa de colúvios foi também registrada a presença de cavernas, porém em número bem inferior do que o que é registrado nos demais domínios cársticos.

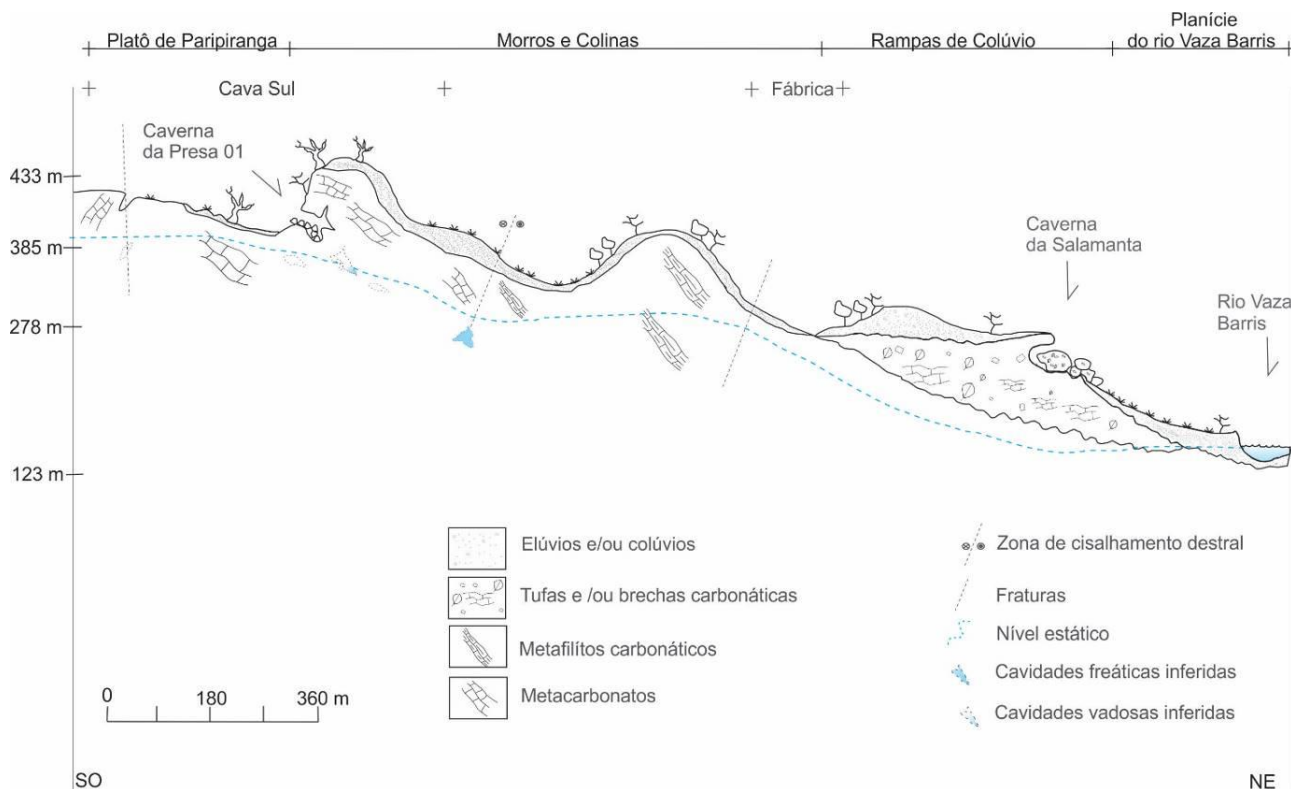


Figura 5: Modelo geológico conceitual do carste de Paripiranga.

5. ESPELEOLOGIA

De acordo com consulta realizada, em Jan/2017, no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas – CANIE, disponível na página de Internet do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECAV (<http://www.icmbio.gov.br/cecav/>), estão cadastradas em Paripiranga um total de 82 cavernas naturais subterrâneas. Este montante coloca o município na quarta colocação, em número de

cavidades cadastradas no Estado da Bahia, atrás apenas de São Desidério, Coribe e Iraquara. Deste modo, pode-se dizer que o município é detentor de uma posição de destaque no cenário espeleológico baiano, com um número expressivo de cavernas cadastradas.

Dentre este conjunto de cavernas conhecidas no município, serão aqui analisadas em detalhe 32 cavernas naturais subterrâneas que são listadas na tabela 1, juntamente com os dados espeleométricos.

Tabela 1: Dados espeleométricos das cavernas naturais subterrâneas de Paripiranga.

Cavernas	Domínio	Projeção Horizontal	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Caverna do Escondido	Platô de Paripiranga	3,86	3,14	4,84	7,16
Fenda da Costura	Platô de Paripiranga	13,37	12,30	19,52	71,77
Abismo Entupido	Platô de Paripiranga	26,24	19,31	27,46	78,63
Fenda do Marcio	Platô de Paripiranga	4,49	2,92	4,41	16,14
Caverna do Alto do Morro da Candeia	Platô de Paripiranga	11,07	7,81	20,23	39,18
Gruta da Presa II	Platô de Paripiranga	21,05	6,71	58,08	61,56
Caverna da Presa I	Platô de Paripiranga	23,09	5,42	100,90	206,49
Caverna das Moscas	Platô de Paripiranga	21,18	8,72	70,09	176,98
Caverna do Descanso	Platô de Paripiranga	24,98	0,00	44,77	79,47
Abismo do Redemoinho	Platô de Paripiranga	6,30	4,71	7,93	16,70
Abismo das Orquideas	Platô de Paripiranga	32,46	21,42	20,91	143,44
Abismo dos Morcegos	Platô de Paripiranga	67,86	23,01	77,58	403,42
Abismo dos Espinhos	Platô de Paripiranga	39,30	24,46	51,32	135,14
Gruta do Lola	Platô de Paripiranga	26,68	11,51	304,16	1.765,04
Furna do Fim do Morro do Parafuso	Platô de Paripiranga	172,08	12,14	577,15	3.316,85
Gruta do Bom Pastor	Platô de Paripiranga	226,20	64,90	1.379,40	3.193,84
Caverna da Ponte	Platô de Paripiranga	115,32	13,85	249,57	1.473,24
Caverna do Zumbi	Platô de Paripiranga	30,88	6,74	57,41	239,74
Caverna do Walmir	Platô de Paripiranga	9,39	7,31	19,65	19,65
Abismo da Aroeira	Morros e Colinas	23,21	15,37	67,89	1.569,28
Caverna do Urubu	Morros e Colinas	16,49	1,52	39,85	71,53
Caverna do Aperto	Morros e Colinas	12,91	7,67	15,29	71,94
Caverna Amor de Barrigudas	Morros e Colinas	63,73	17,80	56,16	104,40
Caverna do Portal	Morros e Colinas	22,34	7,74	11,03	
Caverna das Borboletas	Morros e Colinas	120,76	13,85	122,22	739,20
Caverna da Brilhantina	Morros e Colinas	17,38	6,18	13,78	43,11
Abismo da Macambira	Morros e Colinas	17,93	15,48	6,36	
Caverna do Urutau	Morros e Colinas	46,39	11,81	82,28	273,05
Caverna do Encanto	Morros e Colinas	56,93	5,96	172,99	227,19
Caverna do Sisal Brabo	Morros e Colinas	9,39	7,31	19,65	19,91
Caverna / Toca dos Morcegos	Morros e Colinas	38,42	10,54	128,68	197,93
Caverna da Fenda	Morros e Colinas	3,72	3,01	1,97	10,05
Contexto regional		Projeção Horizontal	Desnível (m)	Área (m²)	Volume (m³)
Media		41,42	11,89	119,80	492,40
desvio padrão		50,47	11,51	256,83	886,08
Contexto local		Projeção Horizontal	Desnível (m)	Área (m²)	Volume (m³)
Platô de Paripiranga					
Média		48,13	13,84	170,87	634,71
Desvio Padrão		61,53	14,64	334,28	1.073,56
Morros e colinas					
Média		37,16	10,10	61,35	302,51
Desvio padrão		31,81	4,85	55,06	468,12

As cavidades listadas foram selecionadas por estarem situadas dentro da ADA ou AID do empreendimento mineiro industrial, ou ainda por serem representativas do enfoque regional da formação Olhos D'Água.

Pelo que se pode observar na tabela 1, as cavernas da Gruta do Bom Pastor, a Furna do Fim do Morro do Parafuso e Caverna da Ponte se destacam neste conjunto, por serem as cavidades com projeção horizontal (figura 6 A e B). De maneira geral, observa-se que as cavidades naturais subterrâneas, encontradas e mapeadas no âmbito da área de estudo, consistem, em sua maioria, em cavidades com desenvolvimento vertical mais acentuado, de modo que caracterizam-se como abismos, sendo todos desenvolvidos em metacalcários cinzentos. Uma análise estatística destes dados, considerando o enfoque regional, aponta que:

No contexto regional, a projeção horizontal média obtida para o conjunto de cavernas analisadas foi de 41,42 m. O maior valor encontrado para este parâmetro foi registrado na Gruta do Bom Pastor, que apresentou um valor de 226,20 m, enquanto o menor valor foi registrado na Caverna da Fenda, com uma projeção horizontal de 3,72 m.

Ω No que se refere ao desnível, o valor médio encontrado foi de 11,89 m, sendo que o maior desnível foi registrado também na Gruta do Bom Pastor, com um valor de 64,90 m. O menor valor encontrado para este parâmetro foi de 0 m, registrado na caverna do Descanso.

Ω Em relação à área das cavernas mapeadas, obteve-se um valor médio de 119,80 m², sendo que a caverna que apresentou a maior área foi, mais uma vez, a Gruta do Bom Pastor com uma área de 1.379,40 m². A caverna da Fenda foi a cavidade com menor área mapeada, onde foi

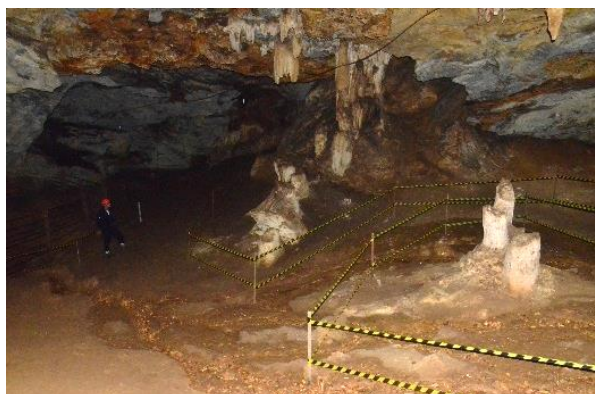
registrado um valor de 1,97 m² para este parâmetro.

Ω O volume médio encontrado foi de 492,40 m³, sendo que o maior volume foi registrado na Caverna do Fim do Morro do Parafuso, com um valor de 3.316,85 m³. Já o menor volume foi registrado na Caverna do Escondido, cujo valor obtido foi de 7,16 m³.

Apesar de, em campo, as cavernas encontradas no carste de Paripiranga aparentarem, de maneira geral, algum controle estrutural, a comparação entre os eixos de desenvolvimento preferencial das cavernas e as medidas de foliação (Sn) e fraturas, levantadas em campo, não confirma esta situação, conforme representado na figura 7.

De acordo com a figura 7, observa-se que a maioria dos eixos de desenvolvimento preferencial das cavernas está compreendido entre as direções N30–50W, enquanto o maior número de foliações medidos em campo se concentra entre as direções N80-90W e as fraturas entre as direções N0-20E, N40-50E e N40-70W. Estes dados apontam que o conjunto secundário de fraturas N40-70W e a família secundária de foliações, com orientação N50-70W, condicionam os eixos de desenvolvimento preferencial das cavernas. Deste modo, percebe-se que as estruturas mais proeminentes em campo, não são as que exercem maior influência no desenvolvimento das cavernas.

Todavia, tendo em vista que o contexto geológico da área está associado à Faixa Sergipana, instalada no limite NE do craton do São Francisco, que apresenta muitas estruturas verticalizadas ou com mergulhos acentuados, entende-se que estes mergulhos acentuados ou verticais exerceram influência no desenvolvimento das rotas de fluxo subterrâneo, resultando na elevada quantidade de abismos encontrados na área estudada.



A



B

Figuras 6: A – Gruta do Bom Pastor, cavidade com maior projeção horizontal e visitação mais intensiva na área estudada. B – Furna do Fim do Morro do Parafuso, cavidade com a segunda maior projeção horizontal na área e morfologia distinta.

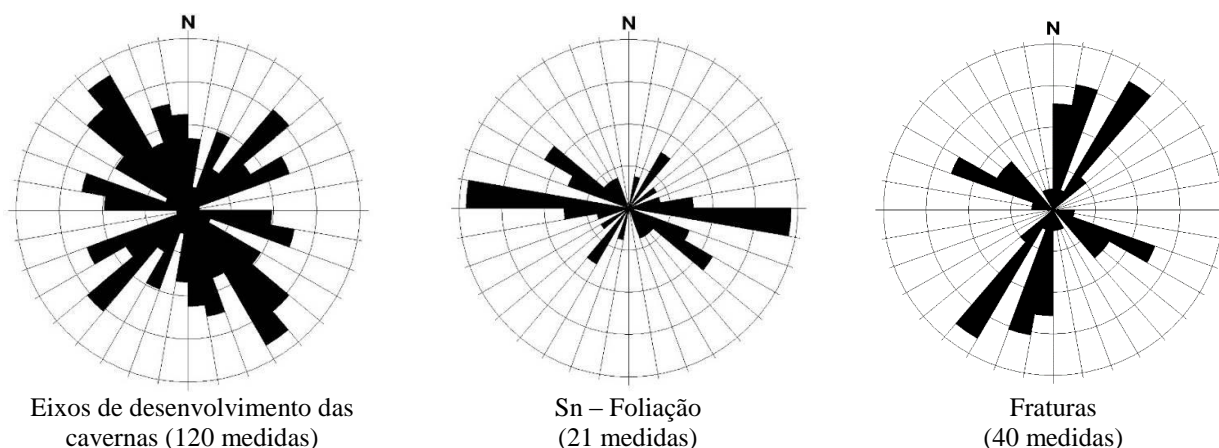


Figura 7: Elementos estruturais das rochas e cavidades naturais subterrâneas em Paripiranga.

Outro aspecto que chama a atenção nas cavernas analisadas na área é que as mesmas apresentam pequenas dimensões, de modo que mais da metade das cavidades têm projeção horizontal inferior a 30 m e área inferior a 60 m². Em uma outra perspectiva, observa-se que dentre as cavernas analisadas, apenas oito delas apresentaram valores superiores ao valor médio obtido para a projeção horizontal (41,42 m) e apenas seis cavidades apresentaram um valor superior à média encontrada para a área (119,80 m²). Ou seja, a maior parte do conjunto de cavernas analisadas apresenta projeção horizontal e área inferiores aos valores médios encontrados para estes parâmetros espeleométricos.

Nenhuma das cavernas estudadas apresenta conexão com o nível freático atual e os cortes transversais de muitas das cavernas mapeadas apresentam seções de entalhamento vadoso preservadas, sem alterações por abatimento. Considerando que apenas cinco cavernas apresentaram valores para o volume, superiores ao volume médio encontrado, percebe-se que a maior parte das cavernas apresenta volumes pouco expressivos.

No intuito de avaliar a presença de cavidades oclusas, que possam estar presentes no meio subterrâneo foi realizado um estudo geofísico e a análise de 555 sondagens geológicas realizadas na etapa da pesquisa mineral. O estudo geofísico não apresentou resultados conclusivos. Entretanto, a análise das sondagens realizadas indicou que na maioria deles houve 100% de recuperação dos testemunhos e não houve registro de vazios no meio subterrâneo. Apenas em três furos foram identificados intervalos com fendas ou vazios, com espessura inferior a 1,5 m.

6. IMPRESSÕES SOBRE A EVOLUÇÃO MORFOLÓGICA DO CARSTE DE PARIPIRANGA

Uma análise preliminar do carste de Paripiranga sugere que o domínio do Platô de Paripiranga foi alvo de uma carstificação pretérita mais intensa, durante um período de clima mais úmido, tendo desenvolvido um sistema de condutos subterrâneos que foi, posteriormente, colapsado, com o rebaixamento do nível d'água. Considerando a posição deste platô, em relação à zona de Morros e colinas e ao nível de base regional (rio Vaza Barris), entende-se que o mesmo consistia na zona de recarga, o que contribuiu para a carstificação mais intensa naquele setor.

No domínio dos Morros e colinas, para além da carstificação nas lentes de metacalcários, atuaram também processos fluviais na evolução das vertentes, nas porções mais argilosas do pacote, que se apresentam como filitos, as vezes carbonáticos. Considerando a menor dimensão destas lentes de metacalcários, em relação à ocorrência mais extensiva destas rochas no Platô de Paripiranga, acredita-se que a carstificação se deu de maneira mais localizada, sem que fosse instalada uma trama mais extensiva de condutos.

Todo o material carbonático, gerado com a dissecação do relevo de montante, se acumulou na porção mais inferior, próximo do nível de base regional e deu origem às tufas e brechas carbonáticas, encontrados no domínio das Rampa de colúvios. A abundância de material vegetal e bioturbações no substrato geológico deste domínio é sugestivo de condições mais úmidas, corroborando com a hipótese de um período mais úmido no momento do entalhamento do carste de Paripiranga. Wang *et al.* (2004) comentam da existência de um período mais úmido no nordeste brasileiro, datado em 210.000 anos (Pleistoceno) através do método

U/Th e utilizando-se de espeleotemas coletados nas cavernas: Toca da Boa Vista, Toca da Barriguda e Gruta dos Brejões, todas elas situadas no Estado da Bahia e com latitudes bem próximas das que são registradas na área aqui estudada, além de travertinos, coletados nos vales dos rios Salitre e Jacaré, também no Estado da Bahia.

Deste modo, percebe-se que o elevado significado paleoambiental das tufas e brechas carbonáticas, encontrados no domínio das Rampa de colúvios. Estudos futuros nestes materiais deverão elucidar etapas importantes sobre a iniciação e o desenvolvimento morfológico do sistema cárstico aqui descrito. Ademais, a datação de material fossilífero, encontrado em algumas das cavernas mapeadas, somados com outros métodos adequados de análise paleoambiental, poderão confirmar o modelo evolutivo aqui apresentado para o carste de Paripiranga e elucidar as idades dos processos envolvidos no desenvolvimento deste sistema.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Carste de Paripiranga foi compartimentado, morfológicamente, nos domínios do Platô de Paripiranga, dos Morros e colinas e Rampa de colúvios. Os dois primeiros estão instalados nas rochas carbonáticas da formação Olhos D'Água, de idade neoproterozóica, e o último domínio em um pacote formado, possivelmente no Cenozóico, a partir do intemperismo e erosão das rochas carbonáticas existentes a montante.

A partir dos dados aqui reunidos, entende-se que o Platô de Paripiranga foi formado pelo colapso de uma rede pretérita de cavidades naturais subterrâneas, em função de um rebaixamento do nível d'água e resultando no relevo aplainado, onde as cavidades hoje encontradas são feições reliquias desta rede pretérita de condutos. Sendo assim, atualmente uma nova trama de condutos freáticos está sendo iniciada abaixo do nível freático e condicionada pelos planos de foliação da rocha

carbonática, representando a porosidade secundária característica dos aquíferos cársticos.

A análise de um conjunto de dados geofísicos e de sondagens rotativas não foram indicativos da existência de cavidades com dimensões expressivas na zona vadosa (situada entre a superfície e o nível piezométrico médio – 35 m). Na zona freática (abaixo dos 35 m de profundidade) os dados apontam a presença subordinada de condutos de iniciação, com diâmetro inferior a 2 m e sem expressão lateral.

Na base de dados do CECAV está cadastrado um total de 82 cavidades naturais subterrâneas em Paripiranga. A análise dos diagramas de rosáceas, sugere que as principais estruturas que condicionam o desenvolvimento destas cavidades podem ser os planos de foliação da rocha ou planos de fratura, com orientação N30-50W, ou mesmo planos de fratura subverticais, com orientação N0-20E, N40-50E.

Considerando os trabalhos de espeleotopografia, realizados até o momento, maioria destas cavidades apresenta projeção horizontal inferior a 70 m. Dentre o conjunto de cavidades conhecidas, destacam-se a Gruta do Bom Pastor, a Furna do Fim do Morro do Parafuso, a Caverna da Ponte e a Caverna das Borboletas que apresentam projeção linear superior a 100 m.

Ressalta-se aqui que, apesar do trabalho e empenho de um grupo local de espeleologia, em campo foi verificada a disposição de lixo, de natureza diversificada, em algumas cavidades. Com a implantação prevista de um complexo mineiro industrial para a produção de cimento no município de Paripiranga, está prevista a implantação de um centro de referência ambiental e a realização de atividades de educação ambiental, que poderão contribuir para a conscientização da população local da importância das cavidades naturais subterrâneas ali presente e abrir novas perspectivas para a gestão do patrimônio espeleológico existente no município de Paripiranga.

REFERÊNCIAS

- BRITO-NEVES B.B., SANTOS E.J., VAN SCHMUS W.R., 2000. **Tectonic history of the Borborema province. In: Tectonic Evolution of South América.** Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., Campos, D.A.(Editors). 31st International Geological Congress, 151 – 182 p.
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 1977. **Projeto Baixo São Francisco / Vaza Barris.** Volume 2, escala 1:250.000. Mapa.
- DAVISON I. & SANTOS R. A. 1989. **Tectonic Evolution of the Sergipano Fold Belt, NE Brazil, during the Brasileiro Orogeny.** *Precambrian Research*, 45: 319-342.

- D'EL-REY SILVA L. J. H. & MCCLAY K. R. 1995. **The Southern Part of the Sergipano Belt, NE Brazil: Stratigraphy and Tectonic Implications**. Rev. Bras. Geociências 25: 185-202.
- HUMPHREY F. L. & ALLARD G. O. 1969. **Geologia da área do domo de Itabaiana (SE) e sua relação com a geologia do geossinclinal de Propriá – Um elemento tectônico recém-conhecido no Escudo Brasileiro**. Tradução de MUNNE, A. I., BARÃO, S. C. Rio de Janeiro, PETROBRAS/CENPES, 1969, 157 p. il.: mapa.
- OLIVEIRA E. P., WINDLEY, B.F., ARAÚJO, M.N.C., 2010. **The neoproterozoic sergipano orogenic belt, NE Brazil: a complete plate tectonic cycle in western Gondwana**. Precambrian Research, 181: 64-84.
- SANTOS R. A., MARTINS A. A. M., NEVES J. P., LEAL, R. A. (Org.). 1998. **Geologia e recursos minerais do Estado de Sergipe**. Brasília, CPRM/CODISE, 157 p. 1 mapa, col. Escala 1:250.000 (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB).
- SIAL A.N., GAUCHER C., SILVA FILHO M.A., FERREIRA V.P., PIMENTEL M.M., LACERDA L.D. EMANNOEL V., SILVA FILHO E.V., CEZARIO W. 2010. **C-Sr-isotope and Hg chemostratigraphy of Neoproterozoic cap carbonates of the Sergipano Belt, Northeastern Brazil**. Precambrian Research, 182: 351-372.
- SILVA FILHO M. A., BOMFIM L. F. C., SANTOS R. A., LEAL R. A., SANTANA A. C., BRAZ FILHO P. A. 1977. **Geologia do Geossinclinal Sergipana e do seu embasamento**. Salvador, CPRM, 435 p., Vol. 2 mapa, col. Escala 1:250.000 (Projeto Baixo São Francisco/Vaza Barris).
- ULHEIN, A.; CAXITO, F. A.; SANGLARD, J. C. D.; SUCKAU, G, L. 2011. **Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozóicas da porção norte do craton do São Francisco**. Genomos, UFMG, Belo Horizonte, pag. 8 - 24.
- WANG, X.; AULER, A. EDWARDS, R. L.; CHENG, H; CRISTALLI P. S.; SMART, P.; RICHARDS, D. A. & SHEN, C. C. 2004. **Wet periods in northeastern Brazil over the past 210 kyr linked to distant climate anomalies**. Nature. Vol. 432. P.: 740-743.

Fluxo editorial:

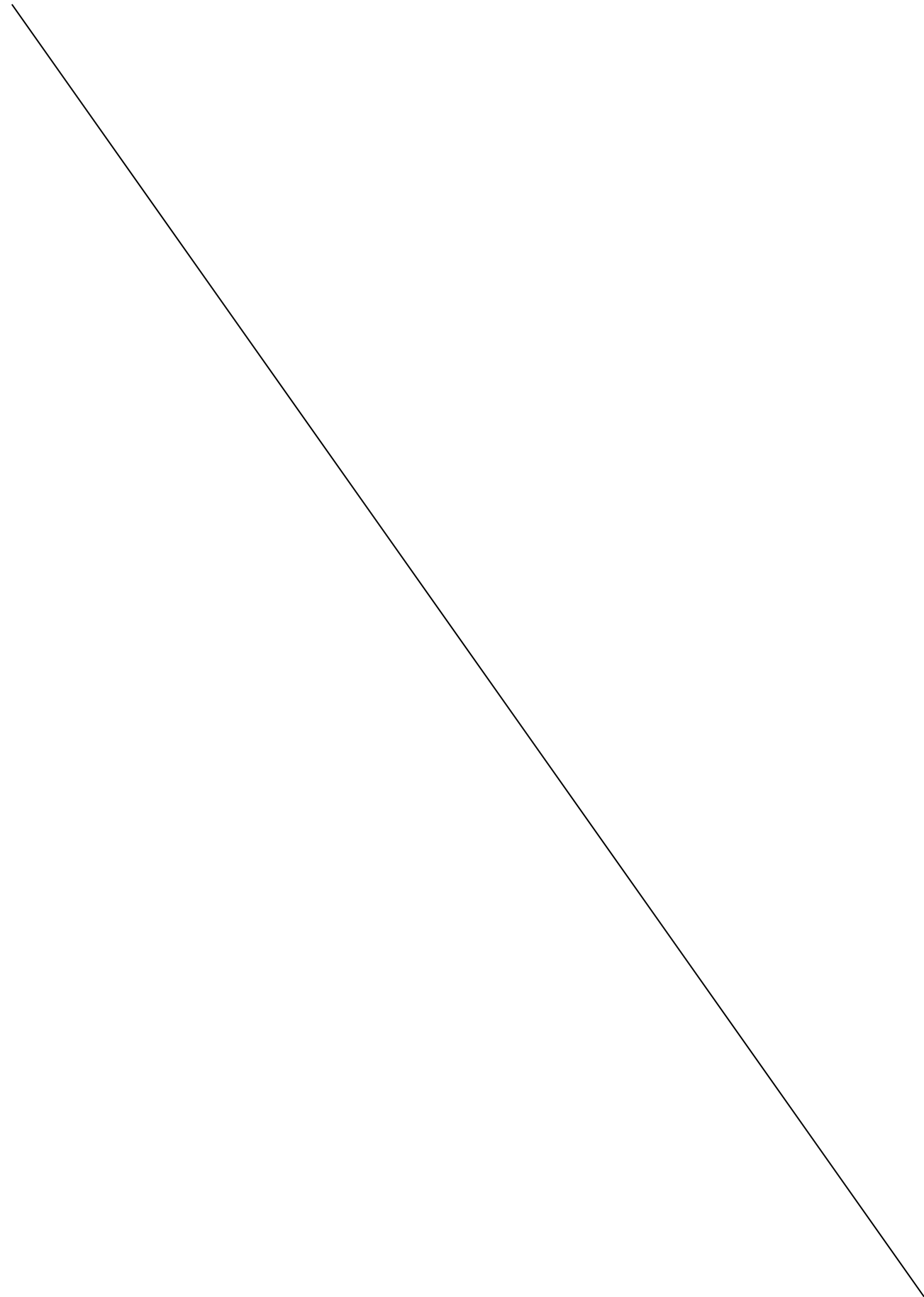
Recebido em: 22.02.2017

Aprovado em: 24.04.2017



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp



CARACTERIZAÇÃO DE CAVIDADES NATURAIS NO PARQUE ESTADUAL DO IBITIPOCA (MINAS GERAIS) POR MEIO DA PESQUISA GEOLÓGICO-GEOFÍSICA

CHARACTERIZATION OF NATURAL CAVITIES IN IBITIPOCA STATE PARK (MINAS GERAIS) BY MEANS OF GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL RESEARCH

Andréa Alves Ferreira (1), Pablo Lopes (2), Marcelo dos Santos Salomão (1), Miguel Angelo Mane (1), Mauro Cesar Geraldês (3) & Heitor Cintra (2)

(1) Departamento de Geologia Aplicada da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (DGAp-FGEL/UERJ), Rio de Janeiro RJ.

(2) Sociedade Carioca de Espeleologia (SPEC), Rio de Janeiro RJ.

(3) Departamento de Geologia Regional e Tectônica da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (DGRG-FGEL/UERJ), Rio de Janeiro RJ.

Contatos: afferreira.andrea@gmail.com; pablo_lopes_914@hotmail.com; salomao.mss@gmail.com.

Resumo

O Parque Estadual do Ibitipoca (PEI), no sudeste do estado de Minas Gerais, possui um dos mais expressivos conjuntos de cavernas em quartzito no mundo, com cerca de 40 grutas mapeadas. Estima-se que, em função de suas características geológicas, há a possibilidade de existirem cavidades ainda desconhecidas no PEI. Neste trabalho, por meio da integração das ciências geológica e geofísica, pôde-se investigar o subsolo da região na busca por cavernas e/ou dutos ainda não identificados. As áreas para a investigação geológico-geofísica foram localizadas próximas à Gruta Jacinto Lage. Recentes estudos topográficos nesta caverna mostram uma rede de dutos aparentemente não contínuos. Nos estudos geofísicos foram utilizados os métodos do Radar de Penetração no Solo (GPR) e Eletroresistividade, com capacidade de penetração do subsolo de até 12 metros. O primeiro método baseia-se na propagação de ondas eletromagnéticas; o segundo, na condutividade/resistividade da corrente elétrica no subsolo. Ambos os métodos mostraram-se eficientes, definindo variações composicionais do quartzito (com mica e granulometria mais fina; sem mica e com grão de quartzo maior) e identificando anomalias interpretadas como cavidades.

Palavras-Chave: Cavernas; Geofísica; Mapeamento; Quartzito.

Abstract

Ibitipoca State Park (ISP), in the southeast of the state of Minas Gerais, has one of the most expressive sets of quartzite caves in the world, with about 40 mapped caves. It is estimated that, due to its geological characteristics, a large number of unmapped cavities may exist at ISP. In this work, by means of the integration of geological and geophysical sciences, one may investigate the underground of the region in the search for caves and/or ducts not identified yet. The areas for geological-geophysical investigation were located near Jacinto Lage Cavern. Recent topographic studies in this cave show a network of apparently non-continuous ducts. In geophysical studies, the methods of the Ground Penetration Radar (GPR) and Electroresistivity were used, with a capacity of penetration of the underground of up to 12 meters. The first method is based on the propagation of electromagnetic waves; the second one, on the conductivity/resistivity of the electric current in the underground. Both methods proved to be efficient, defining compositional variations of quartzite (with mica and finer granulometry; without mica and with larger quartz grain) and identifying anomalies interpreted as cavities.

Key-Words: Caves; Geophysics; Mapping; Quartzite.

1. INTRODUÇÃO

O Parque Estadual do Ibitipoca (PEI) é uma Unidade de Conservação situada no sudeste do estado de Minas Gerais, a 258 km da cidade de Belo Horizonte. Possui uma área de aproximadamente 15 km² distribuídos nos municípios de Lima Duarte,

Bias Fortes e Santa Rita do Ibitipoca. O PEI é integrante da Província Espeleológica do Ibitipoca e possui 42 cavidades naturais (cavernas) e seus condutos, predominantemente em quartzitos (SBE, 2016).

As grutas são formadas pela ação da água e dos ácidos presentes, que atuam como agentes erosivos e provocam a dissolução da sílica existente no quartzito. A ação contínua dos agentes erosivos ocasiona o enfraquecimento das partes mais susceptíveis à solubilidade, gerando o abatimento das camadas de rocha desagregadas, acarretando a expansão das cavidades e a formação de grandes salões (NUMMER, 1991).

Em muitas vezes o mapeamento de cavernas e de seus condutos é dificultado pela inacessibilidade, fazendo-se necessário recorrer a outras tecnologias para a investigação em subsuperfície. O Laboratório de Exploração Mineral da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), em parceria com a Sociedade Carioca de Pesquisas Espeleológicas (SPEC), objetivaram caracterizar possíveis cavidades ainda não identificadas por meio da integração das pesquisas geológica e geofísica. Neste trabalho utilizou-se a Ciência Geofísica por meio dos métodos de investigação Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar - GPR*) e Eletroresistividade. O GPR utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência, que penetram em subsuperfície e identificam materiais com características distintas (condutividade e permeabilidade magnética). O método da Eletroresistividade é uma ferramenta para caracterizar a resistividade elétrica dos materiais, investigando estruturas e fluidos em subsuperfície. As informações provenientes desses métodos foram integradas aos dados geológicos do PEI, contribuindo para o mapeamento de possíveis cavidades naturais.

2. ASPECTOS FISIAGRÁFICOS DO PEI

O Parque Estadual do Ibitipoca está situado na serra homônima, com relevo caracterizado por grotas, escarpas e colinas, e exibe altitudes entre 1200 e 1784 metros (MEDEIROS, 2006). As grotas ocupam cerca de 20% do parque e as escarpas (Figura 1) cobrem 16% da área.

Em relação às características pedológicas, destacam-se latossolos, podzóis e cambissolos (NUMMER et al., 2012), distribuídos por aproximadamente 20% da área, sendo o restante do PEI formado por rochas quartzíticas expostas. A vegetação é constituída predominantemente por cerrados de altitude e campos rupestres (RODELA, 1998). O parque está inserido na região das bacias hidrográficas do Rio Grande e do Rio Paraíba do Sul, cortado pelos Rios do Salto e Vermelho e o Córrego do Monjolinho, formando praias, cachoeiras e piscinas naturais (Figura 2).



Figura 1: Escarpa no Parque Estadual do Ibitipoca.



Figura 2: Piscina natural no Parque Estadual do Ibitipoca.

2.1 Características geológicas

O PEI está inserido no Domínio Tectônico Andrelândia, na zona de interferência entre as Faixas Ribeira e Brasília (TROUW et al., 2000). As rochas da região sofreram uma deformação complexa, registrada na composição mineral, no grau de metamorfismo e nas expressivas estruturas geológicas, como zonas de cisalhamento.

De acordo com Corrêa Neto e Baptista Filho (1997), três fases de deformação afetaram as rochas da região, gerando grandes dobras recumbentes na primeira fase, com eixos E-W; uma reorientação parcial das estruturas anteriores por empurrões na direção SE-NW, além de redobramentos, durante o segundo momento; e, na última etapa, dobras suaves concêntricas com eixos NE-SW.

O Domínio Tectônico Andrelândia exibe um embasamento formado por ortognaisses paleoproterozoicos e cobertura metassedimentar de idade neoproterozoica metamorfisada em baixo a médio grau, denominada de Megassequência Andrelândia (PACIULLO, 1997). Heilbron et al. (2004) descrevem que a Megassequência Andrelândia representa diversas sucessões de rochas sedimentares associadas a rochas metaígneas máficas. As rochas mais características correspondem a quartzito grosso com textura

sacaroidal, quartzito fino micáceo e, com menor frequência, biotita xisto. O quartzito ocorre sob duas formas. A mais comum corresponde a quartzito com textura granular, homogênea e granulometria grosseira. Suas espessuras variam de poucos centímetros a 2 metros. A outra ocorrência é observada intercalada com a primeira, em finas camadas (máximo de 30 centímetros), rica em mica (muscovita), foliação bem definida e com granulometria fina. Estes níveis são mais susceptíveis à erosão, formando "degraus" nos afloramentos (SALOMÃO *et al.*, 2015; Figura 3).

2.2 Espeleogênese

As cavernas ou grutas (do latim *cavus*, buraco) têm definições variadas de acordo com a região ou órgão regulador. O conceito usado pela CPRM (2009) qualifica toda cavidade natural em rocha com dimensões que permitam o acesso a seres humanos, e esclarece que as cavernas podem ser classificadas como abrigo, lapa, fosso e abismo, conforme a sua topografia, comprimento e forma.

No desenvolvimento de cavidades naturais existem fases que envolvem ações pretéritas, como dissolução com águas (frias ou quentes), corrosão, desabamentos ou desmoronamentos (CESAD-UFS, 2012). Segundo Fabri e Augustin (2013) as cavernas mais comuns no mundo se desenvolvem em rochas carbonáticas (muito solúveis), formando os relevos

cársticos – próprios de litologias calcárias. Relatam ainda que as rochas siliciclásticas (elevado percentual de sílica) como o quartzito, não constavam, até recentemente, entre as passíveis de formarem feições cársticas, pois são consideradas pouco solúveis.

O termo Carste surgiu a partir dos estudos de Jovan Cvijić, natural da região de Kras, fronteira entre a Eslovênia e a Itália, e era empregado até meados da década de 1980 para indicar somente feições ou formas concebidas pela dissolução de rochas carbonáticas (BENTO *et al.*, 2015). Nos períodos que antecederam a década de 80, se as litologias não fossem predominantemente calcárias, as feições apesar de possuírem características do carste, eram consideradas pseudocarstes (HARDT *et al.*, 2010). Atualmente o termo é auferido a morfologias típicas do carste em litologias que antes não eram consideradas como base para formas cársticas. Para Hardt *et al.* (2010), caracterizar o carste em função exclusivamente da litologia é arbitrário, e defendem que tal formação deve ser definida nos termos dos processos atuantes, da dissolução, do desenvolvimento das formas de relevo e de drenagens características do carste. Segundo Bento *et al.* (2015), em algumas formações do PEI onde a litologia é mais propensa à carstificação, o padrão é denominado de carste quartzítico ou carste em quartzitos.

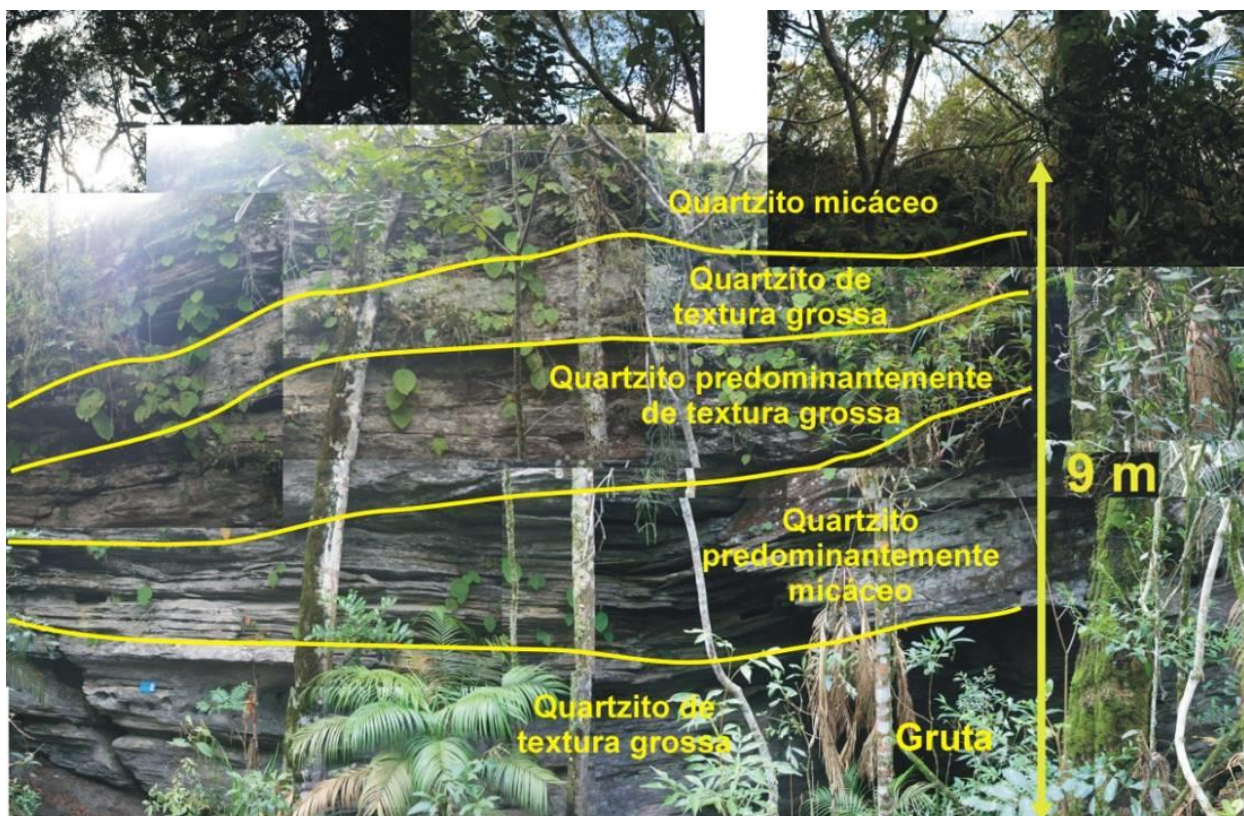


Figura 3 – Intercalação dos níveis de quartzito no Parque Estadual de Ibitipoca.

Nummer (1991) descreve o sistema que compõe o Distrito Espeleológico da Serra do Ibitipoca com os seguintes atributos:

- i) Dissolução regulada pelas estruturas de acamamento e falhamento;
- ii) Predomínio de desmoronamentos em relação à dissolução;
- iii) Existência de grandes salões de abatimento;
- iv) Escoamento subterrâneo sazonal;
- v) Espeleotemas de sílica (SiO₂) pouco desenvolvidos (em escala centimétrica);
- vi) Sedimentação de materiais epígenos (e.g., situados acima) ou hipógenos (e.g., situados abaixo) no piso das grutas;
- vii) Áreas com erosão acentuada pelo fluxo sazonal da água.

Em Ibitipoca, no processo de desenvolvimento de uma caverna, os *pipes* (canais centimétricos a métricos) são formados pela erosão a partir da dissolução de sílica pela água e ácidos, que ao percolarem lentamente o quartzito pelas porosidades estruturais primárias - pela interseção entre fraturas, e interseção entre fraturas e planos de acamamento - passam a convergir os escoamentos de água, aumentando a porosidade. Com o passar do tempo, os *pipes* se alargam por concentrarem os fluxos de água que intemperizam a rocha, formando os condutos (NUMMER et al., 2012).

3 MÉTODOS GEOFÍSICOS

Métodos geofísicos geram dados a partir de informações sobre as propriedades físicas do subsolo, sem a obrigatoriedade de escavação ou de sondagem. A escolha do método a ser usado depende, principalmente, do objetivo que se deseja alcançar e pode ser utilizado em conjunto com um ou mais métodos para corroborarem os resultados.

Dois métodos geofísicos foram utilizados neste trabalho: Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR) e Eletroresistividade.

3.1 *Ground Penetrating Radar* – GPR

O GPR ou Georadar consiste no método geofísico que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 10 e 2500 MHz, aplicado na identificação de estruturas, plumas de contaminação, objetos (e.g. tanque de combustível, material arqueológico, etc.) e feições geológicas rasas do subsolo. Este método se assemelha ao método de

reflexão sísmica e ao sonar, em relação ao princípio físico e à metodologia do levantamento de campo, exceto que é fundamentado na reflexão de ondas eletromagnéticas.

O GPR possui profundidade máxima de investigação em torno de 30 metros, limitando o uso deste equipamento em algumas áreas de pesquisa geológica. A profundidade de alcance das ondas eletromagnéticas e a propagação do sinal são dependentes da frequência do sinal emitido (Tabela 1) e de propriedades como condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética. As propriedades eletromagnéticas dos materiais refletem a sua composição e umidade, controlando a velocidade de propagação das ondas bem como sua atenuação (ANNAN, 1992).

Tabela 1 – Relação entre frequência e profundidade de investigação de algumas antenas de GPR.

Frequência Central (MHz)	Profundidade de investigação no solo (m)	Profundidade de investigação na rocha (m)
25	25	40
50	20	30
100	12	20
200	8	15
500	3,5	5
1000	1,5	3

A condutividade elétrica equivale à habilidade do material em conduzir corrente elétrica (KELLER, 1987) e corresponde à primeira relação constitutiva do meio (Lei de Ohm) e relaciona a densidade de corrente de condução (σ) ao campo elétrico (\vec{E}):

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Em materiais geológicos simples a relação é aproximadamente linear e a constante de proporcionalidade é a condutividade elétrica (σ). Para investigações rasas é mais comum trabalhar com a unidade mS/m.

A permissividade dielétrica relaciona diretamente o campo elétrico (\vec{E}) com a corrente de deslocamento, ou à polarização (D), e a constante de proporcionalidade é a permissividade dielétrica do material (ϵ):

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

A permeabilidade magnética (μ) relaciona o campo magnético (H) com o campo de indução magnética (B), e corresponde à constante de proporcionalidade. A permeabilidade magnética é obtida de acordo com a relação:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Os fatores mais importantes que controlam as respostas GPR em materiais geológicos são as propriedades elétricas. Para materiais com baixa perda de propagação do sinal eletromagnético, o campo EM propaga-se com uma velocidade de fase dada por:

$$v = \frac{C}{\sqrt{k}}$$

onde:

c = velocidade da luz = 2,997 x 10⁸ m/s 0,3 m/ns;

k = permissividade dielétrica ou constante dielétrica dos materiais.

Os padrões de variação nessas propriedades elétricas dos materiais fazem com que parte do sinal emitido seja refletida e a outra parte difratada no subsolo, sendo então recebidas pela antena receptora (Figura 4).

A fração refletida é registrada em razão do tempo de percurso (tempo duplo) e também, amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido do computador, que fica com os dados disponíveis para posterior processamento.

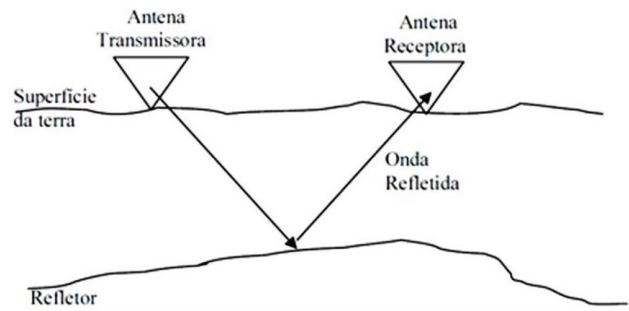


Figura 4: Arranjo das antenas de GPR.

3.2 Eletrorresistividade

Este método geofísico é utilizado para a investigação de estruturas e a presença de fluidos em subsuperfície por meio das variações de resistividade elétrica. Neste método é aplicada uma corrente elétrica artificial (I) injetada no terreno pelos eletrodos (A-B) com o objetivo de medir o potencial gerado (V) em outros dois eletrodos (M-N). O entendimento das relações entre a corrente elétrica e o potencial elétrico possibilitam o cálculo da resistividade aparente no subsolo. (Figura 5).

A eletrorresistividade é amplamente usada na detecção de plumas contaminantes, na investigação do lençol freático, no reconhecimento de estruturas geológicas (solos, rochas, cavernas, zonas de falhas, fissuras e dobramentos), na aferição da resistividade para aterramento e na pesquisa para perfuração e locação de poços.

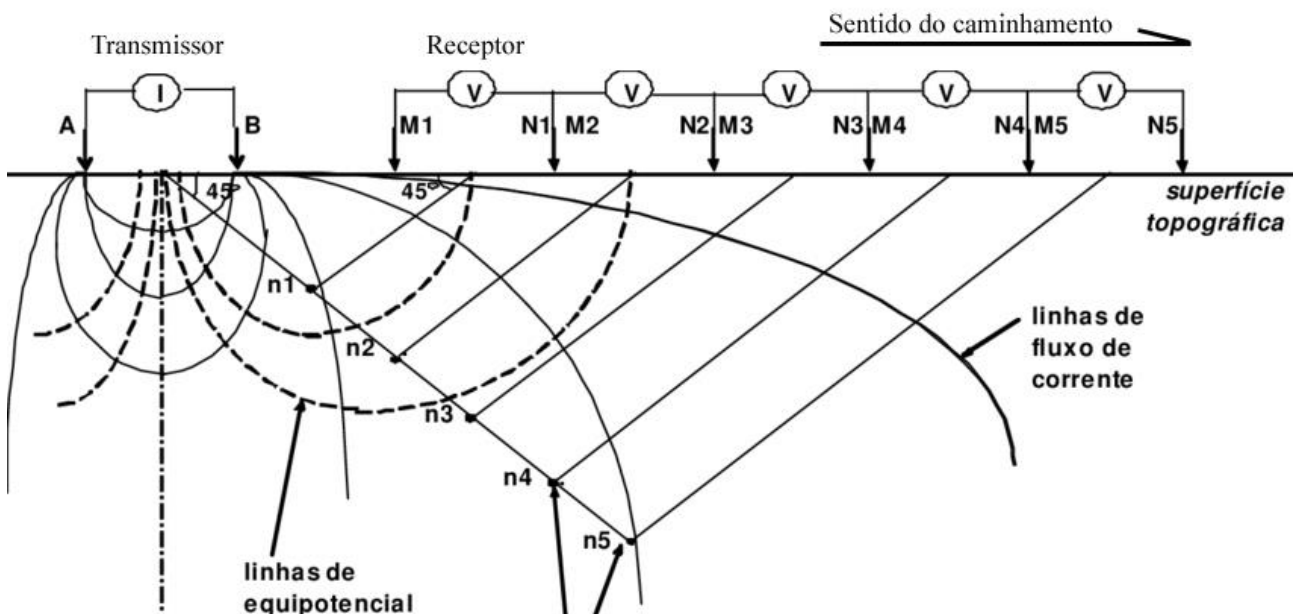


Figura 5: Princípio do método da Eletrorresistividade (PENNER *et al.*, 2008).

4. METODOLOGIA

Para este trabalho foram definidas três etapas de investigação: pré-campo, atividade de campo e pós-campo. A primeira envolve o levantamento bibliográfico das características fisiográficas do Parque Estadual de Ibitipoca, bem como seus aspectos geológicos e espeleológicos. Nesta etapa foram definidos os locais para a investigação geofísica e os métodos adequados. Objetivando caracterizar a resposta geofísica em uma cavidade conhecida e acessível, optou-se pela passagem da primeira linha de aquisição sobre a entrada da cavidade da Gruta Jacinto Lage.

A segunda linha de aquisição geofísica foi traçada paralela à primeira e objetivou caracterizar cavidades não visíveis/acessíveis, com base nas respostas (anomalias) obtidas na primeira linha (Figura 6). As duas linhas de investigação possuem, cada uma, 70 metros de extensão. Os métodos geofísicos escolhidos foram o Radar de Penetração no Solo (GPR) e Eletroresistividade.

dobramentos) em escala de afloramento. Os equipamentos geofísicos utilizados correspondem ao Radar de Penetração no Solo da marca MALA, modelo ProEx, com antenas de 50 e 100 Mhz e Eletroresistivímetro da marca IRIS, modelo Syscal Kid, com 24 eletrodos, disponibilizados pelo Laboratório de Exploração Mineral (LEXMIN) da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

No levantamento de campo usando o GPR utilizou-se o procedimento de afastamento constante, com antenas transmissora e receptora mantidas com uma distância fixa (1m) e constante, sendo transportada passo a passo ao longo da linha, formando uma imagem 2D. Foram utilizadas antenas com frequências de 50 e 100 MHz (Figura 7). O resultado corresponde à imagem (seção) onde o eixo horizontal representa a distância na superfície e o eixo vertical representa o tempo duplo do sinal de GPR (tempo de ida e volta), mostrando as variações das propriedades dielétricas da subsuperfície (reflexões).

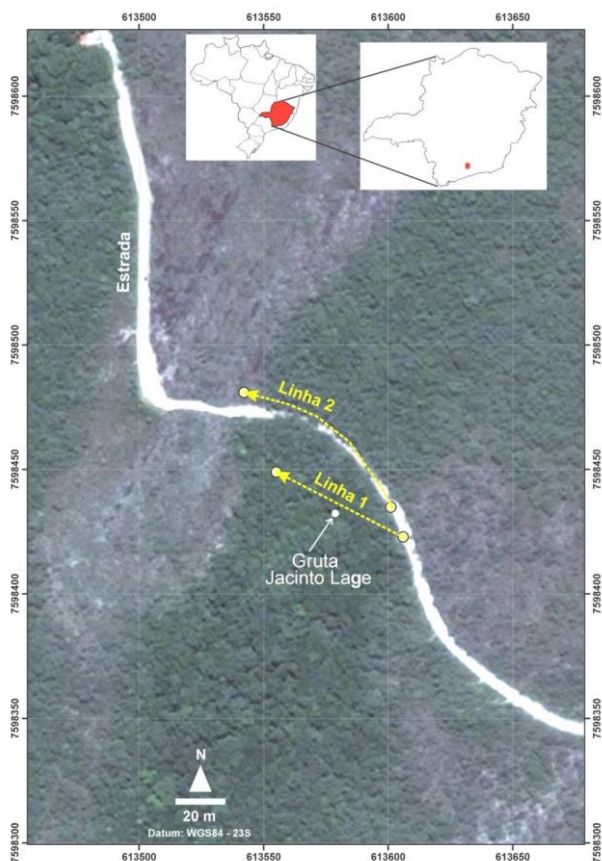


Figura 6: Localização das linhas geofísicas no PEI sobre imagem orbital (Google Earth).

Na segunda etapa foram desenvolvidas as atividades de campo, com investigação geológica e geofísica. A análise dos aspectos geológicos permitiu diferenciar os níveis quartzíticos no pacote metassedimentar e as estruturas existentes (falhas e



Figura 7: Investigação geofísica utilizando o método do Radar de Penetração no Solo no PEI.

Na investigação por Eletroresistividade utilizou-se a técnica do caminhamento elétrico, com arranjo Dipolo-Dipolo, com espaçamento de 3 metros entre os eletrodos e com 9 níveis de investigação.

A etapa pós-campo envolveu a compilação dos dados bibliográficos integrados aos resultados geológicos e geofísicos na área de trabalho. Os dados de GPR foram processados utilizando-se o *software* REFLEX V4.5 da Sandmeier Scientific Software, onde foram aplicados os filtros para refinamento dos resultados visando à integração com as características geológicas. Os dados de eletroresistividade foram processados pelo *software* Res2DInv, da Geotomo Software, gerando as seções de resistividade aparente na unidade Ohm.metro.

5. RESULTADOS

A investigação integrada dos métodos geofísicos com a geologia resultou na caracterização de cavidades até então não mapeadas ou acessíveis. Através das assinaturas geofísicas obtidas na linha sobre a cavidade visível da Gruta Jacinto Lage pôde-se aplicar suas anomalias aos outros trechos da mesma seção (linha 1), bem como da linha 2.

As duas seções de Eletrorresistividade exibem uma camada superficial de alta condutividade (até 20000 Ohm.m) com espessura de até 5 metros (Figuras 8A e 8B). As observações de campo permitiram relacionar esses valores à presença de um solo poroso sobre quartzito micáceo. O quartzito micáceo exibe níveis de resistividade variados, resultado da presença de umidade proveniente da água pluvial.

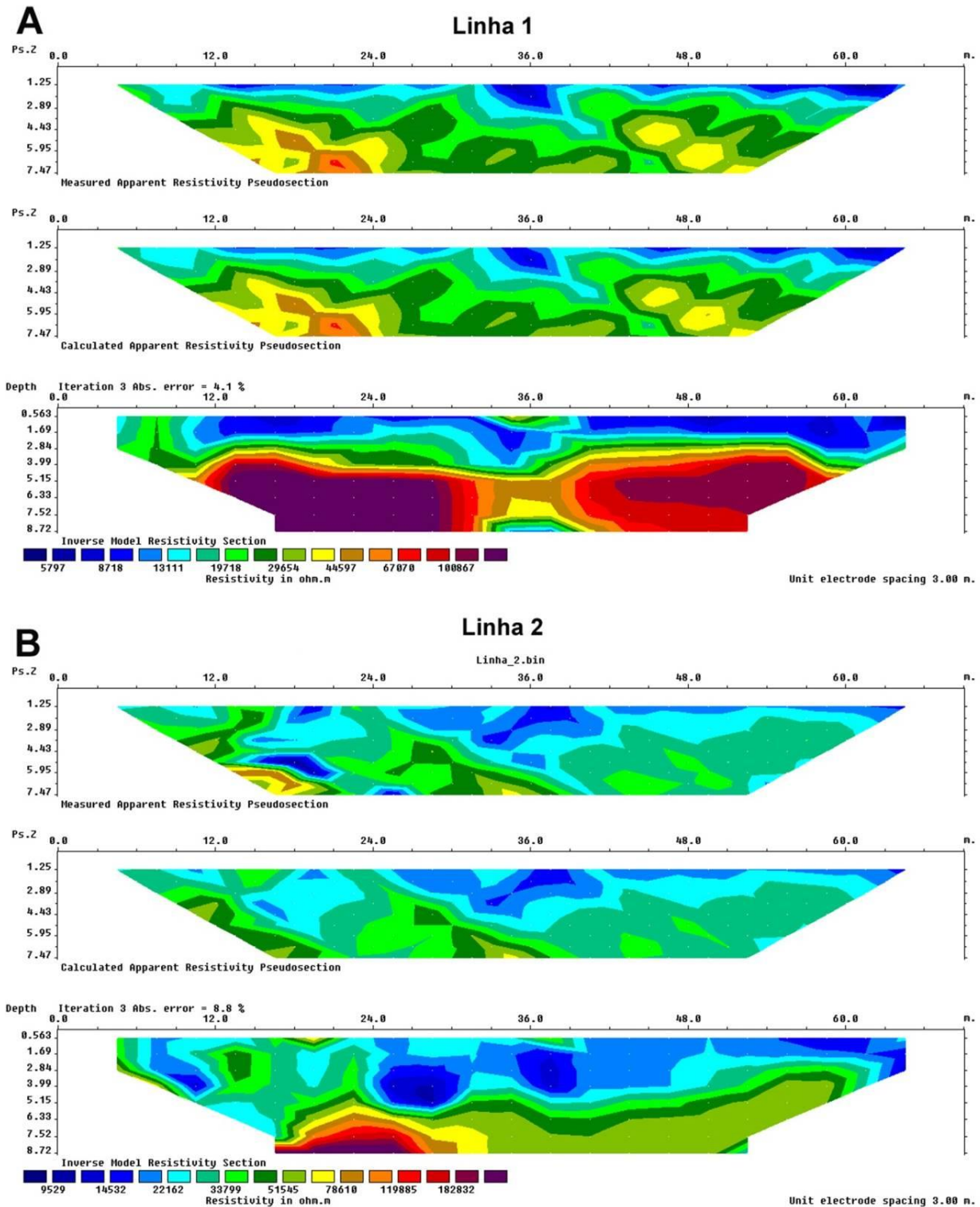


Figura 8: Seções de Eletrorresistividade próximas à Gruta Jacinto Lage. A - Linha 1; B - Linha 2.

A linha 1 (Figura 8A) possui anomalias com valores maiores de resistividade (menor condutividade) em profundidades superiores a 5 metros e aspectos sub-horizontais, interpretadas como níveis de quartzito predominantemente de textura grossa (Figura 9A). Na metade do perfil, aproximadamente a 6 metros de profundidade, ocorre uma anomalia de baixa resistividade associada ao topo da entrada da caverna Jacinto Lage.

A linha 2 (Figura 8B) foi executada passando a nordeste da entrada da caverna Jacinto Lage, visando a investigar a possibilidade de uma continuidade lateral de cavidades e/ou dutos. Seus resultados de eletrorresistividade mostram um pacote de baixa resistividade com espessura de 6 metros. Este pacote é correlacionado à presença de solo com quartzito micáceo, com influência da água pluvial. Um nível de quartzito de textura mais grossa (seco), a 6 metros de profundidade, migra lateralmente para um quartzito micáceo (muscovita), indicado pela diminuição lateral da resistividade (Figura 9B).

As duas seções de GPR foram executadas ao longo das linhas de eletrorresistividade. Seus resultados apontam para a possibilidade de cavidade não mapeada (Figura 10A). Esta possível cavidade está na mesma profundidade da Gruta Jacinto Lage (35 metros) e com assinatura geofísica similar. A propagação do sinal eletromagnético mostrou-se variável em função das características mineralógicas do quartzito (Figura 10A). Na Linha 1 a cavidade acessível da Gruta Jacinto Lage exibiu anomalia de feição arredondada, a cerca de 6 metros de profundidade. Na Linha 2 foram identificadas

variações laterais na composição mineral do quartzito, passando de textura grossa, quase exclusivamente com quartzo, a micáceo. Na Linha 2 não foram identificadas assinaturas associadas à presença de cavidades (Figura 10B).

6. DISCUSSÕES

A integração das ciências Geológica e Geofísica permitiu caracterizar cavidades naturais não acessíveis e/ou mapeadas na região do Parque Estadual de Ibitipoca. Dos métodos utilizados, o Radar de Penetração no Solo mostrou-se mais eficiente na detecção de possíveis cavidades, em função de seu maior poder de penetração no subsolo e pelas características do solo e das rochas da região.

A integração dos métodos geofísicos da Eletrorresistividade e do Radar de Penetração no Solo ao longo de uma mesma linha de aquisição de dados sobre uma cavidade acessível (Gruta Jacinto Lage) permitiu, além da caracterização/assinatura geofísica de cavidades, a diferenciação das camadas de quartzito com mica (muscovita) de outras com granulometria maior e sem mica. O método geofísico da eletrorresistividade contribuiu ainda para caracterizar a presença/ausência de umidade nos níveis quartzíticos.

A possibilidade de novas cavidades na região do PEI estimula as pesquisas geológicas que, integradas aos métodos geofísicos, contribuirão para o entendimento do paleoambiente e dos diferentes mecanismos que tornaram este parque uma referência em Espeleologia.

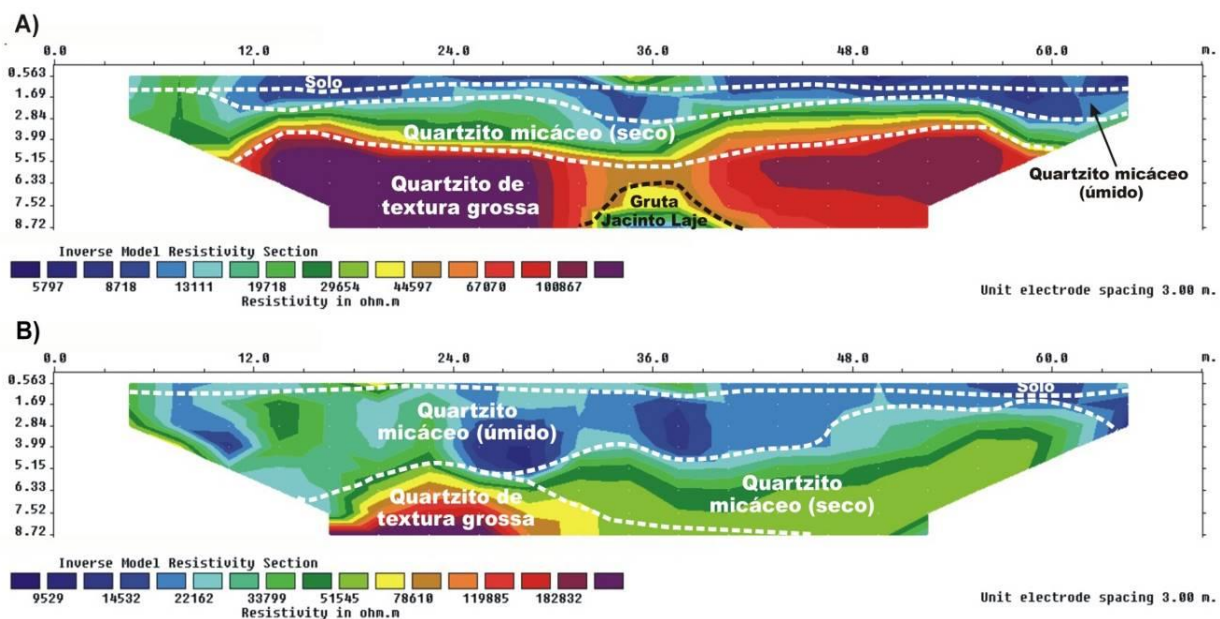


Figura 9: Interpretações geológicas integradas aos dados de eletrorresistividade. A - Linha 1; B - Linha 2.

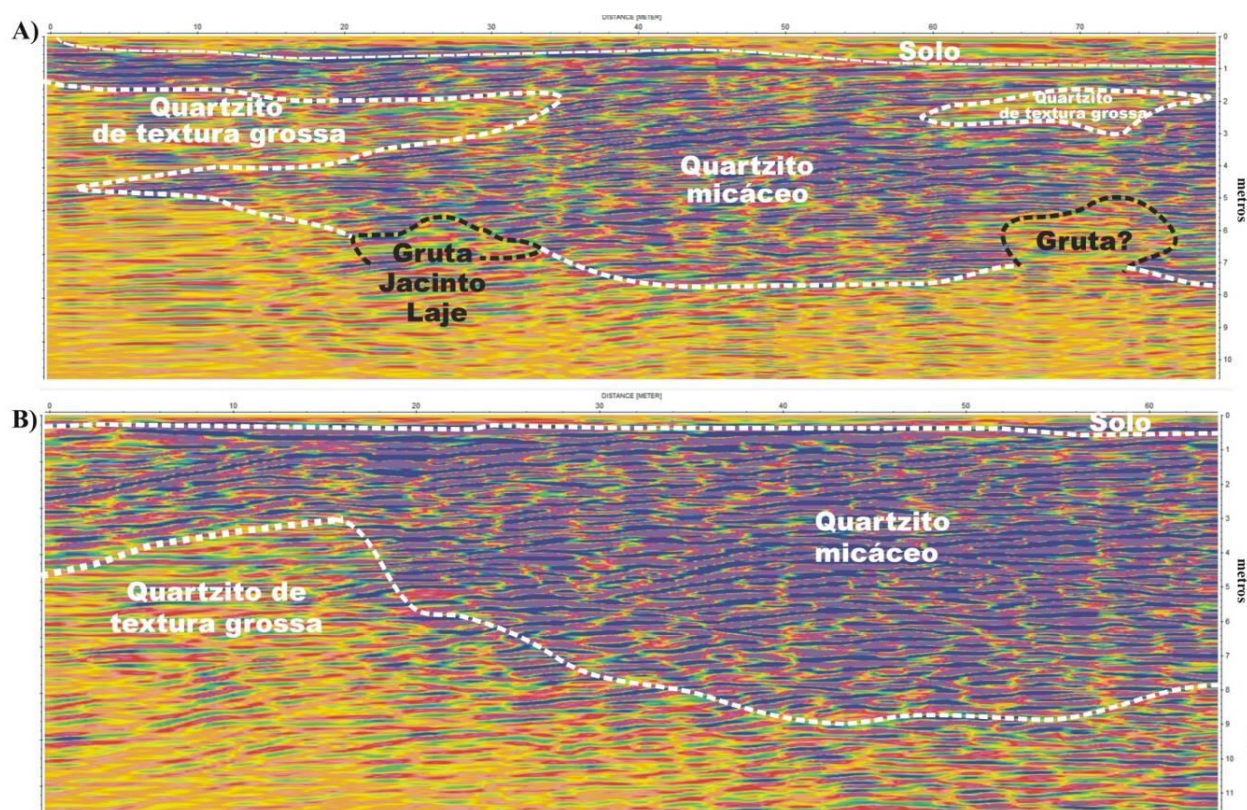


Figura 10: Interpretações geológicas integradas aos dados de Radar de Penetração no Solo. A - Linha 1; B - Linha 2.

AGRADECIMENTOS

Ao Grupo de Pesquisa em Geotectônica da Faculdade de Geologia da UERJ, pelo apoio logístico nas atividades de campo. E aos gestores do PEI, pelo apoio logístico.

REFERÊNCIAS

BENTO; RODRIGUES, Aspectos geológico-geomorfológicos do parque estadual do Ibitipoca/MG: base para o entendimento do seu geopatrimônio. *Soc. & Nat.*, Uberlândia, mai/ago/2013.

BENTO, L.C.M.; TRAVASSOS, L.E.P.; RODRIGUES, S.C. Considerações Sobre as Cavernas Quartzíticas do Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brasil, 2015. *Caminhos de Geografia*- revista online. ISSN 1678-6343.

BRASIL. CONAMA-Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº10, de 1º de outubro de 1993. **Dispõe sobre os parâmetros básicos para análise dos estágios de sucessão da Mata Atlântica.** Diário Oficial da União. Brasília. 1993.

CESAD-UFS. **Morfologia Cárstica**, 2012 Disponível em: http://www.cesadufs.com.br/ORBI/public/uploadCatalogo/15502516022012Geomorfologia_Estrutural_Aula_9.pdf.

CORRÊA NETO, V; BAPTISTA FILHO, J. *Anuário do Instituto de Geociências* - Volume 20 - PP. 75-87 - 1997.

CPRM. **O estudo das cavernas**. Por Pércio de Moraes Branco. Brasil, 2009.

DIAS, H. C. T; SCHAEFER, C. E. G. R; FERNANDES FILHO, E. I; OLIVEIRA, A. P; MICHEL, R. F. M; LEMOS JR, J. B. Caracterização de solos altimontanos em dois transectos no Parque Estadual do Ibitipoca (MG). *Rev. Bras. Ciênc. Solo* [online]. 2003, vol.27, n.3.

- FABRI, F. P.; AUGUSTIN, C. H. R. R. **Fatores e processos envolvidos no desenvolvimento de formas cársticas em rochas siliciclásticas em Minas Gerais, Brasil.** Belo Horizonte, 17 de janeiro - 06 de junho de 2013. Vol. 9, nº 1, 2013.
- HARDT, R.; RODET, J.; FERREIRA PINTO, S.A. **O Carste.** Produto de uma Evolução ou Processo? Evolução de um Conceito. Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. especial VIII SINAGEO, n. 3,2010.
- HEILBRON M, PEDROSA-SOARES AC, CAMPOS NETO MC, SILVA LC, TROUW RAJ AND JANASI VA. Província Mantiqueira. Cap XIII In: MANTESSO-NETO V *et al.*, (Orgs) **Geologia do Continente Sul-Americano:** Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, p. 203–235 - 2004.
- MEDEIROS, E.V.S.S. **Flora do Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais, Brasil – Família Piperaceae.** 2006. 127p. Dissertação (Mestrado em Botânica), Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro-JBRJ.
- NUMMER, A.R. **Geologia Estrutural.** Parque Estadual do Ibitipoca, Minas Gerais. Brasil, 1991.
- NUMMER, A.R.; GARCIA, M.G.M.; RODELA, L. G; OLIVEIRA, J.C.L; Belcavelo, R. **Potencial Geoturístico do Parque Estadual da Serra do Ibitipoca, Sudeste do Estado de Minas Gerais.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908 - Vol. 35 - 1 / 2012 p.112-122.
- PACIULLO, F. V. P. 1997. **A Sequência Depositional Andrelândia.** Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 245p.
- PENNER, G. C.; SCHULZ, H. E.; ELIS, V. R. **Avaliação de sítio contaminado usando o método geofísico do caminhamento elétrico dipolo-dipolo.** XIII SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, At Belém, PA, Brasil, Volume: 1. 2008.
- RODELA, L.G; TARIFA, J. R. O Clima da Serra do Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais. GEOUSP: **Espaço e Tempo**, n11, p. 101-113, 2002.
- RODELA, L.G. Cerrados de Altitude e Campos Rupestres do Parque Estadual do Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais: Distribuição e Florística por Subfisionomias da Vegetação. **Revista do Departamento de Geografia – USP.** n.12, p.163-189, 1998.
- SALOMÃO, M.; CINTRA, H.; FERREIRA, A.; LOPES, P. Uso de radar de penetração no solo (GPR) na caracterização geofísica do quartzito da Caverna dos Coelho, Parque Estadual do Ibitipoca, MG. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p.623-626. Disponível em: http://www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_623-626.pdf.
- SBE. **PROJETO CAVERNAS DO IBITIPOCA – IBITIProCa.** Projeto da Sociedade Carioca de Espeleologia – SPEC. Brasil, 2016.
- TROW, R. A. J.; RIBEIRO, A.; PACIULLO, F. V. P.; HEILBRON, M. 2000a. **Interference between the Neoproterozoic Brasília and Ribeira belts, with special emphasis on high pressure granulites.** Pre-Congress Field Trip.31 International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, Fiel TripBft 08, 45pp
- VASCONCELOS, M.F. **Avifauna dos Campos Rupestres e dos Campos de Altitude do Leste do Brasil: Levantamento, Padrões de Distribuição Geográfica, Endemismo e Conservação.** 2009. 229p. Tese (Pós Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre), Universidade Federal de Minas Gerais.

Fluxo editorial:

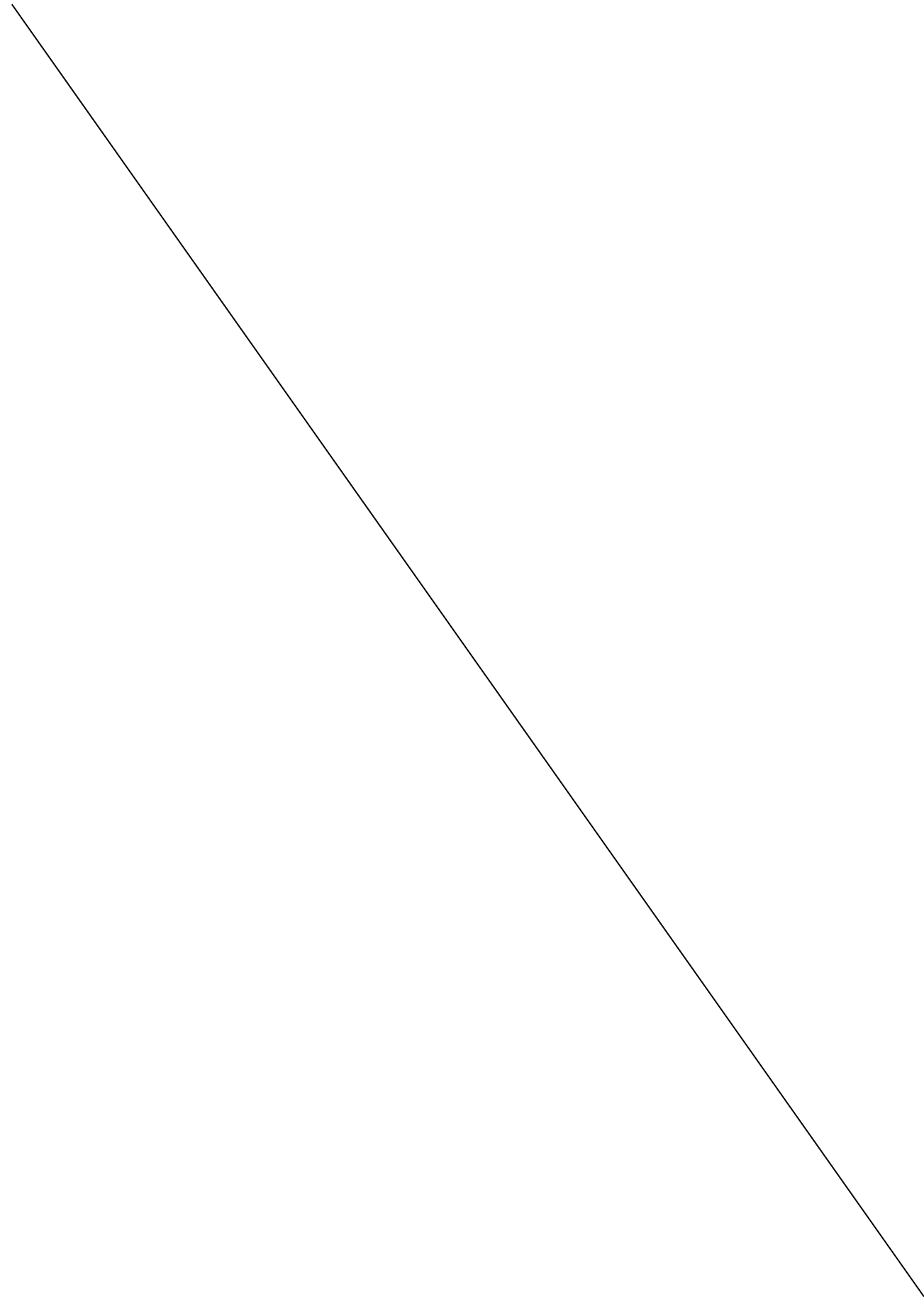
Recebido em: 30.11.2016

Aprovado em: 24.04.2017



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp



ASPECTOS PETROGRÁFICOS E MINERALÓGICOS DA CAVERNA S11D-0047, UNIDADE ESPELEOLÓGICA CARAJÁS – SUDESTE DO PARÁ

PETROGRAPHIC AND MINERALOGICAL ASPECTS OF S11D-0047 CAVE, SPELEOLOGICAL CARAJÁS UNIT - SOUTHEAST PARÁ

Ana Karita da Cunha Sousa (1), Daniele Freitas Gonçalves (2) & Joel Buenano Macambira (3)

(1) Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), Marabá PA.

(2) VALE S.A., Parauapebas PA.

(3) Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém PA.

Contatos: anakarita16@hotmail.com; daniele.freitas.goncalves@vale.com; joel@ufpa.br.

Resumo

O presente estudo consistiu na caracterização mineralógica e petrográfica da cavidade S11D-0047 do platô S11D, Província Mineral de Carajás, sudeste do Estado do Pará. Esta caverna desenvolveu-se em saprólito de rochas vulcânicas da Formação Parauapebas, a qual contém crostas branca, amarelada e avermelhada. As crostas brancas constituem-se mineralogicamente por montmorillonita ($Al(OH)_2Al_2SiO_{10}(OH)_2$), rancieíta((Ca, Mn) $Mn_4O \cdot 3H_2O$) e caulinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$); as amareladas por gibbsita ($Al(OH)_3$), hematita (Fe_2O_3), ferrowillieita ($AlFe_2Na(PO_4)_3$) e nissonita ($Cu_2Mg_2(PO_4)_2(OH)_2(H_2O)$); as crostas avermelhadas ocorrem como revestimentos nas paredes e teto caverna e são constituídas por gibbsita ($Al(OH)_3$), hematita (Fe_2O_3) e goethita ($FeO(OH)$). A caverna S11D-0047 foi gerada a partir de processos de lixiviação sobre basaltos da Formação Parauapebas e o seu posicionamento ao longo de lineamento regional favoreceu percolação de água meteórica provocando o alargamento da caverna, evidenciando que o intemperismo e o condicionante estrutural foram os principais responsáveis pela origem e evolução desta caverna.

Palavras-Chave: Grupo Grão Pará; platô S11D; saprólito; Formação Parauapebas; gibbsita.

Abstract

The present study consisted in the mineralogical and petrographic characterization of the S11D-0047 cavity of the S11D plateau, Mineral Province of Carajás, southeast of Pará State. This cave has been developed under volcanic rock saprolite of Parauapebas Formation, which contains white, yellowish and reddish crusts. White crusts are mineralogically constituted by montmorillonite ($Al(OH)_2Al_2SiO_{10}(OH)_2$), ranocyt (Ca, Mn) $Mn_4O \cdot 3H_2O$ and kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$); $Al(OH)_3$, hematite (Fe_2O_3), ferrowillieite ($AlFe_2Na(PO_4)_3$) and nissonite ($Cu_2Mg_2(PO_4)_2(OH)_2(H_2O)$); Reddish crusts occur as recovering walls and top of the cave and are constituted by gibbsite ($Al(OH)_3$), hematite (Fe_2O_3) and goethite ($FeO(OH)$). The cave S11D-0047 has been generated from leaching processes on the basalts of the Parauapebas Formation and its positioning along regional lineage favored percolation of meteoric water provoking the enlargement of the cave, evidencing that the weathering and the structural conditioning were the main responsible ones by the origin and evolution of this cave.

Key-Words: Grão Pará Group; S11D plateau; saprolite; Parauapebas Formation; gibbsite.

1. INTRODUÇÃO

Estudos em cavernas desenvolvidas em Formações Ferríferas Bandadas (FFB) e rochas associadas na Unidade Espeleológica de Carajás, sudeste do estado do Pará, tem se intensificado nos últimos anos (MAURITY, 1995; MAURITY; KOTSCHOUBEY, 1995; PILÓ; AULER, 2009; DUTRA, 2013; ABREU, 2014; ABREU et al., 2016; BRAGA, 2014; CABRAL, 2014; CONCEIÇÃO, 2014; GOMES, 2014; ROSA, 2014; ALBUQUERQUE, 2015; ALBUQUERQUE et al.,

2015; OLIVEIRA, 2015; PINHEIRO, 2015; PINHEIRO et al., 2015; QUEIROZ, 2015; RIOS, 2015; SOUSA, 2015; SOUSA, 2015; VIEIRA, 2015; BERNADES, 2016; PAIXÃO, 2016; CONDE, 2017). A maioria destes trabalhos enfocaram as cavernas de Serra Norte em Carajás, demonstrando que sua origem e evolução estão relacionadas a dissolução dos minerais dos bandamentos composicionais da FFB, gerando microcavidades a mesocavidades, que por processos continuados de dissolução com interconecção e/ou

desabamento, ampliaram volumetricamente os espaços internos das cavidades culminando em cavernas.

A caverna S11D-0047, localizada em Serra Sul, foco deste trabalho, desenvolveu-se no saprólito de rochas da Formação Parauapebas do Grupo Grão Pará. Ainda há uma grande lacuna no conhecimento dos aspectos petrográficos e mineralógicos deste tipo de caverna. Desta forma, justifica-se a importância e pioneirismo deste trabalho, o qual foi realizado com o objetivo fundamental de se caracterizar petrografica e mineralogicamente o saprólito onde esta caverna desenvolveu-se no intuito de avaliação de sua gênese.

2. CONTEXTOS GEOLÓGICOS REGIONAL E LOCAL

A área onde encontra-se a caverna S11D-0047 está situada na porção sul da Província Mineral de Carajás, Bacia Carajás, Cráton Amazônico. O embasamento da Bacia Carajás é formado pelo

complexo Xingu datado de 2.859 ± 2 (ARAÚJO; MAIA, 1991; MACHADO et al., 1991), sendo constituído de corpos gnáissicos migmatíticos (tonalitos, trondhjemitos e/ou granodioritos), granulitos e granitóides (FEIO, 2011, 2012 et al., 2013). Além desses, fazem parte deste embasamento o Complexo Granítico Estrela, Granito Planalto, Granito Rancho Alegre e Suíte Plaqué de idade arqueana (2,74-2,76 Ga; BARROS et al., 2001).

O preenchimento da Bacia Carajás é formado por rochas metavulcano-sedimentares e compreende os grupos Grão Pará, Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Buritirama e Igarapé Bahia (DOCEGEO, 1988). Na base do platô S11D ocorrem basaltos e dacitos da Formação Parauapebas do Grupo Grão Pará (Figura 1), de idade 2.759 ± 2 Ma, (MACHADO et al., 1991). Sobrepostos a estes, ocorrem os depósitos de FFB de fácies óxido do tipo jaspilito pertencentes a Formação Carajás, de idade 2.740 ± 8 Ma (TRENDALL et al., 1998; MACAMBIRA, 2003). Recobrimo estes últimos ocorrem os depósitos de basaltos alterados, quartzo-wackes e quartzo-arenitos da Formação Igarapé Cigarra (MACAMBIRA et al., 1990).

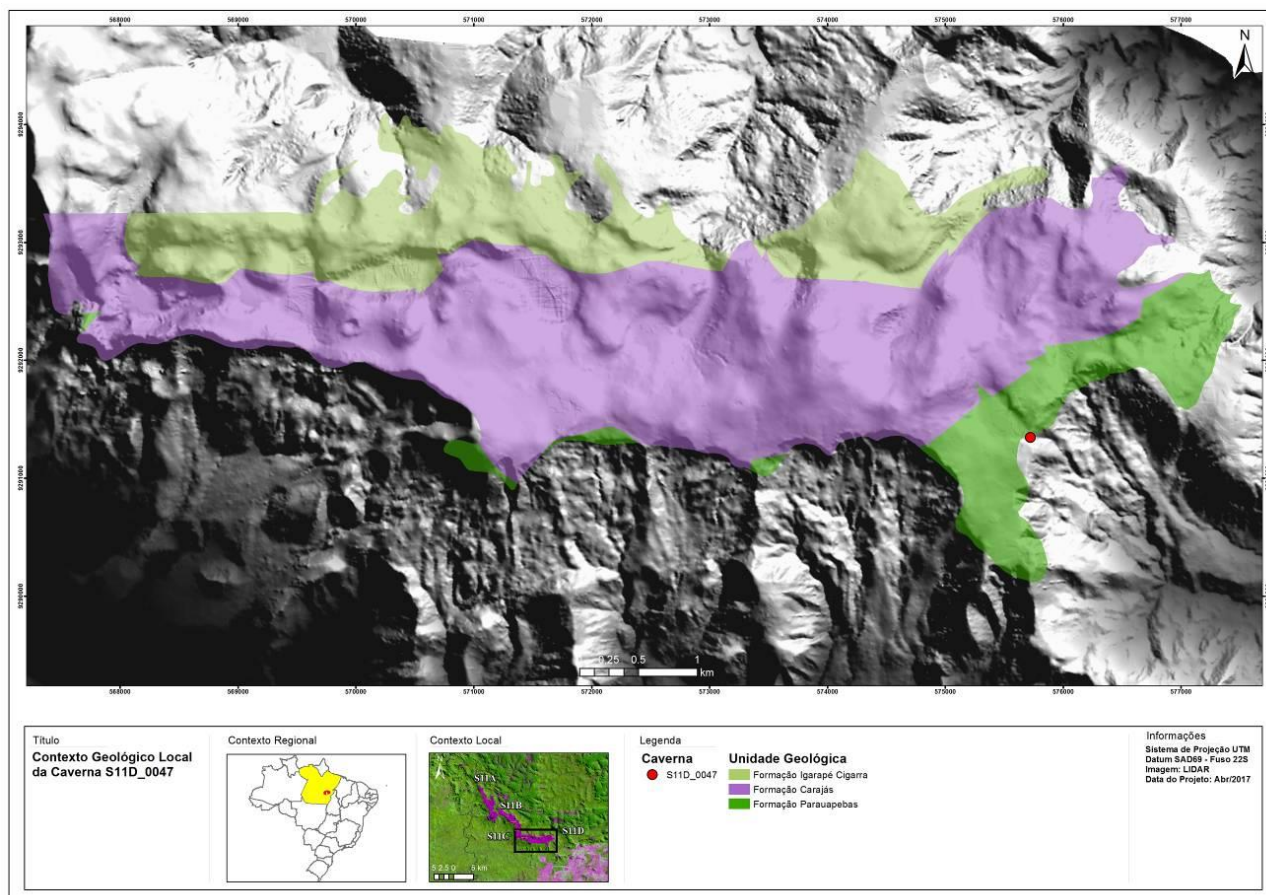


Figura 1 – Mapa geológico local do Platô S11D. (VALE, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo está localizada na porção sul de Carajás, no corpo D do platô S11 em Serra Sul, município de Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará. O acesso à área, a partir de Marabá, dá-se pela BR-155 até a cidade de Eldorado dos Carajás, e, a partir desta, segue-se pela PA- 275 até Parauapebas. Em seguida, por meio da rodovia Raimundo Mascarenhas, percorre-se cerca de 35 km até o Complexo minerário de Carajás, segue-se então pela mesma estrada até a entrada da mina do Manganês, a partir daí toma-se uma estrada não pavimentada que levará até o platô S11D num percurso de 70 km (Figura 2).

A caverna S11D-0047 encontra-se inserida na borda SE do platô S11, corpo D, precisamente em área de ocorrência da Formação Parauapebas (figura 2). Sua entrada apresenta altitude de 725,0 m, projeção horizontal de 72,0 m e área total de 359,0 m². O padrão morfológico desta caverna é esponjiforme (PILÓ; AULER, 2009), a qual caracteriza-se por apresentar condutos de tamanhos variados, em alguns casos, com formato globular,

que se interconectam, normalmente, por passagens mais estreitas, como poros de uma esponja (Figura 3).

Os métodos utilizados neste trabalho envolveram as seguintes etapas:

Ω Levantamento bibliográfico

Consistiu no levantamento de dados bibliográficos referentes à geologia regional e local da área estudada, principalmente sobre cavernas desenvolvidas em formações ferríferas e lateríticas das rochas do Grupo Grão Pará.

Ω Etapa de Campo

Foi realizada uma visita em campo com o intuito de coletar dados e amostras. Foram coletadas 7 amostras referentes a porções do teto, parede e piso da caverna S11D-0047.

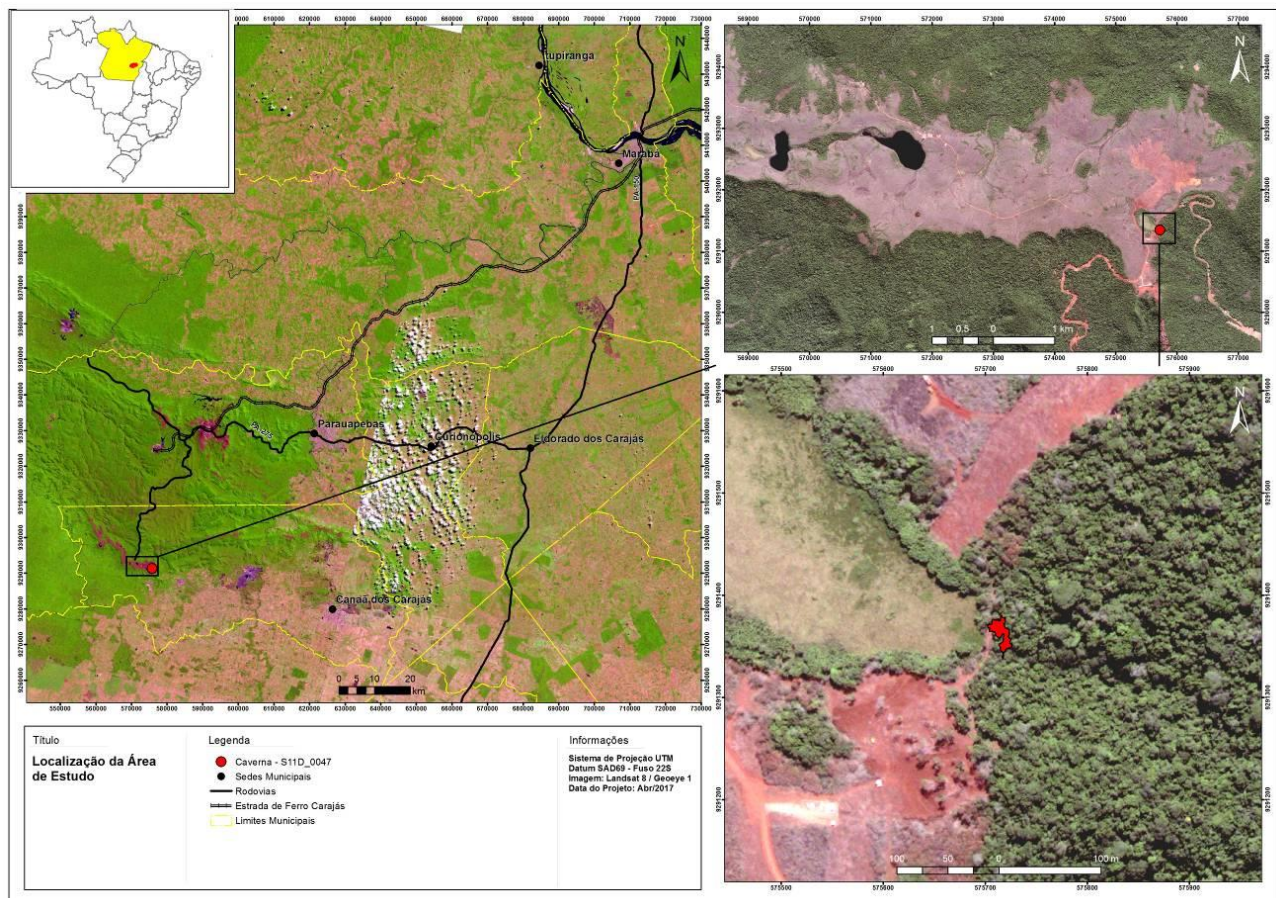


Figura 2 – Mapa de localização e acesso da Serra Sul.

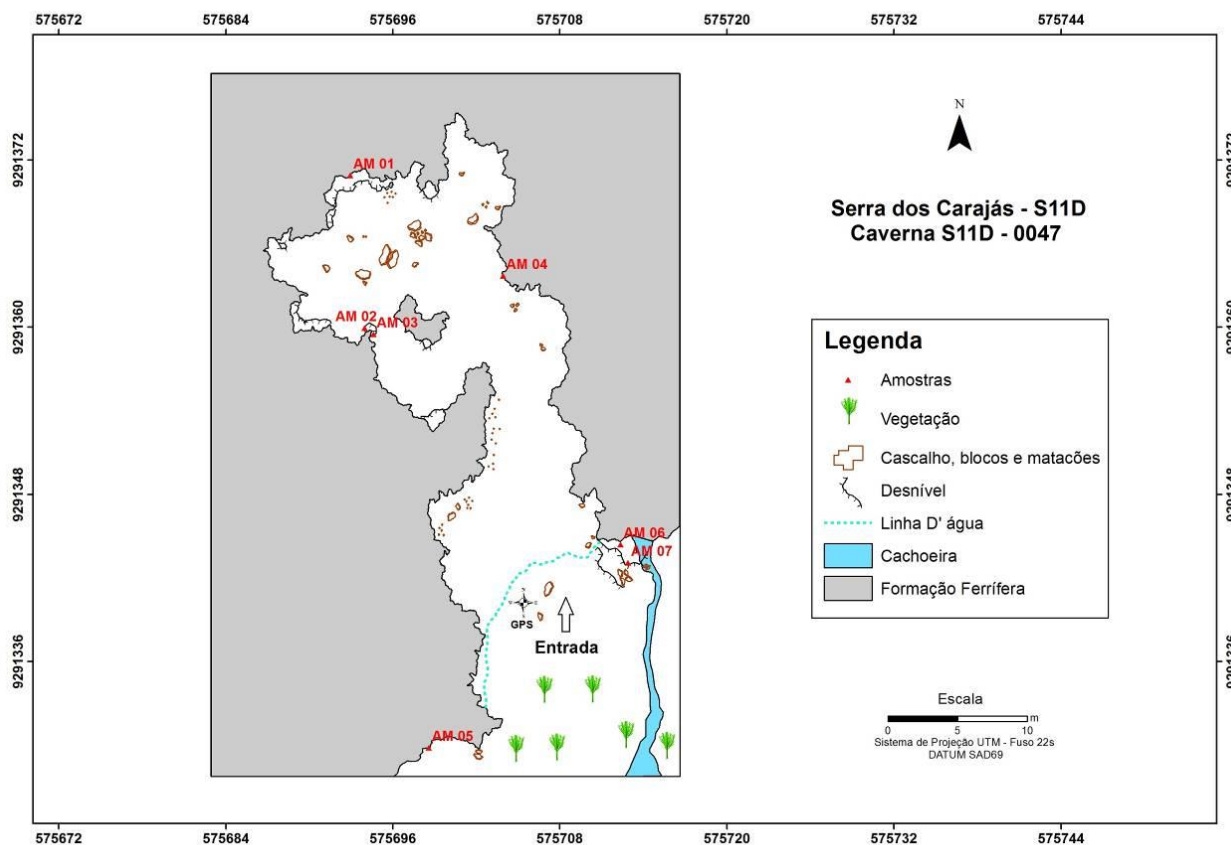


Figura 3 - Planta baixa da caverna S11D-0047 com morfologia esponjiforme e localização dos pontos de coleta das amostras.

Ω Microscopia ótica

Nesta etapa, foram realizadas análises macroscópicas das amostras, com a utilização da lupa binocular, onde foram identificados alguns minerais, a quantidade relativa dos vazios, coloração e aspectos texturais da rocha. Em seguida, foram confeccionadas cinco lâminas delgadas no laboratório de Laminação da UFPA. Posteriormente, com a utilização do microscópio óptico em luz transmitida e refletida, do laboratório de mineralogia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, realizou-se a análise microscópica das lâminas, onde foram reconhecidos os minerais e as microestruturas presentes.

Ω Difração de Raios-X (DRX)

A utilização deste método permitiu a determinação da composição mineralógica das amostras coletadas. A coloração e os aspectos texturais foram os principais critérios para a separação do material a ser analisado. Essas análises foram realizadas no laboratório de DRX da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Para a realização das análises por DRX foram separadas frações do saprólito que mostravam coloração e os aspectos texturais diferenciados, com isso, foram obtidas as porções de coloração avermelhada, coloração branca e porções de coloração amarelada com textura gelatinosa. Tais porções foram submetidas às análise de DRX.

4. RESULTADOS

A caverna S11D-0047 desenvolveu-se em saprólito de rocha vulcânica de coloração vermelho-amarelada (Figura 4A), mostrando textura porosa/cavernosa (Figura 4B), localmente friável e aspecto terroso. O teto e parede da cavidade exibem microcavidades circulares a subcirculares de 2 a 3,5 cm, por vezes preenchidas por material esbraquiçado (Figura 4C). Na parede próxima a entrada da caverna foi observadas fraturas verticais e subverticais (Figura 4D).

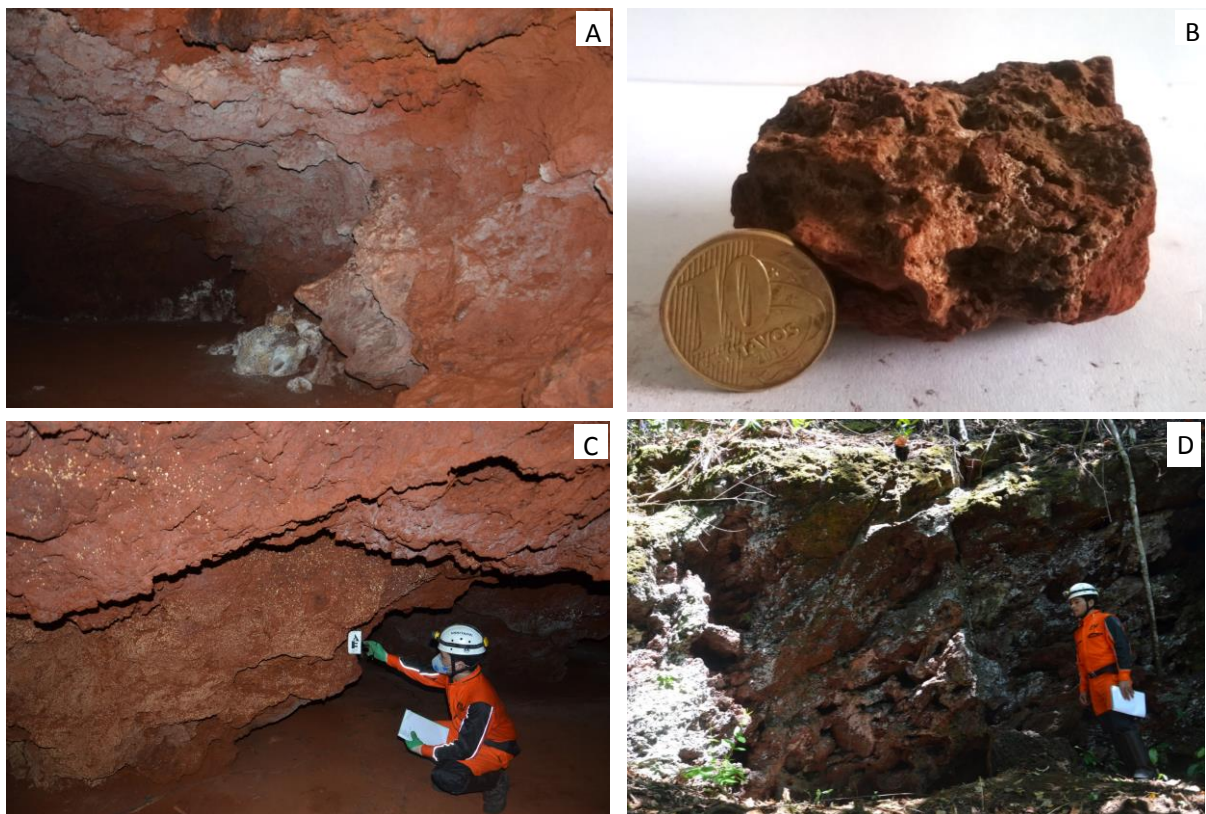


Figura 4 – Aspectos gerais da caverna S11D-0047. (A) Visão interna da caverna S11D-0047 mostrando saprólito de rocha vulcânica em que a caverna desenvolveu-se. (B) Textura porosa/cavernosa do saprólito. (C) Microcavidades circulares a subcirculares preenchidas por material esbranquiçado no teto da cavidade. (D) Fraturas verticais a subverticais na parede na entrada da cavidade.

Ao microscópio, o saprólito em que a caverna desenvolveu-se é composto essencialmente por plasma criptocristalino goethítico envolvendo fragmentos de hematita granular. Poros com contornos irregulares, por vezes arredondados, interconectados e alongados, com dimensões que variam de 0,1mm a 1mm ocorrem dispersos de forma aleatória no plasma criptocristalino. A hematita apresenta-se imersa e dispersa ao longo do plasma goethítico. Exibe textura granular de, aproximadamente, 0,001 mm a 2 mm de raio, contornos irregulares, coloração branca aczentada e birreflectância ausente (Figura 5A). A goethita também ocorre de forma secundária em agregados fibrorradiais contornando os poros (Figura 5C). Gibbsita e hematita ocorrem sob a forma de revestimentos intercrescidos preenchendo parcial ou totalmente poros e microfissuras, com hábitos fibrorradiais com maclamento polissintético e textura criptocristalina, respectivamente (Figuras 5B e 5D).

Localmente foram identificadas crostas brancas (Figuras 6A e 6B), crosta amarelada (Figura 6C) e crosta avermelhada (Figura 6D). O piso exibe, por vezes, porções mais escuras devido à umidade.

As crostas brancas ocorrem na parede da caverna, e, constituem-se mineralogicamente por

montmorillonita ($\text{Al}(\text{OH})_2\text{Al}_2\text{SiO}_{10}(\text{OH})_2$), rancieíta ($(\text{Ca}, \text{Mn})\text{Mn}_4\text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), sendo a montmorillonita o mineral mais abundante e com mais alto grau de cristalinidade, devido a altura e formato de seu pico, bastante intenso e simétrico enquanto que a rancieíta e a caulinita mostraram um grau de cristalinidade menor. (Figura 7).

A crosta amarelada ocorre igualmente na parede da caverna e apresenta aspecto gelatinoso e compõe-se por gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), hematita (Fe_2O_3), ferrowillieíta ($\text{AlFe}_2\text{Na}(\text{PO}_4)_3$) e nissonita ($\text{Cu}_2\text{Mg}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})$). Os minerais de gibbsita e/ou hematita apresentam grau de cristalinidade relativamente mais elevado enquanto que os dois últimos minerais apresentam grau de cristalinidade menores (Figura 8).

A crosta avermelhada apresenta, também, aspecto gelatinoso e constitui-se mineralogicamente de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), hematita (Fe_2O_3) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$). A gibbsita ocorre em maiores quantidades e mostrando elevado grau de cristalinidade, enquanto que a hematita e goethita mostram-se em quantidades e grau de cristalinidade inferiores (Figura 9).

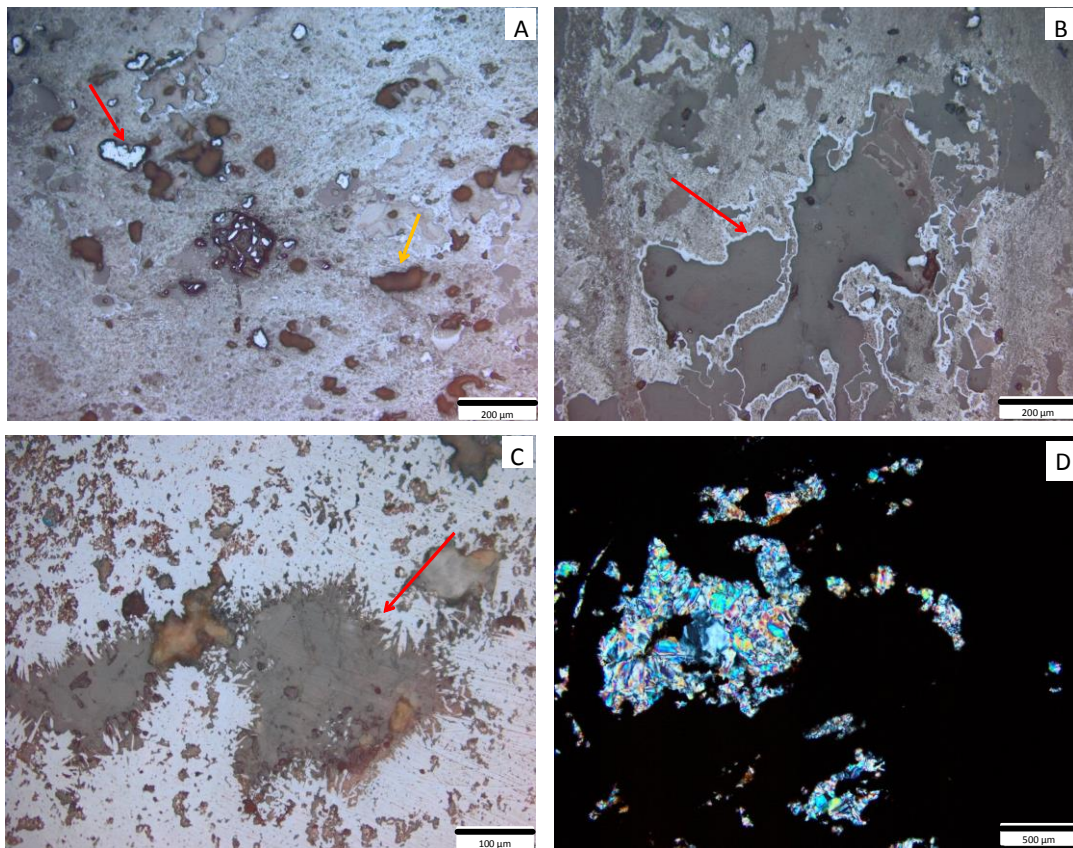


Figura 5 – Texturas gerais da rocha estudada. (A) Poros irregulares, arredondados e, por vezes interconectados (seta laranja). (10X) luz refletida. Hematita granular imersa em um plasma criptocristalino de goethita (seta vermelha). (B) Hematita como finos revestimentos bordejando espaços vazios (seta vermelha). (20X). Luz refletida. Nicóis //. (C) Goethita com hábito fibrorradial intercrescida nas paredes dos poros. (20X). Luz refletida. Nicóis //. (D) Gibbsita preenchendo parcialmente poros e microfissuras. (4X).Luz transmitida. Nicóis cruzados.

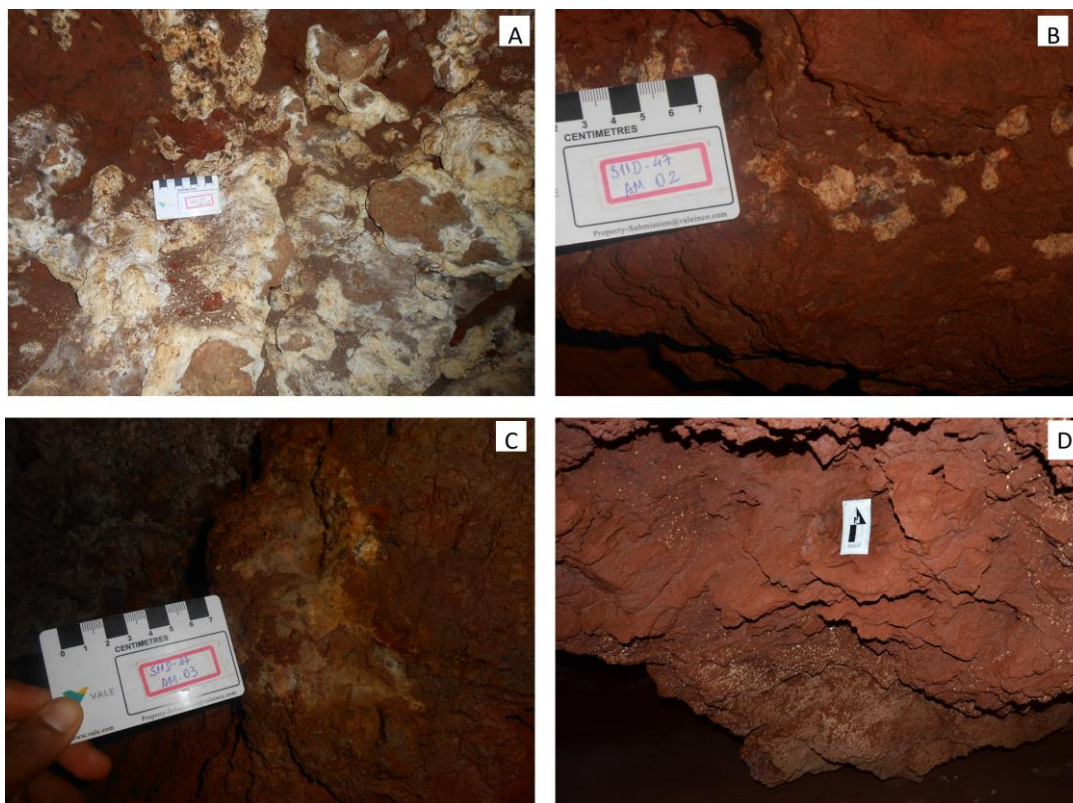


Figura 6 – Crostas encontradas na caverna S11D-0047. (A) Crosta esbranquiçada que ocorre na parede da caverna. (B) Crosta esbranquiçada associada a crosta avermelhada na parede da caverna. (C) Crosta amarelada de aspecto gelatinoso na parede da caverna. (D) Crosta avermelhada que ocorre no teto da caverna.

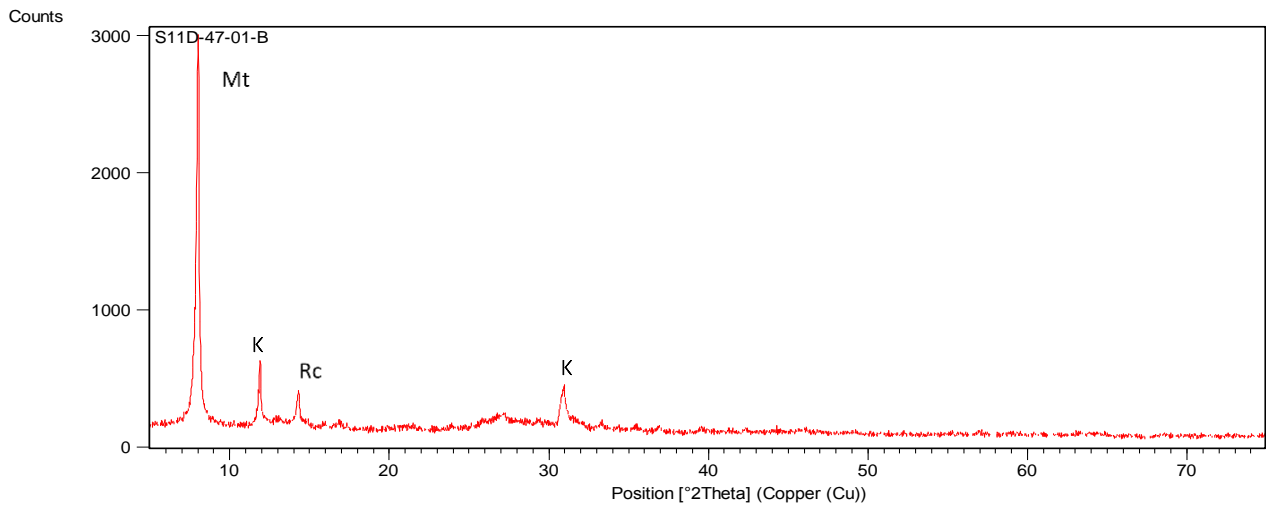


Figura 7 – Assembleia mineralógica identificada na crosta branca da caverna S11D-0047. (Mt = Montmorillonita, K = Caulinita, Rc= rancieíta).

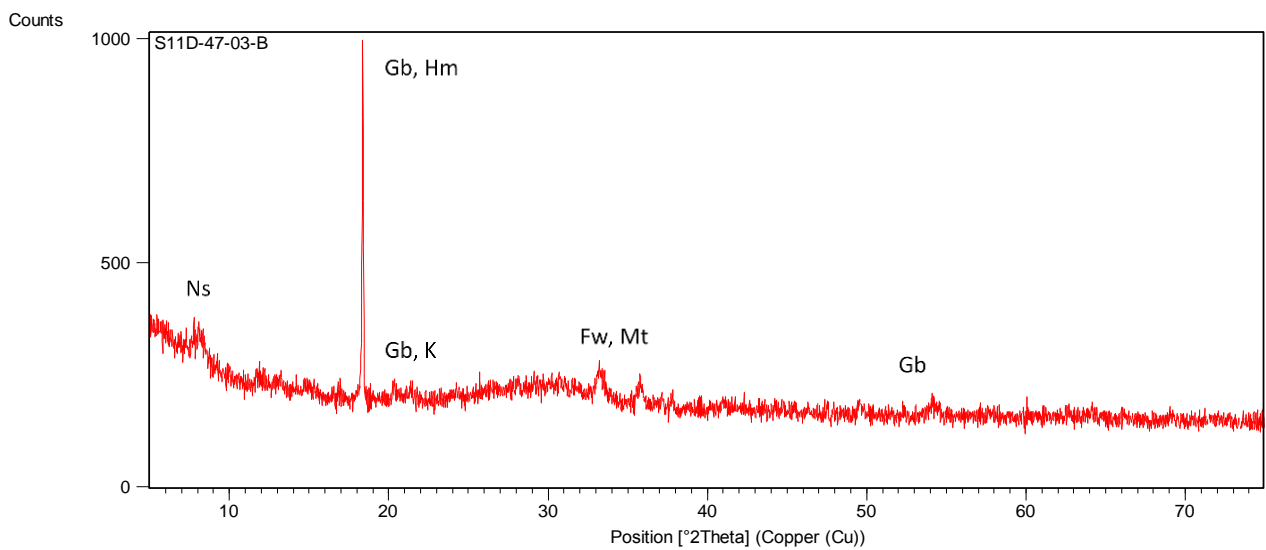


Figura 8 – Assembleia mineralógica identificada na crosta amarelada da caverna S11D-0047. (Gb = Gibbsita, Hm = Hematita, Fw= ferrowillieita, Ns= nissonita).

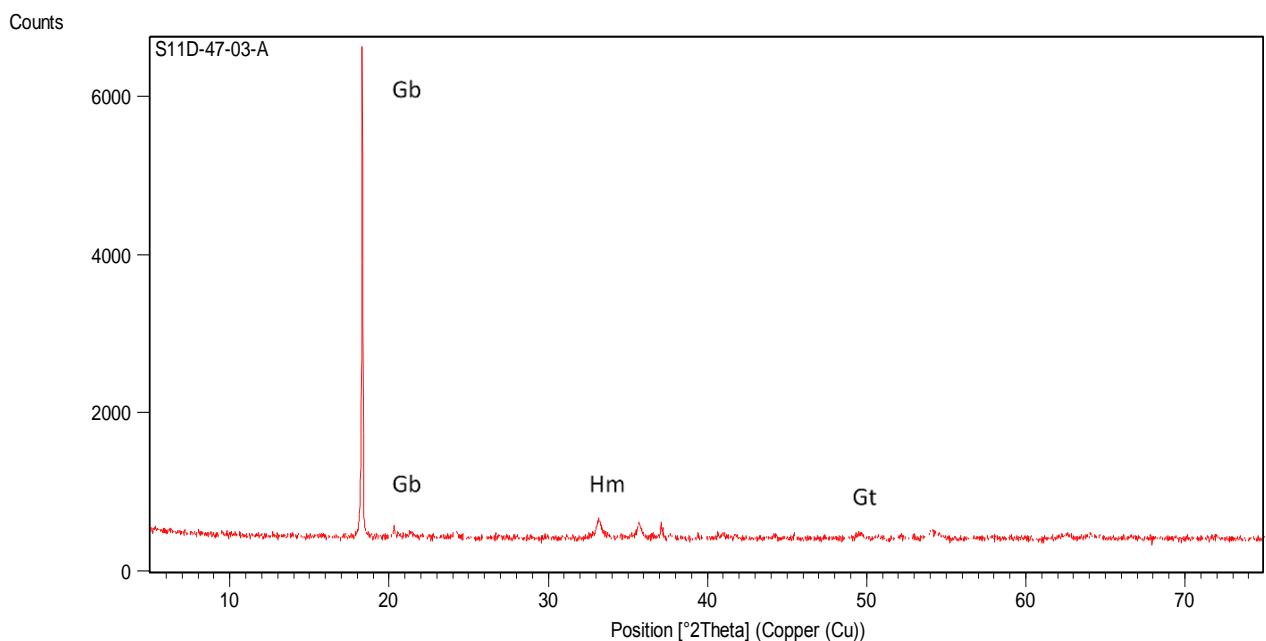


Figura 9 – Assembleia mineralógica identificada na crosta avermelhada da caverna S11D-0047. (Gb = gibbsita, Hm = hematita, Gt = goethita).

5. DISCUSSÃO

A análise petrográfica e mineralógica da caverna S11D-0047, localizada na Unidade Espeleológica Carajás – sudeste do estado do Pará definiu esta caverna como sendo formada por substrato maciço criptocristalino contendo crostas esbranquiçada, amarelada, e avermelhada. A ausência e/ou não mapeamento de rocha-matriz inalterada impossibilita uma discussão mais contundente acerca da origem e evolução desta caverna ao longo do substrato rochoso original. Porém, a assembleia de minerais identificados permite elaborar algumas considerações. A ocorrência de hematita e goethita em grande parte das amostras estudadas sugerem uma relação genética com os depósitos da FFB da Formação Carajás. Depósitos de FFB são comumente descritos e reconhecidos na literatura mundial por serem caracterizados por bandamentos composicionais de óxido/hidróxido de ferro constituídos de minerais de hematita, goethita e magnetita, e silicosos representados por quartzo criptocristalino e jaspe (TRENDALL et al., 1998; MACAMBIRA, 2003). Porém, a ocorrência de gibbsita na maioria das amostras analisadas, sugere fonte distinta. A caverna estudada encontra-se na área de ocorrência das rochas vulcânicas básicas da Formação Parauapebas. Microcavidades no teto e nas paredes preenchidas por crostas brancas assemelham-se muito a uma textura amigdaloidal reliquiar, sugerindo que a rocha estudada tratava-se de uma rocha basáltica. Lemos (1981), propõe uma relação dos supostos minerais primários e seus respectivos minerais secundários oriundos de alteração supergênica sobre as rochas vulcânicas da Formação Parauapebas, onde os piroxênios transformaram-se inicialmente em montmorilonita, que com a continuidade do processo da lixiviação pode originar cristais de caulinita com baixa cristalinidade. Similarmente, o plagioclásio altera-se para montmorilonita e, posteriormente, caulinita.

A hematita e goethita podem ser resultantes da concentração do ferro ocasionada pela lixiviação dos minerais ferromagnesianos, típicos de rochas básicas. Entretanto, essa rocha apresenta quantidades de hematita elevada, o que não seria explicado apenas, pela lixiviação de minerais primários, portanto, sugere-se que esse mineral seja, também, produto da lixiviação de formações ferríferas sobrepostas.

A nissonita ($\text{Cu}_2\text{Mg}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})$) e ferrowillieita ($\text{AlFe}_2\text{Na}(\text{PO}_4)_3$) são minerais fosfáticos, onde sua origem deu-se, provavelmente, a partir de reações químicas entre o guano, rico em fósforo, e soluções ricas em Mg, Fe, Al e Cu. A gênese de minerais fosfáticos relacionado à presença de guano foi citado por Gonçalves (2002).

A rancieita ($(\text{Ca}, \text{Mn})\text{Mn}_4\text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), silicato de manganês com cálcio, provavelmente formou-se a partir de processos supergênicos, onde minerais contendo manganês, em contato com a atmosfera desestabilizaram-se e oxidaram-se. Esse processo foi citado por Creus (2012), que afirma tratar-se de uma substituição pseudomórfica por oxidação.

A gibbsita pode ter originado-se a partir do avanço dos processos de lixiviação, onde a dessilicificação da caulinita, liberando alumina para o sistema, reprecipitou na forma de gibbsita em microfissuras e zonas porosas.

Além dos fatores acima mencionados, o posicionamento da caverna S11D-0047 sobre o lineamento estrutural NNW-SSE; observado na imagem LIDAR (Figura 10) sugere que esta caverna tenha se desenvolvido devido a percolação de água através de condutos estruturais ampliando a caverna e lixiviando minerais primários, originando o saprólito constituído de gibbsita, hematita, goethita, caulinita, montmorilonita, rancieita e nissonita.

6. CONCLUSÕES

Os aspectos mineralógicos e petrográficos investigados por microscopia convencional e DRX permitiram sugerir as seguintes considerações genéticas para a caverna S11D-0047:

- Ω A caverna originou-se a partir de processos de lixiviação sobre basaltos da Formação Parauapebas, gerando minerais secundários por reações químicas entre substrato rochoso e/ou guano: hematita, gibbsita, goethita, montmorilonita, caulinita, nissonita, e rancieita e ferrowillieita, respectivamente.
- Ω O posicionamento da caverna ao longo de lineamento favoreceu percolação de água meteórica provocando alargamento da caverna, demonstrando que, o intemperismo e o condicionante estrutural foram responsáveis fundamentais pela origem e evolução desta caverna.

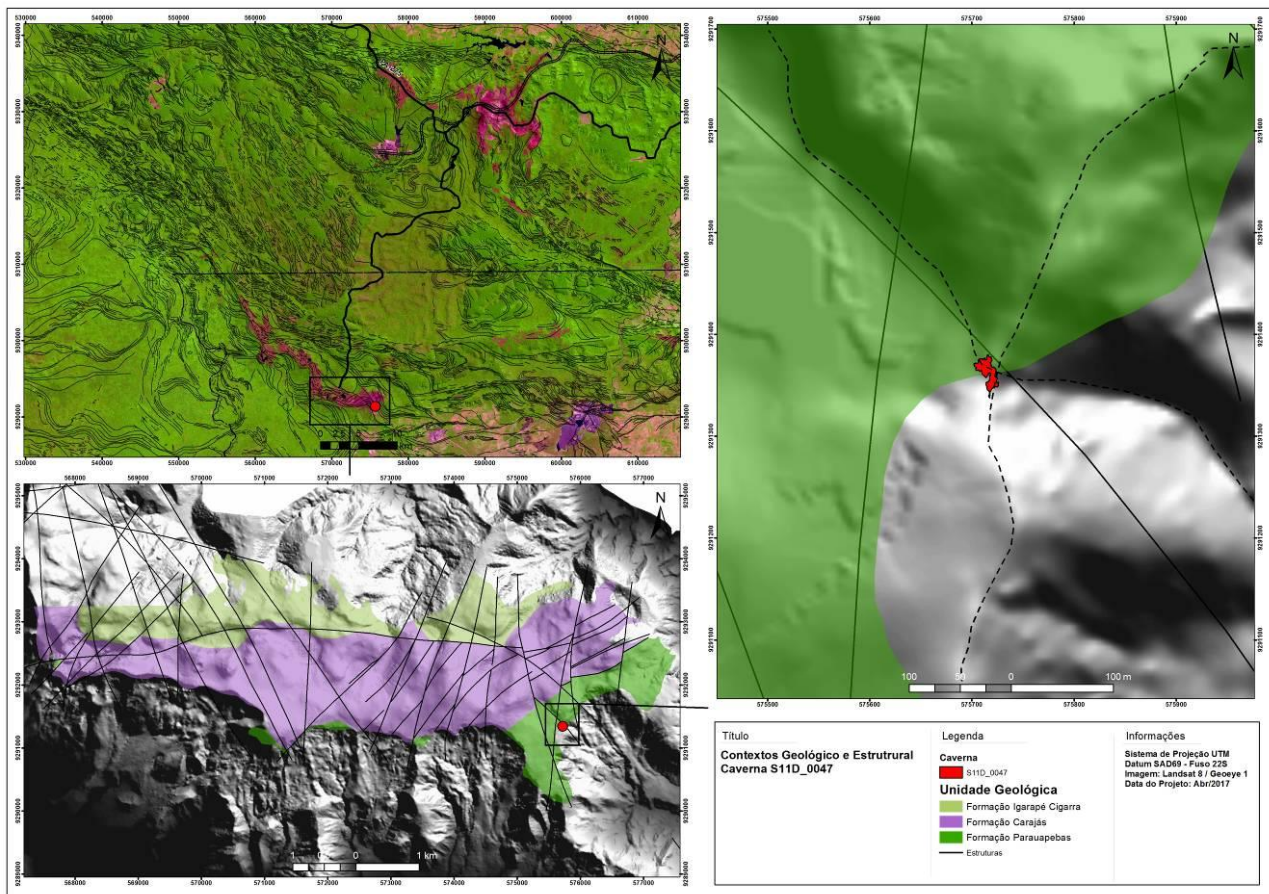


Figura 10 – Imagem do Platô S11D com o posicionamento da caverna. Notar o detalhe da imagem LIDAR mostrando o lineamento em que a caverna está inserida e o vale perpendicular ao lineamento e a intersecção dos lineamentos NW-SE, NE-SW e NNW-SSE com a planta baixa da caverna no centro.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de externar seus sinceros agradecimentos à empresa VALE S.A e Fundação de Amparo e Desenvolvimento de Pesquisa (FADESP), pelo apoio financeiro ao Projeto

Cavidades. Ao professor Dr^o Antônio Emídio Santos Junior da Unifesspa, por sua disponibilidade e considerações na revisão do texto e ao geólogo Rafael Guimarães de Paula pelo auxílio com os mapas e imagens.

REFERÊNCIAS

- ABREU S.S. **Petrografia de formações ferríferas associadas às cavidades naturais subterrâneas da Serra Norte, na unidade espeleológica de Carajás, Província mineral de Carajás-PA.** 2014. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) -Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Pará, Marabá.
- ABREU, S.S.; MACAMBIRA, J.B.; CABRAL, E.S. Geologia e Petrografia de Formações Ferríferas com ênfase na Gênese de Cavidades em Serra Norte, Carajás-PA. **Espeleotema.** v.27, n.1. p. 33-44. 2016. Disponível em: www.cavernas.org.br/espeleo-tema/espeleo-tema_v27_n1_033-044.pdf.
- ALBUQUERQUE, A. R. L. **Petrografia e Geoquímica de Espeleotemas em Cavidades Naturais, N4E-08 e N4WS-72, em Formações Ferríferas da Região de Carajás Unidade Geomorfológica Serra Norte.** 2015. 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.

- ALBUQUERQUE, A.R.L.; GONÇALVES, D.F.; SANTOS JUNIOR, A.E.A. Petrografia e geoquímica de espeleotemas em cavidades naturais, N4E-08 E N4WS-72, em formações ferríferas da região de Carajás – unidade geomorfológica Serra Norte. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. **Anais**. Campinas: SBE, 2015. p.615-622. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_615-622.pdf.
- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N. 1991. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos. Programa Grande Carajás. Serra dos Carajás. Folha SB.22-Z-A. Estado do Pará.** Texto Explicativo. DNPM/ CPRM, Brasília, 136p.
- BARROS, C.E. de M.; e BARBEY, P.; BOULLIER, A. M. Role of Magma pressure, tectonic stress and crystallization progress in the emplacement of sintectonic granites. The A-Type Estrela Granite Complex (Carajás Province Mineral, Brazil). **Tectonophysics**, n. 343, p. 93-109, 2001.
- BERNADES, H.R. **Gênese e Evolução de Espeleotemas em Cavidades Naturais Desenvolvidas em Formações Ferríferas Bandadas e Cobertura Laterítica do Platô N4E, Serra Norte, Província Mineral de Carajás – Pa.** 2016. 49 p. Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.
- BRAGA, A.A.J. **Caracterização estrutural das áreas de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas na Unidade Espeleológica de Carajás, Província Mineral de Carajás.** 2014. 91p. Trabalho de Conclusão de Curso – (Graduação em Geologia) - Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.
- CABRAL, E. S. **Petrografia de formações ferríferas (bif's) associadas a cavernas da Serra Sul (Serra Dos Carajás – PA).** 2014. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.
- CONCEIÇÃO, L.C. **Contribuição ao estudo hidrogeológico nas cavidades naturais da serra norte, Carajás-PA.** 2014. 91f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.
- CONDE, E.A. **Caracterização de cavidades naturais em N4E e N4WS, Serra Norte, Província Mineral de Carajás.** 2017. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.
- CREUS, A. J. Rancièita, bustamita, cummingtonita y neotocita, nuevos hallazgos en la mina la Serrana, el molar, torragona. **Revista de Minerale, Barcelona**, v. 2, n. 1, p. 17-17, 2012.
- DOCEGEO. **Revisão Litoestratigrafica da Província Mineral de Carajás.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35, 1998, Belém. **Anais**. Belém, 1998. p.11-54.
- DUTRA, G. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. In: RASTEIRO, M.A.; MORATO, L. (eds.) **CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA**, 32, 2013. Barreiras. **Anais**. Campinas: SBE, 2013. p.415-426. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais32cbe/32cbe_415-426.pdf.
- FEIO, G. R. L. **Magmatismo granitóide arqueano da área de Canaã dos Carajás: Implicações para a evolução Crustal da Província Carajás.** Universidade Federal do Pará, centro de Geociências. Belém. 2011.
- FEIO G.R.L., DALL'AGNOL R., DANTAS E.L., MACAMBIRA M.J.B., SANTOS J.O.S., ALTHOFF F.J. Geochemistry, geochronology, and origin of the Neoproterozoic Planalto Granite suite, Carajás, Amazonian craton: A-type or hydrated charnockitic granites? **Lithos**, n.151, p. 57-73, 2012.

- FEIO G.R.L., DALL'AGNOL R., DANTAS E.L., MACAMBIRA M.J.B., SANTOS J.O.S., LTHOFF F.J., SOARES J.E.B. Archean granitoid magmatism in the Canaã dos Carajás area: Implications for crustal evolution of the Carajás province, Amazonian craton, Brazil. **Precambrian Res.**, n. 227, p.157-185, 2013.
- GOMES, M A. **Aspectos morfológicos e mineralógicos de feições em cavidade hospedadas em Formações Ferríferas Bandadas/lateríticas da região de Carajás-Pa.** 2014. 66 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.
- GONÇALVES, D. F. **Cobertura de alteração laterítica-bauxítica da serra do Piriá e fosfatos associados – NE do estado do Pará.** 2002. 120 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia). Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- LEMOS, V. P. **Alteração supergenica das rochas básicas do Grupo Grão Pará- implicações sobre a gênese do depósito de bauxita de N5- Serra dos Carajas.** 1981. 140 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- MACAMBIRA J. B. **O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará.** 2003. 217 p. Tese (Doutorado em Metalogênese) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas.
- MACAMBIRA J.B.; RAMOS J.F.F.; ASSIS J.F.P.; FIGUEIRAS A.J.M.1990. **Projeto Serra Norte, Projeto Pojuca: relatório final.** Belém, UFPA, DOCEGEO, SEPLAN, DNPM. 150 p. Inédito.
- MACAMBIRA, J. B.; SILVA, S. A. A. 1998. Caracterização petrográfica dos basaltos do grupo Grão Pará na Serra Norte – Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40, Belo Horizonte. **Anais.** Belo Horizonte: SBG, 1998, p. 127.
- MAURITY, C. W. **Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 Serra dos Carajás.** 1995. 95p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica) Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.
- MAURITY, C.W. & KOTSCHOUBEY, B. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 – Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi.** Série Ciências da Terra, v.7 p. 331-362,1995.
- MACHADO, N., LINDENMAYER, Z.G., KROGH, T.E., LINDENMAYER, D. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. **Precambrian Research**, n. 49, p. 329-354, 1991.
- OLIVEIRA, A. N. **Contribuição Hidrogeológica na Formação e Evolução das Cavidades Naturais da Serra Leste, Carajás-PA.** 2015. p. 60. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.
- PAIXÃO, E. C. de O. **Análise Petrográfica dos Perfis da Canga Laterítica da Serra Norte de Carajás, Furos N4WS 1398 & N4WE 1495, Serra dos Carajás, Pará.** 2016. p. 38. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.
- PILÓ, L. B.; AULER, A. Geoespeleologia das cavidades em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009, Montes Claros. **Anais...** Montes Claros: SBE, 2009. p. 181-186. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais30cbe/30cbe_181-186.pdf.
- PINHEIRO, T.G.C.; **Gênese e Evolução de Espeleotemas em Formações Ferríferas/Lateríticas das Cavidades N4WS-067 e S11D-83 da Região de Carajás.** 2015. 56 p. Trabalho de Conclusão de

Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.

PINHEIRO, T.G.C.; CONÇALVES, D.F.; SANTOS JÚNIOR, A.E.A.. Caracterização petrográfica de espeleotemas em formações ferríferas/lateríticas das cavidades N4WS-067 e S11D-83 da região de Carajás. In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, p.445-453.2015. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_445-453.pdf.

QUEIROZ, R.S.; SANTOS JUNIOR, A.E.A.. Petrografia e análise de “espeleotemas” do testemunho de sondagem n4ws 1495, das Formações Ferríferas Bandadas, província mineral de Carajás (PA). In: RASTEIRO, M.A.; SALLUN FILHO, W. (orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 33, 2015. Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p.581-591. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_581-591.pdf.

RIOS, F.R. **Gênese e evolução de mesocavidades e espeleotemas em testemunho de sondagem N4WS 1495 ao longo de formações ferríferas bandadas, Serra Norte, Província Mineral de Carajás-Pa.** 2015. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.

ROSA, R. R. **Fácies, estratigrafia e petrografia das cavidades N4WS-15 e N4WS-23 na unidade espeleológica de Carajás-Pa, Serra Norte.** 2014. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.

SOUSA, A. K. C. **Caracterização petrográfica e mineralógica de cavidades desenvolvidas como produtos de alteração de rochas máficas na unidade espeleológica Carajás – sudeste do Pará.** 2015. p. 43. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.

TRENDALL, A. F., BASEI M.A.S., LAETER J.R., NELSON D.R. Ion microprobe zircon U-Pb results from the Carajás área of the Amazon Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, v.11, p. 265-277,1998.

VIEIRA. M.S. **Contribuição ao Estudo Hidrogeológico na área de Ocorrência das Cavidades Naturais da Serra Norte, Província Mineral de Carajás- PA.** 2015. p. 55. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Faculdade de Geologia, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá.

Fluxo editorial:

Recebido em: 30.11.2016

Aprovado em: 15.05.2017



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp

CAVERNAS DE TASSO FRAGOSO – MA: MAPEAMENTO E REGISTRO DAS OCORRÊNCIAS ESPELEOLÓGICAS COMO SUBSÍDIO À PRESERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE

CAVES OF TASSO FRAGOSO - MA: MAPPING AND REGISTRATION OF SPELEOLOGY OCCURRENCES AS A SUBSIDY TO THE PRESERVATION OF GEODIVERSITY

Antonia Rejane Cavalcante Moraes (1) & Claudio Eduardo de Castro (2)

(1) Graduada em Geografia da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), São Luis MA.

(2) Prof. Dr. do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA/DHG/CECEN), São Luis MA.

Contatos: rejanymorais@hotmail.com; clanaros@yahoo.com.br.

Resumo

Tasso Fragoso, no Maranhão apresenta elementos de grande importância da geodiversidade, ensejando, pelo seu valor e singularidade, sua preservação como Patrimônio. Isso remete aos aspectos naturais, cujas características fisionômicas (Geológicas, Geomorfológicas e Espeleológicas), incluído sua Fauna e Flora de Cerrado, além de elementos histórico-culturais (Inscrições rupestres, lascamentos e fósseis), constituindo-se como herança de valor cultural das civilizações. Nesse sentido, o trabalho tem por referência registrar a existência do patrimônio espeleológico dessa geodiversidade a partir da prospecção e do levantamento topográfico e cartográfico em grau suficiente que permitiu o cadastramento desse junto ao Cadastro Nacional de Cavidades (CNC), gerido no âmbito da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE). Os dados das cavidades encontradas têm relevante importância ao estudo do quadro da geodiversidade do sul do estado do Maranhão, contribuindo com a valorização e riqueza desse patrimônio. Tal acervo espeleológico desenvolveu-se em Geologia arenítica do Grupo Balsas, especificamente na formação Piauí, sobre geomorfologia de paredões esculpidos nessa litologia e servindo de abrigo à fauna específica. O quadro ambiental do Potencial Espeleológico apresentado é um testemunho do Patrimônio a ser preservado.

Palavras-Chave: Potencialidades Espeleológicas; Geodiversidade; Patrimônio Natural.

Abstract

Tasso Fragoso, in Maranhão State, presents elements of great importance of the geodiversity, promoting, by its value and singularity, its preservation as Patrimony. This refers to the natural aspects, whose physiognomic characteristics (Geological, Geomorphological and Speleological), including its environment (Fauna and Flora), as well as historical and cultural elements (rock engravings, debitage - chipping stone - and fossils), constituting an inheritance of the cultural value of civilizations. In this sense, the work has as a reference to register the existence of the Speleologic Patrimony. This Geodiversity from the prospecting and the topographic survey and mapping to a sufficient extent that allowed the registration of that next to the National Register of Caves (CNC), managed under the Brazilian Society of Speleology (SBE). The data of the caves have relevant importance to the study of the framework of Geodiversity of southern state of Maranhão, contributing to the enhancement and richness of this Heritage. This speleological collection developed in Geology of sandstone rock, Balsas Group, specifically in the Piauí, on Geomorphology of steep rockys in this lithology, serving as the basis for the specific fauna. The environmental picture of the Speleological Potential presented is a testimony of the Heritage to be preserved.

Key-Words: *Speleological Potentiality; Geodiversity; Natural Heritage.*

1. INTRODUÇÃO

As cavernas se apresentam com referência a um conjunto de patrimônio nela inserido, que contribui para o mecanismo de existência dos elementos encontrados. O Patrimônio Espeleológico se configura de modo conectivo e associativo, remetendo sua ligação aos mecanismos de

influências que são mútuas e inter-relacionadas. Nesse sentido, Stávale (2012, p. 12-13) relata que “O patrimônio espeleológico (do grego spelaion=caverna) é constituído pelo conjunto de ocorrências geológicas que abrangem as cavidades bem como todo o sistema ecológico envolvido”.

É eminente que haja essa interrelação ecológica, baseada na interatividade predominante na paisagem geomorfológica a partir dos elementos existentes. Logo esse patrimônio “(...) constitui-se como um conjunto dos elementos Geológicos, Superficiais, Subterrâneo, Hidrológico, Mineralógico, Faunístico, Florísticos, Arqueológico, Remanescentes Históricos e Culturais” (CONAMA, 2004, s/p), características, as quais, permitem esta relação entre a formação, adaptação e interação ao meio. O conjunto das representações assinaladas pela Resolução conduz para a preservação deste rico patrimônio, que se aplica dentro do mecanismo das conexões associativas baseadas nesta inter-relação da diversidade apresentada. Logo, trata-se de um patrimônio, cuja conexão e associação permitem o desenvolvimento da diversidade natural, na evolução das relações mútuas que cabe à diversidade.

Nesse sentido, a concepção de patrimônio é indissociável às ocorrências espeleológicas. As cavernas representam a interação da diversidade, manifestas em seus aspectos naturais, sejam da ordem física e da vida (cujo mecanismo de existência e sobrevivência da diversidade faunística e florística, apontam para a real essência de vida), bem como pelo seu caráter cultural, presentes nas manifestações arqueológicas, representações históricas, religiosas, mitológicas ou lendárias. Neste caso, o patrimônio representa a interação paisagística na forma expressiva, cuja essência está no mecanismo das formas que se relacionam ao meio.

Compor esta interpretação ultrapassa a dimensão da paisagem, pois, os mecanismos que envolvem a relação do bioma com o meio, representam fatores que necessitam serem estudados para compor a interpretação ambiental, servindo como subsídio à preservação do Patrimônio Espeleológico, assim como o bioma Cerrado, característico na região sul do estado do Maranhão, objeto deste trabalho.

Esta área, apresenta aspectos fisionômicos da diversidade ambiental que contribuem na construção de um mosaico representativo, de modo que haja essa ligação de dois ambientes naturais transitórios. Logo:

(...) as diferentes condições de clima, de relevo e de solo do território brasileiro permitem o desenvolvimento de uma grande diversidade de ambientes naturais. A cobertura vegetal do Maranhão reflete, em particular, a influência das condições de transição climática, entre o clima amazônico e o semiárido nordestino. (CORREIA FILHO et al, 2011, p. 19)

Percebe-se que a influência das condições ambientais favorece na representação diversificada fisionômica da paisagem no Estado, e na região estudada vem transmitir a transição climática do ambiente amazônico e do semiárido nordestino, cuja predominância é a do Cerrado. As morfoestruturas apresentam variáveis dimensões, amplitudes, entre outros, além de evidenciar a ação das condições de regimes pluviométricos sazonais de período seco bastante definidos e por vezes pronunciados, caracterizando “(...) clima tropical da zona equatorial, com 4 a 5 meses secos, com chuvas anuais que possibilitam existência de cerrados das mais variadas composições, distribuídas conforme os locais de solos, altitudes e declividades”. (IBGE, 2000, s/p.).

Desse modo, estruturas geomorfológicas da área estão diretamente relacionadas a esse quadro climático sobre a litologia, marcada por evidências testemunhais da morfoescultura. As morfoestruturas, sob ação dos processos dinâmicos exógenos, vêm causar intemperização, modelando o relevo, ao passo que também influenciam na formação das unidades espeleológicas. Trata-se de processo da evolução paisagística, marcada por testemunhos dos processos erosivos modeladores.

As condições ambientais vêm culminar no desenvolvimento das fisionomias morfoestruturais, influenciadas primordialmente pelos processos de escoamento e, no que se refere à espeleogênese, a percolação das águas das chuvas, ao passo que favorecem no intemperismo físico preponderantemente, mas, em certa medida, a dissolução, a partir do ponto interagido da água e componentes da rocha (clima, vegetação, solo, relevo, características geológicas). É o que explica a teoria Geossistêmica das Unidades Taxonômicas Morfoestruturais, que resultam:

(...) da combinação de fatores geomorfológicos (natureza das rochas e dos mantos superficiais, valor do declive, dinâmica das, climáticos (precipitações, temperatura...) e hidrológicos (lençóis freáticos epidérmicos e nascentes, pH das águas, tempos de ressecamento do solo...). (BERTRAND, 2004, p. 146-147)

Os aspectos fisionômicos da paisagem geomorfológica estão normalmente associados ao resultando das dinâmicas de erosão pelos processos hídricos e eólicos e ao intemperismo. As alterações são promovidas em rocha cuja litologia seja de ambientes clásticos e, por vezes, cársticos, originando cavernas. Isso plausível, pois: “A Geomorfologia Cárstica atua como uma assembleia

de formas distintas desenvolvidas sobre as rochas solúveis” (FLORENZANO, 2008, p. 185).

As rochas de ambientes cársticos (carbonáticas) apresentam certo grau de dissolução, acompanhada pela composição, tamanho e agregação da porosidade, conduzida pela retenção e percolação da água, influenciando na dinâmica de modelação das estruturas. Obviamente, o grau de percolação está vinculado a composição litoestratigráfica das estruturas geológicas, na qual a erosão processa-se em graus conforme a agregação da rocha e porosidade em que a seção é composta, conduzindo à transformação de suas geoformas.

Nas características litológicas de Tasso Fragoso, modelam-se as morfoestruturas, elas se encaixam na geologia do Grupo Balsas, representado por intercalações de sedimentos irregulares arenosos, silto-argilosos e calcários pouco expressivos das Formações Pedra de Fogo, Piauí, Sambaíba e Mutuca (CORREIA FILHO, et al., 2011; CPRM, 2017).

Neste sentido, as características litológicas da formação Piauí, na qual todas as ocorrências espeleológicas se concentraram, apresenta-se em

(...) sequência essencialmente arenosa, com níveis de siltitos e folhelhos, além de intercalações de calcário. No topo desenvolvem-se, localmente, níveis de sílex. Os sedimentos arenosos da seção inferior são representados por arenitos avermelhados, róseos e amarelados, finos a grosseiros, argilosos, localmente feldspáticos. A seção superior é constituída de arenitos avermelhados, amarelo-esbranquiçados, finos a médios, pintalgados de caulim, regularmente selecionados e grãos subarredondados. Estratificação cruzada tipo plano-tabular e acanalada de grande porte são as estruturas dominante na seção. É a que tem maior expressão geográfica e aflora, praticamente, em todos os quadrantes do município de Tasso Fragoso, expondo-se amplamente na sede municipal e ao longo da calha do rio Parnaíba. (CORREIA FILHO et. al., 2011, p. 22).

A formação Pedra de Fogo, constituída por siltitos e folhelhos, tem por principal aparência a presença de sílex, com restos de madeiras fossilizadas (VAZ et al. 2007), apresentando também calcários, porém não se verificou espeleogênese. A inexistência de cavernas pode ser associada ao fato de apresentar “frequentes estruturas de escorregamento (*slumping*) em ‘pequenos dobramentos’, causados por acomodação

de estratos de diferentes competências” (CORREIA FILHO et al., 2011, p. 22). Essa formação ocupa uma vasta área, aflorando praticamente em todos os quadrantes do município de Tasso Fragoso, porém sobre as estruturas esculpidas dos relevos dissecados e dos morros testemunhos e mesetas.

As formações Mutuca, representada por siltito vermelho e marrom, arenito branco fino a médio, com folhelho subjacente, anidrita e raros calcários, concordante com a formação Pedra de Fogo (subjacente) e a Sambaíba, constituída por arenitos que quando silicificados constituem mesetas, de litologia composta por arenitos róseos e amarelos, médio a fino, bem selecionado, bimodal, subangulosos, subarredondados e com estratificação cruzada de grande porte (VAZ et al., 2007), não se apresentam expostas na área estudada.

As seções litoestratigráficas assinaladas expõem-se de modo predominante sob os afloramentos, o que reflete nos diferentes testemunhos morfoestruturais. Os processos de erosão e modelação das estruturas estão baseados no contexto das Geoformas, as quais, nas distinções aplicadas dentro destas variáveis, explicitam o processo de formação das unidades espeleológicas. Cabe basicamente apresentar os resultados de um processo interativo que acompanham as características estruturais variáveis. Neste raciocínio, é eminente que “a formação de uma caverna é o resultado de ações físicas e reações químicas sobre a rocha” (CAVALCANTI et. al., 2012, p. 20).

Esse contexto apresenta geomorfologias resultantes de expressivo trabalho erosivo sobre a estratigrafia das Formações, representado pelos testemunhos da dissecação do relevo, o qual pode contribuir na espeleogênese. Desse modo, compõem-se o contexto ambiental, cuja explicação dos processos oriundos que desenvolvem a paisagem permite as condições expressas na inter-relação que origina as cavernas. Nesse sentido:

(...) os ambientes cavernícolas vêm representar um sistema com pequenos níveis de biomassa, um contato reduzido com o meio exterior, temperatura e umidade relativamente constantes e ausência permanente de luz. Com essas características, cria-se um ecossistema único e frágil, que em grande parte, depende do meio externo para a obtenção de energia, já que não possui luz ou produtores primários (plantas). Por outro lado, o meio subterrâneo (hipógeo) apresenta vantagens em relação ao meio externo (epígeo), pois além de oferecer abrigo permanente, representa um refúgio protegido contra a maioria dos predadores e

contra mudanças climáticas extremas. (CAVALCANTI et al., 2012, p. 40)

O ambiente favorece o desenvolvimento da diversidade (geológica, geomorfológica, espeleológica), que reflete as condições de adaptação e sobrevivência, nesse ecossistema, de uma rica e diversificada fauna, a qual, como salientado, em muitos casos, abriga-se nos ambientes hipogeos.

Neste sentido, o trabalho reflete o levantamento de dados, coleta topográfica, registro fotográfico e mapeamento, visando catalogar as informações espeleológicas e informações relacionadas. Vale ressaltar que devem "(...) ser desenvolvidos estudos de coletas para projetar o terreno das cavidades, identificando os seres ali existentes, falar dos processos naturais que constituem na formação das cavidades e registros arqueológicos encontrados nesse patrimônio" (BANDEIRA, 2013, p. 118).

Diante disso, a topografia e mapeamento seguiram padrões de delineamento visando "(...) um sistema de elaboração das cavidades com precisão e detalhamento de um mapa espeleológico" (MAGALHÃES; LINHARES, 1997). A topografia processou-se em nível 4C, pelo sistema da *British Cave Research Association* (BCRA) (ASSUNÇÃO; BRAGANTE-FILHO, 2015; ICMBio, 2011). Os parâmetros de detalhamento são de modo mais próximo da realidade, cujos níveis de precisão exigem parâmetro de 1 centímetro e 1º para as medidas. Essa escolha pode garantir a precisão necessária ao conhecimento e catalogação-registro das cavidades encontradas, uma vez níveis mais elevados, como 5C e 5D são exigência para estudos de relevância em processos de licenciamento de grandes empreendimentos.

A Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE) orienta em suas fichas de registro no CNC a inclusão de subsídios quanto a elementos distintos relacionados à caverna, exigindo que em campo, fossem feitas observações quanto à existência de fauna e seu grau de relação com o ambiente cavernícola, espeleotemas, hidrologia, material clástico, significados sociais e culturais no contexto das escalas local até internacional. Isso tudo possibilita a

(...) concretização de uma metodologia de trabalho que visa sistematizar as tarefas no âmbito da conservação do Patrimônio Geológico. Estas estratégias devem ser agrupadas nas seguintes etapas sequenciais: inventariação, quantificação, classificação, conservação, valorização e divulgação e,

finalmente, monitorização (BILHA, 2005, p. 95).

Nesse caso, visa-se contribuir com a proteção dos "(...) documentos, as obras e outros bens de valor histórico, artístico e cultural, os monumentos, as paisagens naturais notáveis e os sítios arqueológicos" (CECAV, 1988), uma vez catalogando-se oficialmente as informações espeleológicas, contribui-se para seu reconhecimento e gerenciamento (CAVALCANTI et al. 2012, p. 128)

É importante ressaltar o reconhecimento de uma área não apenas como uma paisagem exuberante, mas também pela singularidade espeleológica, que permite conceber a interpretação ambiental do lugar. A partir das informações disponibilizadas, cabe a interpretação, o uso e a manutenção do equilíbrio geodiverso encontrado. No que se refere à área estudada, há ocorrência de inscrições rupestres nos abrigos rochosos, muitos dos quais, classificados como cavernas e, portanto, incluídos nos Cadastro Nacional. Tais registros iconográficos remontam aos ancestrais dos povos americanos, anteriores à chegada dos europeus, os quais

Não conhecendo ainda técnicas de construção destes povos, forçosamente usavam de abrigos naturais, encontrados nos paredões areníticos dessas paragens. Neles manifestaram seu cotidiano, ainda indecifrável aos nossos olhos, através de inscrições de baixo relevo e pinturas com uso de pigmentos disponíveis em cada localidade (CASTRO, 2011, p. 560).

Esse cenário ancestral, não se difere do atual, especificamente na região Sul do Maranhão, utilizado rudimentarmente pelo estilo de vida desses povos que dependiam das disponibilidades oferecidas pela sazonalidade implícita ao Cerrado, portanto, vagavam pelo território conforme essa disponibilidade era oferecida, comportavam-se, pois, como viajantes que vagam segunda as necessidades de caçada e pesca. Essas inscrições nas rochas devem ser preservadas para que se possa estudá-las e entender-se o processo de ocupação do Sul do Maranhão, uma vez que pouco desses povos ancestrais ainda povoam essa área, dada sua expulsão:

(...) pela primogênita atividade de ocupação das áreas de savanas, a pecuária, vindas do leste pelo Piauí, encontrava a barreira humana das tribos que no enfrentamento com branco perderam muitas vidas e foram levadas, ou ao extermínio, ou à

expulsão de suas terras onde tiveram de deixar os remanescentes ancestrais e rumarem para oeste. (CASTRO, 2011, p. 559)

Logo, as atividades desta pesquisa vão além do que cada elemento representa, pois, se dá pela preservação do Patrimônio, remetendo à importância natural e social. Essa finalidade ocorre pela identificação do potencial espeleológico encontrado, em vista de apresentar valor natural, social e cultural, em meio a ocupação humana pregressa inscrita na rocha.

2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As etapas de procedimento metodológico compreendem fases que compõem análise do referencial teórico para as técnicas de execução das atividades de campo e laboratório, além da interpretação ambiental, dentre o levantamento de dados, confecção e registro das informações espeleológicas. Como etapa efetiva da pesquisa desenvolvida, o material bibliográfico nos auxiliou a ter percepção do contexto que figura a área estudada, servindo como auxílio ao levantamento de dados para as fases posteriores a serem desenvolvidas. As contribuições fundamentais para a consecução da pesquisa, advieram de Correia Filho (2011); Florenzano (2008); Silva (2008) e Magalhães e Linhares (1997).

A topografia e mapeamento consistiu-se em desenvolver de forma precisa as medidas estabelecidas. Abre-se parênteses para frisar que os mapas de cavernas, via de regra, são produzidos pelos estudiosos desses ambientes, espeleólogos e cientistas, constituindo-se pela topografia realizada no campo e pela cartografia (confecção do mapa) (PALMER, 2007). Ela seguiu normas discriminadas por Rubbioli e Moura (2009) e padrões estabelecidos pela *British Cave Research Association* (BCRA) (ASSUNÇÃO; BRAGANTE-FILHO, 2015; ICMBio, 2011) os quais estabelecem as etapas e procedimentos de campo, topografia e mapeamento. Dessa forma, as etapas que se seguiram foram:

- Ω O levantamento dos Potenciais Espeleológicos no Patrimônio Geológico do município de Tasso Fragoso, Maranhão;
- Ω Levantamento bioespeleológico, florístico, na área de entorno - através de observação e entrevistas - ou nas próprias unidades espeleológica;
- Ω Evidências de registros fossilíferos, clásticos e inscrições nas cavernas e área de entorno;
- Ω Observação dos aspectos espeleológicos quanto as características que evidencia a dinâmica de interação na formação das cavidades, pelos agentes internos (químicos e físicos) externos;
- Ω Topografia com uso de trena, bússola e clinômetro Bruton com precisão maior que 1°, GPS Garmin Etrex 35, planilha topográfica discriminatória dos aspectos específicos da topografia e das características peculiares encontradas e a situação descritiva da localidade.

A primeira fase da proposta assinala o estudo prévio para a execução de coleta e interpretação do ambiente estudado, que orienta o desenvolvimento da segunda fase (levantamento das potencialidades). Nela considerou-se as cartas geológicas, geomorfológicas e de declividades, esta gerada a partir de imagem *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (JPL, 2013). O registro de informações topográficas ocorreu com a etapas:

 - Ω O início do procedimento topográfico, que se constitui com a escolha da base, posicionada na parte central de entrada da caverna. É importante frisar que o ponto inicial da visada começa com base zero, seguido de numeração, um, dois e números sucessivos, constituindo os estabelecimentos técnicos da projeção de coleta de dados topográficos;
 - Ω Ressalta-se que a retirada da declividade e aclividade do terreno é desenvolvida com o clinômetro de orientação, elevado a altura dos olhos de forma retilínea para a exatidão do dado coletado. É nesse ponto que deve partir a escolha de base, obtendo a marcação de inclinação da projeção da caverna no centro de projeção da planta;
 - Ω Do ponto de partida segue-se sequenciais de caminhamento, com a marcação de pontos com uma trena de corpo aberto, iniciando do ponto zero seguido ao um, zero a dois, sucessivamente, representando um eixo de crescimento até completar a circunferência ou eixos de prolongamento com galerias.
 - Ω Seguindo o procedimento topográfico, a distância retirada em metros com a trena é medida com a bússola para a retirada do azimute. A marcação com a trena de corpo aberto é estabelecida pela distância da visada com a bússola, obtendo assim o prolongamento das cavidades.

Todas as coletas acima apresentadas são registradas no formulário de topografia, além de dados como coordenadas geográficas em GPS,

dentre informações bioespeleológicas, inscrições, fósseis, lascamentos, entre outros interesses do patrimônio. O segmento topográfico atinge as extremidades da cavidade (base a base, conduto a conduto), em projeção da coleta de dados para a futura elaboração do mapa espeleológico e relatório topográfico para o cadastramento.

Os dados da planilha topográfica possibilitaram a confecção em papel dos mapas com planta, cortes e boca, em alguns casos mais de um corte foi necessário pela existência de condutos distintos de um alinhamento central. O mapeamento pode ser realizado em escalas muito grandes, dada a dimensão pouco expressiva da maioria das cavernas encontradas. Os mapas foram escaneados e importados para *software* gráfico, no qual serviram de base à construção das cartografias digitais em formato DWG, posteriormente a sua retificação e conferência de escala e medidas, exportadas para formato Raw e Jpeg, utilizados conforme as possibilidades, já que os primeiros apresentam grande tamanho e melhor qualidade, um exemplo desse trabalho está na figura 1.

O nome do autor e o *software* desenvolvido na confecção do mapa devem ser apresentados como dados básicos necessários para o cadastramento. A

confecção do mapa espeleológico é necessária para o reconhecimento, existência, consolidação de dados, além do monitoramento para a sua proteção e desenvolvimento da dinâmica natural do ambiente. Ultimando os trabalhos, foram solicitados os registros no CNC, através do registro sócio pesquisador na SBE. As cavidades são cadastradas por meio de dados informados no sistema, o que permite catalogar a existência e o interesse do seu patrimônio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados desta pesquisa apresentam bases de dados levantadas durante a prospecção das Unidades Espeleológicas de Tasso Fragoso-MA (Figura 2), que está localizada na mesorregião sul maranhense, na porção sul-sudeste das chapadas pediplanadas na macrorregião de Balsas, na micro região dos ‘Gerais de Balsas’ entre chapadas, chapadões mesas e mesetas ao Sul do Estado do Maranhão. (MARANHÃO, 2005). A região estudada apresenta médio potencial espeleológico, destacada na figura 3.

Caverna Canto do Juriti

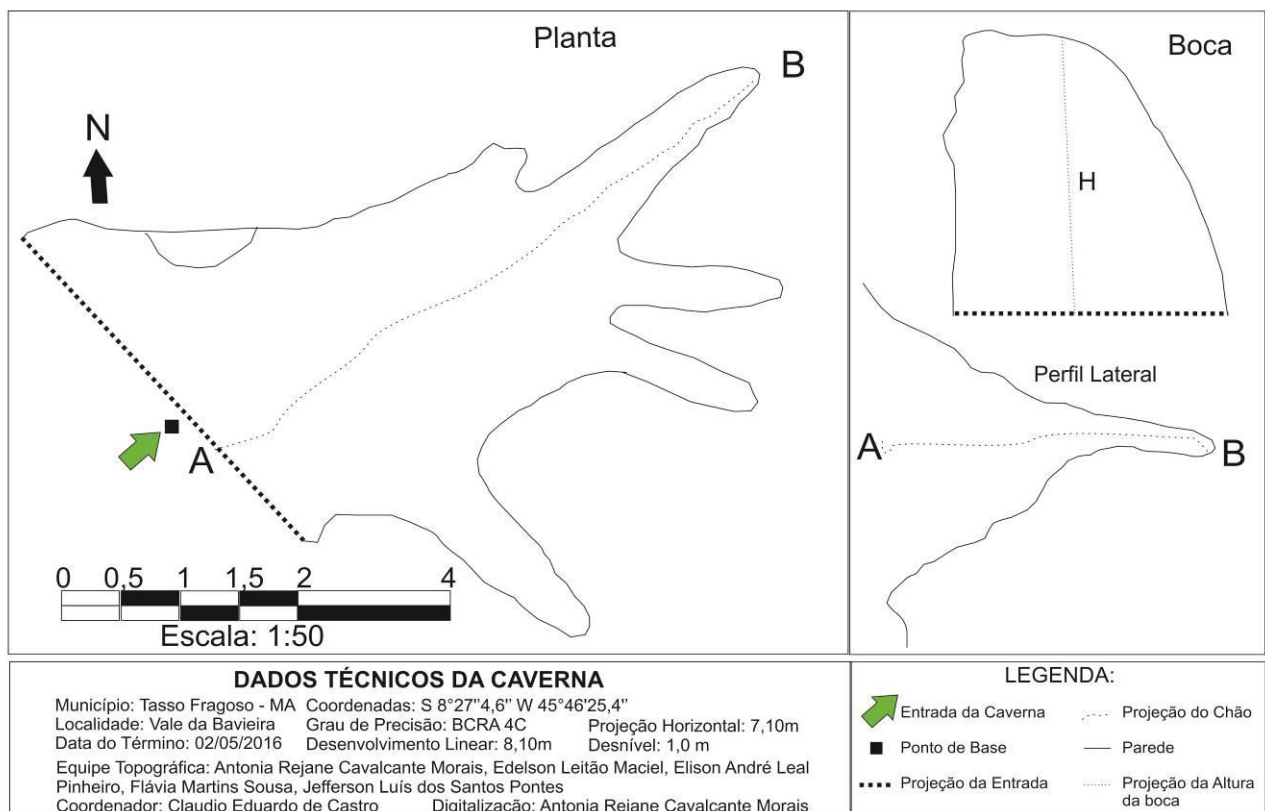


Figura 1 - Carta Topográfica da Caverna Canto do Juriti, Tasso Fragoso - MA (CASTRO, 2016).

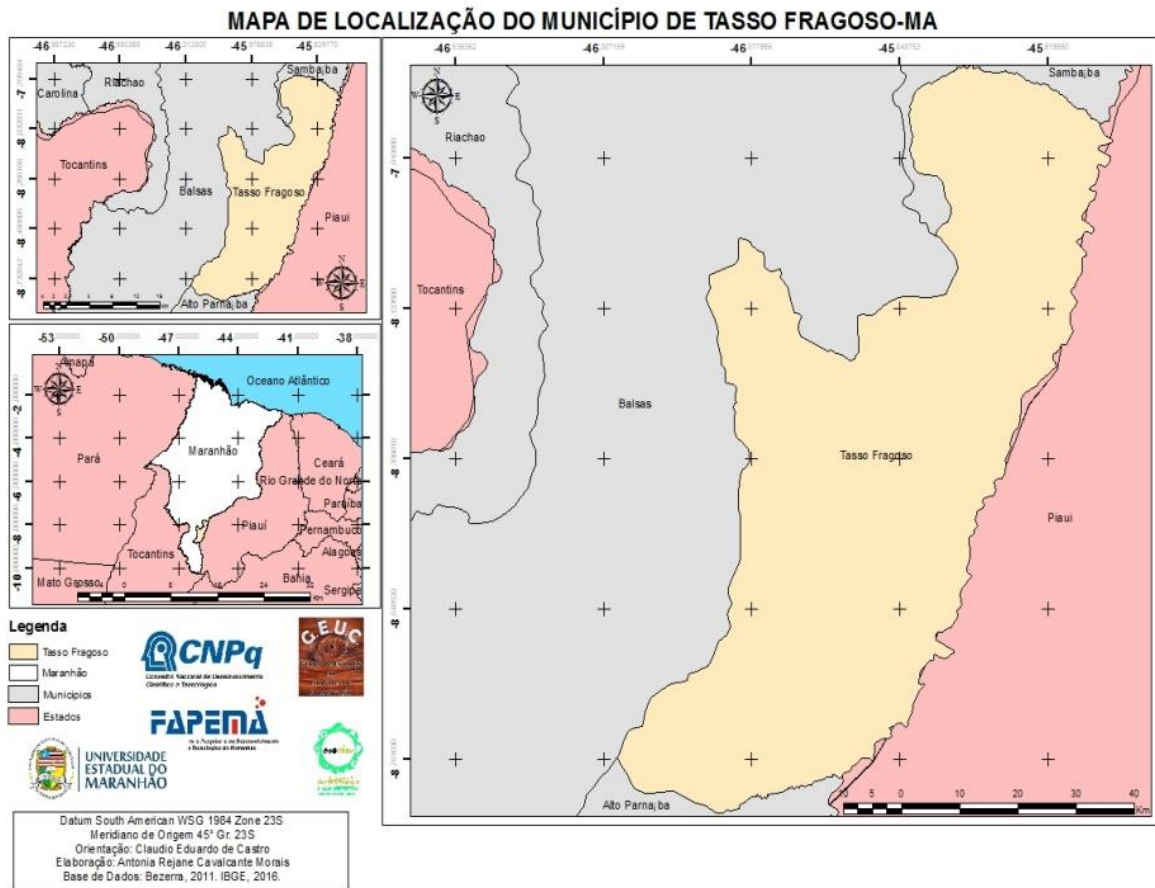


Figura 2 - Mapa de Localização do município de Tasso Fragoso - MA (dados de IBGE, 2005).

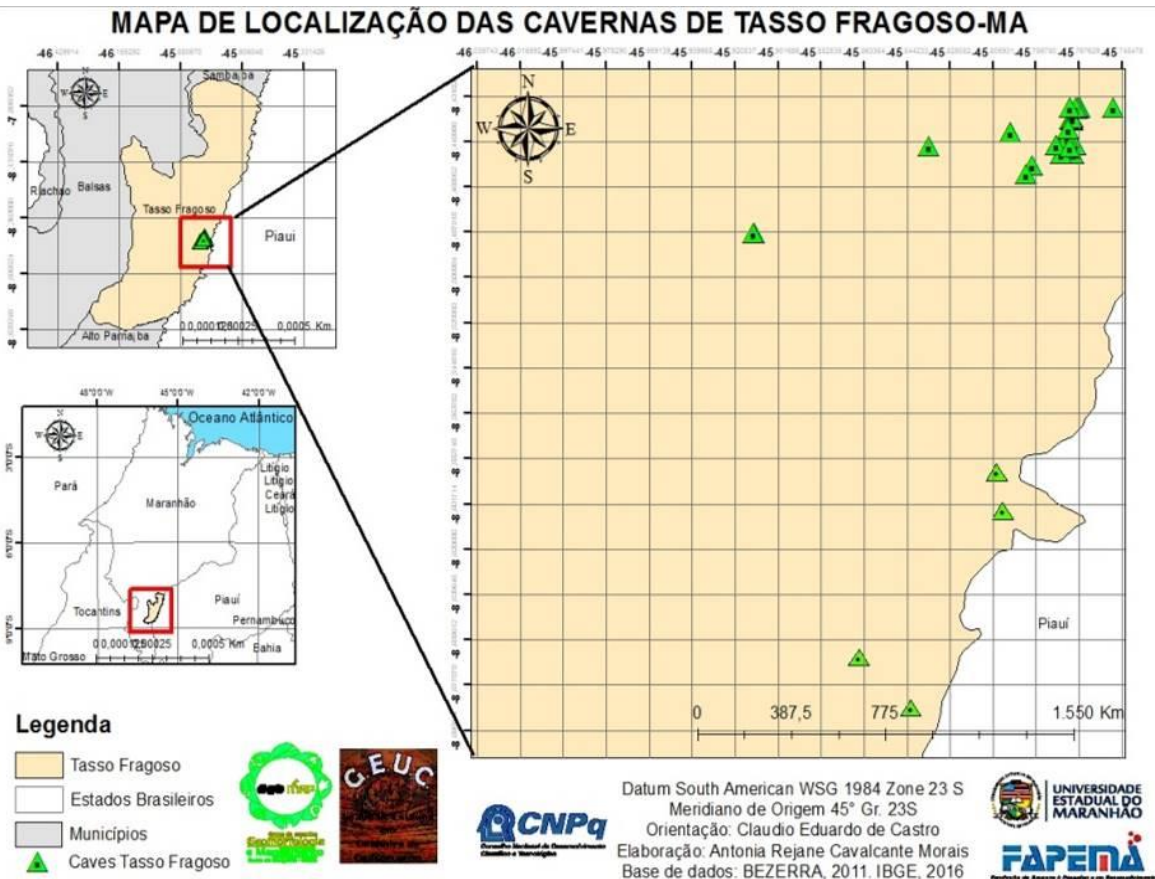


Figura 3 - Mapa de Localização das cavernas de Tasso Fragoso - MA (dados de IBGE, 2005).

Os dados das unidades espeleológicas de Tasso Fragoso-MA sinalizados no mapa foram coletados entre 2014 e 2016, culminando em um total de 44 cavernas. O índice concorre com o que se apresenta na literatura, na qual o CECAV aponta um grau de incidências em nível médio para a região (CAVALCANTI et. al., 2012, p. 24).

Nesse propósito, apresentar os pontos das cavernas em Tasso Fragoso agrupa o conhecimento e as descobertas espeleológicas, ao que também evidencia a suscetibilidade de ocorrências em Tasso Fragoso, dentre toda a região Sul do Maranhão, indicando as possibilidades de ocorrências em outras áreas a se prospectar. Assim a ocorrência de das cavernas é um fator preponderante a existência da fragilidade, pois se constitui “(...) com alta vulnerabilidade a processos erosivos e a movimentos de massa. Tais formas de relevo indicam, portanto, uma retomada erosiva recente em processo de reajuste ao nível de base regional demarcado pela calha do rio Parnaíba”. (BANDEIRA, 2013, p. 59)

Esta vulnerabilidade vem influenciar no processo de formação dos diferentes aspectos geomorfológicos, com aspectos variáveis, isto porque se trata de uma região de transição, cuja característica litológica e clima permitem o desenvolvimento de variadas feições geomorfológicas pois: alternadas as estações chuvosas e seca, “[...] de relevo e de solo [...] permitem o desenvolvimento de uma grande diversidade de ambientes naturais. A cobertura vegetal reflete, em particular, a influência das condições de transição climática, entre o clima amazônico e o semiárido nordestino” (CORREIA FILHO et al., 2011, p. 19)

A dinâmica de interação apresenta a constituição de diferentes feições, tendo estes definidos na literatura como fator de influência para esta representação no estado. Por sua vez, elas se dão por meio de vulnerabilidade ambiental, onde os processos de modelação constituem diferentes feições, como podem ser vistas os processos erosivos dos Potenciais Geomorfológicos e Espeleológicos nas Figuras 4 e 5.

Na área de pesquisa encontram-se as condições que, pelos aspectos estruturais, promovem a constituição de feições geomorfológicas decorrentes da litologia arenítica, manifesta por intercalações de sedimentação cruzada, acanalada e linear, características da formação Piauí, logo abaixo da formação geológica Pedra de Fogo. Sobre os solos dos vales esculpido nessas Formações, há evidências da camada superior erodida, como fragmentos de árvores fossilizadas, indicando a existência das rochas siliciclásticas do período

Neocarbonífero e Permiano, Pedra de Fogo (CALDAS; MUSSA, 1989), o que permite monitoramento para os estudos de interpretação ambiental (Figuras 6 e 7).



Figuras 4 e 5 - Formas erosivas nos potenciais Geológicos e Espeleológicos (Tasso Fragoso-MA).

O registro reflete o testemunhar dos elementos para estudos de interpretação ambiental, cujas evidências: “(...) dos registros fossilíferos refletem nas mudanças da flora e da fauna, as extinções em massa e as mudanças climáticas ocorridas ao longo do tempo geológico” (CPRM, 2008, p. 22). Uma evidência que cabe interpretar o ambiente como um testemunho elucidativo da geodinâmica, cujo espaço é testemunho dos mais variantes processos estruturais-esculturais, sejam eles em curto ou longo tempo geológico.

Desse modo, a diversidade aponta entrelaçamentos entre a dinâmica atuante no espaço, expressos na formação, evolução e constituição do cenário geomorfológico. No que tange às cavernas, isso pode ser constatado por haver carstificação não só em rochas carbonáticas, pois:

(...) trata-se de um ecossistema complexo formado por rochas que, ao longo

de milhares de anos, foram dissolvidas pela água naturalmente acidulada. Tal ambiente é caracterizado, principalmente, pela circulação de água em superfície e em subsuperfície e, por isso, conta com a presença de cavernas, (...) São exemplos de rochas solúveis, em ordem aproximada de maior solubilidade: calcário, dolomito, mármore, arenito, quartzito, granito, formação ferrífera, entre outras (vide carste). (CAVALCANTI et al., 2012, p. 112)

As unidades espeleológicas são resultantes de um cenário geomorfológico modelado na formação Piauí, do Grupo Balsas, neste caso, que abrigam a cavidades, cuja baixa solubilidade está condicionada às características litológicas e especificamente à constituição dessa litologia, friável e de alta erodibilidade. Nesse mesmo contexto de condições está configurado o Patrimônio Geomorfológico, pois remete a dinâmica estrutural de uma paisagem, uma vez que

Sua morfologia (extensão, largura e altura de condutos, relações geométricas, entre outros) que está diretamente relacionada às estruturas geológicas existentes nas rochas encaixantes e à dinâmica do fluxo da água que atuou no processo de formação. (CAVALCANTI et al., 2012, p. 20)

O contexto apresentado reflete ao processo de configuração das fisionomias da região variadas sob os aspectos estruturais, com testemunhos tabulares, dissecados, côncavos, pediplanos, entre outros. Essa geomorfogênese além de subsidiar os efeitos de formação das cavernas, expõem as modificações do cenário geológico, as quais, condicionadas à

dinâmica dos agentes exógenos do relevo, conduz na mudança constante das estruturações, como se vê nas figuras 8, 9 e 10.



Figuras 6 e 7 - Registro fossilífero evidenciado em Tasso Fragoso-MA.



Morro do Guilherme



Morros testemunhos da escultura erosiva em forma de meseta e mesa

Figuras 8, 9 e 10 - Aspectos geomorfológicos do relevo em Tasso Fragoso-MA.

Desse modo pode-se suscitar a fragilidade como associada à paisagem, graças aos constantes processos físicos advindos da dinâmica climática que permite desenvolver o cenário geomorfológico nessas Formações e vegetação de Cerrados, uma vez que

Os mecanismos que permitem a manutenção desta megadiversidade dependem da delicada relação entre inúmeras variáveis: clima, relevo, umidade etc. Este "quebra-cabeças" ecológico forma o mosaico ideal no qual a interação das peças promove mais diferenciação biológica. (CAVALCANTI et al., 2012, p. 19)

A interface dos aspectos até aqui apresentados com o cenário que compõem a manutenção da vida em ambientes de cavernas, se dá pela relação mútua ecológica. A geo e a biodiversidade nos mostra essa condição, dos quais pode-se encontrar alguns aspectos evidenciando essas relações, como se vê nas figuras de 11 a 19.

Cavalcanti *et. al.*, (2012 p. 40) assinalam sobre os ambientes cavernícolas, um cenário que possibilita a condição de uso dessas unidades espeleológicas por refúgio de predadores, manutenção da vida faunística, mudanças climáticas e espécies alternativas que buscam esses ambientes por algum tempo, horas, entre outros mecanismos que cada indivíduo se constitui no meio. Estes fatores, além de promoverem equilíbrio, vêm condicionar a manutenção da diversidade no Cerrado. O autor expressa as relações ecológicas em cavernas, quando fala que o alimento disponível pode ser as fezes de morcego, para invertebrados, ou "material orgânico em decomposição (animais mortos e sedimentos), por material trazido pela água ou por outros animais que eventualmente utilizam a caverna como local para alimentação ou abrigo noturno".

No que se reporta às representações que têm as cavernas para o homem, como abrigo, mitos e a religiosidades a elas associadas, na área pesquisa pode se constatar (Figuras 20 a 23) evidências de registros rupestres por pedras lascadas, com inscrições em cavernas ou em áreas de entorno, além do culto à religiosidade.

Esses artefatos são de grande importância no desenvolvimento civilizatório, na valorização, necessidade, enfim, constitui como peça chave no

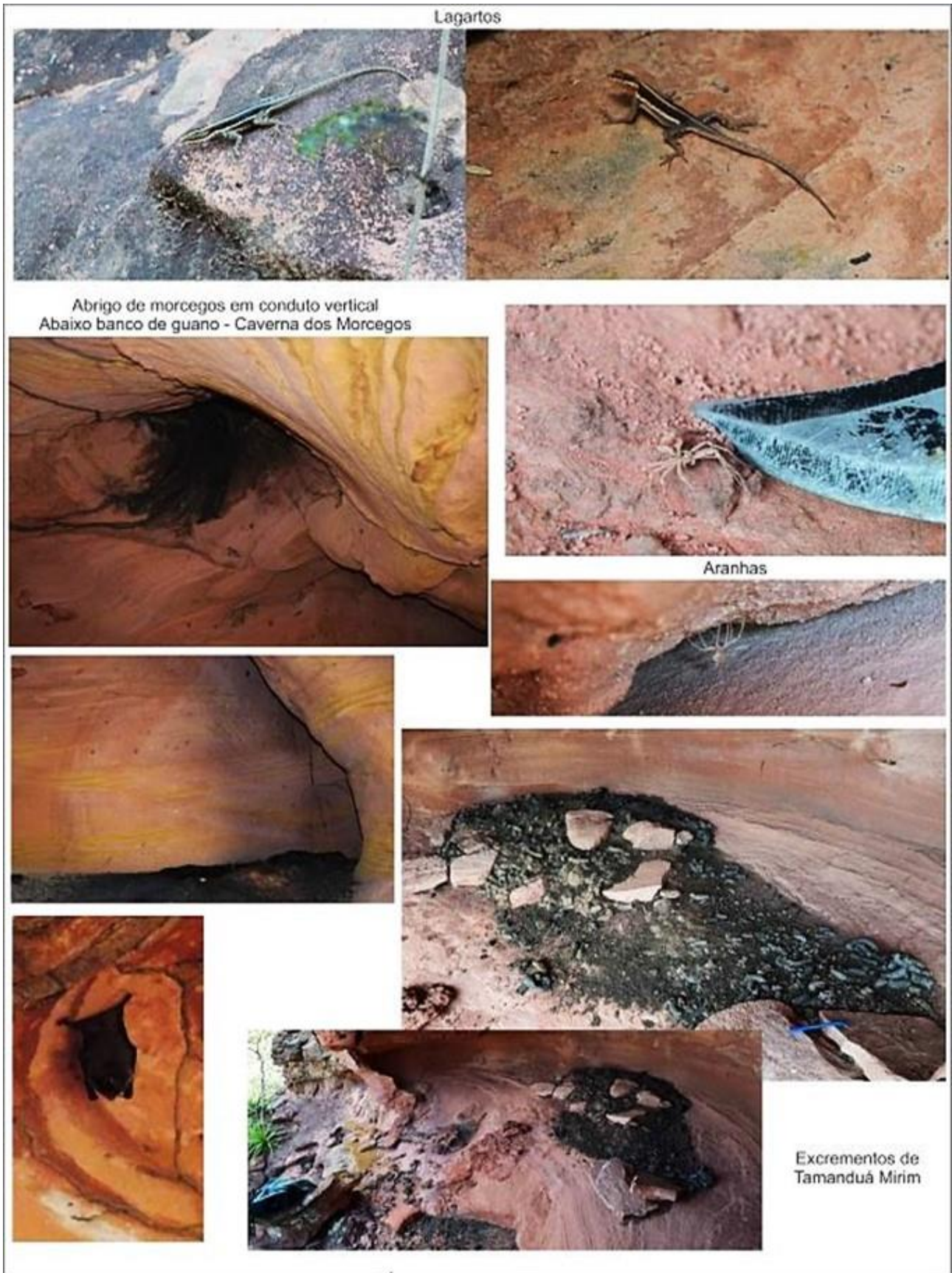
reconhecimento destas áreas com valor histórico, cultural, por meio de suas práticas e costumes, além de valor ao ambiente natural. Dessa maneira, estas expressões da geodiversidade possibilita a composição dos dados para o registro das informações que, por sua vez, tem como alcance o gerenciamento das ações de conservação, onde as causas que atrelam as condições de formação, adaptação e relações sociais são fatores primordiais a menção de Patrimônio.

O registro das informações espeleológicas vem com esse propósito, cuja condição é dada por apresentar os aspectos que vinculam a gestão e monitoramento dos dados identificados e registrados, como elementos que fazem parte do conjunto arquitetônico natural e cultural, cuja construção da história remete a necessidade de proteção legal. A condição de Patrimônio nos reporta à valorização, cuja importância reflete ao que representa o cenário, mediante a fragilidade ambiental, dinâmica e valorização que se estabelece no ambiente, que se constitui:

(...) com exposição natural ou artificial de um ou mais elementos da geodiversidade, bem delimitado geograficamente, que apresenta valor singular do ponto de vista científico, pedagógico, cultural ou turístico, seja por seus aspectos geomorfológicos, paleontológicos, paleoambientais, sedimentológicos, ígneos, metamórficos, estratigráficos, minerários, espeleológicos, seja pela história geológica do lugar de suas formas. (BANDEIRA, 2013 p. 116).

São perceptíveis os processos de grande relevância da diversidade natural (faunística, florística, geológica, arqueológica e espeleológica), que referencia como componente importante para a ciência, natureza e cultura. Atreladas a estes processos deve-se propor diretrizes de gestão e monitoramento, como condições viáveis aos mecanismos de conservação do Patrimônio.

A realização das topografias a partir das informações coletadas, a confecção dos mapas, os relatórios e o registro de suas informações no sistema de cadastramento de cavernas, possibilita o gerenciamento das áreas que devem ser preservadas bem como a proteção destes ambientes de grande vulnerabilidade e importância.



Figuras 11 a 19 - Interação da fauna em cavernas de Tasso Fragoso-MA.



Figuras 20 a 23 – Relação Humana com a Geodiversidade em Tasso Fragoso-MA. No sentido horário a partir do alto à esquerda: 17- Pedras lascadas na entrada da caverna do lascamento; - Inscrição na entrada da caverna; 19 –Pedra lascada10

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diversidade apresentada em Tasso Fragoso-MA representa um mosaico de diversidade geocológica que merece bastante atenção, para a manutenção dos processos naturais e dos recursos culturais ali expostos. São elementos que se constituem de fragilidades, uma vez que são decorrentes de processos exógenos dinâmicos, sobre geologia sedimentar friável cuja geomorfologia expressa essa fragilidade, já que se compõem por morros testemunhos, mesetas, planaltos pediplanados dissecados e presença de cavernas nas bordas dessas geofomas.

Além desses fatores, é importante mencionar que as condições predatórias das espécies vegetais e animais promovem a fragilidade ambiental, mas que a fortalece e conduz para a existência da diversidade faunística pelo modo de sobrevivência que o espaço oferece para a manutenção de todos os elementos que ali se constitui. Nesse aspecto, cabe salientar a importância da relação proporcionadas pelas cavernas à fauna, em certos casos passíveis de existirem unicamente nesses ambientes.

Não obstante, os aspectos relacionais dos universos cultural, religioso, histórico e arqueológico estão presentes não só nas cavernas encontradas, mas nos paredões areníticos representados por inscrições rupestres ainda não estudadas.

Nesse contexto se coloca a necessidade da preservação, uma vez que o desenvolvimento da diversidade se apresenta de modo interligado, se configura como patrimônio. Assim, as cavidades de Tasso Fragoso são caracterizadas como Patrimônio espeleológico, devendo-se promover a manutenção desses ambientes preservando-os. Como atesta Bandeira (2013) são necessários para isso o desenvolvimento de estudos, com coletas de dados para a projeção do terreno das cavidades, identificação dos seres, interpretação sobre os processos oriundos de formação e identificação dos registros arqueológicos encontrados. Nesse trabalho, apresentam-se as relações universalizantes das cavernas prospectadas, topografadas e mapeadas em Tasso Fragoso como suporte à consolidação do patrimônio geológico, bem como seu registro potencializa estudos futuros, já que as etapas iniciais foram realizadas.

O índice médio de ocorrências apontado anteriormente se confirmou, agora constatado por ocorrências concretas, não hipotéticas, contribuindo na elaboração de políticas protecionistas e subsidiando pareceres quanto à empreendimentos que forem propostos nessas áreas.

Desse modo, o trabalho se concretiza com etapas alcançadas, com possibilidades de estudos mais aprofundados nas diversas áreas de conhecimento. Além disso, as informações obtidas

no campo nos apontam a necessidade de se realizar estudos mais abrangentes a partir da própria pesquisa iniciada, uma vez que há indicativos de potenciais espeleológicos em outros pontos do município, cujo dado já alcançado é uma gama de abertura a pesquisas científicas destinadas a conservação. Há necessidade de ampliar esse alcance, uma vez que ainda há muito a ser revelado da diversidade ambiental, social e cultural.

REFERÊNCIAS

- ASSUNÇÃO, P.H.S.; BRAGANTE-FILHO, M.A. Atual metodologia de mapeamento de cavernas realizada pela Sociedade Excursionista e Espeleológica – SEE. Congresso Brasileiro de Espeleologia, 33, 2015. Eldorado. **Anais...** Campinas: SBE, 2015. p.275-280. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais33cbe/33cbe_275-280.pdf.
- BANDEIRA, I.C.N. **Geodiversidade do Estado do Maranhão/ Levantamento da Geodiversidade.** Programa Geologia do Brasil: CPRM. Teresina– PI: 2013; 294 p. Disponível em: www.cprm.gov.br. Acesso em: 10/05/2014.
- BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global: esboço metodológico. **Caderno de Ciências da Terra**, São Paulo, n. 13, 1972.
- BILHA, J. **Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente biológica.** Braga, Portugal: Editora Palimage, 2005.
- BRASIL. **Constituição da república federativa do brasil.** Presidência da República Casa Civil e Subchefia para Assuntos Jurídicos: Ato das Disposições Constitucionais Transitórias e Atos decorrentes do disposto no § 3º do art. 5º de 1988. Acesso em: 20 jul. 2014. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/downloads/legislacao.html>.
- CALDAS. E.B; MUSSA, D. Nota sobre a ocorrência de uma floresta petrificada de idade permiana em Teresina, Piauí. **Bol. IG-USP**, São Paulo: IG-USP, n. 7, 1989.
- CASTRO, C.E. de. Sítios arqueológicos em abrigos e cavernas areníticas no sul do Maranhão e a contemporaneidade socioambiental. Congresso Brasileiro de Espeleologia, 31, 2011. Ponta Grossa. **Anais...** Campinas: SBE, 2011. p.559-565. Disponível em: www.cavernas.org.br/anais31cbe/31cbe_559-565.pdf.
- CAVALCANTI, L.F.; et al. **Plano de ação nacional para a conservação do patrimônio espeleológico nas áreas cársticas da bacia do rio São Francisco.** Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade., 2012. (Série Espécies Ameaçadas n° 27)
- CONAMA. Resolução CONAMA n° 347 de 10 de setembro de 2004. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 176, 13 set. 2004. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=452>. Acesso em: 20 abr. 2014.
- CORREIA FILHO, F.L.; GOMES, É.R.; NUNES, O.O.; LOPES FILHO, J.B. **Relatório diagnóstico do município de Tasso Fragoso:** projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, no estado do Maranhão. Teresina: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2011.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Geodiversidade do Brasil:** conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro. Editor: Cassio Roberto da Silva. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

- _____. **Mapa de Geodiversidade do Maranhão**, 1:1.200.000. Departamento de Gestão Territorial (DEGET). Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/>. Acesso em: 26 abr. 2017.
- FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318 p.
- IBGE. **Atlas Estatístico do Brasil, 1997**. Brasília: IBGE, Diretoria de Geociências, 2000.
- ICMBio. **III curso de espeleologia e licenciamento ambiental**. Brasília: MMA/ICMBio, 2011. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/>. Acesso em: 12 fev. 2013.
- JPL. Jet Propulsion Laboratory – Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm>. Acesso em: 21 mai. 2013.
- MAGALHÃES, E.D.; LINHARES, J.C. **Curso prático de topografia**. Brasília: Espeleo Grupo de Brasília – EGB, 1997.
- MARANHÃO. **Meso e micro região do Estado**. Disponível em: <http://www.ma.gov.br>. Acesso em 15/05/2016.
- PALMER, A. N. **Cave Geology**. Ohio: Cave Books, 2007.
- RUBBIOLI, E.; MOURA V. **Mapeamento de cavernas: guia prático**. São Paulo: Redespeleo, 2009.
- SILVA, C.R. (Ed.). **Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.
- STÁVALE, Y.O. **Espacialização do patrimônio espeleológico da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço: geossítios selecionados e sua importância para a geoconservação**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MPBB-8XSNAx/yuri_okawara_stavale.pdf?sequence=1. Acesso em: 10/06/2015.
- VAZ, P.T., RESENDE, N.G.A.M., WANDERLEY FILHO, J.R., TRAVASSOS, W.A. 2007. Bacia do Parnaíba, **Boletim de Geociências**, 15(2): 253-263. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2007.

Fluxo editorial:

Recebido em: 03.02.2017

Aprovado em: 05.05.2017



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp

A CLASSIFICAÇÃO SCHINER-RACOVITZA DOS ORGANISMOS SUBTERRÂNEOS: UMA ANÁLISE CRÍTICA, DIFICULDADES PARA APLICAÇÃO E IMPLICAÇÕES PARA CONSERVAÇÃO

THE SCHINER-RACOVITZA CLASSIFICATION OF SUBTERRANEAN ORGANISMS: A CRITICAL ANALYSIS, DIFFICULTIES OF APPLICATION AND CONSERVATION

Eleonora Trajano (1) & Regina Bessi (2)

(1) Laboratório de Estudos Subterrâneos (LES), Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva – Universidade Federal de São Carlos (DEBE/UFSCar), São Carlos SP.

(2) Bióloga autônoma, São Paulo SP.

Contatos: etrajano@usp.br; regbessi@gmail.com.

Resumo

Apresentamos uma análise crítica da classificação ecológico-evolutiva geralmente aceita e utilizada dos organismos subterrâneos, proposta por Schiner em 1854 e complementada por Racovitza em 1907. Esse sistema é composto por três categorias, a dos troglóbios, dos troglófilos e dos troglóxenos. Inconsistências conceituais, sobretudo no que diz respeito aos troglóxenos, assim como na correspondência entre essas categorias de acordo com as definições originais e seu uso em classificações alternativas são discutidas. As categorias são redefinidas de acordo com Trajano (2012), o último autor a introduzir uma alteração conceitual relevante, baseada no modelo de população fonte-sumidouro. Dificuldades e armadilhas para aplicação da classificação de Schiner-Racovitza, assim como critérios práticos para distinção entre suas categorias são apresentados. Destacamos a importância de distinguir os acidentais dos organismos subterrâneos propriamente ditos, assim como troglóbios, i.e., espécies exclusivamente subterrâneas, de populações troglomórficas, as quais podem ou não ser restritas ao meio subterrâneo. Critérios para o reconhecimento de troglóxenos obrigatórios também são detalhados. Os problemas especiais envolvendo o estudo da fauna subterrânea de áreas ferruginosas são discutidos. Finalmente, é enfatizada a importância para a conservação de uma classificação cientificamente robusta, dentro de critérios claros e objetivos, como base para a elaboração de políticas ambientais eficientes de proteção aos sistemas subterrâneos.

Palavras-Chave: classificação Schiner-Racovitza; biologia subterrânea; evolução; fauna de cavernas; troglóbios, troglófilos, troglóxenos.

Abstract

Herein we critically analyse the generally accepted and applied ecological-evolutionary classification of subterranean organisms, first proposed by Schiner in 1854 and emended by Racovitza in 1907. This system is composed by three categories: troglobites, troglophiles and troglonexes. Conceptual inconsistencies are pointed, especially concerning the troglonex category, and correspondence between categories according to their original definitions and alternative classifications are discussed. The three categories are redefined according to Trajano (2012), the last author to introduce a relevant conceptual change based on the source-sink population model. Difficulties and pitfalls for application of the Schiner-Racovitza classification, as well as practical criteria for distinction between its categories are presented. We highlight the importance of distinguishing accidentals from subterranean organisms themselves, and troglobites, i.e., exclusively subterranean species, from troglomorphic populations, which may or may not be restricted to the subterranean environment. Criteria for recognition of obligatory troglonexes are also detailed. Special problems concerning the study of the cave fauna from ferriferous areas are discussed. The importance of rightly classifying the subterranean organisms according to the Schiner-Racovitza system for conservation of these fragile ecosystems is discussed.

Key-Words: Schiner-Racovitza classification; subterranean biology; evolution; cave fauna; troglobites, troglophiles, troglonexes.

1. INTRODUÇÃO

Praticamente todos os interessados em espeleobiologia¹ que leram textos, mesmo que básicos, ou assistiram palestras sobre o tema deparam-se com os termos “troglóbios”, “troglófilos” e “trogloxenos”, normalmente acompanhados de definições sucintas – troglóbios são animais só encontrados em cavernas (autores e palestrantes com real conhecimento sobre espeleobiologia tomam o cuidado de referir-se a meio subterrâneo no lugar de cavernas), troglófilos podem viver e completar seu ciclo de vida tanto no meio epígeo (superficial) e trogloxenos são encontrados regularmente no meio subterrâneo, mas devem sair periodicamente ao meio epígeo para completar o ciclo de vida. Adicionalmente, conceitua-se ainda troglóbios pela presença dos chamados troglomorfismos, definidos através dos exemplos mais comuns (referidos simplificada-mente como “redução de olhos e pigmentação”) e não em termos de seu significado evolutivo.

Essa abordagem superficial gera a noção, altamente equivocada, de que é fácil e imediato enquadrar organismos encontrados em cavernas em alguma dessas três categorias. Esse problema vem se tornando mais sério, com consequências cada vez mais graves pelas potenciais implicações adversas na conservação do patrimônio espeleológico nacional em função das mudanças na legislação nos últimos anos. O mais grave acontece quando classificações enviesadas são incluídas em estudos ambientais que servem como base para determinação de graus de relevância de cavernas para fins de aplicação do Decreto Federal nº 6.640, de 7 de novembro de 2008. Considerando-se que muitos critérios biológicos constantes desse Decreto apoiam-se na classificação de Schiner-Racovitza, uma aplicação coerente e cientificamente consistente com os conceitos subjacentes à mesma é fundamental, e a própria continuidade de sistemas subterrâneos inteiros pode depender dela.

Este trabalho baseia-se, em grande parte, em Trajano; Carvalho (2017).

2. BREVE HISTÓRICO E ANÁLISE CRÍTICA DA CLASSIFICAÇÃO DE SCHINER-RACOVITZA

Em capítulo de obra publicada em 1854 sobre as cavernas de Adelsberg, na atual região que compreende Ljubljana, capital da Eslovênia, e Postojna, a maior e mais conhecida caverna desse país, explorada turisticamente desde o início do século 20, Schiner propôs três categorias (RACOVITZA, 1907): 1. hóspedes, ou habitantes

ocasionais: animais encontrados em cavernas, mas também na superfície, em qualquer local onde ocorram condições próprias ao seu estilo de vida (“*hôtes occasionels: animaux qu’on rencontre dans les grottes mais aussi à la surface, partout ‘wosich die ihrer Lebens artentsprechenden Bengungenvorfinden’*”) “[‘when one finds those constraints typical of their lifestyle’, traduzido do alemão por M. Plath]”; 2. troglófilos: animais que habitam as regiões onde a luz do dia ainda penetra e que podem, excepcionalmente, ser encontrados na superfície ou que tem apenas formas representativas lucícolas (“*troglophiles: animaux habitant les régions où la lumière du jour pénètre encore, qu’on peut, exceptionnellement, rencontrer à la surface ou qui ont seulement des formes représentatives lucicoles*”); 3. troglóbios: animais exclusivamente cavernícolas, que não se encontram jamais nas regiões epígeas, exceto no caso de eventos excepcionais como durante inundações (“*Troglobies: animaux exclusivement cavernicoles, qu’on ne rencontre jamais dans les regions épigées, sauf dans le cas d’événements exceptionnels comme les crues*”). Assumindo-se que Racovitza traduziu corretamente para o francês o texto de Schiner, em alemão, é importante notar que originalmente a categoria de troglófilos tinha uma acepção completamente distinta da atual, compreendendo animais fotófilos (atraídos pela luz = *lucicoles*), restritos à zona de entrada e penumbra, ou seja, o oposto da definição atual.

Em sua obra seminal *Essay sur les problèmes biospéologiques*, que marca o início da espeleobiologia moderna, o romeno Racovitza (1907) redefiniu as duas primeiras categorias, criando um novo nome para a primeira (trogloxenos) e mantendo a última (troglóbios) inalterada: 1. trogloxenos: animais desgarrados ou hóspedes ocasionais de cavernas, estes últimos atraídos pela umidade ou pelo alimento, mas que não as habitam constantemente nem aí se reproduzem (“*Trogloxènes: ce sont des égarés ou des hôtes occasionels, ces derniers attirés soit par l’humidité, soit par la nourriture, mais n’y habitant pas constamment et n’y reproduisant pas*”); 2. troglófilos: animais que habitam constantemente o meio subterrâneo, mas de preferência nas regiões superficiais; eles aí se reproduzem com frequência, mas podem também ser encontrados no meio externo (“*Troglophiles: habitent constamment le domain souterrain, mais de préférence dans ces régions superficielles; ils s’yreproduisent souvent, mais ils peuvent être aussi rencontrés à l’extérieur*”); 3. troglóbios: tem por habitat exclusivo o meio subterrâneo e ocorrem preferencialmente nas suas partes mais profundas (“*Troglobies: ont pour*

habitat exclusif le domaine souterrain et se tiennent de preference dans ces parties les plus profondes”). Racovitza ainda completa sua definição de troglófilos caracterizando-os como animais fotofóbicos (*“Ce sont des lucifuges très caractérisés”*), em franco contraste com a definição de Schiner.

Ao longo do tempo, a definição de troglóbios praticamente não mudou. Já a definição de troglófilos permaneceu imprecisa até a década de 1960, quando o influente espeleobiólogo estadunidense T.C. Barr Jr, que estabeleceu várias das bases teóricas da biologia subterrânea moderna, apresentou definições objetivas e cientificamente consistentes e robustas: 1. troglóbios, espécies obrigatórias, incapazes de sobreviver exceto em cavernas ou habitats hipógeos similares; 2. troglófilos, espécies facultativas, as quais habitam comumente cavernas e aí completam seu ciclo de vida, mas que também ocorrem em micro-ambientes epígeos abrigados, frescos e úmidos; 3. troglófilos, que frequentam cavernas como abrigo e microclima favorável, mas que devem retornar periodicamente à superfície para se alimentar; e 4. acidentais (BARR, 1967, 1968). Note-se que este autor retirou acidentais dos troglófilos, que são definidos de forma bastante clara, assim como os troglófilos.

Na Europa, Thinès; Tercafs (1972) também se destacam pela clareza na abordagem do tema. A respeito dos troglófilos, afirmam estes autores: *“ces organismes vivent dans le milieu extérieur mais pour diverses raisons très précises colonisent temporairement le milieu souterrain”* (esses organismos vivem no meio exterior, mas, por razões bem precisas [destaque nosso], colonizam temporariamente o meio subterrâneo). Quanto aos troglófilos, *“ces organismes vivent également dans le milieu extérieur... Ils choisissent ce milieu... certaines de leur potentialités... les prédisposent à vivre dans le milieu souterrain.... Ils se reproduisent dans les caverns et y ont une activité permanente”* (esses organismos vivem igualmente no meio exterior... Eles escolhem esse meio... certas potencialidades...os predispõe à viver no meio subterrâneo...Eles se reproduzem nas cavernas e tem aí uma atividade permanente).

Não é nosso propósito realizar uma revisão histórica exaustiva acerca do sistema Schiner-Racovitza, e sim destacar publicações que contém elementos relevantes ao assunto. Tratando-se este de um tema central na biologia subterrânea e tendo em vista sua complexidade, não é de surpreender que tenha sido objeto de muita discussão e críticas, redefinições e propostas alternativas, algumas extrema e desnecessariamente complicadas. As

controvérsias geralmente envolvem ostrogloxenos, uma categoria até hoje mal-compreendida e frequentemente utilizada de modo equivocado.

É o caso da proposta do italiano M. Pavan (não confundir com o geneticista brasileiro C. Pavan, que estudou o bagre cego de Iporanga, *Pimelodella kronei*, para seu Doutorado). No final da década de 1940, M. Pavan propôs um sistema hierárquico dicotômico teórico, baseado na habilidade de viver e reproduzir-se no meio subterrâneo (VANDEL, 1964; THINÈS; TERCAFS, 1972). Tal sistema resultou em sete categorias, as três primeiras (eutrogloxenos, subtrogloxenos e troglófilos) correspondendo a acidentais no sentido moderno. Dois termos – subtroglófilos e eutroglófilos – têm sido utilizados por alguns autores modernos, porém com sentidos distintos.

De acordo com M. Pavan, tanto subtroglófilos como eutroglófilos vivem no meio subterrâneo por escolha, mas os primeiros não se reproduzem aí. Portanto, eutroglófilos corresponderiam a troglófilos no sentido moderno, e subtroglófilos, a troglófilos em parte (já que há troglófilos que se reproduzem no meio subterrâneo, os quais não são contemplados por nenhuma categoria de M. Pavan).

Contrariamente ao que afirma Sket (2008), seguido por Culver; Pipan (2009) e Guimarães; Ferreira (2014), os subtroglófilos de M. Pavan não correspondem aos troglófilos de Racovitza, pois, por definição, estes últimos *“s’y reproduisent souvent”* [frequentemente se reproduzem em cavernas], enquanto os primeiros *“ne se reproduit pas”* [não se reproduzem] (VANDEL, 1964: 25). Ou seja, são conceitos absolutamente opostos, o que os autores parecem não perceber. O sistema classificatório de Pavan é pouco claro e desprovido de significado biológico, contendo categorias artificiais e supérfluas. Consequentemente, nenhuma de suas categorias tem suporte teórico-conceitual e não deve ser utilizada.

Racovitza, assim como muitos outros que se seguiram, associaram troglóbios à presença de modificações morfológicas (*“ils sont très modifiés et ils offrent les adaptations les plus profonds à la vie obscuricole”* [são muito modificados e frequentemente apresentam as adaptações mais profundas à vida na escuridão] - RACOVITZA, 1907: 437). Tais características, das quais as mais comuns e conspícuas são a regressão de estruturas visuais e da pigmentação escura do corpo (melanina, nos vertebrados e muitos invertebrados) foram denominadas “troglomorfismos” por Christiansen (1962). Em uma definição moderna, troglomorfismos seriam autapomorfias² de troglóbios relacionadas à vida subterrânea

(TRAJANO, 2012). Porém, é importante enfatizar que troglóbios são definidos pela restrição ao meio subterrâneo, ou seja, troglóbios são organismos que não podem mais viver na superfície. Troglóbios são, portanto, espécies para as quais o meio epígeo não é condizente com seu modo de vida. Isto pode ocorrer porque o ambiente epígeo mudou e/ou porque houve mudanças nos requerimentos ecológicos da população subterrânea, em função de diferenciação. Troglomorfismos podem ser, e frequentemente são, a causa dessa incompatibilidade com a vida epígea, mas não a definem.

3. NOVA ABORDAGEM AO SISTEMA SCHINER-RACOVITZA DE CLASSIFICAÇÃO DOS ORGANISMOS SUBTERRÂNEOS: TRAJANO (2012)

Embora consistente e objetiva em sua moderna acepção, quando se tomam as definições de Barr (1968) e Holsinger; Culver (1988), a classificação de Schiner-Racovitza ainda tem falhas que merecem ajustes conceituais. Um primeiro problema diz respeito ao nível de organização biológica das categorias, o que é muito vago, pois as definições referem-se genericamente a "animais" ou a "cavernícolas". São estes indivíduos, populações, espécies? A diferença é grande.

Existem vários casos registrados na literatura de aparentes troglóbios observados com certa regularidade no meio epígeo. Um exemplo clássico é a icônica salamandra europeia *Proteus anguinus*, do carste dinárico, ocasionalmente encontrada fora de cavernas por ocasião de enchentes. Outro exemplo é o bagre cego *P. kronei*, que frequentemente sai à noite na Ressurgência de Bombas para se alimentar. Se a definição de troglóbios for tomada no nível de indivíduos, então estes animais não o seriam.

Estudos populacionais baseados em marcação e recaptura e censos visuais, realizados no Brasil (e.g., MATTOX et al., 2008) e no exterior (FONG, 2004), indicam a ocorrência de populações-sumidouro em cavernas. Populações-sumidouro são aquelas que, uma vez isoladas da fonte de migrantes, extinguir-se-ão, em oposição a populações-fonte, que são autossuficientes (FONG, 2004). O modelo fonte-sumidouro foi desenvolvido para habitats periféricos, tais como poças de maré e lagoas marginais em planícies de inundação de grandes rios, aplicando-se igualmente a habitats subterrâneos como poças de travertinos (caso do bagre *Ituglanis epikarstikus*), riachos vadosos (*I. bambui*), cacimbas e poços dando acesso ao lençol freático (piaba-branca, *Stygichthys typhlops*).

Assim sendo, Trajano (2012) redefiniu as categorias de Schiner-Racovitza, adaptando-as ao modelo fonte-sumidouro: 1. troglóbios (Fig. 1) correspondem a populações-fonte exclusivamente subterrâneas; populações-sumidouro podem ser encontradas na superfície; 2. troglófilos (Fig. 2) incluem populações-fonte tanto em habitats hipógeos como epígeos, com indivíduos deslocando-se regularmente entre esses habitats, promovendo a introgressão de genes selecionados sob regimes epígeos em populações subterrâneas (e *vice-versa*); 3. troglógenos (Fig. 3) são casos de populações-fonte epígeas com indivíduos usando recursos subterrâneos; nos troglógenos obrigatórios, todos os indivíduos são dependentes tanto de recursos epígeos como hipógeos.



Figura 1. Opilião troglóbionid, gênero e espécie não descritos, da Caverna Santana, área cárstica do Alto Ribeira, São Paulo. Foto: Flávia Pellegatti Franco.



Figura 2. Aranha *Ctenus fasciatus*, espécie que frequentemente forma populações troglófilas no Alto Ribeira; exemplar macho. Foto: Renata Nunes.

A classificação de Schiner-Racovitza aplicar-se-ia a organismos subterrâneos, aqui definidos como unidades evolutivas que respondem a regimes seletivos subterrâneos. Habitats subterrâneos provêm

recursos, como alimento, abrigo, substrato, clima, que afetam as taxas de sobrevivência/reprodução. Tais unidades têm uma conexão histórica, filogenética, através de ancestrais comuns, portanto podem ser classificadas em sistemas biológicos taxonômicos. “Acidentais”, i.e., animais introduzidos em cavernas por acaso (arrastados por enchentes ou caindo por aberturas) ou que entram em cavernas em busca de abrigo, mas que são incapazes de se orientar, estão excluídos. Do ponto de vista ecológico, acidentais são recursos potenciais para organismos subterrâneos (alimento, substrato, etc.). Porém, recursos não têm conexão histórica, logo, quando um organismo torna-se recurso, não faz sentido classificá-lo taxonomicamente.

É importante enfatizar que troglóbios, troglófilos e troglóxenos são igualmente subterrâneos, i.e., são todos adaptados à vida subterrânea, cada qual ao seu modo.



Figura 3. Aranha *Enoploctenus cyclothorax*, exemplar troglóxeno na região de Intervalles, São Paulo.
Foto: Flávia Pellegatti Franco.

4. SISTEMA SCHINER-RACOVITZA NA PRÁTICA: DIFICULDADES E ARMADILHAS

As principais dificuldades para aplicação da classificação de Schiner-Racovitza são: 1. entendimento deficiente do arcabouço conceitual; 2. falta de conhecimento sobre a distribuição, biologia e ecologia dos táxons de interesse; 3. uso de métodos inadequados, principalmente esforço amostral insuficiente.

O problema dos troglóbios

Troglóbios são definidos pela ausência no meio epígeo. No entanto, não é logicamente possível

provar uma ausência, apenas levantar uma alta probabilidade, estatisticamente significativa, da mesma. Tal condição é raramente atingida. Assim, na prática, troglóbios em geral são reconhecidos após ter ocorrido diferenciação resultando no aparecimento dos troglomorfismos clássicos (redução de olhos e pigmentação).

Surgem aqui dois problemas. De um lado, no modelo alopátrico (diferenciação em isolamento geográfico), o qual responderia pela grande maioria dos casos de especiação, existe um lapso de tempo entre esse isolamento, que equivale à restrição ao meio subterrâneo definindo troglóbios, e o aparecimento de troglomorfismos. Nesta fase, teríamos troglóbios não troglomórficos, cuja detecção dependeria exclusivamente de levantamentos faunísticos epígeos extensivos.

Por outro lado, há táxons que já apresentam, no meio epígeo, estados de caráter considerados troglomórficos. Por exemplo, todos os diplópodes da grande ordem Polydesmida, a mais diversificada do grupo, são desprovidos de olhos, portanto apenas a despigmentação poderia ser considerada um troglomorfismo indicador do status de troglóbio (Fig. 4). Pequenos artrópodos de solo, tais como dipluros Campodeidae, sínfilos, palpígrados (Fig. 5), isópodes terrestres do gênero *Trichorhina* etc. são despigmentados e sem olhos, de modo que a possível condição de troglóbios é difícil de ser estabelecida, dependendo de estudos comparativos visando à verificação da presença de outros troglomorfismos, além de levantamentos no meio epígeo.



Figura 4. Diplópode Polydesmida troglóbio, de acordo com despigmentação. Foto: Alexandre Camargo.

Note-se, porém, que o encontro fortuito de exemplares troglomórficos no meio epígeo não é, por si, suficiente para descartar a condição de troglóbio. Como já comentado, assim como indivíduos epígeos podem ser introduzidos por acidente em cavernas e aí sobreviver por algum

tempo, o mesmo pode ocorrer com troglóbios na superfície, até mesmo com o estabelecimento de populações-sumidouro (como previsto na definição de troglóbios, cf. TRAJANO, 2012). Por esta razão, observações regulares e sistematizadas são necessárias para uma aplicação cientificamente embasada da classificação de Schiner-Racovitza.



Figura 5. Palpigradi: aracnídeos minúsculos originalmente de solo, todos são troglomórficos.
Foto: Lubomir Kovac.

A morfologia é um indicador pouco confiável de habitat, pois contém sinal filogenético de histórias evolutivas passadas, frequentemente sob condições bem distintas das atuais. Por exemplo, o bagrinho cego da Chapada Diamantina, *Rhamdiopsis krugi* (Fig. 6) apresenta um mosaico de características sugerindo histórias aparentemente incongruentes: tamanho corporal miniaturizado e linha lateral no corpo reduzida indicam adaptação a espaços confinados, enquanto o alargamento da cabeça e do focinho (possibilitando melhor equilíbrio na meia-água e maior número de estruturas quimio- e mecanosensoriais) e o maior desenvolvimento do pseudotímpano (área de contato da bexiga natatória com a superfície do corpo, proporcionando melhor audição) seriam adaptações para espaços amplos, como as cavernas onde esses animais são encontrados atualmente. A explicação mais parcimoniosa para isso foi um modelo de colonização vertical do meio subterrâneo em duas etapas, a primeira através dos pequenos espaços do epicarste, seguida pela entrada nos espaços maiores abaixo do mesmo (BICHUETTE et al., 2015).

Resumidamente, seguem algumas das situações que podem representar complicadores para a classificação dos organismos subterrâneos de acordo com o sistema Schiner-Racovitza utilizando morfologia: falta de conhecimento das espécies epígeas para comparação com aquelas coletadas nas cavernas; utilização exclusiva desses caracteres, como tamanho dos apêndices, os quais resultam da

história evolutiva da espécie, que deve ser reconstituída a partir de estudos filogenéticos; desconhecimento do habitat original, onde os caracteres foram selecionados, e daquele(s) onde vive(m) atualmente a(s) população(ões)-fonte; troglomorfismos como estados de caráter já presentes em grandes grupos zoológicos endógeos ou criptobióticos, tais como a ausência de olhos e/ou de pigmentação nos diplópodes Polydesmida, colêmbolos da família Cyphoderidae (ZEPPELINI, 2012), dipluros Campodeidae (MORAIS et al., 2012), insetos Nicoletidae (HENRIQUES; MENDES, 2012), ou em representantes criptobióticos (que vivem em locais protegidos no meio epígeo) de alguns grupos como besouros Carabidae (por exemplo, MOORE, 1980) e Histeridae (por exemplo, KOVARIK; CATERINO, 2005), estes últimos como exemplo da fauna especializada de cupinzeiros, que são importantes formadores de solo em rocha ferrífera (SCHAEFER et al. 2015).

Esses exemplos mostram que é necessário que sejam feitos estudos detalhados para esclarecer a distribuição geográfica e classificar espécies como troglóbios. Efetuar a classificação de exemplares coletados em cavidades com base em observações realizadas em apenas duas visitas de campo a cavernas em estações diferentes do ano, conforme legislação vigente, é insuficiente, uma vez que o habitat em que um exemplar é encontrado nem sempre corresponde àquele em que a morfologia foi selecionada. E permanece a questão: onde vive a espécie coletada, onde estariam suas populações-fonte para que seja tomada a decisão sobre seu destino durante o uso do solo?



Figura 6. *Rhamdiopsis krugi*, bagrinho troglóbio da Chapada Diamantina, Bahia. Foto: Danté Fenolio.

Troglófilos versus troglógenos

Para o reconhecimento da condição de troglófilos, é necessário encontrar evidências da ocorrência de populações-fonte subterrâneas: sinais

de alimentação e reprodução e presença de todas as fases do ciclo de vida em todo o habitat subterrâneo, ao longo do ciclo anual. Troglóxenos, por outro lado, são encontrados a distâncias dos contatos com o exterior compatíveis com suas capacidades locomotoras, permitindo um deslocamento regular entre os dois ambientes sem gasto energético excessivo (equilíbrio entre as vantagens do uso do meio subterrâneo como abrigo e os gastos do deslocamento). Por exemplo, Santos (1998), estudando o opilião *Serracutisoma spelaeum* (Mello-Leitão, 1933), troglóxeno obrigatório no Alto Ribeira, observou que os juvenis, como saem mais frequentemente para se alimentar em virtude do maior requerimento energético para o crescimento, posicionam-se mais próximo às entradas das cavernas que os adultos. Além disso, vários troglóxenos, inclusive obrigatórios, utilizam cavernas sazonalmente, desaparecendo das mesmas durante parte do ano. Portanto, para a distinção entre troglófilos e troglóxenos são fundamentais estudos populacionais na escala temporal anual.

Note-se, ainda, que, enquanto a distinção entre troglóbios e troglófilos tem uma base evolutiva, pois é resultado de diferenciação genética (após isolamento geográfico - modelo alopátrico de especiação, ou sem isolamento - modelos para e simpátrico; ver Mayr, 1942, para modelos de especiação), a separação entre troglófilos e troglóxenos é de natureza ecológica, pois está relacionada à disponibilidade de alimento. Há exemplos de cavernícolas que são troglóxenos nas condições usuais para o meio subterrâneo (baixa disponibilidade de nutrientes, como fator limitante), mas que, em circunstâncias excepcionais, como cavernas com colônias permanentes muito grandes de morcegos ("bat caves") e consequente abundância de guano, conseguem estabelecer populações troglófilas (HOLSINGER; CULVER, 1988). No Brasil, temos o caso da aranha *Mesabolivar* (Pholcidae), um troglóxeno comumente avistado nas paredes da zona de entrada e penumbra de cavernas carregando o saco de ovos nas quelíceras (Fig. 7), e que forma populações troglófilas nas cavernas areníticas da área cárstica de Altamira-Itaituba (TRAJANO; MOREIRA, 1991).

Outro exemplo são os grilos *Strinatia brevipennis* (Fig. 8), também do Alto Ribeira, restritos à zona da entrada de cavernas do Vale do Betari, onde grilos *Endecous* formam populações troglófilas; porém, na ausência destes últimos, *S. brevipennis* forma populações troglófilas, como ocorre nas cavernas Areias, na região de Espírito Santo-Caboclos, P.E. Intervalas e na porção paraense do Alto Ribeira (TRAJANO; GNASPINI, 2001). Esses exemplos mostram claramente que

espécies **não são** troglófilas, espécies **formam** populações troglófilas.



Figura 7. Aranha *Mesabolivar*, troglóxeno comum na zona de entrada de cavernas do Alto Ribeira; exemplar com saco de ovos nas quelíceras. Foto: João Allievi.



Figura 8. Grilo *Strinatia brevipennis*.
Foto: Renata Nunes.

Note-se que a diferença entre troglófilos e troglóxenos é que os primeiros **podem** sair de cavernas, ao passo que os últimos **devem** sair regularmente das mesmas. Ou seja, registros de indivíduos saindo de cavernas ou entrando nestas não constitui, por si, evidência de status, à medida que seria inútil indagar a intenção da criatura. A solução deste problema está, mais uma vez, na

realização de estudo populacional de longo prazo, dentro de uma abordagem cronobiológica, com foco na observação de eventuais padrões cíclicos de entrada e saída de indivíduos. A ocorrência destes padrões é esperada para troglóxenos, definidos exatamente em função dos mesmos ("must return **periodically** [destaque nosso] to the surface for food" - BARR, 1968:43). São raros, em todo o mundo, estudos dessa natureza enfocando invertebrados. Exemplos brasileiros incluem *S. spelaeum*, que apresenta padrões cíclicos bem definidos de saída e entrada de cavernas para forrageio noturno (SANTOS, 1998), em oposição ao grilo *Strinatia brevipennis*, também do Alto Ribeira, para o qual nenhum padrão foi detectado (HOENEN; MARQUES, 1998), como esperado para um troglófilo (MENNA-BARRETO; TRAJANO, 2015).

O reconhecimento de troglóxenos obrigatórios depende de dados sobre a biologia e a distribuição da espécie, além da ecologia populacional, indicando que essa distribuição está correlacionada e limitada à presença de cavernas. Desde a década de 1960, "grilos" *Hadenocetus* (Rhaphidophoridae) de áreas cársticas do Kentucky (EUA) foram reconhecidos como troglóxenos obrigatórios com base em censos visuais realizados ao longo de várias estações, que revelaram a ocorrência de ritmos circadianos, e análise de itens alimentares demonstrando serem de origem epígea. Estes grilos podem ser encontrados nas zonas mais profundas das cavernas, mas só durante a fase reprodutiva. No Brasil, o único troglóxeno obrigatório conhecido como tal até o momento é o já mencionado *S. spelaeum*, que ocorre na área cárstica do Alto Ribeira, sul de São Paulo (GNASPINI, 1996; SANTOS, 1998, referindo-se a "strict troglóxenos"). Opiliões de outras espécies deste gênero subtropical, também comuns na entrada de cavernas, são troglóxenos não-obrigatórios.

Um exemplo das consequências negativas da associação entre o conhecimento deficiente sobre a biologia e distribuição das espécies e um entendimento equivocado do conceito de troglóxenos obrigatórios é o trabalho de GUIMARÃES; FERREIRA (2014). Estes autores incluíram nessa categoria várias espécies de morcegos que utilizam cavernas no Brasil com base em uma classificação do modo de uso desses abrigos dentro de um sistema de "essencialmente cavernícolas" *versus* "cavernícolas oportunistas", sem fornecer qualquer indicação dos dados utilizados para o enquadramento de cada espécie nessas classes. Em primeiro lugar, o próprio termo "essencialmente" é biologicamente inadequado, pois remete ao essencialismo aristotélico, pré-darwinista,

que é a base do atual tipologismo usado na parataxonomia (ver TRAJANO et al., 2012). De acordo com a definição acima, tratar-se-iam de espécies "que se abrigam majoritariamente (destaque nosso) em cavernas". Isto poderia ser interpretado como forte preferência por abrigos rochosos, no sentido da "litofilia" típica de muitos filostomíneos (grupo parafilético de Phyllostomidae, constituído por espécies carnívoras e predadoras de insetos pousados) e insetívoros como *Furipterus horrens* e *Natalus macrourus* (TRAJANO, 1985). Neste caso, houve um erro na associação desta condição à de troglóxenos obrigatório que, por definição, seriam exclusivamente, e não preferencialmente cavernícolas.

Se, por outro lado, "essencialmente cavernícola" for interpretado como exclusivamente cavernícola, então o erro refere-se à classificação em si, pois não há evidência de que qualquer dessas espécies de fato utilize única e exclusivamente cavernas como abrigo diurno. Na realidade, para a maioria delas as evidências apontam o contrário. Koopmann (1982), por exemplo, traz, para a maioria das espécies consideradas essencialmente cavernícolas, distribuições que incluem tanto áreas cársticas como não cársticas. Um caso emblemático é o do nectarívoro *Anoura caudifer* (Fig. 9), encontrado em diversos tipos de formações vegetais, na Mata Amazônica (REIS; PERACCHI, 1987), Atlântica (SIPINSKI; REIS, 1995; PEDRO; TADEI, 1997), e mesmo em cidades, na condição de morcego urbano, o mesmo ocorrendo com *A. geoffroyi* (PACHECO et al. 2010); após 70 ocasiões de coleta ao longo de mais de dois anos de estudo, Taddei; Pedro (1996) inferem que os morcegos dessas duas espécies sequer seriam troglóxenos no Baixo Ribeira. *A. geoffroyi* foi também registrada na caatinga, a várias dezenas de quilômetros de qualquer caverna, assim como *Pteronotus parnellii*, *Peropteryx macrotis* e *Dyphilla ecaudata* (MARES et al., 1981), para citar algumas outras espécies igualmente classificadas de forma equivocada como troglóxenos obrigatórios na publicação acima citada. Note-se que *P. parnellii* é um morcego amplamente distribuído na Amazônia, incluindo o Médio Tapajós (REIS; SCHUBART, 1979) e a região de Manaus (REIS; PERACCHI, 1987), entre várias outras. Assim como o vampiro comum, *Desmodus rotundus*, *D. ecaudata* utiliza tanto cavernas como ocos de árvores, em áreas abertas e florestadas (NOWAK, 1994); não há qualquer razão para se postular um uso distinto de abrigos diurnos por essas duas espécies, ou para *A. caudifer* e *Carollia perspicillata*, para citar outras espécies comuns em cavernas brasileiras.

Note-se que morcegos com forte preferência por abrigos rochosos serão naturalmente capturados muito mais facilmente em cavernas. Na realidade, qualquer espécie é mais facilmente amostrada nos abrigos, e as cavernas são os melhores locais para coleta de morcegos. É possível que alguma espécie brasileira, como *Furipterus horrens*, seja de fato troglóxena obrigatória. A questão é que ainda não existem dados suficientes para se afirmar isso e os argumentos expostos em GUIMARÃES; FERREIRA (2014) não são os corretos. Exemplos de troglóxenos obrigatórios (ver, por exemplo, THINÈS; TERCAFS, 1972) são raros em todo o mundo e, no caso dos morcegos, os casos comprovados o foram após décadas de estudos populacionais caso-a-caso (e.g., KUNZ; REICHARD, 2010) e tratam-se espécies que hibernam, portanto de zonas temperadas, utilizando as poucas cavernas que apresentam condições ideais para tal; morcegos tropicais não apresentam este requerimento ecofisiológico. O ponto central não é comprovar que há indivíduos utilizando habitats subterrâneos e sim encontrar evidências de que nenhum indivíduo da espécie pode completar seu ciclo de vida sem utilizar recursos desse ambiente.



Figura 9. Indivíduo de *Anoura caudifer* (morcego Phyllostomidae nectarívoro) em pouso misto com exemplar de *Carollia perspicillata* (à frente; Phyllostomidae predominantemente frugívoro), em casa abandonada. No detahe: *A. caudifer*. Foto: Wilson Uieda.

Concluindo, se já é difícil confirmar a condição de troglóxeno, pois isso depende da demonstração de que cada indivíduo que utiliza o meio subterrâneo desloca-se regularmente para a superfície, a determinação do status de troglóxeno obrigatório é muito mais trabalhosa, pois implica na comprovação de que cada indivíduo da espécie também depende do meio subterrâneo para completar seu ciclo de vida. Ou seja, o troglóxeno obrigatório é tão dependente da integridade do meio

subterrâneo quanto o troglóbio para sua sobrevivência.

Enfim, dada sua importância para a conservação, a detecção de troglóxenos obrigatórios deve ser encarada com grande responsabilidade. Evidência dessa condição, que não pode em hipótese alguma ser considerada como conclusiva e sim como indicação da necessidade de estudos populacionais de longo prazo, é a distribuição da espécie restrita a áreas cársticas, desde que áreas não cársticas com potencial para ocorrência da mesma tenham sido devidamente prospectadas.

Indivíduos isolados encontrados em cavernas frequentemente são considerados troglóxenos em função da noção equivocada de que troglóxenos são raros enquanto troglófilos são comuns nesse ambiente. Na realidade, densidade populacional não é critério de aplicação do sistema Schiner-Racovitza, uma vez que este parâmetro depende de condições ecológicas locais, apresentando a mesma amplitude de variação dentro de cada uma das três categorias, pois variações no tamanho e densidade populacionais podem ocorrer dentro da mesma espécie, como observado para o cascudo troglóbio de Goiás, *Ancistrus cryptophthalmus* (TRAJANO, 2001).

Provavelmente devido à pressão de competição interespecífica reduzida em relação ao exterior, densidades de populações troglófilas podem ser bem superiores às das epígeas. É o caso da aranha errante, *Ctenus fasciatus*, um troglófilo comum em cavernas do Alto Ribeira, porém raramente encontrada na superfície. A espécie foi descrita em 1943 com base em um exemplar fêmea, aparentemente coletada em caverna; o macho da espécie (Fig. 2) só foi conhecido na década de 1970 (também coletado em caverna) e exemplares epígeos só vieram a ser encontrados nos anos 2000, quando dois exemplares foram observados, um a aproximadamente 20 metros e o outro a menos de cinco metros da entrada da mesma caverna (F. Pellegatti-Franco obs pess., 2004). Este é um exemplo ilustrativo da necessidade de esforços de amostragem no meio epígeo que podem ser bem superiores aos empreendidos em cavernas quando o objetivo é classificar organismos subterrâneos de acordo com o sistema Schiner-Racovitza.

5. O CASO DAS CAVERNAS EM ROCHAS FERRUGINOSAS

O conhecimento sobre cavernas em rochas ferríferas é novo e promissor para a espeleobiologia, à medida que milhares dessas cavernas vêm sendo descobertas e prospectadas em estudos ambientais

para licenciamento de empreendimentos na última década e meia (por exemplo, PILÓ et al. 2015).

Um pouco da geologia física das formações ferríferas no Brasil é necessária para compreender o ambiente subterrâneo característico que nelas se formam. Essas formações estão geralmente dispostas em serras e planaltos protegidos de processos erosivos por rocha mais resistente (canga) no topo e, às vezes, nas encostas (canga ou ferricrete) (PILÓ et al., 2015). Estes autores caracterizaram a ocorrência de cavidades em rocha ferrífera no Brasil como “em grande profusão no substrato rochoso”, sendo que a maior parte delas é encontrada no contato entre tais rochas resistentes e a formação ferrífera localizada logo abaixo. Mencionam, ainda, que as conexões entre os vazios são ampliadas na porção superficial da rocha exposta a intemperismo, ocorrendo também conexões entre os vazios superficiais e a superfície.

A existência de aquíferos em rochas ferríferas e itabiritos (por exemplo, MOURÃO, 2007; MOURÃO et al., 2006) seria outra característica física a ser agregada ao ambiente subterrâneo das rochas ferríferas. Beato et al. (2006) cita profundidades de poços entre 50 e 120 m em formação ferrífera e entre 68 e 349 m para itabirito, e níveis piezométricos variando de surgentes a 190 m para aquíferos itabiríticos no Quadrilátero Ferrífero.

Dada a existência de conexões entre os espaços maiores (cavernas) nas rochas ferríferas (PILÓ et al., 2015), a descrição de Howarth (1983) para ambiente subterrâneo em rochas carbonáticas, com micro-, meso- e macro-cavidades conectadas no interior da rocha, cabe também para o encontrado nas rochas ferríferas, uma vez que os animais que percorrem tanto uma como outra rocha seriam os mesmos. De fato, há relatos de ocorrência de artrópodes no interior de canalículos na rocha ferrífera (ANDRADE; SABACK, 2015; SOARES et al., 2016). Com essas descobertas, formou-se a percepção de existência de ambiente subterrâneo superficial nas formações ferríferas (BICHUETTE et al., 2015).

Contudo, cabe indagar onde estaria o ambiente subterrâneo nessas rochas, se somente na porção mais superficial ou também na porção mais profunda dessas formações (a princípio, com discontinuidades mais estreitas), assim como indagar se se estende em conexões com outras litologias adjacentes com potencial espeleogenético. Conhecer os limites do ambiente subterrâneo justifica-se por ter, como importante consequência prática, em qualquer litologia, assegurar a coleta epígea longe das conexões do ambiente subterrâneo. Caso não sejam prospectados esses limites, faz-se

necessário conhecimento da geomorfologia local para tentar não sobrepor a busca por espécies subterrâneas e epígeas.

Expandindo um pouco mais sobre tais limites, além de conexões entre os vazios da rocha ferrífera, deve ser considerada a possibilidade da existência de habitats subterrâneos nas litologias adjacentes e destes estarem conectados com o meio subterrâneo da rocha ferrífera. Litologias com potencial espeleogenético, como dolomitos e quartzitos, podem estar estratificados e ter afloramentos adjacentes à rocha ferrífera (por exemplo, BEATO et al., 2006, para o Quadrilátero Ferrífero). O trânsito de troglóbios entre diferentes litologias através do MSS – Meio Subterrâneo Superficial foi registrado por JUBERTHIE et al. (1980). De fato, a ocorrência de opilião troglomórfico da família Cryptogeobiidae (*aff. Spinopilar*) em diferentes cavernas em rocha ferrífera e também em caverna no quartzito adjacente no Quadrilátero Ferrífero (COELHO et al., 2010) sugere unidade do meio subterrâneo entre as litologias, se tal espécie for realmente troglóbia. Porém, não se descarta a dispersão por superfície, uma vez que a família é tipicamente de solo, existindo espécies de outros gêneros com regressões semelhantes amostradas fora de cavidades (KURY, 2014), o que demonstra, mais uma vez, a importância fundamental de estudos taxonômicos comparativos. Há vários outros grupos de solo com estados regressivos de caracteres amostrados em cavernas ferruginosas que se encontram nessa situação duvidosa, como aranhas Prodidomidae e Ochyroceratidae.

Assim, a classificação ecológico-evolutiva das espécies subterrâneas de formações ferríferas parece ter um complicador a mais em relação àquelas de litologias com sistemas subterrâneos apresentando menos conexões com a superfície, como as rochas calcárias. Tal complicador é consequência da natureza altamente porosa da rocha, que facilita o trânsito da fauna tanto em seu interior como para dentro e para fora de suas discontinuidades ao longo de toda sua superfície, adicionando-se ainda a possibilidade de conexão com discontinuidades de litologias anexas.

A fim de se contornar tais problemas, devem ser efetuados estudos adicionais com foco na dispersão, para verificar se superficial, subterrânea ou ambas, e estudos de preferência de habitat no perfil edáfico, estes com o objetivo de evitar que espécies epígeas endêmicas do planalto ferrífero sejam confundidas com espécies subterrâneas. Para exemplificar, JUBERTHIE et al. (1980) empregaram método para detecção de dispersão subsuperficial, enquanto GERS (1998) usou método para

caracterização da distribuição da fauna ao longo do perfil edáfico. Dispositivos para captura no interior de formações ferríferas foram utilizados, por exemplo, por HUMPHREYS et al. (2006); descrições podem ser encontradas em EPA-WA (2016a; 2016b).

Em resumo, levantamentos faunísticos subterrâneos em formações ferríferas devem compreender, além da serra ou do planalto em rocha ferrífera, também partes mais profundas da rocha e os aquíferos, com o objetivo de se evitar negligenciar espécies por serem de mais difícil coleta e, adicionalmente, cavidades de litologias adjacentes e acúmulos clásticos ao longo das encostas.

6. IMPLICAÇÕES PARA CONSERVAÇÃO

Troglóbios são altamente singulares em virtude de seu elevado grau de diversidade genética, expresso através do acúmulo de autapomorfias (características exclusivas) morfológicas, fisiológicas, ecológicas e comportamentais relacionadas ao modo de vida subterrâneo; consequentemente, essas espécies contribuem significativamente para a biodiversidade global (TRAJANO et al., 2016). Troglófilos e troglóxenos são também singulares em sua grande flexibilidade ecológica, necessária à vida em ambientes tão contrastantes como o epígeo e o hipógeo. Na grande maioria de modelos de evolução subterrânea é proposta a origem de troglóbios a partir de populações troglófilas isoladas no meio subterrâneo, o que justifica a proteção destas como ancestrais potenciais de futuros troglóbios. Além disso, troglófilos abundantes em cavernas porém raros no meio epígeo podem ser recolonizadores importantes deste último, especialmente após longos períodos de clima adverso, tornando-se elemento-chave para a sobrevivência dessa meta-população ou mesmo da espécie.

A fragilidade ecológica e vulnerabilidade dos troglóbios, consequência do alto grau de endemismo, raridade e turnover populacional lento é bem conhecida e reconhecida tanto por espeleólogos como pelos órgãos ambientais responsáveis pelas políticas de conservação das cavernas brasileiras. Por outro lado, troglóxenos obrigatórios podem ser tão ou mais vulneráveis em virtude da dependência da integridade tanto do meio subterrâneo como do superficial, porém não recebem o mesmo tipo de reconhecimento. Essa incoerência fica muito clara no Decreto 6640: enquanto a presença de troglóbios raros (categoria em que se poderia incluir praticamente todos, dependendo do critério de

raridade aplicado) confere à caverna o status de relevância máxima - o único que garante algum tipo de proteção, e nem sempre completa -, a de troglóxenos obrigatórios, muito mais raros, portanto mais singulares, é apenas critério para relevância alta, o que equivale a proteção nenhuma, pois a legislação permite supressão de cavernas assim classificadas.

O fato é que a "compensação" por impactos irreversíveis chegando à supressão de cavernas de alta relevância, representada pela preservação de duas outras de "mesmo tipo", prevista no referido Decreto (Art. 4º, § 1º No caso de empreendimento que ocasione impacto negativo irreversível em cavidade ... com grau de relevância alto, o empreendedor deverá adotar ... medidas e ações para assegurar a preservação ... de duas cavidades ..., com o mesmo grau de relevância, de mesma litologia e com atributos similares ...), é uma falácia - além de a unidade de habitat não ser a caverna e sim o sistema subterrâneo ou o afloramento rochoso contínuo, não existem duas cavernas ou unidades de habitat iguais. Tal impossibilidade já está prevista no próprio Decreto: § 3º Não havendo, na área do empreendimento, outras cavidades representativas que possam ser preservadas sob a forma de cavidades testemunho, o Instituto Chico Mendes poderá definir, de comum acordo com o empreendedor, outras formas de compensação. A própria tentativa de justificar a destruição do que deveria ser preservado por se deixar de destruir algo que não se pretende tocar já é, por si, ilógica do ponto de vista da conservação. Tal raciocínio, encontrado na legislação brasileira, abre brecha para que a escolha da área a ser conservada seja baseada em valores estratégicos para a economia e não em valores da fauna subterrânea, que pode ser insubstituível.

Vê-se, portanto, que uma classificação criteriosa e minimamente confiável de qualquer organismo subterrâneo de acordo com o sistema de Schiner-Racovitza, apoiada em uma base teórico-conceitual lógica e coerente, derivada da teoria evolutiva e utilizando o método comparativo, assim como em empíricos robustos e suficientes, tem interesse não apenas acadêmico, como também é o primeiro passo para a elaboração de políticas ambientais eficientes para preservação dos sistemas subterrâneos e biodiversidade associada.

Os principais desafios para se classificar organismos encontrados em habitats subterrâneos dentro das categorias do sistema Schiner-Racovitza são: 1. Distinguir acidentais, que não tem qualquer significado para conservação, dos organismos subterrâneos propriamente ditos, sobretudo aqueles

com baixas densidade populacionais, os quais requerem amplas áreas geográficas para manutenção de populações efetivas minimamente viáveis; 2. separar troglóbios de populações troglófilas pertencendo a táxons epígeos com estados troglomórficos de caracteres; 3. reconhecer troglóxenos, identificando os obrigatórios, que são prioridade para conservação, juntamente com troglóbios (independentemente de serem raros ou não).

Para muitas populações subterrâneas, cavernas são apenas parte, por vezes bastante pequena, do habitat natural. Esses animais podem migrar entre elas e a rede contígua de pequenos espaços em torno das mesmas, tanto em uma base cíclica, sazonal, como não cíclica (GIACHINO; VAILATI, 2010). Variações infra-anuais, i.e. com período superior ao anual (12 meses), também podem ocorrer (TRAJANO, 2013). Assim sendo, uma classificação minimamente confiável de acordo com o sistema Schiner-Racovitza depende de estudos cujo desenho experimental satisfaça os seguintes critérios (TRAJANO, 2016): -

amostragens regularmente distribuídas em diferentes estações do ano e ao longo de pelo menos três ciclos anuais; - coletas em áreas epígeas adjacentes; - testes de suficiência amostral.

Uma classificação equivocada dos organismos subterrâneos compromete políticas de conservação do patrimônio espeleológico. Enquanto as condições mínimas necessárias não são atingidas, o princípio da precaução deve ser seguido. Contudo, a tomada de decisão só deve ser feita sobre a classificação considerada definitiva dentro do estado-da-arte do conhecimento e tendo em vista os objetivos do estudo em questão.

AGRADECIMENTOS

Somos gratas a Flávia Pellegatti Franco e aos revisores anônimos designados pelo periódico Espeleo-Tema pela leitura crítica do manuscrito e sugestões que contribuíram para seu aprimoramento. Agradecemos também a Flávia e a Wilson Uieda, Alexandre Camargo, Danté Fenolio, Renata Nunes e Lubomir Kovac, pela disponibilização das fotos.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R.; SABACK, L. Levantamento da fauna troglomórfica em meso e micro cavidades no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: I Simpósio Brasileiro de Biologia Subterrânea, 2015, Lavras. SBBS –**Resumos**. Lavras. 2015. v. 1.
- BARR, T.C.Jr. Observations on the ecology of caves. **American Naturalist**, v.101, p.475-491, 1967.
- BARR, T.C.Jr. Cave ecology and the evolution of troglobites. **Evolutionary Biology**, v.2, p. 35-102, 1968.
- BEATO, D.A.C.; MONSORES, A.M.; BERTACHINI, A.C. Potencial aquífero nos metassedimentos do Quadrilátero Ferrífero - Região da APA SUL RMBH - MG. **Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 14, 2006, Curitiba. **Anais**. Curitiba, ABAS, 2006.
- BICHUETTE, M.E.; FONSECA-FERREIRA, R.; GALLÃO, J.E. Biota subterrânea associada às cavernas em formações ferríferas. In: RUCHKYS, U.A.; TRAVASSOS, L.E.P.; RASTEIRO, M.A.; FARIA, L.E. (Orgs.). **Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas**. Campinas: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2015. p.174-191.
- BICHUETTE, M.E.; RANTIN, B.; HINGST-ZAHER, E.; TRAJANO, E. Geometric morphometrics throws light on evolution of the subterranean catfish *Rhamdiopsiskrugi* (Teleostei: Siluriformes: Heptapteridae) in eastern Brazil. **Biological Journal Linnean Society**, v.114, p. 136–151, 2015.
- CHRISTIANSEN, K. Proposition pour la classification des animaux cavernicoles. **Spelunca**, v.2, p.76-78, 1962.
- COELHO, A; PILÓ, L.B.; AULER, A.; BESSI, R. **Espeleologia da área do Projeto Apolo, Quadrilátero Ferrífero, MG**. Belo Horizonte: Carste Consultores Associados, 2010. 179p. Relatório não publicado.
- CULVER, D.C.; PIPAN, T. **The biology of caves and their subterranean habitats**. New York: Oxford University Press, 2009.

- EPA-WA (Environmental Protection Authority, Western Australia). **Subterranean fauna survey.** Environmental Assessment Guideline No. 12. June 2013. Technical Guidance. 2016a, 20p. Disponível em: http://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/Policies_and_Guidance/Technical%20Guidance-Subterranean%20fauna-Dec2016.pdf. Acesso em 13 dez. 2016.
- EPA-WA (Environmental Protection Authority, Western Australia). **Sampling methods and survey considerations for subterranean fauna in western Australia.** Guidance Statement n. 54a, August 2007. 2016b, 32p. Disponível em: http://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/Policies_and_Guidance/Tech%20guidance-%20Sampling-Subt-fauna-Dec-2016.pdf. Acesso em 13 dez. 2016.
- FONG, D.W. Intermittent pools at headwaters of subterranean drainage basins as sampling sites for epikarst fauna. In: JONES, W.K.; CULVER, D.C.; HERMAN, J.S. (Eds). **Epikarst.** Karst Waters Institute Special Publication 9, p.114-188, 2004.
- GERS, C. Diversity of energy fluxes and interactions between arthropod communities. **Acta Oecologia**, v.19, n.3, p.205-213, 1998.
- GIACHINO; VAILATI, D. **The subterranean environment. Hypogean life, concepts and collecting techniques.** Verona: WBA Handbooks 3, 2010.
- GNASPINI, P. Population ecology of *Goniosoma spelaeum*, a cavernicolous harvestman from south-eastern Brazil (Arachnida: Opiliones: Gonyleptidae). **Journal of Zoology**, v.239, p.417-435, 1996.
- GUIMARÃES, M.M.; FERREIRA, R.L. Morcegos cavernícolas do Brasil: novos registros e desafios para conservação. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v.2, n.4, 2014. 33p.
- HENRIQUES, A.L.; MENDES, L. *Zygentoma*. In: RAFAEL, J.A.; MELO, G.A.R.; CARVALHO, C.J.B.; CASARI, S.A.; CONSTANTINO, R. (Eds.). **Insetos do Brasil.** Ribeirão Preto: Holos, 2012. p.225-229.
- HOWARTH, F. G. Ecology of cave Arthropods. **Annual Review of Entomology**, v.28, p. 365-389, 1983.
- HOENEN, S.M.; MARQUES, M. Circadian patterns and migration of *Strinatia brevipennis* (Orthoptera: Phalangopsidae) inside a cave. **Biological Rhythm Research**, v.29, p.480-487, 1998.
- HOLSINGER, J.R.; CULVER, D.C. The invertebrate cave fauna of Virginia and a part of Eastern Tennessee: Zoogeography and ecology. **Brimleyana**, v.14, p.1-162, 1988.
- HUMPHRIES, G.; BLANDFORD, D.C.; BERRY, O.; HARVEY, M.; EDWARD, K.; MAIER, M. **Mesa A and Robe Valley Mesas Troglotic Fauna Survey.** Subterranean fauna assessment Report. North Perth (WA): Biota Environmental Science Pty Ltda. 2007.64 p + 2 appendices.
- JUBERTHIE, C.; DELAY, B.; BOUILLON, M. Extension du milieu souterrain zone non-calcaire: description d'un nouveau milieu et de son peuplement par les coleopterestroglobies. **Mémoires de Biospéologie**, v. 7, p. 19-52. 1980.
- KOOPMANN, K.F. Biogeography of the Bats of South America. In: Mars M. and Genoways, H.H. (Eds.). Mammalian biology in South America. **Special Publication of Pymatuning Laboratory of Ecology**, v.6, p.273-302, 1982.
- KOVARIK, P.W.; CATERINO, M.S. Histeridae Gyllenhal 1808. In: BERUTEL, R.G.; LESCHEN, R. et. al. (Eds.) **Morphology and Systematics (Archostemata, Adephaga, Myxophaga, Polyphaga Part 1).** Berlim: Walter de Gruyter GmbH & Co, 2005. p.190-222.

- KUNZ, T.H.; REICHARD J.D. 2010. **Status review of the little brown myotis (*Myotis lucifugus*) and determination that immediate listing under the endangered species act is scientifically and legally warranted. Status Review.** Boston: Boston University's Center for Ecology and Conservation Biology.
- KURY, A.B. Why does the Tricommatinae position bounce so much within Laniatores? A cladistic analysis, with description of a new family of Gonyleptoidea (Opiliones, Laniatores). **Zoological Journal of the Linnean Society**, v. 172, p. 1-48, 2014.
- MARES, M.A.; WILLIG, M.R.; STREILEIN, K.E.; LACHER, T.E. Jr. The mammals of northeastern Brazil: a preliminary assessment. **Annual Carnegie Museum**, v.50, n.4, p.81-137, 1981.
- MATTOX, G.M.T.; BICHUETTE, M.E.; SECUTTI, S.; TRAJANO, E. Surface and subterranean ichthyofauna in the Serra do Ramalho karst area, northeastern Brazil, with updated lists of Brazilian troglobitic and troglophilic fishes. **Biota Neotropica**, v.8, p.145-152, 2008.
- MAYR, E. Systematics and the origin of species. Columbia University Press, New York. 1942.
- MENNA-BARRETO, L.; TRAJANO, E. Biological Rhythmicity in Subterranean Animals: A Function Risking Extinction? In: AGUILAR-ROBLERO, R.; DÍAZ-MUÑOZ, M.; FANJUL-MOLES, M. (Eds.). **Mechanisms of circadian systems in animals and their clinical relevance.** Switzerland: Springer International Publishers, 2015. pp 55-68.
- MORAIS, J.W.; FIGUEIREDO, A.R.; ADIS, J.U. Diplura Borner, 1904. In: RAFAEL, J.A.; MELO, G.A.R.; CARVALHO, C.J.B.; CASARI, S.A.; CONSTANTINO, R. (Eds.). **Insetos do Brasil.** Ribeirão Preto: Holos, 2012. p. 214-218.
- MOORE, B.P. A synopsis of the New Zealand Anillini (Coleoptera: Carabidae: Bembidiinae), with descriptions of new genera and species. **New Zealand Journal of Zoology**, v. 7, n. 3, p. 399-406, 1980.
- MOURÃO, M.A.A. **Caracterização hidrogeológica do aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG.** 2007. 297 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte.
- MOURÃO, M.A.A.; LOUREIRO, C.O.; ALKMIM, F.F. O aquífero Cauê na região metropolitana de Belo Horizonte, Quadrilátero Ferrífero, MG. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 14, 2006, Curitiba. **Anais.** Curitiba, ABAS, 2006.
- NOWAK, R.M. 1994. **Walker's Bats of the World.** The Johns Hopkins University Press, 1994. 287 p.
- PACHECO, S.M.; SODRÉ, M.; GAMA, A.R.; BREDT, A.; CAVALLINI-SANCHES, E.M.; MARQUES, R.V.; GUIMARÃES, M.M.; BIANCONI, G. Morcegos urbanos: status do conhecimento e plano e ação para a conservação no Brasil. **Chiroptera Neotropical**, v.16, n.1, p.630-647, 2010.
- PEDRO, W.A.; TADEI, V.A. Taxonomic assemblage of bats from Panga Reserve, southeastern Brazil (Chiroptera): abundance patterns and trophic relations in the Phyllostomidae. **Boletim do Museu de Biologia Mello-Leitão (Nova Série)**, v.6, p.3-21, 1997.
- PILÓ, L.B.; COELHO, A.; REINO, J.C.R. Geoespeleologia em rochas ferríferas: cenário atual e conservação. In: CARMO, F.F.DO; KAMINO, L.H.Y. (ORG.) **Geossistema Ferruginosos: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais.** Belo Horizonte: 3i Editora, 2015. p.125-148.
- RACOVITZA, E.G. Essai sur les problèmes biospéologiques. **Archives de Zoologie Expérimentale et Générale**, 4^a ser., v.6, p371-488, 1907. [Edición Facsímil. In: BELLÉS, X, (Ed.). 2004. Assaig sobre els problemes bioespeleològics. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona].

- REIS, N.R.; PERACCHI, A.L. Quirópteros da região de Manaus, Amazonas, Brasil (Mammalia, Brasil). **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi**, série de Zoologia, v.3, n.3, p.161-182, 1987.
- REIS, N.R.; SCHUBART, H.O.R. Notas preliminares sobre os morcegos do Parque Nacional da Amazônia (Médio Tapajós). **Acta Amazônica**, v.8, n.3, p.507-515, 1979.
- SANTOS, F.H.S. **Estudo da atividade locomotora do opilião cavernícola *Goniosoma spelaeum* (Arachnida, Opiliones, Gonyleptidae)**. 1998. 77p. (Dissertação de Mestrado em Zoologia), Instituto de Biociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SCHAEFER, E. C.; CÂNDIDO, H.G.; CORRÊA, G.R. et al. In: CARMO, F.F.DO; KAMINO, L.H.Y. (Org.). **Geossistema Ferruginosos: áreas prioritárias para conservação da diversidade geológica e biológica, patrimônio cultural e serviços ambientais**. Belo Horizonte: 3i Editora, 2015. p.77-102.
- SIPINSKI, E.A.B.; REIS, N.R. Dados ecológicos dos quirópteros da Reserva Volta Velha, Itapoá, Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v.12, n.3, p.519-528, 1995.
- SKET, B. Can we agree on an ecological classification of subterranean animals? **Journal Natural History**, v.42, p.1549-1563, 2008.
- SOARES, G.; ANDRADE, R.; PERRONI, G. Troglomorphic fauna sampling methods in canga formations, Minas Gerais State, Brazil. In: 2016 International Conference on Subterranean Biology, 2016, Fayetteville. ICSB -**Abstracts**. 2016. v.1. p.96.
- TADDEI, V.A., PEDRO, W. A. Morcegos (Chiroptera, Mammalia) do Vale do Ribeira, Estado de São Paulo: diversidade de espécies. Seminário Regional de Ecologia, VIII, 1996, São Carlos. **Anais**. 1996.
- THINÈS, G.; TERCAFS, R. **Atlas de la vie souterraine**. Bruxelles, Albert de Visscher Ed., 1972.
- TRAJANO, E. Ecologia de populações de morcegos cavernícolas em uma região cárstica do sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Zoologia**, v.2, n.5, p.255-320, 1985.
- TRAJANO, E. Habitat and population data of troglobitic armored cave catfish, *Ancistrus cryptophthalmus* Reis, 1987, from Central Brazil (Siluriformes: Loricariidae). **Environmental Biology of Fishes**, v. 62, p.195-200, 2001.
- TRAJANO, E. Ecological classification of subterranean organisms. In: WHITE, W.B.; CULVER, D.C. (Eds.). **Encyclopedia of Caves**. Academic Press, Waltham, 2012.
- TRAJANO, E. Variações anuais e infra-anuais em ecossistemas subterrâneos: implicações para estudos ambientais e preservação de cavernas. **Revista da Biologia**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 1-7, 2013. doi.org/10.7594/revbio.10.02.01
- TRAJANO, E. Biologia Subterrânea. In: LOBO, H.A.S.; SÁNCHEZ, L.E. (Org.). **Guia de Boas Práticas de Mineração de Calcário em Áreas Cársticas**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 2016.
- TRAJANO, E.; CARVALHO, M. Towards a biologically meaningful classification of subterranean organisms: a critical analysis of the Schiner-Racovitza system from a historical perspective, difficulties of its application and implications for conservation. **Subterranean Biology**, v. 21, p. 1-27, 2017. DOI 10.3897/subbiol.21.9759
- TRAJANO, E.; GALLÃO, J.E.; BICHUETTE, M.E. Spots of high diversity of troglobites in Brazil: the challenge of measuring subterranean diversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 25, p.1805-1828, 2016. DOI 10.1007/s10531-016-1151-5
- TRAJANO, E.; GNASPINI, P. Cavernas. In: LEONEL, C. (Org.). **Intervalos**. Fundação para a Conservação e a Produção Florestal do Estado de São Paulo, São Paulo, 2001.

TRAJANO, E.; MOREIRA, J.R.A. Estudo da fauna de cavernas da Província Espeleológica Arenítica Altamira-Itaituba, PA. **Revista Brasileira Biologia**, v.51, p.13- 29, 1991.

VANDEL, A. **Biospéologie**. Paris: Gauthier-Villars, 1964.

ZEPPELINI, D. Collembola. In: RAFAEL, J.A.; MELO, G.A.R.; CARVALHO, C.J.B.; CASARI, S.A.; CONSTANTINO, R. (Eds.). *Insetos do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos, 2012. p. 201-211.

Fluxo editorial:

Recebido em: 21.10.2016

Aprovado em: 24.01.2017



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp

-
- ¹ Existe uma tendência atual em se utilizar este termo no lugar do tradicional Bioespeleologia para deixar claro que o estudo dos ecossistemas subterrâneos é uma área, ou especialidade, dentro da biologia e não uma especialidade da espeleologia. Ou seja, é necessário ser biólogo para estudar biologia subterrânea.
- ² Apomorfia é a condição mais recente em uma série de transformação, surgida por modificação de uma condição mais antiga [série de transformação: sequência de modificações que uma determinada estrutura sofreu, tornando-se sucessivamente mais derivada]. Autapomorfia seria o estado de caráter apomórfico para um único ramo terminal em um cladograma (árvore filogenética).