

Fatores e processos envolvidos no desenvolvimento de formas cársticas em rochas siliciclásticas em Minas Gerais, Brasil

Fabiana Pena Fabri
Universidade Federal de Minas Gerais

Profa. Dra. Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin
Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

Feições cársticas desenvolvidas em rochas não carbonáticas têm chamado a atenção de pesquisadores em todo o mundo. Este é o caso das rochas siliciclásticas, que, até recentemente, por serem consideradas pouco solúveis, não eram incluídas entre as litologias passíveis de formação de relevos cársticos. No entanto, pesquisas em áreas quartzíticas e areníticas têm apontado para a ocorrência de feições com características até então restritas a substratos rochosos de fácil dissolução química. Este estudo busca apresentar e discutir os fatores envolvidos na elaboração dessas formas de relevo na região de Itambé do Mato Dentro, no Espinhaço Meridional, um conjunto montanhoso localizado no estado de Minas Gerais. Para isto, utilizou metodologia com base na quantificação desses fatores, bem como em sua avaliação qualitativa, com o objetivo de comparar os fatores responsáveis pelo desenvolvimento das cavernas descritas com outros apontados pela literatura, como é o caso do gradiente hidráulico. Resultados mostram que, na área, este não apresenta a mesma importância verificada em outras áreas de relevo cárstico em rochas siliciclásticas. As análises também demonstraram a importância da composição mineralógica das rochas na aceleração dos processos de intemperismo químico e físico, e sua importância para o desenvolvimento das feições cársticas na área.

Palavras-chaves: feições cársticas, rochas siliciclásticas, fatores, Espinhaço Meridional.

Abstract:

Karstic features developed in rocks poor in calcium carbonate have more recently called the attention of researchers. That is the case of the siliciclastic rocks not included among those in which karst can develop because of its low rates of solubility. However, researches in areas of quartzite and sandstones revealed the occurrence of relief forms which were until recently reported as occurring only in geological substratum prone to chemical dissolution. This research aims to present and discuss the factors involved in the elaboration of such landforms in Itambé do Mato Dentro, Espinhaço Meridional, Minas Gerais State, Brazil. Methodological procedures based on quantitative as well as qualitative evaluation of these factors were used to provide a basis for comparing them with those pointed out by the literature as the most representative ones for cave evolution as for instance the hydraulic gradient. Results show that in the study area this factor has not the importance attributed to it by literature for the development of karstic features elsewhere. Analysis also indicates that the main factor involved in the evolution of the karstic forms is the lithology which seems to be responsible for the acceleration of chemical as well as mechanical weathering.

Keywords: karstic features, siliciclastic rocks, factors, Espinhaço Meridional.

Recebido 04/2013
Aprovado 06/2013

fpfabri@yahoo.com.br
chaugustin@hotmail.com

Introdução

Nas últimas décadas, é possível observar, em escala mundial, o aumento das pesquisas e trabalhos sobre relevos cársticos desenvolvidos em rochas não carbonáticas. Eles demonstram uma tendência para incluir as rochas siliciclásticas, notadamente os quartzitos e arenitos, no grupo das rochas carstificáveis (WHITE *et al.*, 1966; SZCERZBAN *et al.*, 1974; CORRÊA NETO, 1997; DOERR, 1999; SILVA, 2004).

Devido ao fato de quartzitos e arenitos serem considerados rochas praticamente inertes do ponto de vista da dissolução (KRAUSKOPF, 1972), havia a tendência de se tratar tais formas como representativas de um pseudocarste, ou seja, formas assemelhadas às cársticas geradas por dissolução em calcários, porém oriundas predominantemente de processos físicos de erosão (POUYLLAU, 1985; POUYLLAU *et al.*, 1985). Embora quantitativamente haja o predomínio de processos mecânicos de “piping” na geração dessas formas em litologias não carbonáticas, em especial nas fases tardias da evolução das formas cársticas, a dissolução desempenha papel fundamental na iniciação do processo, promovendo a individualização dos grãos de quartzo. Esta fase de desagregação química, denominada de arenização, ocorre no domínio intergranular (MARTINI, 1979).

De acordo com Piló (1998), a dificuldade em se empregar o termo carste provém das incertezas sobre os critérios que qualificam uma paisagem como cárstica. O principal aspecto definidor do termo carste consiste na representatividade de formas típicas dos processos de dissolução, tendo em vista que o próprio termo carste possui origem morfológica (LLOPIS *et al.*, 1970). Dessa maneira, a dissolução, como condicionante das formas, representa um elemento fundamental para que uma paisagem ou uma feição seja considerada cárstica, ainda que não seja necessariamente o processo dominante (JENNINGS, 1983).

Segundo Galán (1991), diferentemente do que se observa nas rochas carbonáticas, o processo de dissolução em rochas siliciclásticas produz um grande volume de material residual, essencialmente insolúvel (grãos de quartzo), o qual deve ser removido mecanicamente, via “piping”, resultando na formação de condutos. Para muitos autores (MARTINI, 1979; CORRÊA NETO *et al.*, 1977; GALÁN, 1991; CORRÊA NETO, 1997; YOUNG *et al.*, 1992; SILVA, 2004), duas condições parecem essenciais ao desenvolvimento da etapa erosiva do carste em rochas siliciclásticas: disponibilidade hídrica e alto gradiente hidráulico, sendo que ambas devem ocorrer de forma integrada.

Os estudos relacionados ao carste “não tradicional” em rochas siliciclásticas ainda encontram-se em estágio incipiente, se comparados ao carste carbonático (FABRI, 2011). Tal fato se deve principalmente ao pequeno número de trabalhos de detalhe realizados nessas rochas, o que contribui para a existência de uma base experimental insuficiente para esclarecer os mecanismos que, de fato, levam à sua carstificação.

Neste contexto, o presente trabalho tem como propósito elucidar, por meio da análise dos aspectos do meio físico, os processos que levaram à carstificação das cavernas localizadas no município de Itambé do Mato Dentro (MG), procurando investigar possíveis fatores espeleogenéticos comum entre elas.

A área de estudo

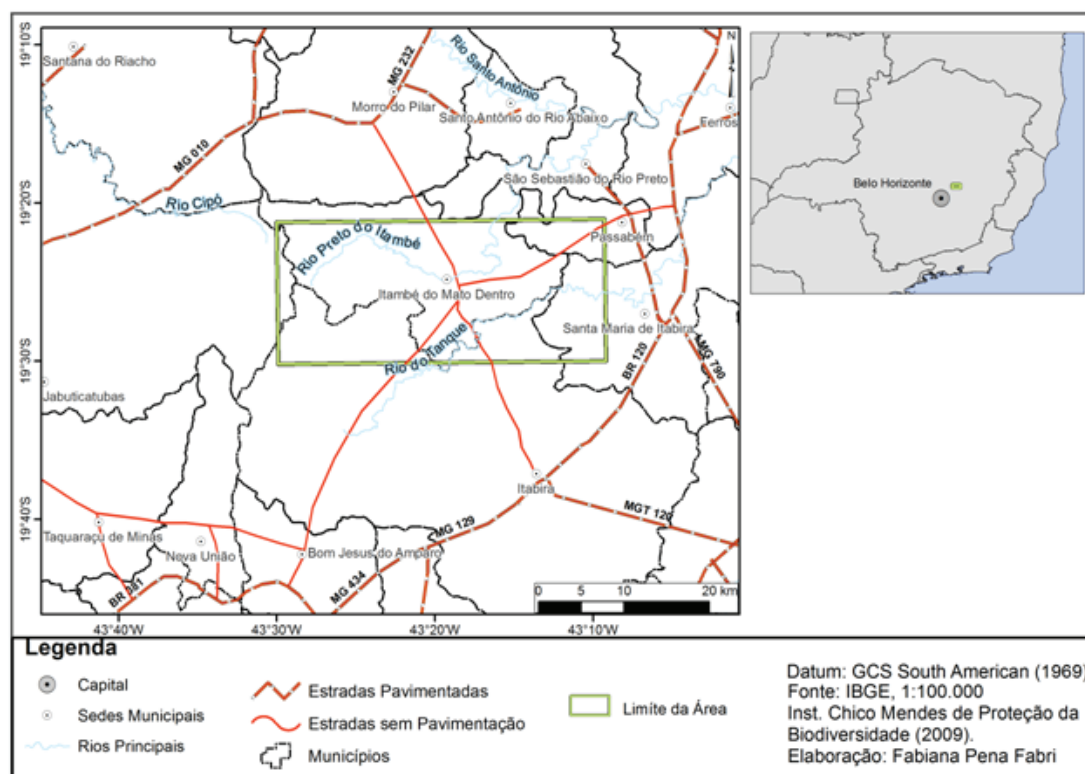
A área de estudo possui cerca de 410 km², e está localizada a aproximadamente 100 km de Belo Horizonte (MG). As cavernas localizam-se no município de Itambé do Mato Dentro, mas a área

em questão abrange também os municípios limítrofes de Jaboticatubas, Passabém, Santa Maria de Itabira e Itabira (Fig. 1).

O clima da região é classificado como tropical de altitude do tipo Cwb – Mesotérmico, com presença de duas estações bem definidas: verões brandos e úmidos e invernos secos de baixas temperaturas. A precipitação média anual situa-se entre 1.300 e 1.600 mm e as temperaturas médias ficam em torno de 21,2°C.

Na área abordada, são reconhecidas as seguintes unidades geológicas: (i) os terrenos arqueanos gnáissicos-granitos-migmatíticos do Complexo Dona Clara; (ii) as rochas metassedimentares da Formação Sopa Brumadinho, Supergrupo Espinhaço, relacionadas ao Proterozóico Médio e (iii) as intrusões de metadiabásios a metagabros na forma de diques e *sills* do Proterozoico Médio e/ou Superior, representadas pela Suíte Metabásica Pedro Lessa (GROSSI SAD *et al.*, 1997).

FIGURA 1 Localização da área de estudo.



Do ponto de vista geomorfológico, a área estudada encontra-se localizada na borda leste da Serra do Espinhaço Meridional, caracterizada por uma sequência de *hogbacks*, orientados aproximadamente na direção norte-sul (PFLUG, 1965; UHLEIN, 1991). As cristas sustentadas por quartzitos, cujas altitudes chegam a superar os 1.500 m, são intercaladas por gnaiesses do embasamento. A grande variedade de rochas intercaladas (quartzitos e conglomerados *versus* granitoides e xistos), aliada à variabilidade de estruturas tectônicas e suas diferentes direções, proporciona um avanço diferenciado da frente de dissecação, movido pelos afluentes da margem esquerda do rio Doce (SAADI, 1995).

Metodologia

No interior das cavidades, foram realizados os seguintes procedimentos: (i) detalhamento geomorfológico, por meio da análise da morfologia de condutos e de microformas; (ii) detalhamento geológico, buscando reconhecer e medir os planos estruturais; (iii) descrição e análise dos depósitos químicos e clásticos e (iv) coleta de amostras de rochas para produção de lâminas delgadas, com o objetivo de realizar análises mineralógicas e textuais dos quartzitos que compõem as cavidades.

A análise geomorfológica da área em estudo foi realizada com base no cruzamento das informações obtidas a partir da elaboração dos mapas: hipsométrico (imagem ASTER, 2009), declividade (imagem ASTER, 2009) e do mapa geológico (Folha Conceição do Mato Dentro – SE-23-Z-D-I.1:100.000. COMIG, 1996).

Em relação às formas cársticas superficiais, buscou-se identificar, descrever e analisar as feições que se assemelham às típicas formas cársticas carbonáticas. Em seguida, optou-se por classificá-las como sendo cársticas ou não, tendo como base os processos envolvidos na sua gênese.

Posteriormente, as cavernas foram avaliadas quanto à sua localização com relação à morfologia do terreno. Foram analisadas a partir de um mapa de declividade e, por meio da realização de cortes topográficos da área e de perfis topográficos das vertentes, foram analisadas quanto ao gradiente hidráulico. Os perfis topográficos nas duas escalas possibilitaram uma avaliação visual e qualitativa, da inserção das cavernas na geomorfologia regional e local, e o mapa de declividade ofereceu os valores percentuais da variação do relevo.

Com o objetivo de proporcionar uma melhor representação visual do gradiente do relevo, foram traçados cinco perfis topográficos, sendo 2 do limite leste ao oeste, e 3 do limite sul ao norte da área, tendo como elemento de orientação do traçado dos perfis a localização das cavernas. As bases cartográficas dos perfis foram: a imagem ASTER-2009 e o mapa geológico, na escala de 1:100.000, da COMIG (1996). Sua utilização permitiu que fossem traçados os mergulhos aproximados entre os contatos geológicos. Os perfis foram gerados utilizando-se do programa Global Mapper, versão 10.02. Em termos quantitativos, foram considerados os valores das classes do mapa de declividade na escala regional.

Essa avaliação também foi feita em escala local, através de perfis topográficos das vertentes nas quais as cavernas se encontram localizadas. Esses perfis também foram úteis para avaliar a morfologia do relevo e sua provável influência na gênese e evolução dessas cavidades, assim com na sua dinâmica. Já os valores quantitativos para representar o gradiente do relevo local foram obtidos a partir dos valores entre o interflúvio e talvegue das vertentes, através da seguinte equação:

$$[(A_{max} - A_{min}) / D] \times 100$$

onde:

A_{max} representa a máxima altitude alcançada;

A_{min} representa a mínima altitude alcançada;

D = distância entre A_{max} e A_{min}.

A mesma equação acima foi utilizada na análise quantitativa do gradiente hidráulico, para calcular o gradiente da drenagem situada mais próxima à cavidade (IBGE, 1997).

Todas essas informações foram cruzadas com aquelas do mapa geológico, hipsométrico, de declividade e com os dados litológicos obtidos em campo.

Apresentação e discussão dos resultados

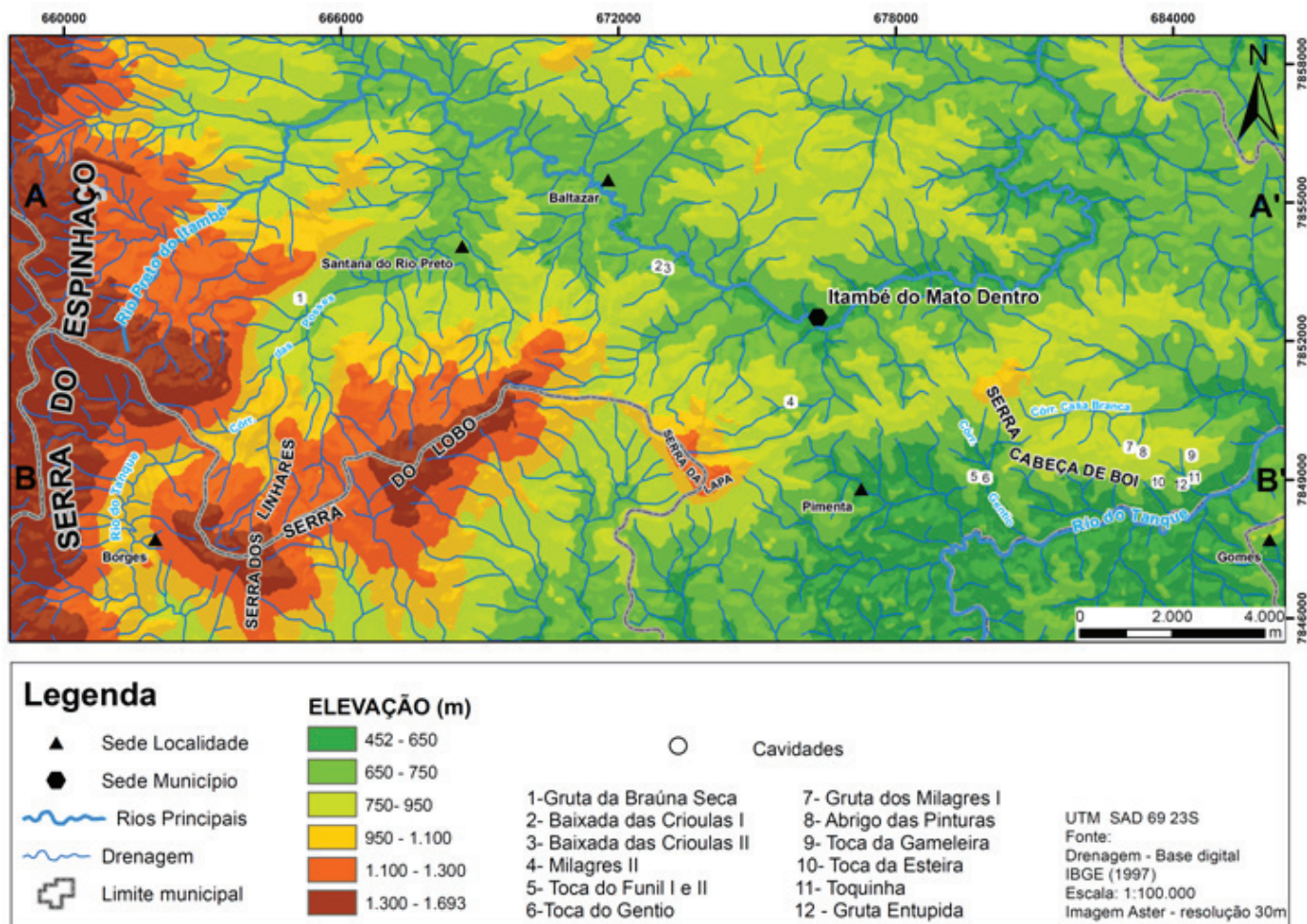
Contextualização geomorfológica da área de ocorrência das cavernas

Para entender os fatores atuantes na elaboração das formas cársticas estudadas, bem como das suas características, foi importante proceder a uma análise geomorfológica de detalhe das suas áreas do entorno.

O relevo da área de estudo foi modelado em diferentes tipos de rochas, mas sobretudo nos quartzitos da Formação Sopa Brumadinho. Esta formação foi subdividida em três unidades geológicas, que apresentam variações litológicas proeminentes, que se refletem no condicionamento do relevo (Fig. 2).

A primeira unidade, Serra do Lobo, destaca-se na paisagem com cotas altimétricas entre 1.300 e 1.693 m, sendo constituída por rochas pouco susceptíveis à erosão, tais como quartzitos e metaconglomerados poli e monomíticos. A Serra do Espinhaço ocupa parte da borda oeste da área, formando extensos platôs entrecortados por drenagem e escarpamento originado por linha de falha. A Serra do Lobo e a Serra dos Linhares apresentam perfis abruptos, com encostas dissecadas pela drenagem.

FIGURA 2 Mapa hipsométrico da área de estudo.



A segunda, Unidade Rio Preto, apresenta quartzitos finos micáceos e sericita xistos, por vezes contendo minerações fosfáticas. Caracteriza-se por apresentar relevo mais rebaixado e pouco acidentado, com altitudes que variam entre as faixas altimétricas 650-750 e 750-950 m, com exceção da Serra da Lapa, que possui encosta íngreme, com pontos cimeiros que chegam a atingir 1.200 m.

A Unidade Itambé do Mato Dentro é formada por quartzitos finos, com laminação composta por filmes sericíticos e ferruginosos. Essas rochas também sustentam um relevo rebaixado, no qual as maiores altitudes não ultrapassam os 1.000 m na Serra Cabeça de Boi (Fig. 2).

As formas de relevo da região são resultantes da dissecação fluvial do rio Preto do Itambé e do rio Tanque, e seus afluentes, adaptados às direções tectônicas estruturais. A rede de drenagem é caracteristicamente mais estruturada e densa à medida que se aproxima da Serra do Espinhaço, apresentando padrões subparalelos e retangulares, em decorrência da forte influência do controle estrutural, sobretudo por falhas e fraturas. As drenagens de primeira e segunda ordem organizam-se nas direções aproximadas E-W e N-S. As formas predominantes no embasamento e nas intrusões são as colinas convexas e policonvexas. Neste compartimento, a rede de drenagem apresenta menor controle estrutural, podendo ser classificada como apresentando um padrão dendrítico (Fig. 2).

As feições cársticas superficiais da área de estudo

As feições cársticas superficiais são muito pouco recorrentes no relevo da área de estudo. Estão associadas basicamente às dolinas originadas por colapso de teto de caverna. Destaca-se a presença de feições residuais semelhantes às torres cársticas desenvolvidas em rochas carbonáticas (Fig. 3). Sua gênese está associada à erosão pluvial, condicionadas por fraturas. Com base em tais características, não é aconselhável classificar tais formas como cársticas. Já os afloramentos quartzíticos da área são marcados, com frequência, pela ocorrência de microfeições originadas pelo processo de dissolução, tais como sulcos, saliências irregulares e furos, muitas vezes denominados alvéolos (FORD *et al.*, 1989).

FIGURA 3 Formas residuais semelhantes às torres cársticas carbonáticas.
Fonte: Fabri (2011).



As cavernas da área de estudo

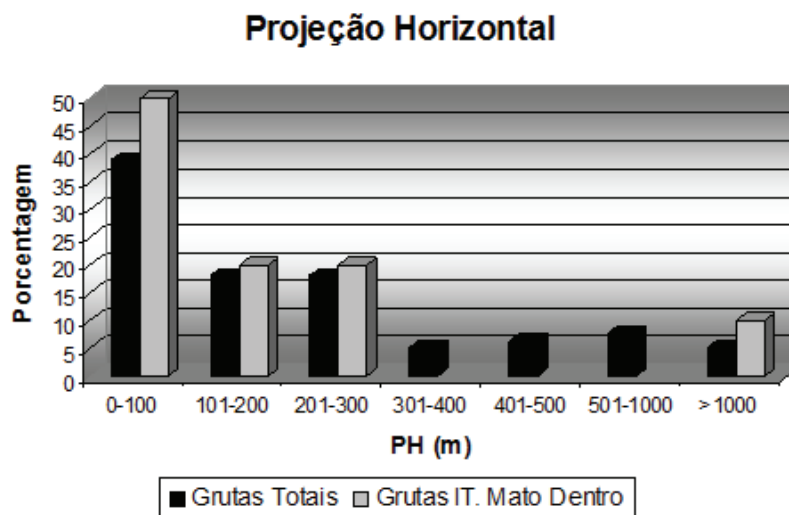
Na região de Itambé do Mato Dentro, foram mapeadas e estudadas onze cavidades: Gruta da Braúna Seca, Gruta Baixada das Crioulas I, Gruta Baixada das Crioulas II, Gruta dos Milagres I, Gruta dos Milagres II, Toca do Funil I, Toca do Funil II, Toca do Gentio, Abrigo das Pinturas^I, Toca da Esteira e Toquinha. Além dessas cavidades, também foram objeto de análise, para esta pesquisa, duas cavernas que se encontram entupidas por sedimentos, a Toca da Gameleira e a Gruta Entupida.

De acordo com a distribuição dessas, é possível observar que se encontram localizadas em afloramentos quartzíticos, caracterizando formas isoladas na paisagem, embora haja uma maior concentração na Serra Cabeça de Boi.

A área estudada apresenta, portanto, uma baixa densidade de feições endocársticas, com ocorrência média de apenas 0,044^{II} de feições por km², com a ressalva de que possa haver outras cavidades ainda não descobertas. Essa densidade é ainda mais baixa se comparada com a da Serra do Ibitipoca (MG), onde se desenvolveu um dos maiores conjuntos espeleológicos do mundo, apresentando 2,015^{III} cavernas por km² (CECAV, 2009).

As grutas de Itambé do Mato Dentro também não são muito extensas, sendo que 50% do total não alcançam os 100 m, enquanto que 40% têm entre 200 e 300 m (Fig. 4). Os restantes 10% contam com projeção horizontal de 1.114 m e são representados pela Baixada das Crioulas I. A Tabela 1 apresenta os dados morfométricos das cavidades.

FIGURA 4 Gráfico de projeção horizontal das cavernas de Itambé do Mato Dentro de outras grutas em rochas siliciclásticas no Brasil. Fonte: Fabri (2011), adaptado de Silva (2004).



^I Segundo os parâmetros morfométricos da classificação da SBE (1991), o Abrigo das Pinturas pode ser considerado uma caverna.

^{II} Densidade = número de cavernas encontradas na região / área de estudo em km² coberta por quartzitos.

^{III} Densidade = número de cavernas cadastradas na região / área do Limite do Parque Estadual do Ibitipoca (Fontes: CECAV e IBGE).

Esses valores são concordantes com um grande grupo de cavernas em rochas siliciclásticas no Brasil (SILVA, 2004), uma vez que 75,3% do total não ultrapassam os 300 m, embora se registre um número significativo (12,98%) de cavernas que superam os 500 m, conforme demonstra a Figura 4.

Dessa forma, conclui-se que as grutas desenvolvidas em rochas siliciclásticas apresentam, em geral, baixo grau de desenvolvimento em relação às cavernas carbonáticas, conforme sugere Silva (2004).

TABELA 1 Dados morfométricos das cavidades estudadas.

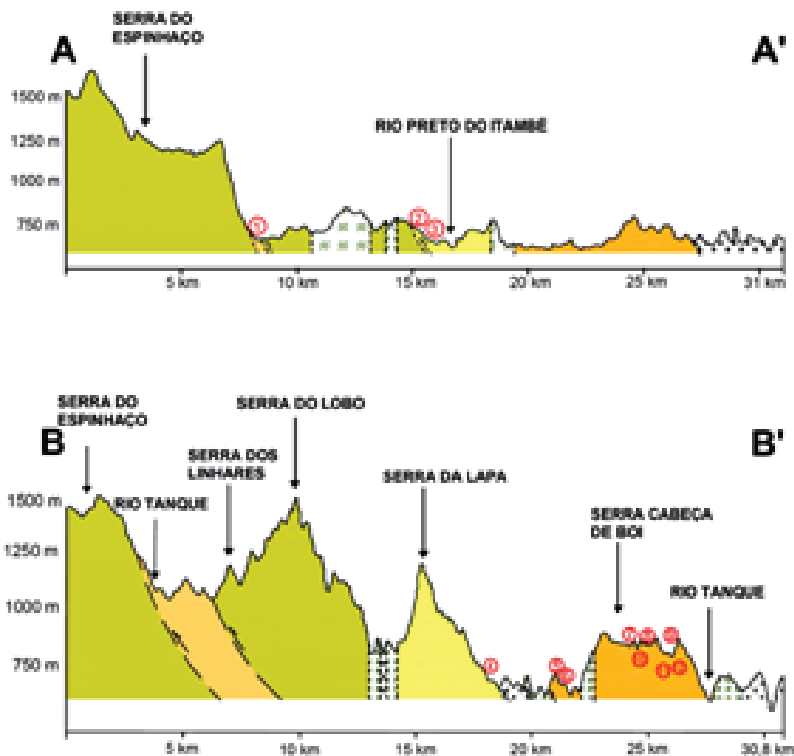
N°	Cavidades	Coordenadas UTM/SAD 69			Projeção Horizontal (m)	Desnível (m)	Área (m ²)
		Fuso	N	S			
1	Abrigo das Pinturas	23	7.849.576	683.355	65	8	518
2	Gruta da Braúna Seca	23	7.852.877	665.233	37	7	193
3	Gruta Baixada das Crioulas I	23	7.853.631	672.862	1074	75	6660
4	Gruta Baixada das Crioulas II	23	7.853.583	673.059	205	13,5	1777
5	Gruta dos Milagres I	23	7.849.656	683.048	225	14	1100
6	Gruta dos Milagres II	23	7.850.686	675.724	149	17	806
7	Toca da Esteira	23	7.848.930	683.629	96	28	335
8	Toca do Funil I	23	7.849.054	679.690	21	4	141
9	Toca do Funil II	23	7.849.054	679.690	106	29	534
10	Toca do Gentio	23	7.848.947	679.991	14	2	53
11	Toquinha	23	7.848.930	683.629	6	1,5	9,3

Principais características e possíveis mecanismos genéticos das cavernas estudadas

No contexto da geomorfologia regional, as cavernas não se localizam nas áreas consideradas como aquelas de maior gradiente hidráulico, tais como em encostas das serras mais elevadas, onde a declividade é em torno de 20 a 45% e 45 a 75% (Fig. 5).

Com base na distribuição altimétrica, verifica-se que as cavidades concentram-se entre as altitudes mais baixas, nas faixas de 650-750 e 750-950 m, que correspondem, de forma geral, às porções do relevo onde a declividade é relativamente menos acentuada, de 8 e 20%. Sua localização também está relacionada aos quartzitos menos resistentes, pertencentes às Unidades geológicas Rio Preto e Itambé do Mato Dentro.

FIGURA 5 Localização das cavernas nos perfis topográficos Leste – Oeste da área de estudo.



Legenda

○ Caverna

- 01- Gruta da Braúna Seca
- 02-Baixada das Crioulas I
- 03-Baixada das Crioulas II
- 04-Gruta dos Milagres II
- 05- Toca do Funil I e II
- 06-Toca do Gentio

- 07-Gruta dos Milagres I
- 08- Abrigo das Pinturas
- 09-Toca da Gameleira
- 10-Toca da Esteira
- 11-Toquinha
- 12- Gruta Entupida

↗ Faixa de empunção inferida
 - - - Contato geológico inferido

SUPERGRUPO ESPINHAÇO

- Unidade Serra do Lobo
- Unidade Rio Preto
- Unidade Rio Preto fosfatada
- Unidade Matadentro

Metadiabásios

Complexo Dona Clara

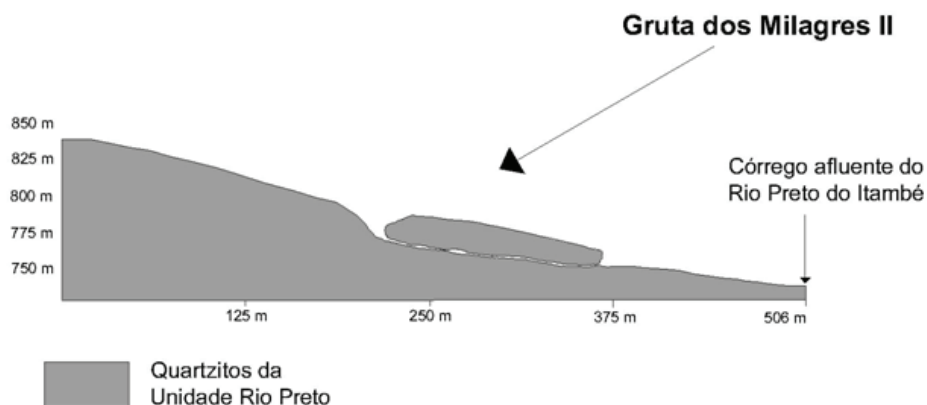
Pesquisadores que estudaram feições cársticas na Serra do Ibitipoca (CORRÊA NETO *et al.*, 1997; CORRÊA NETO, 1997; SILVA, 2004) assumem o princípio de que, sem o elevado gradiente hidráulico existente na serra, é provável que não ocorresse, ao menos no que diz respeito à magnitude, a formação de cavernas.

No entanto, a importância do alto gradiente hidráulico como um fator determinante para a espeleogênese não parece se aplicar às cavidades estudadas neste trabalho. Tal fato pode ser explicado tendo em vista que, em relevos com declividade acentuada, a capacidade de infiltração do solo em subsuperfície é limitada e a velocidade do fluxo subterrâneo é mais rápida, não havendo disponibilidade hídrica e tempo suficientes para que as reações químicas ocorram. Isto é especialmente verdadeiro para as rochas siliciclásticas, uma vez que estas necessitam de um tempo muito maior para a carstificação (GALÁN, 1991; SCHULZ *et al.*, 1999). Embora não tenha sido possível identificar a grande significância do gradiente hidráulico no desenvolvimento de outras cavernas em áreas de rochas siliciclásticas, isso não significa que ele esteja ausente ou mesmo que seja pouco importante no processo de espeleogênese das cavernas estudadas.

A maior parte das cavernas encontradas na região de estudos tem como características a existência de drenagem perene, com exceção daquelas localizadas em áreas topograficamente mais elevadas, como a Gruta dos Milagres I e o Abrigo das Pinturas, que apresentam, respectivamente, cursos de água intermitentes e ausência de drenagem. Já as grutas situadas em porções mais rebaixadas do relevo, como é o caso da Gruta dos Milagres II, da Toquinha e do Sistema Baixada das Crioulas, são drenadas por cursos de água de maior vazão em relação às demais cavidades. Não é possível datar diretamente a idade dessas cavernas, mas tal fator sugere que o processo de formação das mesmas está relacionado com o desenvolvimento da paisagem. Devido ao rebaixamento geral do relevo e da superfície do aquífero, a circulação hídrica das cavernas tende a diminuir, bem como a atuação dos processos de carstificação.

No contexto geomorfológico local, as cavernas investigadas estão inseridas nos mais variados compartimentos geomorfológicos: alta, média e baixa vertente, bem como em depressão e fundo de vale. É válido ressaltar que seu desenvolvimento acompanha a morfologia da vertente, indicando sua forte influência no desenvolvimento e dinâmica dessas cavidades (Fig. 6).

FIGURA 6 Perfil topográfico da Gruta dos Milagres II.



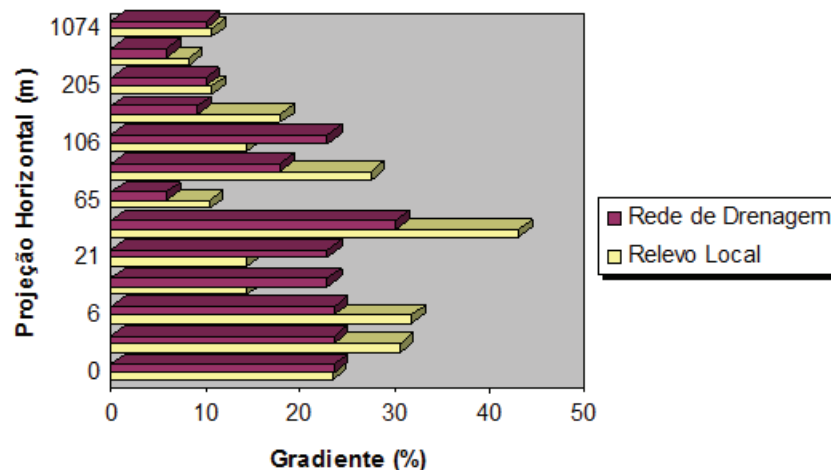
De acordo com o gráfico da Figura 7, é possível notar que as cavernas mais desenvolvidas não estão associadas às áreas de maior gradiente hidráulico, ou do relevo local, assim como as menores cavidades não estão relacionadas às áreas de menor gradiente. Logo, não foi possível estabelecer uma relação clara entre esses parâmetros medidos e o desenvolvimento das cavernas estudadas.

Em relação aos aspectos geológicos, a interpretação mais provável é a de que a presença de outros minerais mais solúveis do que o quartzo na composição dos quartzitos acelere os processos de intemperismo químico e físico da rocha.

Conforme foi observado nas lâminas de rochas coletadas no interior das cavidades, os quartzitos apresentam granulometria fina a média, bem como níveis sericíticos e ferruginosos paralelos ao plano de foliação da rocha (FABRI, 2011). Essas características justificam a tendência da rocha ao deslocamento (GROSSI SAD *et al.*, 1997), fenômeno que é nitidamente observado no interior das grutas.

Os níveis sericíticos também ocorrem no contato entre os grãos de quartzo (FABRI, 2011), corroborando a hipótese de alguns autores de que a dissolução dos quartzitos pode agir sobre uma matriz mais solúvel (URBANI, 1986; YOUNG, 1988; GALÁN, 1991; YOUNGER *et al.*, 1995). O mesmo foi observado por pesquisadores que estudaram o processo de cavernamento na província espeleológica quartzítica de Andrelândia (CORRÊA NETO *et al.*, 1997; CORRÊA NETO, 1997; SILVA, 2004), levando-os também a formularem a hipótese de que a presença de micas na composição do quartzitos representa um fator importante na gênese das grutas.

FIGURA 7 Gráfico de comparação entre projeção horizontal das cavernas e o gradiente do relevo local e da rede de drenagem.

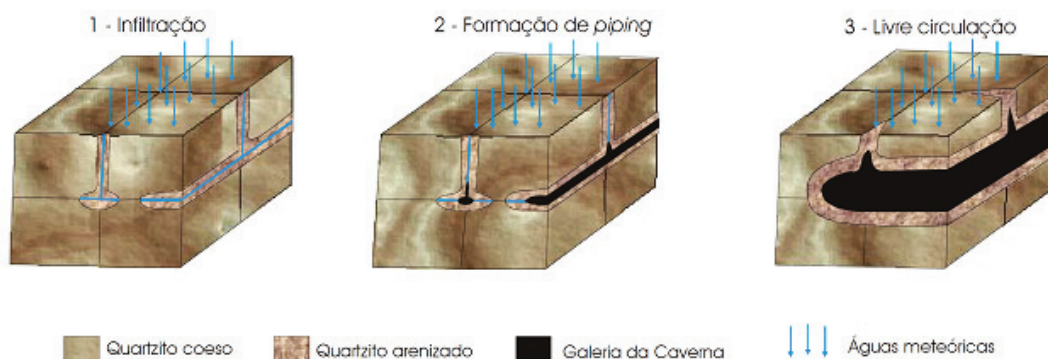


A partir das medidas estruturais nas cavernas estudadas, constatou-se que estas se desenvolvem preferencialmente ao longo dos planos de foliação e/ou acamamento, que, por sua vez, são concordantes com a vertente. Assim, as cavidades parecem desenvolver-se onde as camadas de quartzitos, com níveis ricos em sericita, apresentam-se concordantes com a morfologia externa. Nessas condições, o fluxo subterrâneo é direcionado lateralmente, gerando maior descarga e agressividade de dissolução, devido à pressão hidrostática.

Destaca-se, portanto, a importância e eficiência do processo de alteração da sericita como possível mecanismo gerador de planos preferenciais de permeabilidade, tanto no domínio intergranular, como através dos planos estratigráficos. Gotejamentos perenes frequentemente observados no interior das cavidades evidenciam a capacidade de transmissão de fluidos.

À medida que o contínuo processo de “arenização” avança, a rocha tem sua porosidade e permeabilidade aumentada, resultando em um quartzito muito friável, que caracteriza a primeira etapa de espeleogênese das cavernas estudadas, de acordo com o modelo proposto por Martini (1979). A rocha se torna, portanto, mais susceptível ao intemperismo físico por meio de canalículos ou “pipings”, processo no qual se inicia a formação de cavernas em rochas siliciclásticas, segundo o referido autor (Fig. 8).

FIGURA 8 Modelo de formação de condutos por “arenização” e piping.



Fonte: Silva (2004).

As variáveis climáticas temperatura e precipitação podem ser consideradas fatores importantes no processo de carstificação da área estudada, uma vez que ambientes quentes (temperaturas mais elevadas promovem a aceleração da maioria das reações químicas, inclusive da sílica, segundo Szczerban *et al.*, 1974) e úmidos oferecem condições mais propícias ao processo de dissolução.

Considerações finais

Conforme as informações obtidas nas pesquisas de campo e de laboratório, é possível afirmar que a região de Itambé do Mato Dentro não representa um relevo cárstico propriamente dito, tendo em vista que, embora apresente feições típicas do carste, elas não têm grande expressão espacial. Não configuram, portanto, um relevo cárstico como verificado em outras regiões de carste “não tradicional” nacionais e internacionais (ANDREYCHOUK *et al.*, 2009; SENA; SOARES; TRAVASSOS, 2011).

A partir da análise geomorfológica da área estudada, é possível concluir que o desenvolvimento das cavernas não está intrinsecamente relacionado à presença de um gradiente hidráulico elevado, diferentemente do que foi constatado para as cavernas da Serra do Ibitipoca, onde o alto gradiente hidráulico é retratado como um fator importante no processo de carstificação das grutas (CORRÊA NETO *et al.*, 1997; SILVA, 2004). As cavernas estudadas encontram-se localizadas em quartzitos menos resistentes que afloram na região em altitudes mais baixas e em relevo relativamente pouco acentuado.

Foi possível verificar que as cavernas de Itambé do Mato Dentro seguem um padrão evolutivo no qual um conjunto de fatores parece ser essencial para o seu processo de carstificação:

- **Clima:** variáveis precipitação e temperatura;
- **Litologia:** quartzitos com tendências ao deslocamento, dada a presença de filmes sericíticos orientados no plano de foliação da rocha e quartzos de granulometria média a fina. As micas também ocorrem no contato entre os grãos, podendo contribuir para o aumento da permeabilidade primária da rocha, tornando-a muito friável, porosa e susceptível ao intemperismo físico numa fase mais tardia;
- **Estrutura da rocha:** desenvolvimento das cavidades seguindo preferencialmente mergulho dos planos estratigráficos (possivelmente através dos níveis ricos em mica) que acompanha a morfologia externa, direcionando o fluxo lateralmente. Essa condição proporciona o aumento do gradiente hidráulico, resultando em uma maior eficiência nos processos de dissolução da rocha e remoção do material residual;
- **Geomorfologia:** formação das cavernas relacionada com o desenvolvimento da paisagem, em função do rebaixamento geral do relevo e da superfície do aquífero.

Assim, as cavernas e outras feições encontradas na área de estudo ocorrem de maneira restrita, diferentemente de uma paisagem tipicamente cárstica, que apresenta um padrão espacialmente recorrente de feições características de dissolução química das rochas. Neste contexto, as cavernas estudadas podem ser consideradas como formas cársticas pontuais na paisagem, de importância apenas local, sem configurar um relevo cárstico.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro (CRA APQ 01652-09), e ao Instituto do Carste-MG, pelo apoio logístico para a realização desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- ANDREYCHOUK, V.; DUBLYANSKY, Y.; EZHOV, Y.; LYSENIN, G. *Karst in the Earth's Crust: its distribution and principal types*. Poland: University of Silesia/ Ukrainian Academy of Sciences/ Tavrichesky National University-Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 2009.
- ASTER. *Advanced Spaceborne Thermal and Reflection Radiometer*. Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/defaultl.htm>>. Acesso em: 20 ago. 2009.
- CENTRO DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS – CECAV. Disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br/cecav>>. Acesso em: 25 ago. 2009
- COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS - COMIG. Mapa Geológico da *Folha Conceição do Mato Dentro* – SE-23-Z-D-I. 1:100.000, 1996.
- CORRÊA NETO, A. V. Cavernas em Quartzitos da Serra do Ibitipoca, Sudeste de Minas Gerais. In: *Anais do Seminário de Pesquisa sobre a Serra do Ibitipoca*, p. 43-51, 1997.
- CORRÊA NETO, A. V.; DUTRA, G. A. Província Espeleológica Quartzítica Andrelândia, sudeste de Minas Gerais. In: *Anais XXIV Congresso Brasileiro de Espeleologia*, p. 57-64, 1997.
- DOERR, S. H. Karst-like landforms and hydrology in quartzites of the Venezuelan Guyana Shield: Pseudokarst or “real” Karst? *Zeitschrift fur Geomorphologie*, Vol. 43, p. 1-17, 1999.
- FABRI, F. P. *Estudo das cavernas quartzíticas da região de Itambé do Mato Dentro*. Belo Horizonte, 2011. 179p. Dissertação de Mestrado em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- FORD, D.; WILLIAMS, H. P. *Karst geomorphology and hydrology*. London: Chapman & Hall, 1989. 601p.
- GALÁN, C. Disolución y génesis del karst en rocas carbonáticas y rocas silíceas: un estudio comparado. *Munibe*, Vol. 43, p. 43-72, 1991.
- GROSSI SAD, J. H.; MOURÃO, M. A. A.; GUIMARÃES, M. L. V.; KNAUER, L. G. Geologia da Folha Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais. *Projeto Espinha o em CD-Rom*, 1997.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Folha Conceição do Mato Dentro / MG. SE.* 23. Z. D. 1.1:100.000, 1997.
- JENNINGS, J. N. Sanstone pseudokarst or karst? In: YOUNG, R. W.; NANSON, G. C. (eds.). *Aspects of Australian Sandstone Landscapes*. Australian and New Zealand Geomorphology Group Special Publication, Vol. 1, p. 21-30, 1983.
- KRAUSKOPE, K.B. *Introdução à Geoquímica*. São Paulo: Edusp, Vol. 1, p. 197-214. 1972.
- LLOPIS LLADÓ, N. *Fundamentos de Hidrogeologia Cárstica: Introdução a La Geoespeleogia*. Madrid: Blume, 1970. 269 p.
- MARTINI, J. Karst in the Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Transvaal. *Ann. Geol. Surv. South Africa*, Vol. 13, p. 115-128, 1979.
- PFLUG, R. *A geologia da parte meridional da Serra do Espinhaço e zonas adjacentes, Minas Gerais*. Dep. Nac. Prod. Mineral/Div. Geol. Mineralogia, Bol. 226, Rio de Janeiro, 1965. 51 p.
- PILÓ, L. B. *Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú, Carste de Lagoa Santa, MG*. São Paulo, 1998. 283p. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo. São Paulo. CD-ROM.
- POUYLLAU, M. Les karsts gresieux dans la Gran Sabana (Guyane Vénézuélienne). *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, p. 269-283, 1985.
- POUYLLAU, M.; SEURIN, M. Pseudo-karst dans les roches grésos-quartzitiques de la formation Roraima. *Karstologia*, Vol. 5, p. 45-52, 1985.
- SAADI, A. A. Geomorfologia da Serra do Espinhaço em Minas Gerais e suas margens. *Geonomos*, Vol. 3, nº 1, p. 41-63, 1995.
- SENA, E.; SOARES, B. F.; TRAVASSOS, L. E. P. Panorama inicial dos estudos pedológicos em regiões de carste tradicional. In: 31º Congresso Brasileiro de Espeleologia Espeleodiversidade:

- Ensino e Conservação, 2011, Ponta Grossa. *Anais CBE*. Campinas/Ponta Grossa: SBE/UEPG, 2011. p. 111-114.
- SILVA, S. M. *Carstificação em Rochas Siliciclásticas: Estudo de caso na Serra do Ibitipoca, Minas Gerais. MG*. Belo Horizonte. 2004. 143 p. Dissertação de Mestrado em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE ESPELEOLOGIA-SBE. Normas e convenções espeleométricas, 1991. Disponível em: <<http://www.cavernas.org.br>>. Acesso em: 10 out. 2010.
- SCHULZ, M. S.; WHITE, A. F. Chemical weathering in a tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico III: Quartz dissolution rates. *Geochimica et Cosmogeochimica Acta*, Vol. 63, p. 337-350, 1999.
- SZCZERBAN, E.; URBANI, F. Carsos de Venezuela. Parte 4: Formas carsicas en areniscas precambrianas del territorio federal Amazonas y estado Bolívar. *Boletín de la Sociedad Venezolana de Espeleología*, vol. 5, p. 27-54, 1974.
- UHLEIN, A. Transição Craton - Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no Estado de Minas Gerais. Aspectos estratigráficos e estruturais. São Paulo. 1991. 259 p. Tese de Doutorado em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- URBANI, F. Una revision preliminar sobre el desarrollo de cavidades y otras formas relacionadas en las rocas cuarcíferas del Grupo Roraima, Guayana Venezolana. Parte 2. Algunos comentarios sobre terminología. *Boletín de Geociencias*, Vol. 7, p. 10-14, 1986.
- YOUNG, R. W. Quartz etching and sandstone Karst: Examples from the East Kimberleys, Northwestern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 32, p. 409-423, 1988.
- YOUNG, R. W.; YOUNG A. R. W. *Sandstone Landforms*. Berlin: Springer-Verlag, 1992. 163p.
- YOUNGER, P. L.; STUNELL, J. M. Karst and pseudokarst: An artificial distinction? In: *Geomorphology and Groundwater*, Brown, A. G. (eds.), WILEY J. & SONS, London, p. 121-142, 1995.
- WHITE, W. B.; JEFFERSON, G. L.; HAMAN, J. F. Quartzite Karst in southeastern Venezuela. *International Journal of Speleology*, Vol. 2, p. 309-314, 1966.