

Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Graduação em Ciências Socioambientais

Amanda Garcia Amaral Silva

**O Endocarste em Diferentes Litologias de Minas Gerais – Uma
Análise Comparativa**

Belo Horizonte – MG

2018

Amanda Garcia Amaral Silva

**O Endocarste em Diferentes Litologias de Minas Gerais – Uma
Análise Comparativa**

Monografia apresentada à banca examinadora da
Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas da
Universidade Federal de Minas Gerais, como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Ciências Socioambientais. Orientador: Prof. Dr.
André Augusto Rodrigues Salgado.

Belo Horizonte
Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas
2018

“Tudo o que acontece com a Terra, acontece com os filhos e filhas da Terra. O homem não tece a teia da vida; ele é apenas um fio. Tudo que se faz à teia, ele faz a si mesmo”

-Ted Perry, inspirado no Chef Seattle

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto do meu esforço, tempo e amor ao carste. Dedico ele a todas as pessoas que me ajudaram a chegar até aqui, o fim de mais uma trajetória que carrego com muita gratidão.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador André Salgado por ter me apresentado a geomorfologia e o carste, fazendo surgir o gosto que é estudar aquilo que se ama. Obrigada por acreditar em mim quando nem eu mesma encontrava caminho pelas minhas limitações, por me dar oportunidades, ser presente, aconselhar, criticar e realmente orientar meu caminho acadêmico.

Meus pais, Ivan José da Silva e Elídia Cleunice Silva, a vocês devo tudo que sou e sei. Obrigada por me criarem com tanta dignidade e amor, além de proporcionarem tudo além do que necessito para buscar o conhecimento e ser quem eu quiser.

Ao meu irmão Guilherme Garcia, meu agradecimento por me guiar e ser meu maior companheiro. Obrigada pelos inúmeros conselhos e ensinamentos, pelo carinho e cumplicidade. Sempre juntos, irmão!

Agradeço à minha querida amiga Gabriela Giffoni por estar presente do primeiro ao último dia da graduação, por todos momentos de descobertas, aventuras, dificuldades e superações que vivemos juntas nesses quatro anos.

À Fernanda Souza agradeço pela paciência, por me ajudar com tanta empatia no campo do antigo tema, pelas tantas referências bibliográficas e ensinamentos sobre o carste.

Ao meu velho amigo Guilherme Oliveira agradeço pela parceria desde sempre, mas principalmente nessa fase pelas várias correções ortográficas e gramaticais do texto. Ao Daniel Prates, muito obrigada pelas ajudas nos conteúdos de Geologia, por ser sempre solícito e contribuir com muitas referências bibliográficas.

A todos meus professores agradeço pela contribuição na construção do meu conhecimento, sem eles seria impossível chegar a lugar algum.

Meus grandes amigos do Colégio Arnaldo: Pedro Affonso, Leonardo Batista, Jéssica Pagani, Regis Oliveira, Carolina Lins, Elenne Talma e Ana Luisa Lima, muito obrigada por serem minha primeira família de Belo Horizonte e estarem sempre presentes mesmo que nossas vidas tenham tomado caminhos tão distintos. Ao Pedro Affonso, muita gratidão por me mostrar a beleza do mundo natural através de olhar tão belo, pelas experiências, ensinamentos, lugares e histórias. Agradeço também à sua família, Pitu, José, Lau e Joana por me acolherem em alguns anos da graduação com muito carinho.

Ao grande sábio Seu Cardoso (*in memoriam*), agradeço pelo privilégio de carregar seus ensinamentos sobre geologia e sobre a vida, por ter instigado a curiosidade e despertado o interesse pelo mundo das rochas. Será sempre uma honra levar comigo suas histórias e sua memória.

ÍNDICE

1. Introdução	11
1.1. Objetivos	12
1.2. Relevâncias do Estudo	13
1.2.1. Importância do estudo e conservação de ambientes cársticos	13
1.2.2. Importância histórico-cultural dos ambientes cársticos	14
2. Geomorfologia dos Ambientes Cársticos	16
2.1. Rochas Carbonáticas – O carste em mármore	22
2.2. O carste em formações ferríferas	26
2.3. O carste em quartzito	32
3. Procedimentos Metodológicos	36
4. Análise Comparativa – O carste em diferentes litologias	37
4.1. Caracterização geral dos trabalhos	37
4.2. Influência Litoestrutural	38
4.3. Densidade de Cavidades	44
4.4. Morfologia das Cavidades	48
5. Considerações Finais	59
6. Referências Bibliográficas	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Exemplo de Pinturas Rupestres - Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – Januária MG	15
Figura 02 - Lapa do Rezar formada pela ação do Rio Peruaçu no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – Januária MG	17
Figura 03 - Padrões planimétricos de cavidades descritos por Palmer (1991)	18
Figura 04 - Blocos abatidos – Gruta do Janelão, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – Januária MG	20
Figura 05 - Clarabóia do Coração oriunda da queda de parte do teto da Gruta do Janelão, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – Januária MG	21
Figura 06 - Diferentes tipos de espeleotemas	22
Figura 07 - Localização das províncias espeleológicas da Serra dos Carajás e do Quadrilátero Ferrífero	27
Figura 08 - Esquema espeleogenético proposto para cavernas ferríferas da Serra dos Carajás	30
Figura 09: - Paleotoca de tatu gigante na Serra do Gandarela – Quadrilátero Ferrífero MG	31
Figura 10 - Sedimentos arenosos e blocos abatidos na Gruta dos Milagres – Itambé do Mato Dentro, MG	35

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Estruturas responsáveis pelo controle estrutural das cavidades em mármore da Borda Oeste da Serra do Cipó, MG	40
Gráfico 02 - Relação entre lineamentos estruturais e orientação dos condutos das cavidades – Borda oeste da Serra do Cipó, MG	43
Gráfico 03 - Relação entre litologia e densidade de cavidades por Km ² das áreas de estudo selecionadas	47
Gráfico 04 - Porcentagem de cavidades por projeção horizontal das cavidades em mármore da borda oeste da Serra do Cipó	49
Gráfico 05 - Porcentagem de ocorrência dos padrões planimétricos nas cavernas em mármore da Serra do Cipó, MG	51
Gráfico 06 - Projeção horizontal das cavernas situadas na região SE de Diamantina –MG	55
Gráfico 07 - Projeção horizontal média das cavidades por litologia	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Número de cavidades por sub-áreas espeleológicas na borda Oeste da Serra do Cipó, MG	45
Tabela 02 - Área e quantidade de cavernas dos distritos espeleológicos do Quadrilátero Ferrífero, MG	46
Tabela 03 - Dados de densidade e projeção horizontal das cavidades em mármore da borda oeste da Serra do Cipó, MG	49
Tabela 04 - Características espeleométricas das cavidades da borda oeste da Serra do Cipó selecionadas para estudo detalhado	50

RESUMO

Feições e paisagens cársticas são produto do balanço entre processos dissolutivos e corrosivos de rochas quimicamente solúveis. Uma geoforma é considerada como cárstica desde que a dissolução constitua um fator determinante em sua morfologia, mesmo este que não represente o processo predominante. Desta forma, feições cársticas podem se desenvolver em várias litologias, carbonáticas ou não. O estudo de ambientes cársticos contribui na investigação e compreensão de diversas áreas de estudo como arqueologia, paleontologia, geomorfologia e geologia, por representarem lugares capazes de contar a história de um tempo em que não vivemos. O estado de Minas Gerais abriga um patrimônio espeleológico rico e diverso no que diz respeito à quantidade de cavidades naturais subterrâneas, assim como a variedade morfológica na qual elas se apresentam em diferentes tipos de rocha. Desta forma, o presente trabalho tem como principal objetivo apresentar e comparar as especificidades da gênese e morfologia do endocarste em três províncias espeleológicas situadas respectivamente: na borda oeste da Serra do Cipó (carbonática - mármore), Quadrilátero Ferrífero (formações ferríferas) e Diamantina (siliciclástica – quartzito). A comparação será realizada com base em revisões bibliográficas, e a abordagem sistemática das características espeleogenéticas e morfológicas do endocarste nas litologias selecionadas, propõe expor as diferenças e semelhanças entre os sistemas analisados em termos de formação e constituição. Os resultados obtidos apontam que as três litologias possuem condicionantes genéticos e morfológicos específicos, os quais possibilitam a evolução de sistemas cársticos muito distintos.

Palavras chave: carste, geomorfologia, espeleologia.

1. Introdução

O termo carste (*karst*) possui origem servo-croata e significa campo de pedras. Inicialmente essa nomenclatura foi utilizada para referir-se à morfologia das formações calcárias da região de Rijeka (antiga Iugoslávia) (BIGARELLA, 1994), mas hoje em dia abarca todo o conjunto de relevos que possuem a dissolução das rochas como processo fundamental para a morfogênese da paisagem.

O relevo cárstico compreende paisagens de morfologia e hidrologia únicas, constituídas por feições oriundas da combinação do processo de dissolução de rochas quimicamente solúveis, com a erosão mecânica (BIGARELLA, 1994). Nesse cenário, esse tipo de relevo exibe morfologia específica, podendo apresentar feições exocársticas (lapiás, poljés, etc), epicársticas (dolinas, uvalas, etc) e endocársticas (cavernas, abrigos, abismos, etc), bem como uma drenagem predominantemente subterrânea (PILÓ, 2000).

Por anos, o carste foi particularmente associado às rochas calcárias, mas atualmente pode referir-se também às paisagens similares desenvolvidas em outras rochas, carbonáticas ou não. Segundo Piló (2000), as rochas carbonáticas configuram-se como as mais frequentes no desenvolvimento de paisagens cársticas por apresentarem solubilidade favorável à gênese dessas formas de relevo únicas. Contudo, o reconhecimento de geoformas provenientes de processos dissolutivos em litologias ferríferas e siliciclásticas, influenciaram o início da discussão e investigações sobre a gênese e morfologia do carste não tradicional (SOUZA, 2014).

De fato, todas as rochas são suscetíveis aos processos dissolutivos em determinadas condições ambientais (JENNINGS, 1971); porém, nas paisagens cársticas, a dissolução é responsável pela especificidade da morfologia das feições, constituindo assim, mais do que em outras paisagens, um elemento fundamental no sistema, embora não necessariamente sempre represente o processo dominante (JENNINGS, 1985). Considerando que as geoformas cársticas são resultado do balanço entre processos dissolutivos e corrosivos da rocha, as feições podem

assim ser designadas em litologias não carbonáticas, desde que a dissolução constitua o processo que defina a configuração morfológica da geoforma analisada (JENNINGS, 1985; CALUX, 2011).

Além da presença de rocha solúvel, o desenvolvimento de paisagens cársticas depende do clima (disponibilidade hídrica), porosidade da rocha - primária (intragranular) e secundária (estrutural) bem desenvolvidas - e, gradientes hidráulicos de moderados a altos. Estas propriedades estão diretamente relacionadas entre si e não devem ser analisadas como elementos isolados na investigação de sistemas cársticos (PILÓ, 2000). Além disso, segundo Bigarella (1994), um relevo cárstico deve possuir certa escala, ou seja, ter determinada extensão regional para que as feições não sejam apenas isoladas e insuficientes para a determinação do verdadeiro relevo cárstico.

A abordagem do carste em rochas não carbonáticas trás consigo uma recente e longa discussão sobre a terminologia apropriada à sua aplicação. Autores tradicionais consideram que a ocorrência de feições semelhantes às exibidas nas rochas carbonáticas, em outras litologias, devem ser designadas como **pseudocarste**. Porém, vários outros especialistas afirmam que a definição do carste independe da rocha encaixante, mas sim dos processos que atuam sobre o sistema. Sendo assim, na atualidade outras litologias são consideradas como cársticas, com destaque, em Minas Gerais, para o quartzito e as formações ferríferas.

1.1 Objetivos

Geral

Diante do acima apresentado e considerando a variedade de litologias nas quais as paisagens cársticas ocorrem no estado de Minas Gerais, o presente trabalho objetiva apresentar e comparar as especificidades da gênese e morfologia do endocarste em três províncias espeleológicas situadas, respectivamente: na borda oeste da Serra do Cipó (carbonática - mármore), Quadrilátero Ferrífero

(formações ferríferas) e Diamantina (siliciclástica – quartzito). A comparação será realizada com base em revisões bibliográficas, e a abordagem sistemática das características espeleogenéticas e morfológicas do endocarste nas litologias selecionadas, propõe expor as diferenças e semelhanças entre os sistemas analisados em termos de formação e constituição.

Específicos

- Discutir os aspectos que definem o verdadeiro relevo cárstico;
- Apresentar a diversidade do fenômeno cárstico no Brasil e no mundo, com ênfase na riqueza do patrimônio espeleológico do estado de Minas Gerais;
- Discutir os processos e condicionantes que atuam na variabilidade morfológica de feições endocársticas em diferentes litologias;

1.2 Relevâncias do Estudo

1.2.1 A importância do estudo e conservação de ambientes cársticos

Apesar de atualmente o patrimônio espeleológico ser protegido pela legislação brasileira, esses ambientes ainda sofrem fortes impactos ambientais causados pela contaminação de aquíferos, extração insustentável dos recursos hídricos, assoreamento por sedimentos externos, urbanização, turismo e mineração (AULER; LEDA, 2005). É relevante ressaltar que várias cidades como Lagoa Santa e Sete Lagoas, dependem de reservatórios cársticos para o abastecimento de água. Além disso, o turismo de cavernas é uma atividade econômica relevante em vários municípios brasileiros. Logo, o fenômeno cárstico precisa ser melhor compreendido em toda a sua diversidade, considerando que possui grande importância sócio-ambiental, visto que as cavidades naturais são fundamentais não apenas em termos ambientais, mas culturalmente também. Por exemplo: constituem áreas de cultos religiosos desde tempos imemoráveis em diversas culturas (TRAVASSOS, 2010). Porém, o ato de preservar pode entrar em conflito com o direito da população de acesso aos recursos naturais, tornando-se assim, cada vez mais necessária a implementação de um plano de preservação

inteligente, que cumpra seu papel, mas também integre a sociedade ao meio ambiente (TRAVASSOS et al., 2008).

No Brasil, o conhecimento científico a respeito dos ambientes cársticos é ainda reduzido considerado o seu potencial (AULER et. al, 2005). Auler (2011), estima que até o momento apenas 5% das cavidades do país foram prospectadas e mapeadas, o que dificulta um monitoramento adequado desses ambientes frágeis. Ademais, considerando a multidisciplinaridade do estudo do carste, sua compreensão pode contribuir com diversas áreas como, por exemplo, a dinâmica dos recursos hídricos, o estudo de paleoclimas, bioespeleologia, investigações arqueológicas, paleontológicas e sociais. Fora isso, na Geologia, as cavernas propiciam a visão do maciço rochoso por uma diferente perspectiva, a qual pode possibilitar o esclarecimento de algumas questões importantes como a história geológica do local (AULER; PILÓ, 2010).

1.2.2 A importância histórico-cultural dos ambientes cársticos

As regiões cársticas são utilizadas pelos humanos desde os primórdios, pois em função de suas características do relevo, eram lugares ideais para obtenção de alimento, água e abrigo (TRAVASSOS, 2010). Atualmente, em todo o mundo, populações inteiras são abastecidas por mananciais cársticos e, em diversas culturas, estes ambientes estão muito associados às práticas religiosas (TRAVASSOS et. al, 2008). De fato, as expressões através de pinturas rupestres (Figura 01), objetos arqueológicos e inclusive fósseis, levam a crer que as cavidades foram palco dos primeiros assentamentos humanos (TRAVASSOS et al., 2008). O mesmo vale para o Brasil, pois o país dispõe de um grande patrimônio arqueológico adquirido em ambientes cavernícolas ou próximo a eles, como pinturas rupestres, artefatos e o crânio de Luzia, que foi exumado na cavidade da Lapa Vermelha na região de Lagoa Santa e é considerado o fóssil humano mais antigo já encontrado na América.

Em diversas regiões do mundo, as cavernas são utilizadas para fins turísticos. Apesar de gerarem impactos negativos, muitas vezes essas atividades são de grande importância econômica, fazendo com que em alguns casos, a

exploração seja inclusive necessária (TRAVASSOS et al., 2008). Além disso, o turismo consciente e planejado de determinadas cavidades pode cumprir papel de educação ambiental para que a população contribua no conservar. Ademais, é comum perceber que várias religiões, referentes a diversas culturas, remetem profundo significado espiritual a algumas cavernas pelo mundo. No Brasil, de maioria católica, encontram-se *cavernas-igreja*, que utilizadas para devoção e celebração de cultos, movimentam a economia do turismo cultural e religioso. Nelas, objetos e feições são venerados por sua beleza e crença nos poderes milagrosos associados a lendas e histórias locais (TRAVASSOS, 2010).



Figura 01: Exemplo de Pinturas Rupestres - Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – Januária MG. Fonte: Arquivo pessoal.

2. Geomorfologia dos Ambientes Cársticos

A geomorfologia cárstica consiste no estudo das geoformas superficiais e subterrâneas resultantes da dissolução química da rocha solúvel e dos demais processos relacionados (SOUZA, 2011). O conjunto cárstico é representado por macro e micro geoformas que podem ser erosivas e construtivas. As primeiras se referem a feições superficiais como lapiás, dolinas, uvalas, poljés, torres, etc, bem como formas subterrâneas a exemplo das cavernas. Assim, são resultado da ação de processos químicos de dissolução e físicos, como a erosão, desabamento, corrosão, entre outros. As formas construtivas são de natureza secundária, sendo predominantemente subterrâneas e se referem aos espeleotemas (estalactites, estalagmites, colunas, cortinas, cascatas, etc.) (BIGARELLA, 1994).

O Endocarste

Bogli (1978) denomina como endocarste a zona cárstica onde ocorrem as cavidades no corpo rochoso, incluindo seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos. A evolução do endocarste consiste no progressivo alargamento de descontinuidades da rocha que formam o sistema de condutos cársticos (SOUZA, 2011). As cavernas são feições cársticas que, segundo a União Espeleológica Internacional, representam as cavidades subterrâneas naturais, passíveis de serem acessadas pelo homem (FORD; WILLIAMS, 1989). As cavernas são consideradas como “anomalias” rochosas e podem ser classificadas quanto a sua origem e quanto a morfologia dos seus condutos. Quanto à **origem**, as cavernas podem ser primárias, isto é, formadas simultaneamente à rocha encaixante, ou secundárias, referentes àquelas geradas após a diagênese da rocha. Como exemplo de cavidades subterrâneas primárias podemos citar as cavernas de tubos de lava e como secundárias, as cavernas cársticas, que representam a maioria das cavidades naturais conhecidas no mundo (AULER; PILÓ, 2010) e constituem o grande interesse do presente trabalho.

As cavidades naturais podem também ser subdivididas em epigênicas (Figura 02) e hipogênicas. As cavernas epigênicas são formadas a partir do fluxo de água das recargas superficiais, seja pela chuva ou pelos rios. Esse tipo de gênese representa a grande maioria das cavidades. Por sua vez, as cavernas hipogênicas,

decorrem da ação química de águas profundas e/ou acidificadas no interior do maciço rochoso (AULER; PILÓ, 2010).



Figura 02: Lapa do Rezar formada pela ação do Rio Peruaçu no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – Januária MG. Fonte: Arquivo pessoal.

Com relação a **morfologia** dos condutos, Palmer (1991) descreve cinco padrões planimétricos principais das cavidades (Figura 03). Ressalta-se que, muitas vezes, as cavidades possuem morfologias que abrangem mais de um padrão, assim como podem apresentar padrão indefinido (AULER; PILÓ, 2010). Estas morfologias são:

Dendríticas: Consiste em um conduto de rio (ativo ou pretérito) principal, interligado a condutos laterais tributários. Este padrão refere-se ao mais comum entre as cavidades conhecidas;

Reticuladas: Os condutos são condicionados por fraturas, que se cruzam em ângulos determinados pela estrutura da rocha;

Anastomosadas: Representadas por diversas galerias curvilíneas que se entrelaçam formando “ilhas”;

Espongiformes: São formadas por salas e condutos de formato irregular, se unindo como poros de uma esponja;

Ramiformes: Condutos que apresentam perfil e seção irregulares.

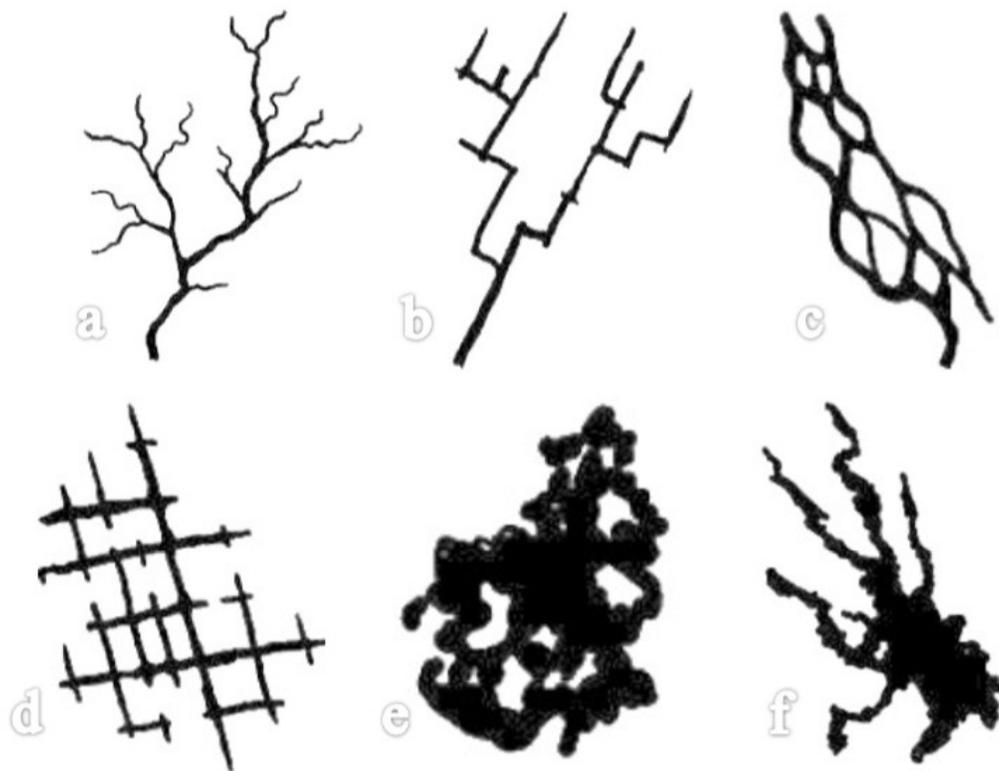


Figura 03: Padrões planimétricos de cavidades descritos por Palmer (1991).

(a)Dendrítica; (b) Reticulada; (c) Anastomosado; (d) Network; (e) Espongiforme; (f) Ramiforme. Fonte: Calux (2013) modificado de Palmer (1991)

Com relação aos depósitos sedimentares, os sedimentos endocársticos podem ser classificados em depósitos autóctones ou alóctones. O primeiro se refere a aos depósitos químicos (espeleotemas), aos resíduos insolúveis das rochas do sistema (como as argilas) e os blocos abatidos (Figura 04), resultantes do colapso do teto (Figura 05) e parede das cavidades (SOUZA, 2011). Já os

sedimentos alóctones representam a maioria dos depósitos observados. A composição desses sedimentos depende de sua área fonte, ou seja, de onde são desprendidos e transportados para o interior das cavidades. Esse processo pode ocorrer por meio das áreas de recarga dos aquíferos (dolinhas, sumidouros, etc.), através da água ou pela gravidade (SOUZA, 2011).

Os sedimentos químicos, genericamente conhecidos como espeleotemas (do grego "depósito de cavernas") (Figura 06) são comumente formados por calcita (CaCO_3), aragonita (CaCO_3) e gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) nas cavernas carbonáticas (AULER; PILÓ, 2010). Sua gênese decorre da precipitação de minerais a partir de solução aquosa que circula no ambientei cavernícola. Assim, a origem das distintas formas de espeleotemas se deve os diferentes tipos de circulação da água no sistema (AULER; PILÓ, 2010). No entanto, de forma geral, todos tem sua gênese relacionada ao mesmo processo de deposição mineral que ocorre quando a água saturada em bicarbonato de cálcio entra em contato com a atmosfera da caverna liberando dióxido de carbono (CO_2). O bicabornato se transforma em carbonato de cálcio (insolúvel) e ocorre a deposição da calcita ou aragonita (AULER; PILÓ, 2010).



Figura 04: Blocos abatidos – Gruta do Janelão, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – Januária MG. Fonte: Arquivo pessoal.

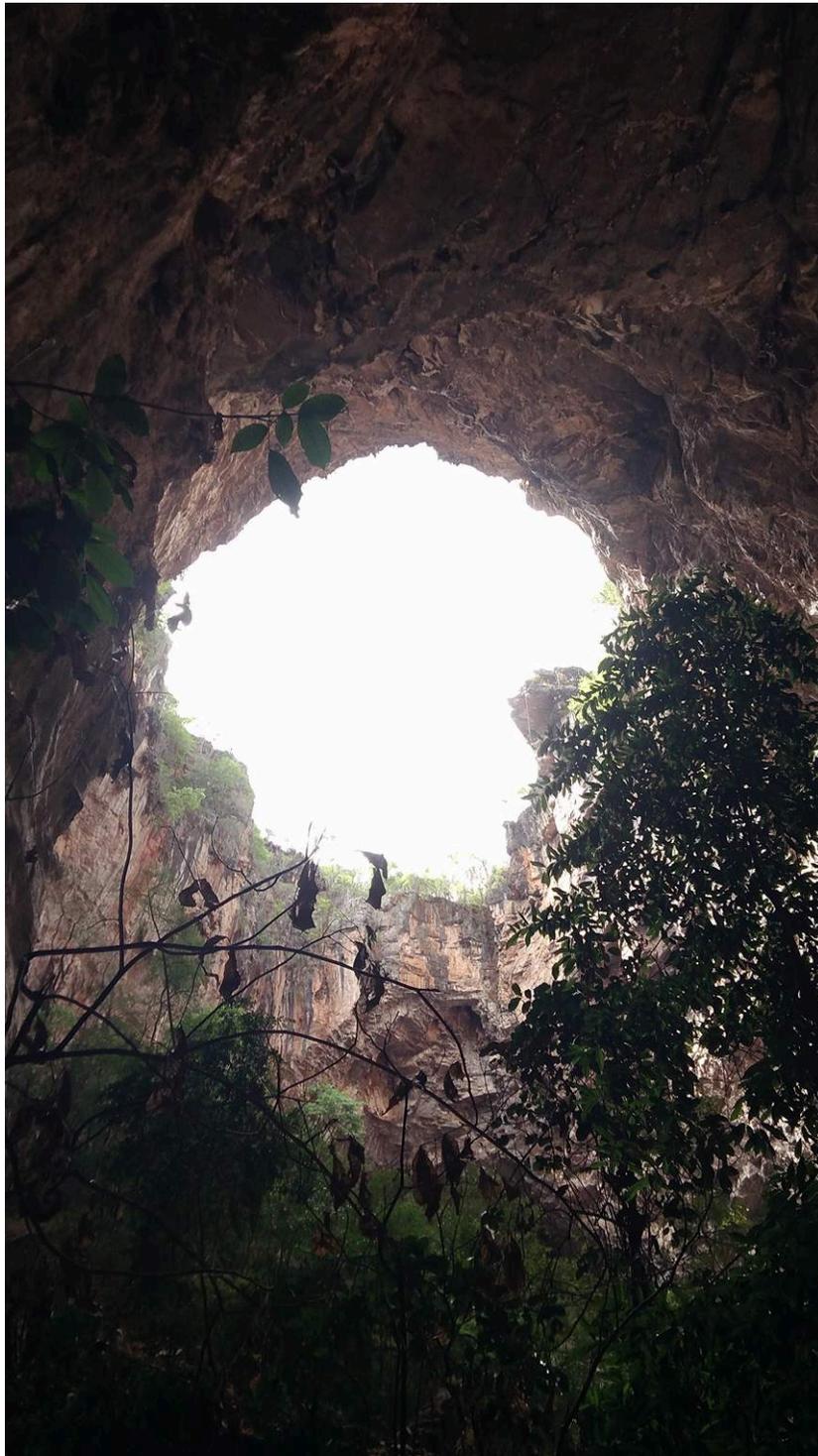


Figura 05: Clarabóia do Coração oriunda da queda de parte do teto da Gruta do Janelão, Parque Nacional Cavernas do Peruaçu – Januária MG. Fonte: Arquivo pessoal

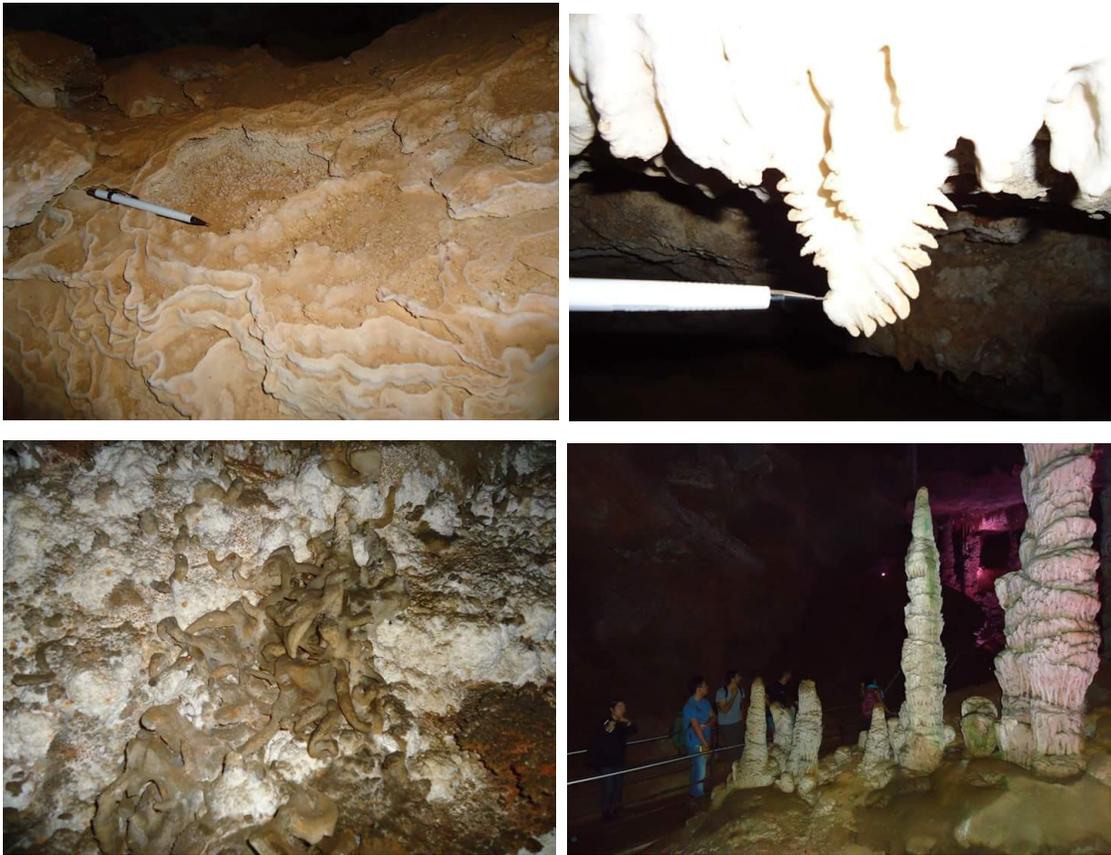


Figura 06: Diferentes tipos de espeleotemas. No sentido horário começando do canto superior esquerdo: Travertinos na Caverna Teto de Seixos na Serra do Cipó/MG; Coralóides na mesma caverna; Elictites ainda na Teto de Seixos e Estalagmites na Caverna Rei do Mato em Sete Lagoas/MG. Fonte: Arquivo pessoal.

2.1 - As Rochas Carbonáticas – O Carste em Mármore

As rochas carbonáticas compreendem as litologias mais frequentes no desenvolvimento do relevo cárstico e ocupam cerca de 10% a 15% da superfície terrestre (FORD e WILLIAMS, 1989). Entre as rochas carbonáticas mais comuns no processo de carstificação, podemos citar o calcário, formado por calcita ou aragonita (CaCO_3), o dolomito, composto por dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e o mármore, resultante do metamorfismo do calcário ou dolomito sob alta temperatura e pressão (FORD e WILLIAMS, 2007). Segundo Ford e Williams (1989) a gênese do carste é

fortemente influenciada pelas características litológicas e estruturais da rocha. Para os autores, esses aspectos incluem: pureza da rocha, textura, porosidades primária e secundária.

As impurezas mais comuns encontradas nas rochas carbonáticas são a sílica e os minerais argilosos. As rochas consideradas como favoráveis ao desenvolvimento do carste devem apresentar composição de pelo menos 70% de minerais carbonáticos (FORD e WILLIAMS, 1989). Já a textura refere-se ao tamanho dos grãos. As rochas que possuem granulometria fina tendem a apresentar maior solubilidade. Isto ocorre devido à maior superfície de contato que as partículas podem adquirir com a água. Porém, esse quadro se estabelece apenas se os grão não apresentarem características uniformes em tamanho e compartimentação (FORD e WILLIAMS, 1989). Por sua vez, a porosidade primária (intragranular) diz respeito aos espaçamentos entre os grãos gerados ao longo da deposição química e sedimentar que formam a rocha. Para os hidrogeólogos, a porosidade secundária se refere ao sistema estrutural da rocha (falhas, fraturas, fissuras, etc.) e é formada após a diagênese do corpo rochoso (FORD e WILLIAMS, 1989).

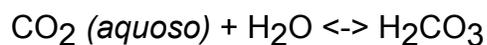
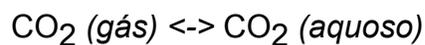
No Brasil, a maior ocorrência do carste carbonático se encontra em rochas antigas do Pré-Cambriano, desenvolvidos em crátons (zonas tectonicamente estáveis), submetidos a clima sazonal (AULER et. al, 2005). A predominância se encontra nos carbonatos do Grupo Bambuí que se estendem entre os estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia. Além deste, o Grupo Una, na Bahia, possui algumas das cavernas mais importantes da América do Sul e os grupos Apodi no Rio Grande do Norte e Açungui em São Paulo e no Paraíba, apesar de em menor extensão, assim como em outras regiões do país, também apresentam o típico relevo cárstico (AULER et. Al, 2005).

Em termos de processos, o balanço da atuação entre dissolução química e da erosão mecânica pode ser descontínuo, demonstrando assim, a atuação relativa desses processos no tempo e no espaço (BIGARELLA, 1994). Entretanto, o

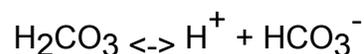
processo de dissolução da calcita (CaCO_3) é fundamental para o carste em rochas carbonáticas. Ele ocorre através da percolação da água nos solos que se enriquece em CO_2 e reage com a rocha formando bicarbonato de cálcio solúvel e pode ser representado pela clássica reação química:



As condições ótimas para a dissolução dos carbonatos se correlacionam com uma grande disponibilidade hídrica, altas temperaturas e a presença de gás carbônico no solo associado à vegetação (BIGARELLA, 1994). A quantidade de água é considerada como fator climático principal para o melhor desenvolvimento do carste. Quanto maior a precipitação, maiores são as taxas de desnudação (PILÓ, 2000). A respeito da dissolução da calcita e da dolomita, minerais carbonáticos mais comuns na evolução do carste, sabe-se que a ação da água pura, deionizada, é muito lenta. Com relação a este fator, o aumento da solubilidade da água é proporcional ao aumento da hidratação por CO_2 que por conseguinte forma o ácido carbônico H_2CO_3 . Este, facilitador da dissolução, dissocia-se concedendo íons H^+ para a solução (FORD e WILLIAMS, 1989). Com a chuva e o escoamento superficial, a água se enriquece em gás carbônico gasoso, que entra em solução na forma líquida. A combinação de CO_2 com a água (H_2O), forma o ácido carbônico (H_2CO_3). Este processo pode ser representado pelas seguintes reações lentas:



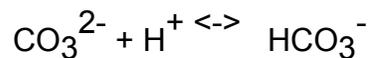
A partir de uma reação rápida, o ácido carbônico (H_2CO_3) se dissocia para formar íons hidrogênio (H^+), e íons bicarbonato (HCO_3^-).



A calcita (CaCO₃), dissocia-se em uma reação lenta, formando íons solúveis cálcio e carbonato.



Por fim, íons de carbonato (Ca²⁺) se combinam com íons de hidrogênio (H⁺) para formarem, em reação rápida, íons bicarbonato.



Em termos estruturais, a porosidade secundária compreende as falhas, fraturas, juntas, planos de acamamento, entre outros tipos de descontinuidades formadas após a diagênese da rocha (PILÓ, 2000). Entre os especialistas do carste é consenso que, além da presença de rocha solúvel, a evolução do relevo cárstico está condicionada às características estruturais e/ou tectônicas (AULER et. al, 2005). A capacidade de infiltração é determinada pela permeabilidade. Esta se define tanto pela porosidade primária da rocha, quanto por seu grau de fraturamento (AULER et. al, 2005). Sendo assim, apenas a solubilidade da rocha é insuficiente para a configuração do típico relevo cárstico. A porosidade secundária representa maior importância por orientar a dissolução de quase todas as partes da rede de condutos subterrâneos (FORD e WILLIAMS, 1989).

Apesar do mármore se tratar de uma litologia carbonática de mesma fórmula química do calcário, o processo metamórfico transforma o calcário ou dolomito poroso em uma rocha maciça de porosidade intragranular e permeabilidade frequentemente negligenciáveis. Estas características influenciam na redução dos processos de circulação e dissolução do corpo rochoso (SOUZA, 2011). Logo, a gênese do carste em mármore depende fortemente da porosidade secundária (sistema estrutural). Mármorees muito falhados e fraturados permitem a penetração da água ao longo do sistema estrutural e, por consequência, o desenvolvimento do sistema cárstico (SOUZA, 2011). Caso contrário, baixa porosidade secundária, o

desenvolvimento do carste fica muito inibido. De fato, como afirma Bigarella (1994), o pleno desenvolvimento do carste só é possível graças a presença de estruturas tectônicas. De outra forma, a água apresentaria ação erosiva limitada e predominantemente superficial. Apesar de representar uma rocha carbonática de grande ocorrência mundial, e mesmo sendo alvo de exploração mineral, os estudos acerca do carste em mármore são ainda escassos.

2.2. – O Carste em Formações Ferríferas

Muito embora os primeiros trabalhos científicos sobre cavernas em minério de ferro no Brasil tenham sido publicados por Simmons (1963), as formações ferríferas e seu produto de alteração (canga), apenas se tornaram visadas quanto a sua susceptibilidade à carstificação nas últimas décadas. Por apresentar menor padrão dimensional quando comparadas às cavernas de demais litologias como calcário, arenito, e quartzito, bem como por possuir características estéticas diferenciadas às valorizadas no carste tradicional, as investigações sobre cavernas em ferro foram negligenciadas por anos (AULER e PILÓ, 2005).

A descoberta dos depósitos de minério de ferro na Serra de Carajás (PA), influenciou o interesse pelo tema a partir dos anos 80, quando até então, os olhares eram limitados ao Quadrilátero Ferrífero (MG). Mas somente nos últimos anos, com o aumento do rigor da legislação ambiental, bem como a expansão do mercado ligado à exploração do minério de ferro, houve um incremento dos cadastros e estudos sobre as cavernas em rochas ferríferas, além do reconhecimento do valor que esta litologia detém sobre o patrimônio espeleológico brasileiro (AULER e PILÓ, 2005). Segundo Calux e Cassimiro (2015), os estudos voltados ao licenciamento ambiental contribuíram significativamente com a geração de dados quantitativos e qualitativos a respeito da morfologia das cavidades ferríferas, permitindo apontar que no Brasil, onde se encontram as maiores jazidas de minério de ferro do mundo, a ocorrência destas geoformas é recorrente. Tal fato comprova-se com o progressivo cadastro em bases de dados oficiais que, atualmente,

ultrapassa as quatro mil cavidades localizadas nas províncias espeleológicas da Serra dos Carajás (PA) e do Quadrilátero Ferrífero (MG), como demonstra a Figura 07 (CALUX, 2013).

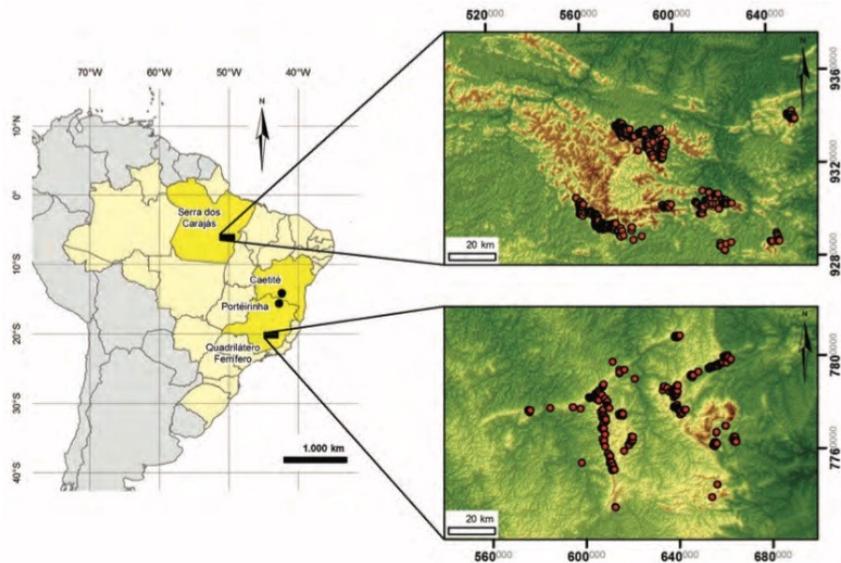


Figura 07: Localização das províncias espeleológicas da Serra dos Carajás e do Quadrilátero Ferrífero. Os pontos laranja e vermelho representam as cavernas cadastradas no CANIE. Mapa: Alan Calux (2011)

As cavernas em minério de ferro ainda representam uma incógnita no que se diz respeito aos mecanismos envolvidos em sua gênese. Possivelmente, esta morfogênese é muito diversa da que ocorre nas rochas carbonáticas. Porém, a tentativa de entender essa gênese têm possibilitado a geração de novos dados, hipóteses e significativas descobertas (AULER e PILÓ, 2005).

Auler e Piló (2005), apontam as bordas de topo de serras, encostas íngremes e áreas com quebra de relevo, como os locais onde o gradiente do nível hidráulico referente ao nível freático seria mais pronunciado, representando assim, situações de maior potencial erosivo. De acordo com os autores, as cavidades em formações ferríferas tendem a situar em três localizações principais da alta, média e

baixa vertente: cabeceiras; bordas de drenagens e bordas de platôs (PILÓ e AULER, 2009). Pioneiro nos estudos do carste em formações ferríferas no Brasil, George Simmons (1963), foi o primeiro autor a criar hipóteses quanto à espeleogênese nessa litologia, bem como a atribuir importante papel da dissolução nesse processo. O pesquisador sugere em seu clássico trabalho sobre as cavernas do Quadrilátero Ferrífero que algumas cavidades resultam de processos dissolutivos. Entretanto, outras são atribuídas à erosão e possivelmente algumas seriam resultado da combinação de ambos processos. Segundo esse autor, as cavernas de erosão provém da erosão diferencial do contato entre canga e rochas subjacentes, enquanto as cavernas de dissolução se formariam nos itabiritos sob a canga, relacionadas às cristas de serra cobertas por canga.

Simmons (1963) propõe um modelo endogenético às cavernas de dissolução, no qual os vazios seriam inteiramente formados no interior do maciço rochoso. O autor atribui a estas cavidades maior dimensão do que as cavernas de gênese erosiva e afirma que, frequentemente, cavidades de gênese dissolutiva podem apresentar vários compartimentos internos. A entrada das cavidades, normalmente formada por pequenas aberturas verticais, seria resultado do desabamento da canga a partir de um vazio subjacente. Já as cavernas controladas pela erosão, são lateralmente dispostas em função de dobramentos e localizadas principalmente em posição topográfica baixa, logo abaixo do manto de canga que sustentam as bordas dos vales. De modo geral, as cavernas de erosão apresentam uma única galeria, com extensão limitada à capacidade de suporte da canga sobrejacente (SIMMONS, 1963).

As cavernas de dissolução, por sua vez, são normalmente maiores do que as cavidades formadas por erosão, podendo apresentar vários compartimentos internos. A forma e as dimensões dessas cavidades são possivelmente controladas pelo teor de minerais solúveis, bem como a disposição do acamamento do itabirito. Segundo Simmons (1963), a orientação do acamamento controla a formação da caverna e a direção do fluxo das soluções envolvidas em sua gênese.

A incompatibilidade dimensional entre a entrada e os condutos, assim como uma morfologia aparentemente espongiiforme, leva a crer que algumas dessas cavidades seriam de origem oclusa, ou seja, evoluíram no interior do maciço, sem contato com o exterior. Igualmente, grandes galerias conectadas por condutos menores, possivelmente teriam origem e evolução independente, sendo posteriormente conectadas por abatimento (AULER e PILÓ, 2010). Neste contexto, Piló e Auler (2005), propõem duas etapas distintas no processo espeleogenético de cavernas em formações ferríferas. A primeira se relaciona aos processos químicos (dissolução), e a segunda à ação dos processos físicos (erosão). Inicialmente, na zona freática da massa rochosa, a atuação da dissolução formaria uma zona de alta porosidade. Posteriormente, com o rebaixamento do nível freático, o material friável é lixiviado para o exterior a partir de processos similares ao “*piping*” (Figura 08). Iniciada a etapa erosiva, com o estabelecimento de uma saída para o exterior, os processos físicos se tornam predominantes. A segunda fase é considerada por vários autores como a maior responsável pela morfologia atualmente observada nas cavernas desta litologia (PILÓ e AULER 2005).

Ainda não há dados suficientes para quantificar a perda de volume de rocha por dissolução do ferro, porém, a observação de expressivos espeleotemas (pingentes) compostos por oxi-hidróxidos de ferro comprovam a lenta solubilidade do elemento (AULER e PILÓ, 2010). Assim como a disposição do acamamento influencia na evolução da morfologia do endocarste ferrífero, a presença de uma grande densidade de descontinuidades estruturais de toda ordem como falhas, fraturas e fissuras, também influencia na capacidade de percolação das soluções aquosas e consequente desenvolvimento de um sistema reticulado de vazios.

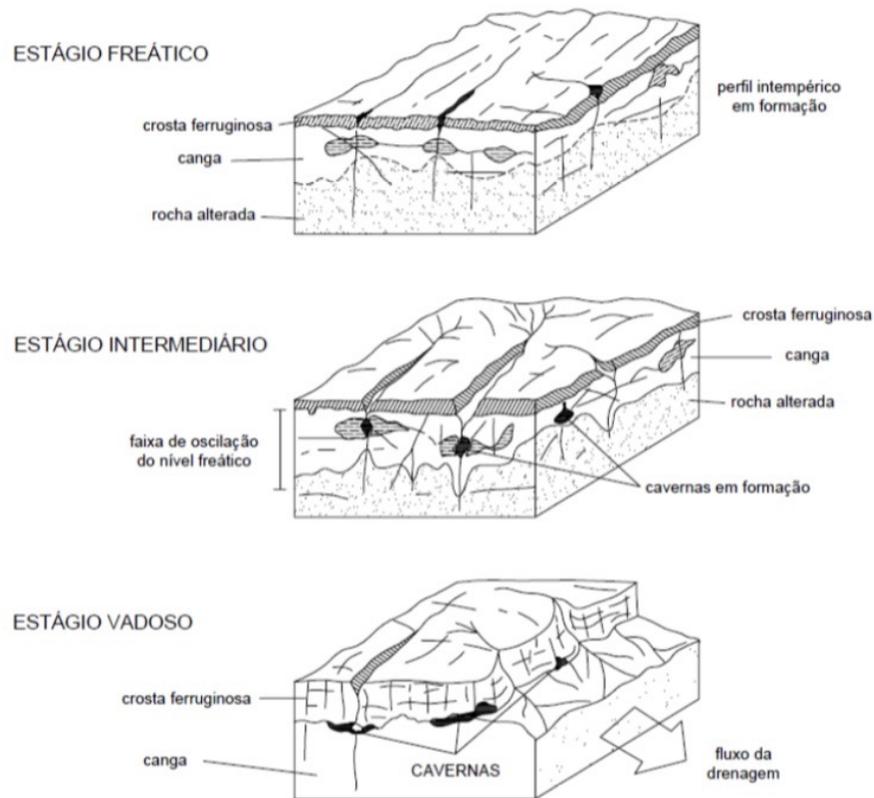


Figura 08: Esquema espeleogenético proposto para cavernas ferríferas da Serra dos Carajás. 1- Formação da crista ferruginosa e diferenciação da canga. 2- Dissecção do relevo e oscilação do nível freático. Surgimento de cavidades em zonas instáveis resultantes do processo de formação da canga. 3- Fase vadosa, predominância da erosão mecânica. Alan Calux (2011), modificado de Pinheiro e Maurity (1988)

Além dos processos químicos e físicos citados, dá-se atenção ao fator biogenético observado em algumas cavidades já estudadas. Tal fator refere-se às evidências de paleotocas (Figura 09), geradas e/ou ampliadas por animais da fauna pleistocênica (como os tatus, preguiças gigantes e outros animais). Neste caso, a rocha ou saprolito se apresentava friável e “mole”, para que os animais pudessem escavar (DUTRA, 2015). Outro aspecto a ser considerado seria a intensificação da erosão mecânica pelas raízes das plantas. Estas se aproveitam dos bandamentos e descontinuidades no corpo rochoso, contribuindo na quebra da rocha (DUTRA, 2015).



Figura 09: Paleotoca de tatu gigante na Serra do Gandarela – Quadrilátero Ferrífero MG. Fonte: Arquivo pessoal.

A maioria das cavernas ferríferas são encontradas isoladas umas das outras e são raros os casos que existem interconexão hidrológica entre elas. Tal fato decorre do atual estágio evolutivo em que se encontram, onde o nível do lençol freático na maioria dos casos observados está a dezenas de metros abaixo do desenvolvimento das cavidades. Com isso, afirma-se que as cavernas desta litologia são fósseis, ou seja, não possuem evolução cárstica ativa (CALUX e CASSIMIRO, 2015).

2.3. – O Carste em Quartzito

O quartzito representa uma litologia siliciclástica resultante do processo de metamorfismo do arenito. Em função da baixa susceptibilidade à dissolução do quartzo, por anos as rochas siliciclásticas foram consideradas imunes ao processo de carstificação em condições naturais de temperatura e pH (KRAUSKOPF, 1972). Por isto, a terminologia aplicada ao carste em rochas siliciclásticas, assim como em outras litologias não carbonáticas, ainda é controversa, havendo resistência de parte dos pesquisadores do carste clássico que tendem a nomear tais formas como pseudocarste (HARDT *et. al.* 2007; URBANI, 1986a). O referente conflito acadêmico decorre principalmente da pequena quantidade de pesquisas realizadas nessas rochas, representando ainda, uma base experimental insuficiente para que sejam estabelecidos os mecanismos genéticos e particularidades que definem o processo de carstificação, bem como informações que possibilitem a comparação com o carste carbonático (HARDT *et. al.*, 2009; FABRI, 2011).

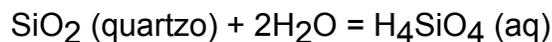
Apesar de ainda prevalecerem quantitativamente os estudos em regiões calcárias, feições cársticas em rochas consideradas pouco solúveis como os quartzitos e arenitos vêm sendo reportadas em diversas localidades do mundo (FABRI, 2011). Neste contexto, assim como nas litologias ferríferas, Martini (1984) sugere que a dissolução de rochas siliciclásticas é lenta quando se comparada às carbonáticas, apresentando predomínio dos processos de erosão mecânica. Enquanto nas litologias carbonáticas a dissolução é responsável por até 80% da remoção do material, em rochas siliciclásticas esse processo se restringe de 10 a 20% da redução do volume de rocha (MARTINI, 1979).

Apesar da baixa remoção de material através da dissolução, Martini (1979) atribui a esse processo papel fundamental no estágio inicial de carstificação das litologias siliciclástica. Dentre as hipóteses criadas para explicar o desenvolvimento do carste em arenito e quartzito, o modelo genético proposto por Martini (1979), é o mais aceito pela comunidade científica. Segundo o autor, a gênese do carste em rochas siliciclásticas abrange duas fases, sendo a primeira regida pela dissolução

intragranular dos grãos de quartzo, transformando o cimento rochoso em areia (processo denominado arenização), e posteriormente prevalecendo uma fase controlada por processos erosivos através do “*piping*”, possibilitando a remoção dos grãos de quartzo intemperizados no sistema (MARTINI, 1979).

Na fase inicial, o intemperismo químico age no limite dos cristais de quartzo, possibilitando a transformação da rocha maciça em massas friáveis, porosas e permeáveis. O referente processo é denominado “arenização” (MARTINI, 1979; 1984).

A dissolução do quartzo resulta em uma solução de sílica ácida, representada pela seguinte equação:



No entanto, observações indicam que a dissolução do quartzo nem sempre segue simples regras termodinâmicas, considerando que essa reação pode cessar sem motivos esclarecidos (MARTINI, 1984). Segundo YARIV *et al* (1979), a dissolução da sílica não é tão simples quanto demonstra a equação. Tal processo depende de propriedades da dissolução como: temperatura, tempo, pH, presença de compostos orgânicos, bem como da condição estrutural na qual a sílica se encontra (grau de cristalização ou fase amorfa) (YARIV *et al.*, 1979; FABRI, 2011). O ácido resultante do processo de dissolução (ácido silícico, H_4SiO_4), é muito mais fraco que o ácido carbônico (H_2CO_3) e sua ionização é aproximadamente mil vezes menor que a do carbônico (KRAUSKOPF, 1972).

As propriedades da sílica definem a variabilidade da resistência do elemento frente ao intemperismo químico. A sílica pode se apresentar em três distintos estados morfológicos, sendo eles: cristalino, vítreo e amorfo, os quais possuem especificidades que influem no desenvolvimento das feições cársticas. Ressalta-se que quando em estado amorfo, a sílica apresenta grau de solubilidade muito maior quando comparada à sílica cristalina (SOUZA, 2014; FABRI, 2011).

Em função do processo de metamorfismo do arenito, as rochas quartzíticas apresentam baixa porosidade primária. Por esse motivo, a porosidade secundária desempenha papel importante como condicionante dos processos de dissolução da rocha. Os lineamentos estruturais como falhas e fraturas, bem como os planos de estratificação, representam os caminhos preferenciais nos quais a água infiltra e percorre o corpo rochoso, conseqüentemente possibilitando a dissolução do quartzito em grandes profundidades (MARTINI, 1979; URBANI 1986b).

Com a redução significativa da coesão do cimento silício, se inicia a etapa de prevalência dos processos de erosão mecânica. Considerando a baixa solubilidade da sílica, a etapa inicial de dissolução produz um grande volume de material residual quando comparado aos carbonatos. O “*piping*” é caracterizado como o processo responsável pela remoção mecânica do material residual das rochas siliciclásticas, resultando na formação de condutos. Quanto ao desenvolvimento da etapa erosiva, duas condições são estabelecidas como essenciais para a formação do endocarste siliciclástico, sendo elas: disponibilidade hídrica e alto gradiente hidráulico (MARTINI, 1979; FABRI, 2011).

O gradiente hidráulico elevado é atribuído na literatura como característica importante no desenvolvimento do carste carbonático, porém, em rochas siliciclásticas, se apresenta como um fator indispensável. Em regiões elevadas, a circulação da água é mais rápida, possibilitando o carreamento dos grãos inconsolidados de quartzo para fora do sistema (MARTINI, 1979). Deste modo, as cavidades em rochas siliciclásticas geralmente ocorrem em locais de alto gradiente hidráulico como bordas de falésias, possibilitando o “*piping*”, sobretudo se a camada carstificável estiver mergulhando em direção à escarpa (AULER, 2004).

Com a diminuição do volume de água, formam-se zonas vadasas. Assim, os colapsos se tornam fatores importantes na evolução das cavidades. Com o progressivo aumento dos colapsos, os blocos desprendidos são intemperizados ou erodidos (Figura 10). Nessa etapa, fatores litológicos, estruturais e hidrológicos podem variar, explicando assim, a diversidade morfológica observada no

endocarste siliciclástico (URBANI, 1986B).



Figura 10: Sedimentos arenosos e blocos abatidos na Gruta dos Milagres – Itambé do Mato Dentro, MG. Foto: Fabiana Fabri (2011)

3. Procedimentos Metodológicos

Diante dos objetivos propostos para o presente trabalho, o procedimento metodológico consistiu em duas etapas baseadas em revisão e levantamentos bibliográficos a fim de embasar os assuntos abordados.

Na fase inicial, o levantamento bibliográfico de obras nacionais e internacionais propôs conceituar e apresentar os aspectos gerais que determinam o carste, envolvendo temas como geomorfologia, espeleologia, geologia, entre outros. Além disso, procurou-se discutir a questão conceitual do carste não carbonático. Posteriormente, o levantamento bibliográfico do carste em diferentes litologias objetivou apresentar as especificidades da gênese e morfologia do endocarste nos carbonatos, formações ferríferas e silicatos, levando em consideração os processos espeleogenéticos e elementos condicionantes à evolução das feições.

Na segunda etapa de levantamentos bibliográficos, foram selecionadas três dissertações de mestrado referentes ao estudo do carste nas litologias designadas, de modo a possibilitar uma análise comparativa qualitativa (morfologia) e quantitativa (densidade) do endocarste em mármore (carbonática), Itabirito e canga (formações ferríferas) e quartzito (siliciclástica).

Com o intuito abordar as características do endocarste em mármore, o estudo selecionado refere-se ao carste em mármore na borda oeste da Serra do Cipó - MG, redigido por Tatiana Souza (2011). Quanto ao carste em formações ferríferas, o trabalho escolhido aborda a gênese e desenvolvimento do endocarste no Quadrilátero Ferrífero – MG, produzido por Alan Calux (2013). Por último, a fim de descrever e contextualizar o carste nos quartzito, a dissertação selecionada foi redigida por Fernanda Souza (2014), que propõe caracterizar as feições cársticas nos quartzitos da região sudeste de Diamantina.

4. Análise Comparativa

Considerando a diversidade litológica em que o fenômeno cárstico se apresenta no estado de Minas Gerais, os resultados obtidos a partir dos três trabalhos selecionados possibilitam uma análise comparativa acerca das características morfológicas e dos fatores condicionantes à gênese e evolução das paisagens cársticas levando em consideração as particularidades de cada litotipo. Neste capítulo serão apresentadas e discutidas as análises referentes à influência dos fatores litoestruturais na gênese e morfologia das feições, à densidade de ocorrência do endocarste dentro de cada área de estudo e, por fim, às características dimensionais das cavidades selecionadas pelos autores (projeção horizontal média, padrões planimétricos).

4.1. Caracterização Geral dos Trabalhos

O carste em mármore na borda oeste da Serra do Cipó, MG – Tatiana Souza

Os estudos voltados à ocorrência do carste em mármore são ainda escassos no Brasil e no mundo. A fim de abordar suas particularidades e investigar os elementos condicionantes à espeleogênese na borda oeste da porção sul da Serra do Espinhaço Meridional (Serra do Cipó), Tatiana Souza (2011) desenvolveu seu trabalho na restrita faixa de ocorrência dos afloramentos de mármore impuros pertencentes ao Grupo Bambuí na borda do Cráton do São Francisco. A área de estudo foi delimitada por meio de um polígono de 100 Km² de extensão, abrangendo a área carbonática bem como as litologias de contato formadas por quartzitos e metapelitos. A referente área de estudo contempla 161 cavidades naturais subterrâneas dentre as quais foram selecionadas 14 cavernas representativas para a elaboração de estudos geoespeleológicos e espeleogenéticos de detalhe.

O carste em formações ferríferas no Quadrilátero Ferrífero, MG – Alan Calux

A exploração mineral de formações ferríferas representa uma das principais atividades econômicas do Brasil. Nessa perspectiva, o Quadrilátero Ferrífero, situado na borda sul do Cráton do São Francisco (Minas Gerais), constitui uma das províncias minerais de maior relevância do país (CALUX, 2013). Além da

importância econômica, o Quadrilátero Ferrífero se destaca por hospedar uma das maiores densidades de cavernas em rochas ferríferas do mundo. Até o momento, foram cadastradas 651 cavidades naturais em bases oficiais (CANIE), distribuídas em seus aproximados 7000 Km² de extensão. No entanto, as prospecções ainda não contemplaram todo o território, o que leva a crer que o patrimônio espeleológico na província do Quadrilátero Ferrífero seja muito maior do que se conhece (CALUX, 2013). Com o intuito de caracterizar os atributos morfológicos e contribuir com a investigação acerca dos processos envolvidos na gênese e evolução das cavernas ferríferas, Alan Calux (2013) selecionou em seu trabalho 11 cavidades naturais do Quadrilátero Ferrífero distribuídas em quatro distritos espeleológicos onde foram elaboradas análises detalhadas que pudessem representar a região.

O carste em quartzito na região SE de Diamantina, Mg – Fernanda Souza

O Estado de Minas Gerais se destaca quanto à expressividade da ocorrência do fenômeno cárstico em rochas siliciclásticas, tanto quantitativamente quanto pela extensão das feições (FABRI, 2011). Com a finalidade de contribuir com o conhecimento de uma área ainda pouco estudada, Fernanda Souza (2013) desenvolveu seu trabalho na caracterização do carste em rochas quartzíticas do Supergrupo Espinhaço, na região sudeste de Diamantina – MG. A área de estudo foi delimitada em uma região de 22,71 Km² onde até então se registrava no CECAV a existência de apenas duas cavidades (Gruta do Salitre e Gruta Monte Cristo). A partir de atividades de prospecção espeleológica, foram identificadas dez cavernas e 32 abrigos, dentre as quais foram selecionadas sete cavidades para caracterização morfológica e interpretação dos fatores litoestruturais e geomorfológicos associados ao desenvolvimento das feições.

4.2. Influência litoestrutural

A porosidade primária bem desenvolvida é caracterizada na literatura como importante propriedade litológica no que diz respeito à dissolução intragranular das rochas e consequente formação de feições cársticas. As três litologias selecionadas

referem-se a rochas metamórficas, ou seja, estas apresentam porosidade intragranular inibida em função da recristalização mineral ao longo do processo de metamorfismo. Diante de tal característica, a gênese do endocarste em mármore, formações ferríferas e quartzito está fortemente condicionada à porosidade secundária, ou seja, ao controle estrutural da rocha. A porosidade secundária apresenta importante papel na gênese de cavidades em litologias sedimentares como os calcários, como afirma Bigarella (1994), pois o pleno desenvolvimento do carste só é possível em função da presença de estruturas tectônicas. Sendo assim, em rochas metamórficas, a espeleogênese apenas é possibilitada em regiões onde o sistema estrutural é expressivo. Ressalta-se que a porosidade secundária é atribuída às falhas, fraturas, fissuras, juntas, dobras de toda ordem bem como aos planos de acamamento e foliação das rochas. Estas estruturas possuem influência distinta em cada litologia e variam também de acordo com a região estudada.

Os afloramentos de mármore situados na borda oeste da Serra do Cipó se inserem na margem sudeste do Cráton do São Francisco e possuem origem relacionada aos sucessivos ciclos sedimentares da Bacia Intracratônica do São Francisco (SOUZA, 2011). Com a reativação tectônica no evento Brasiliano (Neoproterozóico), o aquecimento termal e os empurrões de E para W, resultaram em metamorfismo, dobramentos, cavalgamentos e consequentes lineamentos estruturais. Os mármorees nessa área de estudo se encontram intensamente deformados próximos à frente de empurrão onde o acamamento foi totalmente obliterado (SOUZA, 2011).

De acordo com a caracterização petrográfica obtida por Souza (2011), os mármorees da região são impuros, apresentando concentrações relativamente altas de quartzo, enquanto a média de calcita representa apenas 64% da composição das amostras analisadas microscopicamente. A baixa concentração de minerais carbonáticos, como visto anteriormente, influi na diminuição da capacidade de dissolução da rocha. Por outro lado, foram identificadas 95 estruturas lineares na área de estudo referentes a fraturas e falhas. A partir de observações estruturais, foi possível concluir que dentre as cavidades em que foi possível realizar a análise, 77% apresenta controle exercido por fraturas verticais e subverticais, enquanto em 23% dos casos, esse controle é atribuído aos planos de foliação (Gráfico 01). A

forte influência dessas estruturas no desenvolvimento do endocarste também é evidenciada pela correspondência entre as áreas de maior densidade de lineamentos estruturais com as de maior ocorrência de cavidades (SOUZA, 2011).

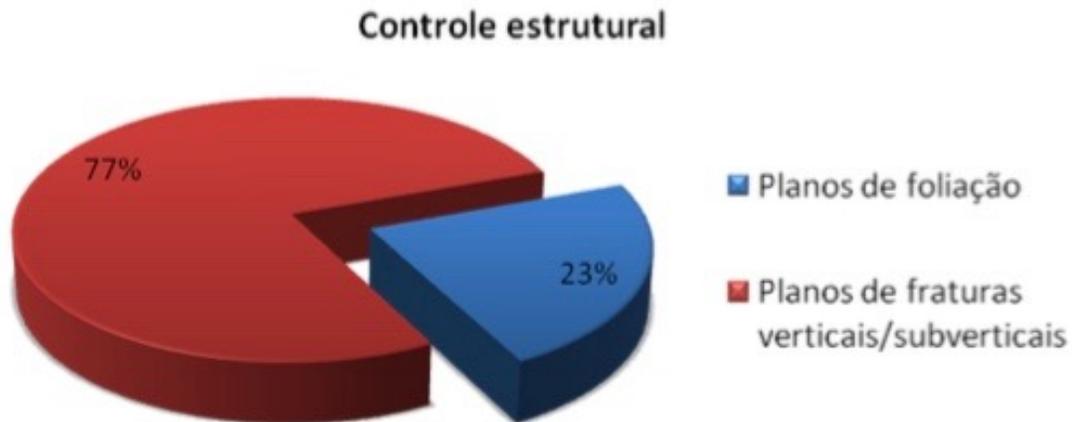


Gráfico 01: Estruturas responsáveis pelo controle estrutural das cavidades em mármore da Borda Oeste da Serra do Cipó, MG. Fonte: Souza (2011)

As cavidades estudadas por Allan Calux (2011), estão abrigadas nos itabiritos e em seu produto de alteração (canga) do Quadrilátero Ferrífero. O itabirito, muito resistente aos processos de intemperismo físico e químico, representa uma litologia pertencente à Formação Cauê do Grupo Itabira e refere-se a uma formação ferrífera bandada (BIF's).

Com relação às estruturas geológicas, o Quadrilátero Ferrífero apresenta geometria definida por megadobras sinformes e antiformes, truncadas por cinturões de falhas de empurrão direcionadas de norte para sul em sua porção oriental atribuídas ao Ciclo Tectônico Brasileiro. Já na porção ocidental, um cinturão de dobras-falhas de direção noroeste – sudeste, evidencia uma deformação ocorrida no Ciclo Transamazônico. A partir de observações, conclui-se que os distritos espeleológicos estudados estão fortemente associados a este contexto

megaestrutural da região (CALUX, 2011).

As propriedades litoestruturais condicionam a espeleogênese das cavidades em formações ferríferas tanto nas fases iniciais quanto na dinâmica tardia do desenvolvimento endocárstico. No Quadrilátero Ferrífero, Calux (2011) afirma que os principais fatores controladores da espeleogênese referem-se respectivamente aos: bandamentos, fraturas tectônicas e atectônicas, eixos e flancos de dobras, e contato erosivo entre canga e formação ferrífera bandada.

Em estágio inicial, as descontinuidades estruturais tais como fraturas, falhas e fissuras de toda ordem, condicionam o caminho preferencial para a percolação de soluções aquosas ao longo do corpo rochoso, possibilitando o processo dissolutivo orientado. Posteriormente, a direção do bandamento da formação ferrífera, pode condicionar a orientação das galerias (CALUX, 2011). Os dobramentos podem exercer controle estrutural na evolução de cavernas em formações ferríferas semelhantes aos processos observados no bandamento. Porém, dependendo de sua dimensão e posição, o fluxo de solução aquosa pode se concentrar ao longo do eixo resultando na aceleração do processo de transporte sedimentar. Além destas estruturas, a área de contato erosivo entre canga e substrato adjacente também constitui uma zona preferencial para o desenvolvimento de cavernas na área de estudo (CALUX, 2011).

Nota-se a partir dos resultados obtidos por Calux (2011) que existe uma forte influência dos fatores litoestruturais na gênese das cavidades nas formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero. Porém, a importância de cada tipo de estrutura varia de acordo com o contexto no qual cada caverna está inserida, sendo que na maioria das cavidades, o controle estrutural é exercido por mais de um atributo.

A área de estudo referente ao trabalho de Fernanda Souza (2013) está inserida geologicamente no Supergrupo Espinhaço, Grupo Guida, Formação Sopa-Brumadinho da Serra do Espinhaço Meridional (SdEM). Esta unidade geológica, majoritariamente metassedimentar, é composta principalmente por quartzitos de granulação grosseira e baixo grau metamórfico (SOUZA, 2013 apud ALMEIDA ABREU; PFLUG, 1994).

A influência das características litológicas de rochas siliciclásticas no desenvolvimento do endocarste pode ser discutida a partir da composição mineralógica da rocha, porosidade primária e textura. Como visto anteriormente, a composição mineralógica das litologias siliciclásticas desfavorece a dissolução e conseqüentemente a formação de feições cársticas bem desenvolvidas. Sabe-se que, ao contrário dos carbonatos, quanto maior a pureza mineralógica da rocha menor será a velocidade e intensidade da dissolução dos silicatos (FORD e WILLIAMS, 2007 ; SOUZA, 2011).

Segundo Ford & Williams (2007), a heterogeneidade granulométrica (textura) das rochas favorece a dissolução por aumentar a superfície de contato entre a solução aquosa e os grãos. Nesse caso, a dissolução tende a ser mais acelerada nos conglomerados do que em quartzitos monimíticos por exemplo (SOUZA, 2013). Apesar do baixo grau de metamorfismo e textura predominantemente grosseira dos quartzitos na referente área de estudo, constatou-se a partir da análise de lâminas petrográficas que o espaço intragranular é pequeno a ponto de limitar a ação da água na dissolução. Em função dessas características, pode-se afirmar que o desenvolvimento do carste na região não possui forte ligação com o fator litológico, mas está associado ao contexto estrutural e geomorfológico local (SOUZA, 2013).

A partir da investigação entre a direção dos condutos e a orientação preferencial dos planos de fratura, Souza (2013) concluiu que em 42,86% a relação é concordante e em 57,14%, a relação se apresenta irregular (Gráfico 02). Portanto, apesar de todas as cavidades possuírem condutos orientados pelos planos de fratura, esses lineamentos não representam o único fator estrutural condicionante na morfologia dos condutos de algumas cavidades.

Relação entre direção dos lineamentos estruturais internos e direção dos condutos das cavidades

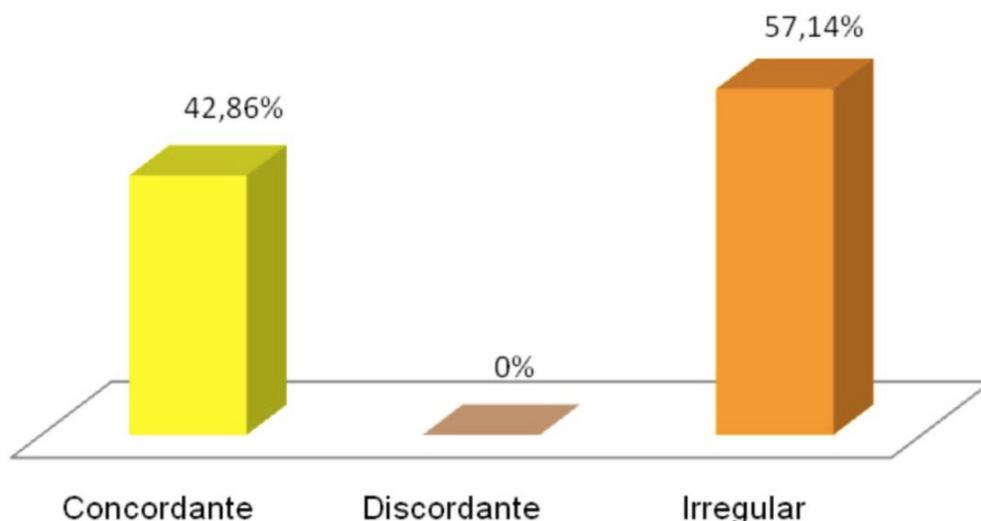


Gráfico 02: Relação entre lineamentos estruturais e orientação dos condutos das cavidades – Borda oeste da Serra do Cipó, MG. Fonte: Souza (2013)

Além da forte influência dos planos de fratura, constatou-se que há uma associação destes lineamentos estruturais com o mergulho dos planos de acamamento na formação das cavidades da área de estudo. Afinal, a direção preferencial dos condutos (NE-SW) corresponde principalmente aos planos de fratura (NE-SW), e posteriormente à direção e mergulho dos planos de acamamento (NW-SE) (SOUZA, 2013). Assim, conclui-se que o controle estrutural das cavidades na região SE de Diamantina é exercido predominantemente pelos planos fratura seguido pelo direcionamento e mergulho dos planos de acamamento e xistosidade. Vale ressaltar que em vários casos, os condutos possuem influência de mais de um condicionante estrutural (SOUZA, 2013).

Discussão

Como dito anteriormente e evidenciado através da análise dos autores, a porosidade secundária exerce importante papel na morfogênese de cavidades em rochas metamórficas, onde a influência do tipo de estrutura geológica varia de acordo com a litologia e o contexto estrutural no qual as cavidades estão inseridas.

Com relação à resistência frente aos processos intempéricos (erosão e dissolução), os mármore, de maneira geral, são menos resistentes que os quartzitos enquanto estes são menos resistentes que as formações ferríferas. Assim, os diferentes tipos de rochas possuem características distintas quanto às taxas de dissolução, padrões planimétricos, volume e densidade de cavidades por quilômetro quadrado. Entretanto, apesar do mármore ser considerado o menos resistente entre as litologias selecionadas, a presença de uma grande densidade de fraturas pode ser afirmada como o principal condicionante litoestrutural do desenvolvimento endocárstico nos mármore da borda oeste da Serra do Cipó, seguido pela também notável influência dos planos de foliação da rocha. Tal afirmação foi estabelecida a partir da conformidade entre os condutos e os lineamentos estruturais assim como pela correspondência entre as áreas de maior densidade de cavidades com a maior densidade de fraturas.

Em relação às cavidades hospedadas nas formações ferríferas e em seu produto de alteração do Quadrilátero Ferrífero, é possível concluir que a influência estrutural é estabelecida por vários atributos, os quais exercem variada importância em cada cavidade. Na maioria das cavernas foi constatado mais de um tipo de atributo estrutural como possível condicionante espeleogenético sendo que os mais citados foram a influência do bandamento e a presença de fraturas tectônicas e atectônicas.

Nos Quartzitos da região sudeste de Diamantina, apesar do baixo grau metamórfico e granulometria heterogênia, Souza (2013) atribuiu maior importância estrutural do que litológica no desenvolvimento das cavidades na área de estudo. Com a análise dos lineamentos estruturais, foi possível estabelecer relação positiva entre os planos de fratura e todos os condutos. Além disso, este fator não pode ser considerado como único visto que em 57,14% dos condutos a correlação é irregular possuindo também a influência do acamamento na morfologia das cavidades.

4.3. Densidade das Cavidades

A densidade média de cavidades dentro de uma área de estudo expressa a representatividade da paisagem cárstica na região, afinal, como afirma Bigarella (1994), para que um relevo seja considerado como cárstico, ele deve apresentar

certa escala. Caso contrário as feições seriam apenas isoladas e insuficiente para a caracterização de um relevo cárstico. A análise comparativa da densidade média de cavidades em cada litologia dos estudos de caso selecionados possibilita a visão da influência litológica no desenvolvimento de sistemas cársticos. O cálculo da densidade é executado a partir da razão entre o número de cavidades encontradas com a área de interesse total.

Em seu trabalho voltado ao carste em mármore na borda oeste da Serra do Cipó, Souza (2013) delimitou um polígono referente à sua área de estudo composto por 100 Km² de extensão. A área abrange mármore do Grupo Bambuí bem como uma porção dos quartzitos e metapelitos de contato pertencentes ao Supergrupo Espinhaço. A densidade média de cavidades por quilômetro quadrado foi calculada considerando apenas a superfície carbonática do polígono onde foram registradas 161 cavidades. Assim, constatou-se a existência de 3,33 cavidades por Km². A área total da província espeleológica foi dividida em cinco distritos (Tabela 01), a maior concentração de feições endocársticas foi registrada no Morro da Pedreira (103 cavidades), seguido pelo Mato Grande (19 cavidades), Buracão (17 cavidades), Bocaina e Fazenda Cipó (11 cavidades).

Tabela 01: Número de cavidades por sub-áreas espeleológicas na borda Oeste da Serra do Cipó. Fonte: SOUZA (2011).

Sub-áreas Espeleológicas	Número de Cavidades
Bocaina	11
Buracão	17
Fazenda Cipó	11
Mato Grande	19
Morro da Pedreira	103

Quanto ao carste hospedado nas formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero, Calux (2013) delimitou dez distritos espeleológicos (Tabela 02) dentro dos 7000 Km² da província. Assim, o autor calculou a quantidade de cavidades reportadas em cada distrito espeleológico, pela área referente a estas sub-regiões. O resultado parcial da densidade de cavernas possibilita constatar a concentração das feições endocársticas dentro da área de estudo. Ao somar a área total dos

distritos espeleológicos (730 Km²) e dividir pela soma das cavidades de cada distrito (1086 cavidades), obtêm-se que o Quadrilátero Ferrífero apresenta densidade média de 1,48 cavernas por Km².

Com relação à região sudeste de Diamantina, a delimitação da área de estudo de Souza (2013) contempla 22,71 Km² de quartzitos do Supergrupo espinhaço. A partir da etapa de campo do trabalho, foram prospectadas na região 10 cavernas e 32 abrigos. Sendo assim, a densidade média de cavidades resulta em 1,84 por Km².

Tabela 02: Área e quantidade de cavernas dos distritos espeleológicos do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Calux (2011) * apud Oliveira et al (2011).

Província Espeleológica	Distrito Espeleológico	Área (km2)*	Quantidade de Cavernas**	Densidade Caverna/km2
Quadrilátero Ferrífero	Serra do Rola Moça	35	60	1,7
	Serra do Curral	39	15	0,4
	Serra da Piedade	36	100	2,8
	Sinclinal Gandarela	217	530	2,4
	Serra de Antônio Pereira	84	90	1,1
	Serra de Ouro Preto	28	30	1,1
	Miguel Burnier	111	40	0,4
	Serra da Moeda	80	100	1,3
	Serra do Itabirito	50	100	2,0
	Serra Azul	50	21	0,4

Discussão

Os resultado da densidade média de cavidades por quilômetro quadrado contemplam o esperado: a maior taxa está situada nos mármore da borda oeste da Serra do Cipó (3,33 cavidades por Km²), seguida pelos quartzitos da região sudoeste de Diamantina (1,84 cavidades por Km²) e, por último, o resultado obtido

nas formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero (1,48 cavidades por Km²) (Gráfico 03). Este comportamento pode ser considerado esperado, pois, como dito na análise litoestrutural, de maneira geral, os mármore são menos resistentes que os quartzitos e as formações ferríferas. Mesmo que nos mármore as taxas de dissolução sejam reduzidas em função do metamorfismo do calcário, estas ainda se apresentam muito superiores quando comparadas ao quartzito e as formações ferríferas. Por isso, vale ressaltar que normalmente a paisagem cárstica carbonática, incluindo os mármore, é quantitativamente mais expressiva do que nas demais litologias. Assim, podemos considerar também que em quartzitos e formações ferríferas o tempo necessário para a formação de feições endocársticas bem desenvolvidas é muito maior do que nos mármore.

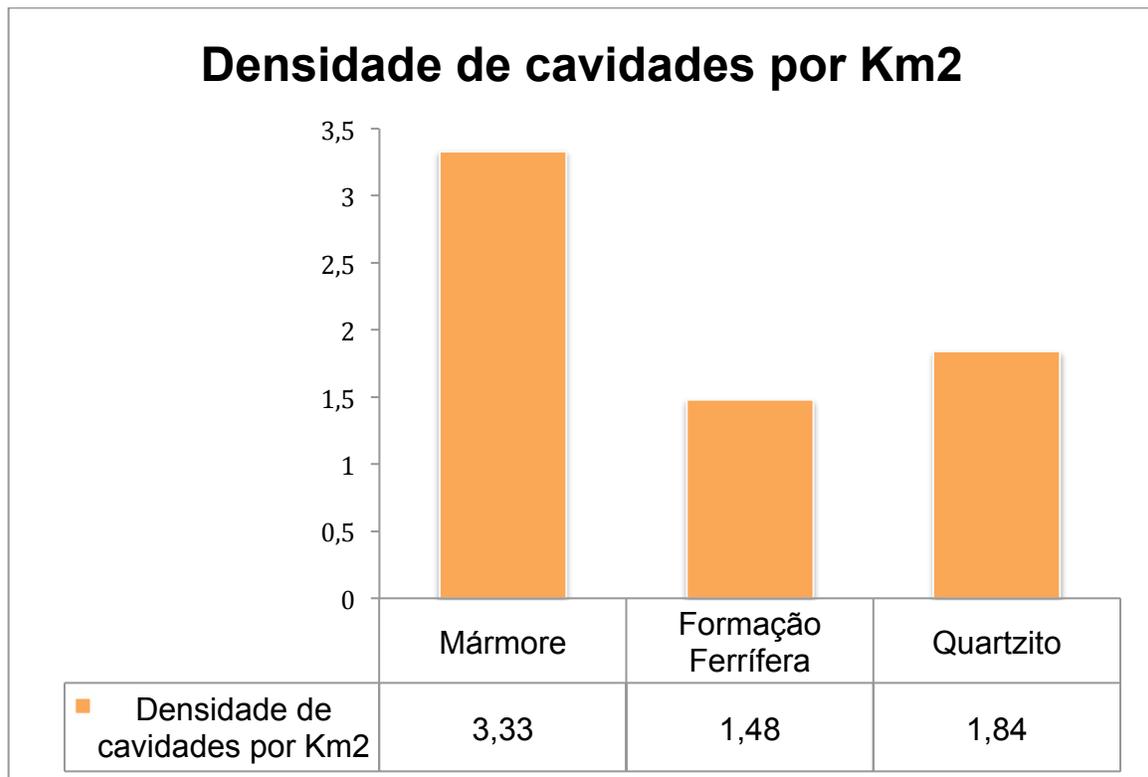


Gráfico 03: Relação entre litologia e densidade de cavidades por Km² das áreas de estudo selecionadas. Fonte: Dados das pesquisas Souza (2011); Calux (2013); Souza (2013).

Como dito na análise litoestrutural, de maneira geral, os mármorees são menos resistentes que os quartzitos e as formações ferríferas. Mesmo que nos mármorees as taxas de dissolução sejam reduzidas em função do metamorfismo do calcário, estas ainda se apresentam muito superiores quando comparadas ao quartzito e as formações ferríferas. Por isso, vale ressaltar que normalmente a paisagem cárstica carbonática, incluindo os mármorees, é quantitativamente mais expressiva do que nas demais litologias. Assim, podemos considerar também que em quartzitos e formações ferríferas o tempo necessário para a formação de feições endocársticas bem desenvolvidas é muito maior do que nos mármorees.

4.4. Morfologia das cavidades

A própria definição de carste remete à morfologia de feições mediante a ação de processos dissolutivos nas rochas. Porém, a evolução de um sistema cárstico está condicionada à interação uma diversidade de elementos que possibilitam o desenvolvimento de uma grande variedade morfológica de feições em diferentes regiões do mundo. Dentre os principais condicionantes pode-se citar o clima (disponibilidade hídrica), características litológicas (composição química), porosidade primária, textura, pureza da rocha), desenvolvimento do sistema estrutural (porosidade secundária) e gradiente hidráulico local (FORD e WILLIAMS, 1989).

Quantos às classificações morfológicas, os padrões planimétricos de cavidades dissolutivas descritos por Palmer (1991) (capítulo 2.1), compreendem categorizações em função das características morfológicas de condutos em planta (Figura 03). Estes podem ser classificados como dendríticos, reticulados, anastomosados, espongiiformes e ramiformes. Vale ressaltar que uma mesma caverna pode apresentar mais de um tipo de padrão, ou mesmo apresentar morfologia indefinida.

Considerando os atributos apresentados como condicionantes à espeleogênese e conseqüente variabilidade morfológica das cavidades, a análise comparativa da morfologia das cavidades estudadas pelos autores nas litologias

selecionadas propõe discutir a diversidade do fenômeno cárstico sob diferentes contextos geológicos, geográficos e geomorfológicos.

Apesar de comparativamente apresentar a maior densidade de cavidades entre os estudos analisados, o endocarste em mármore da borda oeste da Serra do Cipó, de maneira geral, contempla cavernas de baixo grau de desenvolvimento. Das 161 cavidades cadastradas na referente área de estudo, 84% possui projeção horizontal de até 30 metros, 12% apresenta de 31 a 100 metros e apenas 4% possui parâmetro superior a 100 metros (Tabela 03; Gráfico 04). A baixa projeção horizontal média (33,43 metros) leva a crer que algumas cavidades de pequena ordem representam remanescentes de cavernas maiores que existiram na área (SOUZA, 2011).

Tabela 03: Dados de densidade e projeção horizontal das cavidades em mármore da borda oeste da Serra do Cipó. Fonte: (SOUZA,2011).

Número de cavidades cadastradas	161
Densidade de cavidades na superfície cárstica de estudo	3,33/km ²
Projeção horizontal total	5.383,5 m
Projeção horizontal média	33,43 m



Gráfico 04: Porcentagem de cavidades por projeção horizontal das cavidades em mármore da borda oeste da Serra do Cipó. Fonte (SOUZA, 2011).

Referente às cavidades selecionadas para análise detalhada por Souza (2011) (Tabela 04; Gráfico 05), a projeção horizontal total das 14 cavernas somam 3036 metros, o que resulta em uma projeção média de 216,85 metros. Em relação à morfologia das cavidades, Souza (2011) relata que a maioria das cavernas apresenta padrão planimétrico e morfologia de condutos indefinidos. A grande representatividade de cavidades em padrão retilíneo (32%) e de rede (12%) evidencia o claro condicionamento estrutural no desenvolvimento morfológico de feições endocársticas na região, também comprovado pela morfologia fissural dos condutos em 42% dos casos.

Tabela 04: Características espeleométricas das cavidades da borda oeste da Serra do Cipó selecionadas para estudo detalhado. Fonte: Souza (2011)

Caverna	UTM E	UTM N	Altitude (m)	Projeção Horizontal (m)	Desnível (m)	Área (m ²)	Volume ap. (m ³)	Sub-área Espeleológica	Atributo
Gruta da Viola	645344	7865861	867	615	30	2.570	10.280	Morro da Pedreira	Espeleometria
Gruta Teto de Seixos	645305	7865742	874	500	42	1.387	5.049	Morro da Pedreira	Espeleometria
Gruta do Brejo	644579	7865489	810	351	08	1.020	2.794	Morro da Pedreira	Hidrologia
Gruta do Salitre	642642	7869360	860	350	42	2.461	6.940	Mato Grande	Espeleometria
Gruta Bocaina V	646690	7861543	929	339	32	2.338	5.868	Bocaina	Espeleometria
Gruta dos Morcegos	644247	7866499	804	168	23	897	3.422	Morro da Pedreira	Espeleometria
Gruta Pináculo da Fenda	645728	7864546	943	151	12	608	2.973	Morro da Pedreira	Espeleometria
Gruta Labirinto do Sumidouro	644532	7865776	805	164	42	2.461	6.940	Morro da Pedreira	Hidrologia
Gruta Consolo do Raul	645535	7864885	935	100	32	273	562	Morro da Pedreira	Espeleometria
Gruta Vizinha	645314	7865733	893	68	13	221	1.063	Morro da Pedreira	Morfologia
Lapa do Gentio	643806	7867561	703	66	26	255	1.175	Mato Grande	Morfologia
Gruta Fenda da Drenagem	645511	7864424	893	60	5,3	59	236	Morro da Pedreira	Morfologia
Gruta da Ligação	645502	7864753	930	58	13,5	99	567	Morro da Pedreira	Morfologia
Gruta Trilha da Bolha	645899	7864025	909	46	1	81	56	Morro da Pedreira	Morfologia

Padrões planimétricos das cavernas

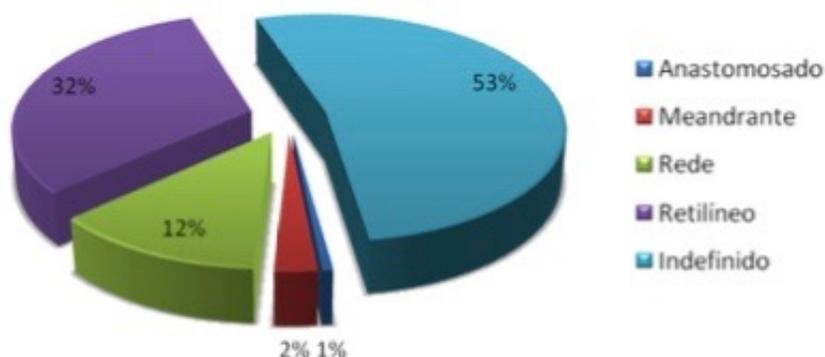


Gráfico 05: Porcentagem de ocorrência dos padrões planimétricos nas cavernas em mármore da borda oeste da Serra do Cipó, MG. Fonte: Souza (2011)

A partir dos resultados obtidos na análise dos padrões morfológicos das cavidades, Souza (2011) destaca dois principais fatores que condicionam os processos cársticos e a morfologia das feições. Estes se referem ao substrato rochoso (litologia e estrutura geológica) e o tipo de recarga do sistema.

Com relação ao substrato rochoso, a impureza relativamente alta dos mármore da região e a baixa concentração de minerais carbonáticos caracterizam um inibidor dos processos de dissolução. Por outro lado, o sistema estrutural da rocha tende a orientar os processos de formação e desenvolvimento das cavidades.

Já o tipo de recarga hidrológica dos sistemas cársticos na área de estudo possui forte influência no controle morfológico das feições. As cavidades que recebem drenagem alogênica, proveniente dos maciços quartzíticos de contato, possuem características distintas daquelas formadas por recarga autogênica (SOUZA,2011). Ao escoar superficialmente pelos maciços de quartzito, a solução aquosa alogênica adquire característica ácida, altamente agressiva para áreas carbonáticas. Como efeito, esse tipo de drenagem acelera os processos dissolutivos e influi na composição do padrão morfológico das cavidades, normalmente bem desenvolvidas. Na área de estudo, esta influência se exhibe em

formas como bolsas de dissolução, feições anastomáticas e ocorrência de padrão planimétrico labiríntico do tipo rede e anastomosado, incomuns por outro lado em cavidades que possuem drenagem autogênica. As cheias episódicas de rios alogênicos promovem grande variação de fluxo e se associam a eventos de inundação periódica no carste, o que implica em uma maior ampliação dos condutos e na evolução de padrões labirínticos (SOUZA, 2011).

Desta forma, nas porções da área de estudo onde a densidade de estruturas geológicas apresentou-se mais elevada e a recarga alogênica, em condições de alto gradiente hidráulico, formaram-se feições endocársticas mais desenvolvidas e diversas. O contexto geográfico divergente nas porções leste e oeste da superfície cárstica estudada exhibe diferentes tipos de recarga hídrica, o que conseqüentemente resultou na variabilidade do desenvolvimento morfológico das cavidades. A porção leste possui cavidades mais desenvolvidas em termos espeleométricos. Estas possuem as características consideradas como favoráveis à espeleogênese. Por outro lado, a porção oeste abriga cavernas de baixa ordem, limitadas por não serem tão significativamente contempladas pelos atributos considerados como influentes no melhor desenvolvimentos das feições.

As cavidades hospedadas em litologias ferríferas possuem características estéticas e morfológicas bem distintas do carste tradicional. De maneira geral, essas cavernas apresentam pequenas dimensões quando comparadas às cavidades de demais litologias (PILÓ et al., 2009; CALUX, 2013). Com relação à origem evolutiva das cavidades, SIMMONS (1963) afirma que as cavernas de dissolução normalmente são maiores do que as de erosão e é comum que apresentem vários compartimentos internos.

A frequente observação de uma morfologia espongiforme, bem como a incompatibilidade dimensional entre pequenas entradas e grandes salões e condutos, leva a crer que parte dessas cavernas originalmente evoluiu de forma oclusa no interior do maciço rochoso e as entradas surgiram a partir de abatimentos. Da mesma forma, galerias maiores conectadas por pequenos condutos podem ter evoluído independentemente e terem se conectado posteriormente (PILÓ e AULER, 2009). É comum classificar cavidades ferríferas como irregulares, porém SIMMONS (1963) atribui essa característica ao

alargamento e junção de feições originalmente lineares.

Em relação à projeção horizontal das cavidades do Quadrilátero Ferrífero – MG, Dutra (2015) afirma que o desenvolvimento das cavernas varia de poucos metros a no máximo 400 metros de extensão, onde aproximadamente 74% possui projeção inferior a 30 metros e apenas 2% das cavidades apresenta mais do que 100 metros. Por outro lado, considerando apenas as cavidades selecionadas por Calux (2013), as 11 cavidades somam 871 metros de projeção horizontal, resultando na média de 79,18 metros. Novamente, esse dado não representa a totalidade do Quadrilátero Ferrífero e é citado aqui apenas para fins de comparação.

A fim de identificar os padrões geométricos e morfológicos das cavidades do Quadrilátero Ferrífero – MG, Calux (2013) analisou mapas topográficos de 160 cavernas. A classificação geométrica procurou comparar a planta baixa com figuras geométricas elementares como círculos, triângulos e retângulos, e a classificação dos padrões planimétricos foi baseada nas classificações propostas por Palmer (1991).

Dentre os 160 mapas analisados, Calux (2013) identificou a ocorrência de sete padrões planimétricos, sendo eles: espongiforme, retilíneo, reticulado e as formas mistas globular/espongiforme, labiríntico/espongiforme, retilíneo/espongiforme e reticulado/espongiforme. Também foram identificados quatro padrões geométricos, representados por: circular, elíptico, triangular e retangular. Quantitativamente, foi possível afirmar que o padrão planimétrico espongiforme e suas formas mistas são predominantes morfológicamente nas cavernas ferríferas (Tabela 05). Das 160 plantas analisadas, 111 (69,4%) apresentam esses padrões. Referente à geometria, observou-se uma maior ocorrência de tipologias triangular, retangular e elíptica que juntas somam 140 (87,5%) cavidades da amostra (CALUX, 2013).

Segundo Calux (2013), a morfologia das cavidades baseada nos padrões planimétricos e geométricos é principalmente influenciada pelo tipo de rocha encaixante, ou seja, formação ferrífera, canga ou contato entre elas. Este condicionamento se relaciona às diferentes características dos substratos tais como

textura, estrutura e comportamento frente a ação intempérica e hidrodinâmica. Assim, o autor identificou que as cavernas em canga são predominantemente espongiiformes e, por outro lado, os padrões retilíneo, reticulado e as formas mistas retilíneo/espongiiforme e reticulado/espongiiforme, são exclusivamente relacionados às cavidades hospedadas em formação ferrífera bandada.

Assim como no endocarste em formações ferríferas, as cavidades estudadas por Fernanda Souza (2013) nos quartzitos da região sudeste de Diamantina – MG possuem características morfológicas bem distintas do carste tradicional. Em decorrência da variabilidade de processos e condicionante litológico, nos dois casos a carstificação é inibida quando comparado ao carste carbonático. Tal distinção se comprova com o fato de que os padrões planimétricos de cavernas ferríferas e em quartzito não se encaixam adequadamente nas classificações morfológicas criadas por Palmer (1991). Desta forma, Souza (2013) não utiliza estes padrões na classificação morfológica das cavidades estudadas.

Em relação à projeção horizontal (Gráfico 06), quatro cavidades apresentam entre 5 e 50 metros de extensão, uma entre 101 e 300 metros e duas cavidades possuem de 301 a 600 metros. A soma da projeção total é de 1293,6 metros resultando na média de 184,8 metros (Souza, 2013).

Projeção horizontal das cavidades

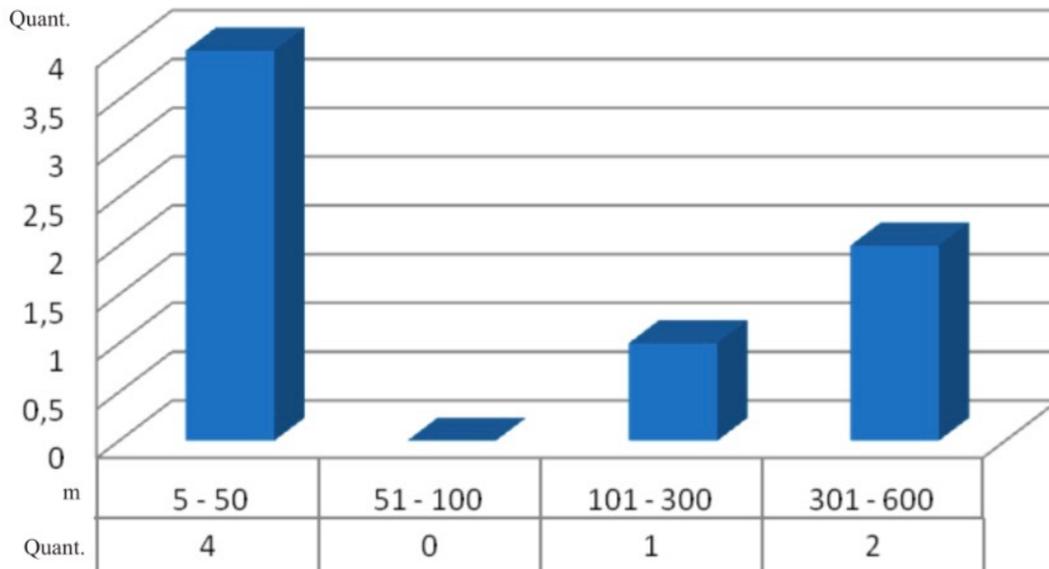


Gráfico 06: Projeção horizontal das cavernas situadas na região SE de Diamantina –MG. Fonte: SOUZA (2011).

A partir da confecção e análise de plantas das sete cavernas dentro de sua área de estudo, Souza (2013) descreve que estas se apresentam predominantemente horizontalizadas ou suavemente inclinadas. Segundo os padrões geométricos, de maneira geral, as galerias, salões e condutos possuem morfologias retangulares, triangulares e elípticas. Mesmo que os padrões planimétricos das cavidades não se encaixem perfeitamente na classificação de Palmer (1991), constatou-se que cinco cavernas possuem características que indicam a influência dos planos de fratura na morfologia das cavidades. Considerando que a ocorrência do padrão planimétrico em rede é restrita às rochas fraturadas em função da influência na recarga do sistema, cavidades ou porções das mesmas que apresentam concordância com os lineamentos estruturais, possuem a morfologia reticulada sob a influência de fraturas (SOUZA, 2013).

Souza (2013) elege os planos de fratura e mergulho do acamamento como

os principais condicionantes à gênese e morfologia das cavidades na área de estudo. A interação entre os dois atributos contribui para a formação planimétrica específica das cavidades na região sudeste de Diamantina. Esta afirmação é comprovada pela associação direta entre a direção preferencial dos condutos (NE-SW), principalmente com a direção dos planos de fratura (NE-SW) e posteriormente com o mergulho do acamamento (NW-SE).

Discussão

Inicialmente, a partir dos dados obtidos pelos autores, vale ressaltar a complexidade de se comparar sistemas tão distintos. A evolução do carste em cada litologia possui seus próprios processos e condicionantes, o que resulta em uma paisagem morfológicamente variada. Os padrões propostos por Palmer (1991) foram desenvolvidos para categorizar o endocarste carbonático e, a partir da análise morfológica das cavidades de cada litologia estudada, é possível constatar que: enquanto Tatiana Souza (2011) conseguiu enquadrar perfeitamente a morfologia das cavernas em mármore da borda oeste da Serra do Cipó -MG nos padrões de Palmer (1991), Allan Calux (2013) utilizou em alguns casos, formas mistas dos padrões para melhor descrever a morfologia das cavidades em formações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero – MG. Fernanda Souza (2013) por sua vez, não considerou que estes padrões são cabíveis na representação das cavidades estudadas nos Quartzitos da região sudeste de Diamantina - MG. Logo, a partir desta análise, percebe-se a importância do debate, esclarecimento e confecção de novas classificações que contemplem todas as litologias passíveis de carstificação para fins acadêmicos e profissionais.

Referente à relação entre litologia e projeção horizontal, mesmo que o resultado da média das projeções de cada litologia não contemple a realidade da maioria das cavidades, é possível estabelecer o padrão esperado (Gráfico 07). A maior projeção horizontal média refere-se à cavidades hospedadas nos mármore (216,85 metros), seguida pelas localizadas nos quartzitos (184,8 metros) e por último nas formações ferríferas (79,18 metros).

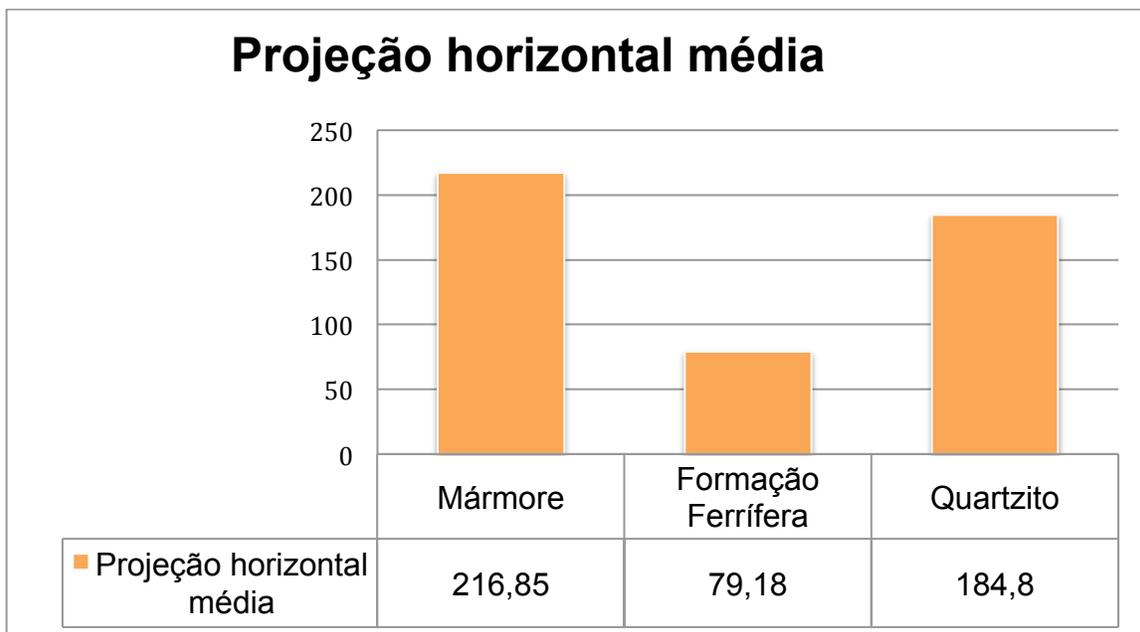


Gráfico 07: Projeção horizontal média das cavidades por litologia. Fonte: Dados das pesquisas: Souza (2011); Calux (2013); Souza (2013).

Em função dos distintos processos de formação e das características estruturais e mineralógicas de cada rocha, os valores espeleométricos não são facilmente comparados. Apesar de tal afirmação, nos três trabalhos foram relatadas cavidades com projeção horizontal superior a 100 metros, ou seja, de alto grau de desenvolvimento. Isso remete aos condicionantes espeleogenéticos e morfológicos que quando presentes possibilitam a formação de feições expressivas.

Nos mármore da borda oeste da Serra do Cipó, Souza (2011) atribui aos lineamentos estruturais e ao tipo de recarga (autogênica ou alogênica) como os principais atributos no desenvolvimento do esndocarste. A frequência dos padrões planimétricos retilíneo e de rede em concordância com os planos de fratura evidenciam a forte influência estrutural na definição da morfologia das cavidades, enquanto onde a recarga é alogênica, se exibem padrões anastomosados e labirínticos de grande projeção horizontal e volume.

Nas cavidades ferríferas do Quadrilátero Ferrífero, Calux (2013) afirma que as características morfológicas estão principalmente condicionadas ao substrato em

que se hospedam, sendo eles: formação ferrífera, canga, ou contato entre elas. Este condicionamento se refere às diferentes características como textura, estrutura, hidrodinâmica e resistência ao intemperismo dos substratos. De maneira geral, as cavidades hospedadas em canga foram caracterizadas como espongiiformes e as localizadas nas formações ferríferas se apresentaram como retilíneas.

Já nas cavidades hospedadas nos quartzitos da região sudeste de Diamantina, Souza (2013) associa a morfologia das cavidades a dois principais fatores: presença e orientação dos planos de fratura e mergulho dos planos de acamamento. Essa correlação foi atribuída pela concordância entre direção dos condutos principalmente com a direção dos planos de falha e em segundo lugar com a direção do mergulho do acamamento.

5. Considerações Finais

A execução de uma análise comparativa acerca da ocorrência de feições endocársticas em diferentes litologias de Minas Gerais teve como objetivo enfatizar a grande diversidade do fenômeno cárstico e sua importância socioambiental sob a perspectiva geomorfológica, geográfica e geológica. Por muito tempo o termo "carste" foi utilizado unicamente para referir-se às paisagens oriundas do processo de dissolução de rochas carbonáticas. A partir da constatação da existência de feições dissolutivas em diversas litologias no mundo, o termo passou a remeter ao processo e não à rocha encaixante. Hoje, considera-se como carste toda geoforma ou paisagem onde a dissolução define morfologia, mesmo que no balanço de processos erosivos e dissolutivos no tempo e no espaço, a dissolução não seja predominantemente.

Os três trabalhos aqui citados contemplam áreas cársticas "não tradicionais" no que diz respeito à pouca quantidade de pesquisas científicas elaboradas no Brasil e no mundo. Tal fato resulta nos diversos questionamentos ainda existentes no que se refere aos aspectos genéticos e evolutivos dos sistemas cársticos aqui comparados. Cada litologia e localização geográfica possui variados processos de formação e condicionantes morfológicos na evolução do carste. Mesmo considerando que a dissolução seja o processo que condicione a morfologia das geoformas nas três litologias estudadas, foi possível observar que suas particularidades mineralógicas, estruturais e geográficas, submetidas a variados processos, resultaram em feições endocársticas morfologicamente muito distintas.

A partir da descrição dos processos espeleogenéticos de cada litologia e da análise comparativa dos estudos de caso, foi possível concluir que:

- O quartzito e as formações ferríferas bandadas possuem baixas taxas de dissolução, e conseqüentemente a evolução das cavidades ferríferas e em quartzito é mais lenta do que a de cavidades carbonáticas, incluindo as hospedadas em mármore. Assim, de maneira geral, as cavernas em mármore possuem valores espeleométricos maiores do que cavidades em quartzito e formação ferrífera bandada;

- Os processo erosivos são predominantes na evolução do endocarste em formações ferríferas e quartzito;
- Em decorrência da perda de porosidade primária resultante da recristalização mineral no processo de metamorfismo, em todos os três casos a gênese e desenvolvimento do endocarste está fortemente relacionada ao sistema estrutural, mesmo que haja variação da influência de cada atributo nas diferentes litologias;
- A localização geográfica influi na atuação de agentes exógenos e conseqüente morfologia das cavidades. Como exemplo podemos citar a diferenciação dos padrões planimétricos observados por Souza (2011) entre as cavidades de regiões que recebem recarga hídrica autogênica ou alogênica, dentro de uma mesma área de estudo;
- Os padrões planimétricos criados por Palmer (1991), foram pensados para categorizar cavidades carbonáticas, sendo assim, não é possível comparar a morfologia de cavidades em diferentes litologias a partir desses padrões. A criação de novos padrões planimétricos é de suma importância para a construção científica dos conhecimentos acerca do carste não carbonático.

Por fim, o estado de Minas Gerais abriga um rico e diverso patrimônio espeleológico no qual as cavidades naturais subterrâneas representam ambientes de interesse social, cultural e econômico, além de contribuírem com a investigação e compreensão de diversas áreas de estudo como arqueologia, paleontologia, geomorfologia e geologia por representarem lugares capazes de contar a história de um tempo em que não vivemos. Assim, o estudo, conservação, uso sustentável e a divulgação dos conhecimentos acerca dos ambientes cársticos é indispensável.

6. Referências Bibliográficas

AULER SA, PILÓ LB AND SAADI A. 2005. Ambientes Cársticos. In: SOUZA CRG ET AL. (Eds), Quaternário do Brasil, Ribeirão Preto: Holos, Ribeirão Preto, Brasil, p. 321-337.

Auler, A. & Zogbi, L. 2005. Espeleologia: noções básicas. São Paulo: RedespeleoBrasil

AULER, A.S. Quartzites caves of South America. Encyclopedia of Caves and Karst Science (Gunn, J. ed.) Fitzroy Dearborn, London, p. 611-613, 2004.

AULER, A.S.; PILÓ, L.B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. O carste v.17, n.3, 228p. Belo Horizonte, 2005.

AULER, Augusto; PILÓ, Luís B. Geoespeleologia. In: Curso de espeleologia e licenciamento ambiental. Brasília, 2010, Cap. 2, p. 25-44.

BIGARELLA, J. J. Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais. Ed. UFsc. Volume 3. 1436 p. Santa Catarina 1994.

CALUX, A. S. Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em formação ferrífera no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 2013. 218 f. Dissertação. (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas. Gerais, Belo Horizonte. 2013.

CALUX,A.S.;CASSIMIRO,R.; Geoespeleologia das Cavernas em Rochas Ferríferas : Aspectos Dimensionais, Morfológicos, Hidrológicos e Sedimentares, In: Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas, SBE, SP, p. 134-159, 2015.

DUTRA, G. Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas, In: Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas, SBE, SP, p. 158-173, 2015.

FORD. D. C. & WILLIAMS, P.W. *Karst Geomorphology and Hidrology*. 1.ed. London: Unwin Hyman, 1989.

JENNINGS, J.N. *Karst Geomorphology*. Oxford: Basil Blackwel, 1985.

KRAUSKOPF, K.B. Introdução à Geoquímica. São Paulo, 1972.

MARTINI, J. Karst in the Black Reef Quartzite near Kaapsehoop, Transvaal. Ann. Geol. Surv. South Africa, v.13, p. 115-128, 1979.

MARTINI, J. Rate of quartz dissolution and weathering of quartzite. Bulletin of the South African Speleological Association, v. 25, p. 7-10, 1984.

PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. Geological Society of America Bulletin, v. 103, p. 1 – 21, 1991.

PILÓ L. B.; AULER A. S. Cavidades em minério de ferro e canga de Capão Xavier, Quadrilátero Ferrífero,. MG. O Carste, v.17, n.3, p.92-105, 2005. PILÓ, L. B.; AULER, A.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Geoespeleologia das cavidades em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. Congresso Brasileiro de Espeleologia, 30, Montes Claros. Anais... Montes Claros: SBE, p.181-186, 2009.

PILÓ, Luís Beethoven. Geomorfologia Cárstica. Revista Brasileira de Geomorfologia. V. 1, nº 1, 2000, p. 88-102.

Simmons, G.C. 1963. Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. The National Speleological Society Bulletin 25: 66-72.

SOUZA, Fernanda. Caracterização de Feições Cársticas Desenvolvidas em Quartzitos na Região Sudeste de Diamantina – MG. 229f. Dissertação de mestrado – Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

SOUZA, Tatiana. O carste em Mármore na Borda Oeste da Serra do Cipó, MG: Investigações acerca da morfodinâmica cárstica. 215f. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

TRAVASSOS, L. E. P. A importância cultural do carste e das cavernas. 2010.

TRAVASSOS, L.E.P.; GUIMARÃES, R.L.; VARELA, I.D. Áreas cársticas, cavernas e a Estrada Real, 2008. Pesquisas em Turismo e Paisagens Cársticas. Campinas, SeTur/SBE. 2008

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, v. 7. p.10-14, 1986b.

YARIV S., Cross H. Geochemistry of Colloid Systems for Earth Scientists. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 450 p.