



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 20, nº 1 (2019)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1457>



O CARSTE EM MÁRMORE NA BORDA OESTE DA SERRA DO CIPÓ, MINAS GERAIS, BRASIL

THE KARST IN MARBLE ON THE WEST EDGE OF THE SERRA DO CIPÓ RANGE, MINAS GERAIS, BRAZIL

Tatiana Aparecida Rodrigues de Souza

*Pesquisadora do Instituto do Carste
Rua Barcelona 240/302, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP: 30360-260. Brasil
E-mail: tatiana.arsouza@gmail.com*

André Augusto Rodrigues Salgado

*Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6.627, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP: 31270-901. Brasil
E-mail: aarsalgadoufmg@gmail.com*

Augusto Sarreiro Auler

*Pesquisador do Instituto do Carste
Rua Barcelona 240/302, Belo Horizonte, Minas Gerais. CEP: 30360-260. Brasil
E-mail: aauler@gmail.com*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
02/06/2018
Aceito (Accepted):
03/09/2018

Palavras-chave:

Carste em Mármore; Evolução do Relevo; Serra do Cipó - MG

Keywords:

Marble karst; Relief Evolution; Serra do Cipó - MG.

Resumo:

Este trabalho investiga a geomorfologia cárstica em uma faixa de mármore na borda oeste da Serra do Cipó, parte central do Estado de Minas Gerais. Os estudos pautaram-se na identificação, caracterização e análise morfométrica das formas cársticas superficiais da área, bem como no cadastramento, mapeamento e estudo geoespeleológico das cavernas. A metodologia envolveu ainda a análise litológica e estrutural do substrato rochoso, bem como investigações sobre a hidrologia cárstica. Os resultados obtidos apontaram dois fatores controladores principais da morfogênese cárstica nos mármore da borda oeste da Serra do Cipó: (i) a geologia - com destaque para a estrutura geológica - e; (ii) o tipo de recarga do sistema. As diferentes formas de ocorrência e atuação desses fatores na área de estudo culminaram no desenvolvimento de padrões distintos de feições cársticas, resultantes, por sua vez, de processos diferenciados de gênese e evolução. Estes padrões morfológicos foram agrupados em duas unidades cársticas: a *unidade marginal* e a *unidade interiorana*. A primeira, adjacente à Serra do Cipó, apresenta um conjunto de formas cársticas mais desenvolvidas e diversas em relação à segunda. Isso ocorre graças a uma maior densidade das descontinuidades estruturais e à recarga hidrológica alogênica proveniente dos quartzitos do Supergrupo Espinhaço.

Abstract:

This work researchs the karstic geomorphology in a range of marbles on the western border of the Serra do Cipó, central part of the State of Minas Gerais. The studies were based on the identification, characterization and morphometric analysis of the karstic surface geofoms of the area, as well as on the registration, mapping and geospatial study of the caves. The methodology was also based on the lithological, structural and karst hydrological analysis. The results showed two main controlling factors of karst morphogenesis in the marbles of the western border of Serra do Cipó: (i) geology - with emphasis on the geological structure - and; (ii) the type of hydric recharge. The different forms of occurrence of these factors in the study area culminated in the development of distinct patterns of karstic features, resulting, in turn, from differentiated morphogenesis and evolution. These morphological patterns were grouped into two karst units: the *marginal* and the *inland*. The first one, adjacent to the Serra do Cipó, presents a series of karst forms more developed and diversified in relation to the second one. This is due to a higher density of the structural discontinuities and to the allogenic hydrological recharge from the Quartzites of the Espinhaço Supergroup.

Introdução

As rochas carbonáticas constituem o substrato de grande parte das regiões cársticas no Brasil (CECAV, 2009). Neste grupo, as formas de dissolução ocorrem predominantemente em calcários e dolomitos, e os mármore, também considerados como altamente solúveis, apresentam-se, em geral, como pouco representativos em termos de ocorrência de paisagens cársticas.

As razões desse baixo registro associam-se a dois fatores principais: (i) O primeiro refere-se às limitadas ocorrências espaciais desse litotipo que, em muitos casos, ocorre em estreitas e isoladas faixas, limitadas por rochas metamórficas pouco solúveis (Palmer, 2007); (ii) O segundo fator é atribuído às próprias características petrográficas do mármore, já que o processo de metamorfismo ao qual foi submetido implica, em geral, na considerável diminuição de sua porosidade primária e consequente permeabilidade, sendo esta última frequentemente negligenciável nestas rochas (Ford e Williams, 2007). Tais aspectos inibem a infiltração e percolação das águas em seu interior, e, consequentemente, a dissolução e o desenvolvimento de formas cársticas.

Sendo assim, tornam-se importantes pesquisas que procurem entender a morfogênese e o desenvolvimento de geofomas cársticas em mármore. O presente trabalho situa-se nesse contexto e busca contribuir para o apontamento de aspectos possivelmente particulares desse relevo em uma área de 100 km² situada entre a Faixa de dobramentos Araçuaí e o Cráton São Francisco, na margem oeste da Serra do Cipó, Estado de Minas Gerais. As investigações morfológicas foram direcionadas no sentido de se identificar os controles litológicos, estruturais e hidrológicos para o desenvolvimento do carste na área de estudo.

Área de Estudo

A Serra do Cipó corresponde à porção meridional da Serra do Espinhaço (SdEM), que representa a faixa orogênica pré-cambriana mais extensa e contínua do território brasileiro (Almeida-Abreu e Renger, 2002). É edificada, sobretudo, em rochas quartzíticas paleo/mesoproterozóicas do Supergupo Espinhaço e se estende da parte central do Estado de Minas Gerais até ao norte do Estado da Bahia, na direção N-S. Na margem oeste da Serra do Cipó, no contato entre esta faixa orogênica e o Cráton do São Francisco, ocorrem os mármore do Grupo Bambuí, pertencentes à Formação Sete Lagoas (Figura 1). Na região, a altitude da área de ocorrência dos mármore varia de 700 m nos vales do rio Cipó e rio Parauninha até 1200 m nas porções mais elevadas dos maciços cársticos. Já a hipsometria da Serra do Cipó chega aos 1700 m em alguns pontos da área de contato.

As unidades geológicas da região encontram-se distribuídas em faixas alongadas, segundo a direção NNW-SSE (Figura 2). Segundo Silva *et al.* (2007), a Formação Sete Lagoas na área foco é composta por mármore impuros, cinzas e beges, que podem ocorrer associados ou isolados. Os planos de impureza são marcados por níveis centimétricos de composição pelítica (máximo cinco centímetros), ricos em minerais micáceos, descritos como clorita. Para os mesmos autores (Silva *et al.*, 2007), os mármore da região são essencialmente compostos por carbonato de cálcio, com cristais de calcita neoformados, associados a veios de quartzo. Sulfetos de ferro (pirita) também são observados localmente, bem como lâminas de clorita. De acordo com Oliveira *et al.* (1997), as intercalações conferem aos mármore locais aspecto bandado. Em relação ao acamamento, este se

mostra geralmente sub-horizantalizado, com caimento para oeste nas porções mais distais da frente de empurrão. Nas porções proximais desta, encontra-se extremamente

dobrado e obliterado. A espessura deste pacote de rochas foi estimada em 200 a 300 metros nos perfis geológicos (Silva *et al.*, 2007).

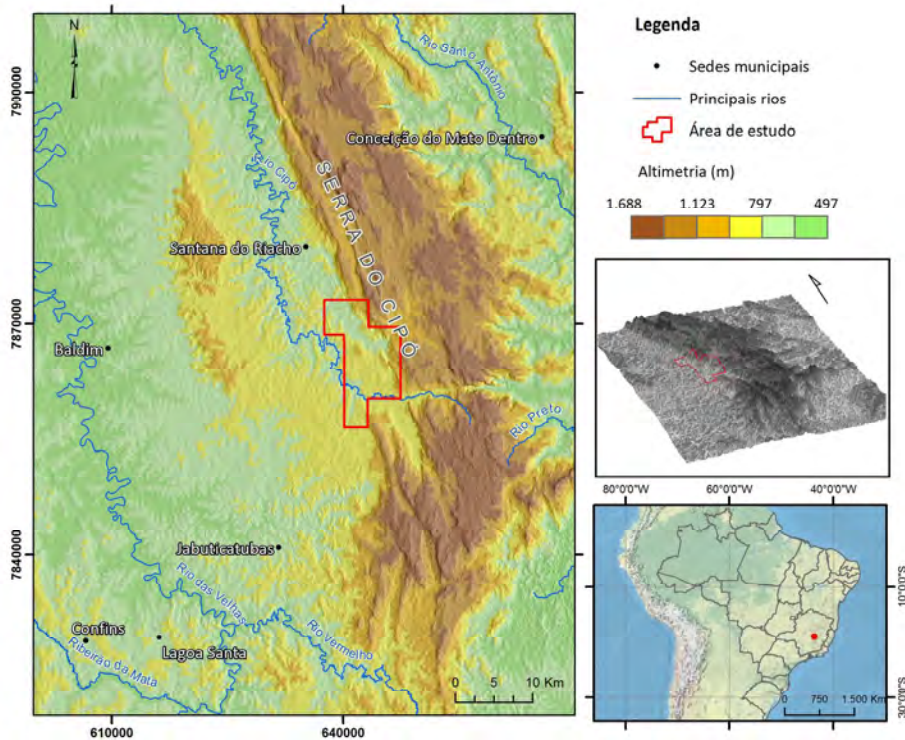


Figura 1 – Área de estudo.

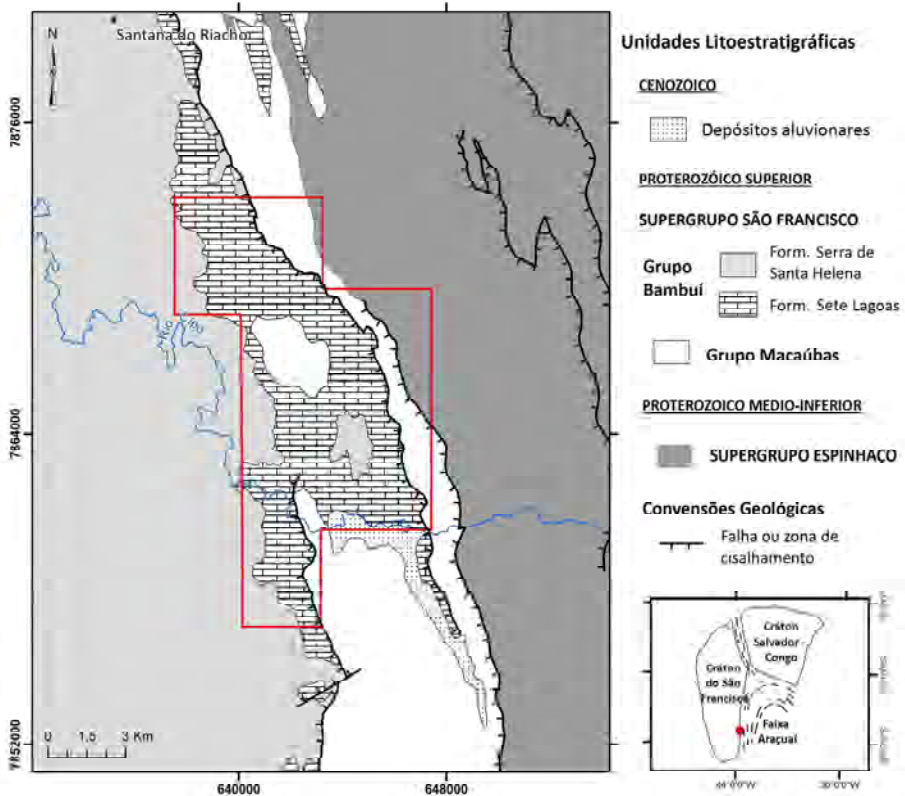


Figura 2 – Mapa Geológico simplificado da região da Serra do Cipó.

Em termos estruturais, os mármores da Formação Sete Lagoas se encontram em contato tectônico com os quartzitos micáceos e puros do Grupo Macaúbas, por falha de empurrão, com dobramentos associados, e em contato concordante com os metasiltilitos laminados da Formação Serra de Santa Helena (Silva *et al.*, 2007) (Figura 2). De fato, a geologia estrutural da área aponta para um modelo de cinturão de dobramento e cavalgamento, conforme proposto para a Serra do Espinhaço Meridional por diversos autores (Oliveira *et al.*, 1997). Na transição Cráton – Faixa de Dobramentos Araçuaí, a reativação tectônica durante o Evento Brasileiro (Neoproterozóico) gerou um notável aquecimento termal com deformação associada, além de empurrões de E para W, impondo o cavalgamento e superposição das sequências do Supergrupo Espinhaço às dos Grupos Macaúbas e Bambuí (Almeida Abreu, 1995). Esta forte tectônica compressiva resultou em direções estruturais NNW-SSE dos empurrões e dobras, além de transcorrências E-W (geralmente dextrais) (Almeida Abreu e Pflug, 1994). Os mármores da área foco encontram-se, segundo Silva *et al.* (2007), intensamente deformados próximos à frente de empurrão, apresentando dobras apertadas com padrão “caótico”.

O clima regional é do tipo tropical semiúmido afetado pela altitude. As chuvas se concentram no verão e os invernos tendem a ser secos. A média anual de pluviosidade circula entre 1.250 e 1.550 milímetros, sendo que a borda leste da Serra do Cipó, graças a fatores orográficos, é sensivelmente mais úmida do que a oeste (Magalhães *et al.*, 2015). A amplitude altimétrica influencia fortemente nas temperaturas – médias anuais entre 18° e 19° - e na vegetação. Nas terras altas, sobre os quartzitos do Supergrupo Espinhaço, predominam os campos rupestres. Nas áreas mais baixas da borda oeste, a vegetação típica é a de cerrado. Toda a borda oeste da Serra do Cipó está inserida na bacia hidrográfica do rio Cipó – sub-bacia do rio São Francisco.

Materias e Métodos

A análise do quadro litológico, estrutural, topográfico e hidrológico constituiu o ponto de partida na tentativa de compreender a geomorfologia cárstica da área de estudo. O material base do trabalho abrangeu os dados topográficos na escala 1:100.000 da Folha Baldim (IBGE, 1975), o mapeamento geológico na escala 1:30.000 (Silva *et al.*, 2007), ortofotos na escala 1:10.000 (CEMIG, 1989), fotografias aéreas na

escala 1:30.000 (CEMIG, 1989), imagem de satélite Landsat 7 ETM+ (2001), além de dados de elevação proveniente do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), bem como do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). A composição da base completa de dados da pesquisa foi realizada a partir de levantamentos e mensurações de campo, análises digitais e processamento de dados espaciais, através de ferramentas SIG.

A análise litológica ocorreu por meio da caracterização petrográfica do mármore, através da descrição macroscópica e microscópica de, respectivamente, dez e cinco amostras. Para esta última análise, foi utilizado microscópio petrográfico sob luz transmitida e refletida, no CPMT-IGC-UFMG. Para a geologia estrutural, inicialmente foram gerados *Hillshades*, por meio de processamentos no software ArcGis 9.3, dos dados ASTER (resolução espacial de 30 m), com azimute de iluminação de, respectivamente 45°, 315° e 360°. Estes foram gerados com o objetivo de se realçar lineamentos de diferentes direções. Também foi utilizada imagem de satélite Landsat 7 ETM+ (2001), nas composições RGB 754 e RGB 431, devido às características espectrais ressaltadas. Após a identificação dos lineamentos e posterior vetorização, foi gerado o diagrama de rosetas evidenciando os respectivos direcionamentos, por meio do programa *StereoNett*, versão 2.45. O estudo da drenagem no carste, por sua vez, envolveu o mapeamento das unidades hidrológicas elementares da área cárstica, como as dolinas, ressurgências e sumidouros, além das áreas de recarga e descarga hídrica, por meio de ortofotos (CEMIG, 1989). A identificação das áreas de recarga foi realizada por meio de modelo digital de terreno.

Investigações sobre a geomorfologia cárstica da área de estudo pautaram-se na análise das formas superficiais e subterrâneas. O estudo do exocarste baseou-se em observações de campo e fotointerpretação, resultando em um mapa das feições cársticas superficiais. Também envolveu a análise morfométrica da totalidade da superfície cárstica, bem como da caracterização individual das depressões fechadas, realizadas com base na metodologia utilizada por Ferrari *et al.* (1998) e Pereira (1998), por meio de técnicas de geoprocessamento.

Já o estudo do endocarste envolveu, inicialmente, o levantamento das cavernas registradas junto ao CECAV/IBAMA na região. Em seguida, foi realizado o levantamento espeleológico em campo e caracterização das cavidades encontradas, realizadas em três campanhas de campo, que totalizaram 30 dias de trabalhos. Uma

vez identificadas, as cavidades foram localizadas espacialmente, por meio de GPS Garmin 60CSX, e descritas em uma ficha padronizada, de acordo com seus aspectos morfológicos, estruturais, hidrológicos e dos depósitos. Quatorze cavernas da amostra total foram selecionadas para mapeamento no grau BRCA 4C, e para estudos geoespeleológicos de detalhe.

Resultados e Discussões

O Carste Superficial

A superfície cárstica junto aos mármore da borda oeste da Serra do Cipó encontra-se limitada por rochas não-carbonáticas (Figura 2). A localização das principais feições exocársticas da área está representada na Figura 3. Em micro e meso escala, as lapiás ou *karren*

exibem presença marcante nos afloramentos rochosos da área, possuindo concentração maior nos maciços situados na porção leste da mesma. As tipologias identificadas foram: *Kamenitzas*, microfissuras, *rillenkarrren* e *rinnenkarren*. As primeiras consistem em formas circulares ou ovais, de ocorrência pouco comum na área, localizadas ao longo de pequenas fraturas, em geral no topo dos maciços, com diâmetro médio de 0,5 m. As microfissuras ocorrem controladas pelos planos de foliação da rocha, sendo em geral, sub-horizotalizadas. *Rillenkarrren* representam o tipo mais comum de lapiás na área, com dimensões centimétricas. Já os *rinnenkarren* alcançam dezenas de metros de comprimento nos afloramentos, e dimensões decimétricas de largura e profundidade. Possuem ocorrência comum, em especial nas bordas dos maciços.

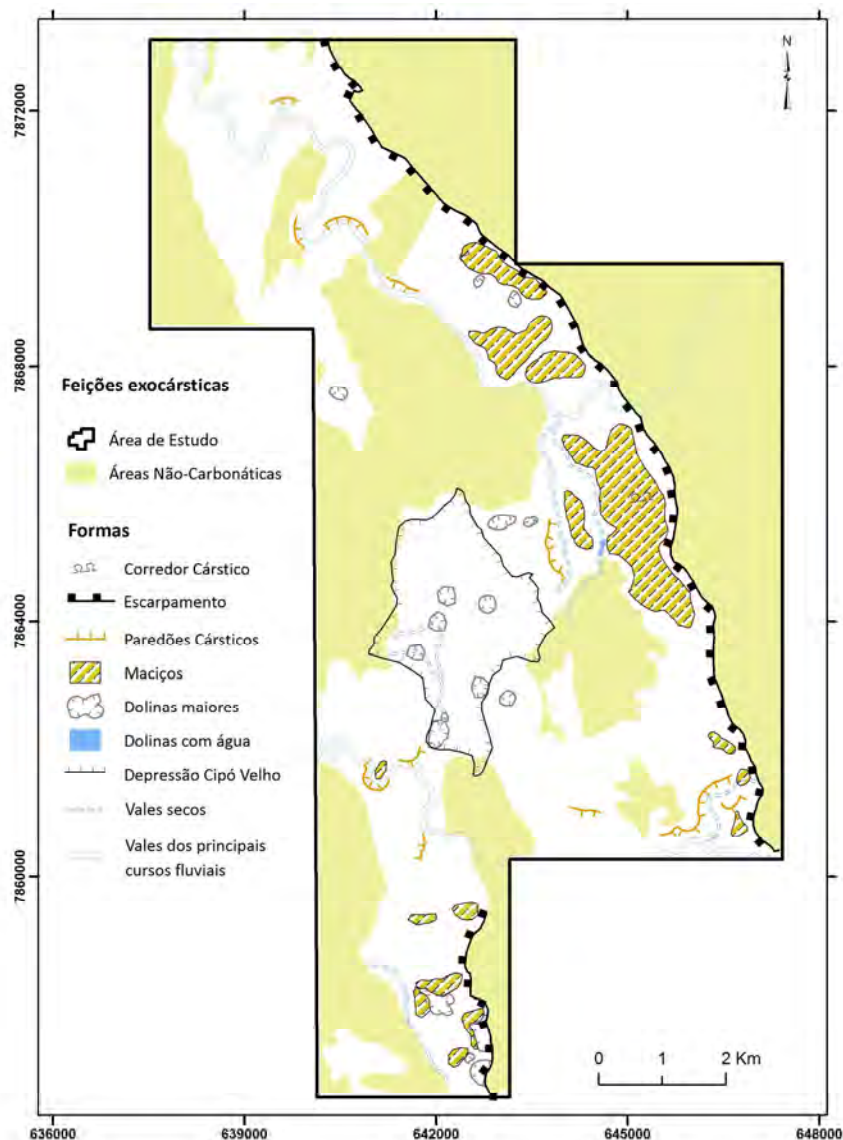


Figura 3 – Localização das feições exocársticas da área de estudo.

Apesar de não apresentarem ocorrência expressiva no polígono de estudos, as depressões fechadas constituem feições de extrema importância para compreensão da dinâmica cárstica local. A partir de fotointerpretação, foram identificadas 19 depressões fechadas na superfície cárstica, enquanto que, nos trabalhos de campo na área, foram cadastradas mais 20. As 39 depressões no total (incluindo a grande depressão Cipó Velho) conferem a esta área uma densidade de depressões de 0,81/Km², considerando-se apenas a superfície cárstica. Deve-se ressaltar, porém, que não se descarta a ocorrência de um número superior dessas feições em escala não identificável nas bases cartográficas utilizadas.

As depressões mapeadas foram classificadas em duas tipologias principais, quanto à forma de absorção do escoamento superficial: depressão com infiltração concentrada e com infiltração difusa. O primeiro caso corresponde às dolinas individuais identificadas em campo, que consistem em depressões simples, de morfologia suave, e dimensões reduzidas, apresentando área planimétrica variando de 28,0 a 78,0 m², com profundidade entre 1,0 e 3,0 m. O contorno em planta é geralmente regular, de formato circular ou oval, com fundo côncavo. Não se evidenciam ravinas ou canais incipientes no interior dessas depressões. Já aquelas com infiltração difusa correspondem às dolinas compostas (uvalas), onde notam-se múltiplos pontos de

absorção das águas superficiais para o meio subsuperficial e subterrâneo. Estas depressões apresentam área planimétrica maior do que as anteriores, variando de 0,003 a 0,06 km² e contorno assimétrico, com formas planimétricas que variam de ovais a alongadas, em alguns casos com mais de um direcionamento principal da mesma depressão. Apresentam, de modo geral, fundo irregular e alguns canais de escoamento superficial intermitente em seu interior. Esta tipologia de depressão ocorre muitas vezes limitada por afloramentos, como paredões ou borda de maciço.

Em relação às formas residuais calcárias, foram identificados e mapeados dois tipos principais: maciços e paredões. Dentre essas, os maciços são as feições superficiais que mais se destacam nesta paisagem cárstica. De ocorrência praticamente limitada à faixa de contato com a escarpa da Serra do Espinhaço Meridional, esses possuem dimensões muito variadas, em termos de altura e largura, e também diferem quanto à simetria das suas formas. Possuem amplitude altimétrica variando de 100 a 225 metros, e juntos somam uma área de 4,0 km², sendo que somente o maciço Morro da Pedreira possui 2,0 km² de área (Figura 4). Este consiste na principal forma residual da área, com 3,4 km de comprimento, 1,0 km de largura máxima, e direcionamento NW-SE. Os maciços dessa superfície apresentam vertentes íngremes, sendo comum a ocorrência de rampas de colúvio em suas bases.



Figura 4 - Morro da Pedreira, principal maciço da área de estudo.

Os paredões, na área de estudo, consistem em escarpamentos de mármore presentes nas margens dos vales fluviais, chegando a atingir até 80 metros de altura. Podem ser interpretados, conforme colocação de Ford e Williams (2007), como uma consequência morfológica de grandes descargas de águas allogênicas em áreas cársticas. No caso da área de estudos, pode-se considerar que o expressivo gradiente hidráulico entre as áreas fonte dos rios allogênicos (SdEM) e a superfície cárstica contribuiu para a incisão vertical dos vales do rio Parauninha e rio Cipó nos mármore, formando paredões que atualmente permanecem preservados em alguns trechos. Cabe ressaltar que corredores cársticos também foram identificados, especialmente no interior do maciço Morro da Pedreira. Estes se encontram

limitados por paredões, apresentam morfologia retilínea - devido ao controle estrutural - e indicam possíveis áreas de colapso do teto de cavidades.

Por fim, os vales secos presentes na superfície cárstica de estudo estão diretamente associados a áreas de captação allogênica. A presença dos mesmos indica diminuição da vazão a jusante, que, na área de estudos, está relacionada à presença de sumidouros, que drenam o fluxo superficial de forma concentrada, ou a uma infiltração dispersa ao logo do vale, por meio de vários pontos de absorção da drenagem. Foi verificada a intermitência dos fluxos no interior dos vales secos ao longo dos períodos de estiagem e umidade, sendo que, nesse último, estes se tornaram ativos. Alguns exemplos de formas cársticas superficiais na área de estudo são apresentados na Figura 5.

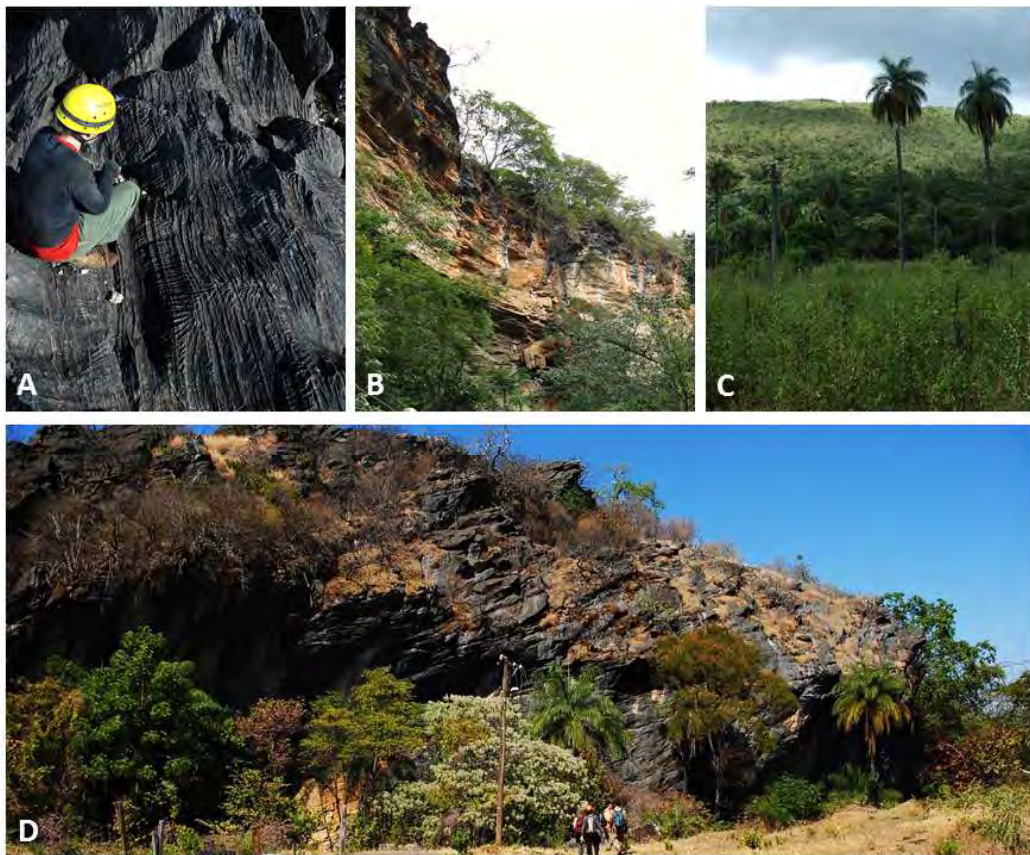


Figura 5 – Feições cársticas superficiais na área de estudo. A) Rillenkarrren e microfissuras no topo de maciço; B) Paredão da Lapa da Sucupira; C) Depressão cárstica do Buracão, no primeiro plano; D) Maciço Bocaina. Fotos: Vilmar Silva (A), Tatiana Souza (B e C), Allan Calux (D).

Caracterização Morfométrica da Superfície Cárstica

Os parâmetros morfométricos considerados no estudo foram: área planar, área da superfície, índice de rugosidade (IR), altitude, amplitude e declividade. O índice de rugosidade (IR) consiste em um parâmetro que indica as irregularidades de determinada superfície,

sendo considerado um discriminador para classificação de áreas cársticas tropicais (Dray, 1979; Ferrari *et al.*, 1998). Segundo esse método, superfícies planas apresentam índice igual a 1, enquanto que, nas superfícies irregulares, este tende ao infinito. Os baixos resultados obtidos para IR, amplitude do relevo

e declividade média da superfície cárstica na área de estudos (Tabela 1) expressam numericamente o caráter aplainado da mesma, remetendo também ao baixo grau de dissecação do relevo nessa área. Como já mencionado, esta característica é consequência direta da baixa densidade de drenagem nessa superfície cárstica, que ocorre em função dos pontos de infiltração das águas de superfície para o meio subterrâneo. Tal aspecto relaciona-se às características morfológicas das vertentes dessa superfície que lhes confere baixo gradiente hidráulico, promovendo um também baixo potencial erosivo à rede de drenagem superficial.

Em relação às depressões cársticas presentes na área carbonática, os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 2. Esta superfície apresenta uma densidade de 0,81/ km², considerando-se todas as 39 depressões identificadas. A razão de dolinamento (RD), expressa

pela razão entre a soma da área total das depressões e a área carbonática, indicou que 13,78% desta superfície é ocupada por depressões. O índice de dolinamento (ID), por sua vez, definido por Williams (1971), representa o inverso da RD, e indica que quanto maior a área das depressões cársticas, mais o índice tende a 1. O valor para esse parâmetro foi de 7,25. Ressalta-se que, para o cálculo dos dois últimos parâmetros apresentados, a área das dolinas individuais não foi incluída, por ausência de dados completos. Pelo fato destas apresentarem valores de área muito pequenos (em média 0,00005 km²), acredita-se que esta ausência não tenha interferido na confiabilidade dos índices obtidos. Dessa forma, os resultados para DD, RD e ID indicaram valores baixos não apenas para o número das depressões presentes na superfície carbonática de estudo, como também para a área que as mesmas ocupam (Tabela 2).

Tabela 1: Parâmetros morfométricos para a superfície cárstica.

Área planar (km ²)	Área da superfície (Km ²)	Altitude máxima (m)	Altitude mínima (m)	Declividade Máxima (graus)	Declividade Mínima (graus)
48,31	48,92	1027	721	45,99	0
Índice de Rugosidade: 1.01		Amplitude: 306 m		Declividade média: 6,98°	

Tabela 2: Parâmetros morfométricos para a totalidade das depressões cársticas.

Número total de depressões cársticas	39
Área total da superfície carbonática	48, 31 km ²
Soma da área total das depressões ¹	6,63 km ²
Densidade de Depressões (DD)	0,81/km ²
Razão de Dolinamento (RD)	13,78 %
Índice de Dolinamento (ID)	7,25

¹ Não inclui os dados das dolinas individuais. A área da depressão Cipó Velho foi incluída, subtraindo-se as áreas das depressões compostas presentes em seu interior.

O Carste Subterrâneo

Por meio dos trabalhos de prospecção espeleológica, foram identificadas e caracterizadas 161 cavidades naturais subterrâneas, incluindo-se abrigos (cavidades que possuem desenvolvimento linear menor que a altura de sua entrada) e cavernas (cavidades que possuem desenvolvimento linear maior ou igual ao da altura de sua entrada). Estas estão concentradas na porção oeste da área, próximo ao escarpamento que

marca o contato dos mármores com os quartzitos da Serra do Cipó, especialmente no Maciço Morro da Pedreira (Figura 4), que abriga 61% das cavidades cadastradas (Figura 6).

Quanto às características das cavidades, pode-se dizer que, embora exista uma elevada densidade das mesmas na superfície carbonática, com ocorrência de 3,33 cavidades por km², estas possuem, em geral, pequeno desenvolvimento. Juntas, somam 5.383,5

metros de projeção horizontal, com média de 33,43 metros de desenvolvimento. Em 85% das cavidades, a projeção horizontal não ultrapassa os 30 metros, e em apenas 4% delas esse parâmetro é superior a 100 metros (Tabela 3). Acredita-se que esse aspecto pode estar relacionado ao fato de a maioria consistir, possivelmente, remanescentes de paleocavidades maiores já existentes na área, denominadas como “cavernas de passagem única” (*single-passage caves*), segundo Palmer (2007). Ou seja, trata-se de segmentos preservados de paleocavidades que eram maiores, mas que, com o passar do tempo geomorfológico, já foram parcialmente destruídas pelo desabamento de partes de seu teto e paredes.

Sobre a inserção na paisagem, as cavidades da área são encontradas no topo, na alta, média e baixa vertente dos maciços, e nas áreas de planície

ou terraços, ocorrendo em todos os compartimentos geomorfológicos da região, com destaque para o planalto onde os grandes corpos rochosos afloram. Em relação à distribuição altimétrica dessas feições, há uma concentração considerável das mesmas nas altitudes mais elevadas, ou seja, acima dos 900 metros.

As observações referentes à geologia estrutural evidenciaram que em 77% das cavidades em que foi possível realizar essa interpretação (30% do total), as fraturas verticais e subverticais exercem controle sobre o desenvolvimento das mesmas, e em 23% dos casos, esse controle é realizado por planos de foliação da rocha.

Sobre a hidrologia, a maioria das cavidades da região (55%) é seca. Em 42% destas, ocorre o gotejamento e/ou escoamento intermitente de água, e apenas 3% das cavidades prospectadas estão associadas a cursos d’água.

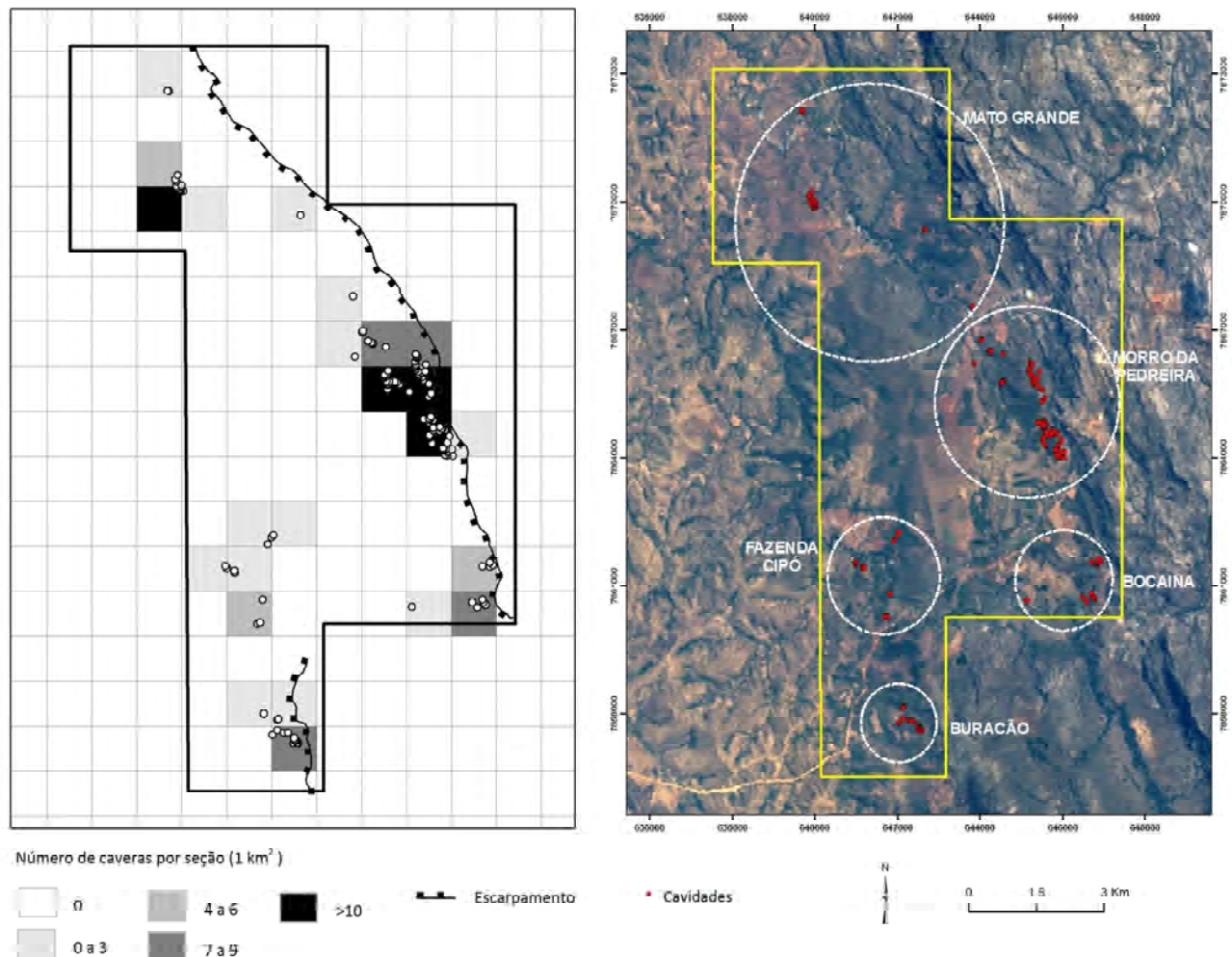


Figura 6 – Distribuição das cavidades naturais subterrâneas na área.

Tabela 3: Cavidades com desenvolvimento aproximado superior a 100 metros na área de estudo e suas características morfológicas.

Nome	UTM E	UTM N	Altitude (m)	Projeção Horiz. aprox. (m)	Padrão Planimétrico	Morfologia Condutos
Gruta da Viola	645345	7865862	867	615	Retilíneo	Fissural
Gruta V G4 (Gruta Teto de Seixos)	645306	7865742	874	500	Retilíneo; Network	Fissural
Gruta XIX G5 (Gruta do Brejo)	644579	7865489	810	351	Meandrante	Keyhole
Gruta do Salitre	642642	7869360	702	350	Retilíneo; Network	Fissural; Tubular
Gruta Bocaina V	646691	7861544	929	339	Anastomosado	Lenticular
Gruta V G5 (Gruta dos Morcegos)	644247	7866499	804	168	Retilíneo; Network	Fissural
Gruta VII G2 (Gruta Pináculo da Fenda)	645728	7864546	943	120	Retilíneo	Fissural
Gruta III G3 (Gruta Consolo do Raul)	645535	7864886	935	100	Network	Fissural
Gruta VII G4	645417	7865891	829	100	Retilíneo	Fissural
Gruta X G4	645267	7865826	935	100	Network	Fissural
Gruta X G5 (Gruta Labirinto do Sumidouro)	644532	7865776	805	100	Network	Fissural
Gruta da Travessia	639716	7872124	771	100	Retilíneo	Fissural

Do ponto de vista morfológico, a maioria das cavidades apresenta padrão planimétrico e geometria dos condutos inibida, uma vez que constituem, provavelmente, pequenos fragmentos de paleocavernas maiores. A morfologia tubular das seções foi observada em 7% dos registros (Figura 7a). Já o padrão retilíneo foi observado em 32% das cavidades. Além disso, dentre as cavernas que tinham um padrão bem definido, 12% apresentaram padrão labiríntico do tipo *network* (Palmer, 1991), incluindo algumas das maiores cavernas da área (Tabela 3). Esses dados evidenciam claramente o controle estrutural exercido no desenvolvimento dessas feições, fato também corroborado pela morfologia destes condutos, que se apresenta como fissural em 42% dos casos

(Figura 7b). As cavidades cadastradas possuem padrão de desenvolvimento predominantemente horizontal, e apenas 1% destas se desenvolveram verticalmente. Ainda em relação à morfologia, observa-se a presença comum de mesoformas do tipo bolsas de dissolução (*solution pockets*, segundo Palmer, 2007) no teto e paredes das cavidades. Estas bolsas indicam circulação freática sob pressão durante a espeleogênese e, na área de estudo, geralmente ocorrem associadas a fraturas, bem como à presença considerável de paleopisos em níveis altimétricos diferenciados. Os paleopisos (Figura 7c), ou partes destes que permanecem preservados, encontram-se cobertos por capa estalagmítica que contribui para sua maior resistência.

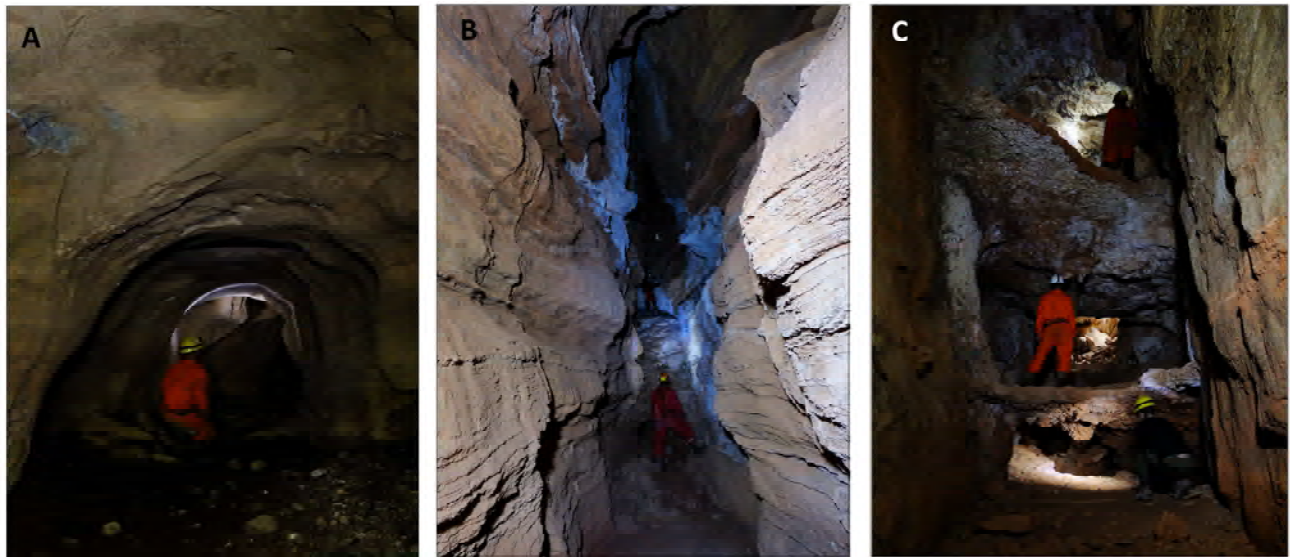


Figura 7 – A) Geometria tubular na Gruta Bocaina V; B) Geometria fissural na Gruta da Viola; C) Níveis de paleopisos na Gruta Teto de Seixos. Fotos: Rafael Camargo.

Em relação aos depósitos clásticos, cabe destacar a presença marcante de brecha nas cavernas de estudo. Estas são compostas por uma matriz silto-argilosa de coloração amarronzada e alarajada, onde comumente são encontrados seixos de quartzo sub-angulosos a sub-arredondados. Matações de variadas dimensões, provenientes de abatimento do teto ou paredes, também são recorrentes no interior das cavidades e em seu ambiente externo. Raízes de gameleiras são comuns, constituindo agente do intemperismo físico nas cavernas.

Fatores Controladores

A caracterização da petrografia macro e microscópica da rocha, conjuntamente com os estudos geológicos realizados anteriormente na área (Oliveira *et al.*, 1997; Silva *et al.*, 2007), possibilitaram concluir que o substrato rochoso da região é formado por mármore impuros, neoproterozóicos, cinzas e beges, com concentrações relativamente elevadas de quartzo, que chegam a representar até 40% da composição aproximada da rocha. A calcita apresenta uma concentração média aproximada de 64% nas amostras analisadas microscopicamente. A dolomita teve presença pouco comum nas amostras avaliadas. A concentração relativamente baixa de minerais carbonáticos no universo amostral analisado representa uma característica que pode ser tomada como inibidora de uma carstificação mais intensa na região. Tal aspecto

pode estar associado, por exemplo, à baixa ocorrência de depressões cársticas, que apresentam densidade de 0,81/km² na área. Para fins comparativos, esse valor é bem inferior ao encontrado na depressão poligonal Macacos-Baú, no carste de Lagoa Santa (MG), onde Piló (1998) registrou densidade de 18,9/km², e aos valores mensurados por Karmann (1994) para o carste do Alto Vale do Rio Ribeira (SP), que apresenta densidade de dolinas de 7,72 e 13,08/Km². Estes últimos valores, segundo Karmann e Ferrari (2002), seriam típicos do carste tropical.

Apesar da ausência de estruturas primárias e da inexistência da porosidade intergranular, em função do crescimento e recristalização mineral pelo metamorfismo, os mármore da borda oeste da Serra do Cipó possuem estruturas secundárias muito desenvolvidas, capazes de possibilitar a infiltração da água para o interior da rocha, e, conseqüentemente, o desenvolvimento dos processos cársticos. Os direcionamentos predominantes dos lineamentos são N20-30W, N40-50W e N50-60E (95 medidas), enquanto as fraturas ocorrem preferencialmente em N15-20W e N60-65W (90 medidas) (Figura 8). As formas exocársticas, por sua vez, se desenvolveram principalmente em N10-15W (33 medidas), enquanto que os condutos endocársticos apresentam direção principal em N15-25W e N35-40W (123 medidas) (Figura 8). Apesar da evidente influência direta das fraturas, perceptível também pela macro e meso morfologia das cavidades, não se deve descartar

o papel dos planos de foliação nesse condicionamento. Pode-se afirmar, portanto, que a área de estudo possui um padrão estrutural de direção NNW, imposto pelo

evento brasileiro e coincidente, por sua vez, com o direcionamento geral das feições cársticas na área.

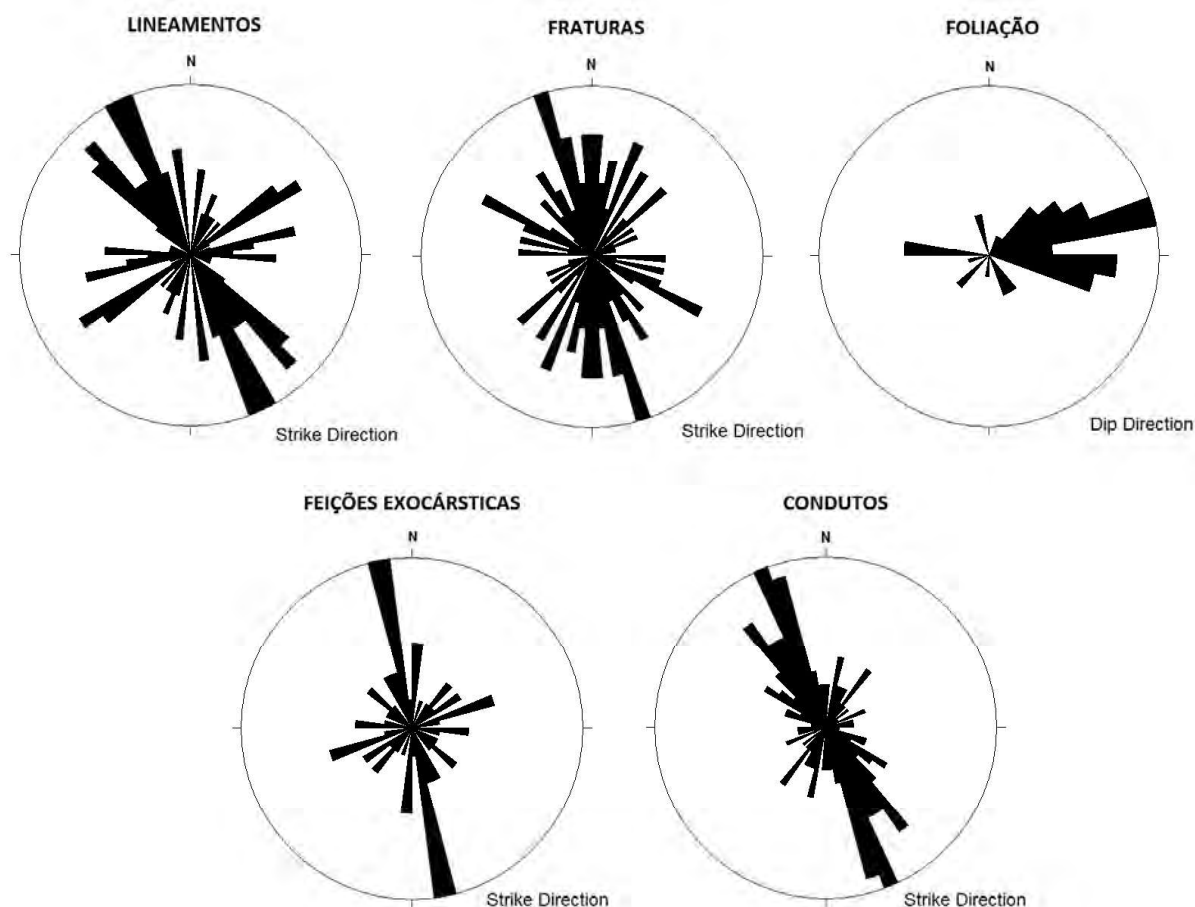


Figura 8 – Diagramas de rosetas representando as medidas estruturais e o direcionamento das feições cársticas na área de estudo.

Em relação à influência dos aspectos hidrológicos no desenvolvimento cárstico da área, considera-se que a drenagem alogênica proveniente das áreas não-carbonáticas do entorno representa um fator de controle direto sobre a gênese das cavernas situadas, em especial, na área de contato com os quartzitos da Serra do Espinhaço Meridional (Figura 2). Isto explica também os depósitos de brechas encontrados no interior das cavidades, pois estas teriam sido carreadas da serra e depositadas no interior das cavernas graças a recarga alogênica. Vale ressaltar que esse tipo de recarga tende a ser altamente agressiva para as áreas carbonáticas, uma vez que contém, em geral, baixa concentração de sólidos dissolvidos e alta acidez. Dentre as particularidades da drenagem alogênica no desenvolvimento cárstico, destaca-se a maior velocidade com a qual esta tende a alargar os protocondutos, bem como o fato da mesma

poder determinar o padrão morfológico das cavidades, normalmente desenvolvidas, nesse caso, na “fronteira de corrosão” subterrânea (*border corrosion*), descrita por Gams (1965). Formas como bolsas de dissolução, feições anastomóticas, além do padrão planimétrico labiríntico do tipo *network* e anastomosado, típicos das cavernas da porção leste da área de estudo, podem ter desenvolvimento associado à ocorrência de inundações episódicas, que promovem elevada descarga hídrica no sistema. Como coloca Palmer (2001), o desenvolvimento das feições endocársticas como as mencionadas acima ocorre, em muitos casos, em condições de fluxo rápido, decorrente de inundações alogênicas na zona epifreática, como se acredita ser o caso da área de estudo. Dessa forma, considera-se que as características morfológicas do endocarste na porção leste da superfície carbonática de estudo estão diretamente associadas ao fluxo

alogênico proveniente dos quartzitos litiformes (Figura 2) da Serra do Espinhaço Meridional.

Acredita-se que o elevado gradiente hidráulico imposto pelos escarpamentos de contato, bem como a curta distância percorrida (L) na área carbonática pelos fluxos alogênicos, permitiram que, em condições de inundação, esse fluxo penetrasse rapidamente no sistema cárstico. Essa penetração ocorreu através das descontinuidades estruturais da rocha, a partir de sumidouros, sob condições de elevada descarga hídrica (Q) e alta agressividade química. A injeção de águas agressivas nas várias aberturas iniciais previamente formadas, com elevada relação Q/L (Palmer 2001, 2007), teria permitido que todas as aberturas maiores que um determinado tamanho mínimo fossem ampliadas em taxas similares, produzindo, assim, padrões labirínticos, conforme colocação de Palmer (2007) para esse tipo de controle. Portanto, considera-se que a recarga alogênica, conjuntamente com a estrutura geológica bem desenvolvida dos mármore locais, representam elementos determinantes da configuração endocárstica da área.

É importante ressaltar que as características mencionadas aplicam-se apenas às feições localizadas nos maciços cársticos na porção leste da superfície carbonática, adjacentes à SdEM. A formação e desenvolvimento do carste da porção oeste da área, como na região da Fazenda Cipó (Figura 6), possivelmente não foram influenciados por esse tipo de recarga. Apesar de também estar circundada por rochas não-carbonáticas, o gradiente hidráulico nessa região dificilmente teria sido igual ou superior ao encontrado na porção leste, cuja origem associa-se à tectônica brasileira de empurrão. Sendo assim, aquele dificilmente teria condições de gerar uma elevada descarga hídrica (como no caso da borda leste) sobre essa superfície. Tal configuração não possibilitaria, por exemplo, a formação de cavernas labirínticas. Deste modo, justifica-se a razão das cavernas de oeste, de modo geral, serem muito pouco desenvolvidas em termos de projeção horizontal, somando somente 120 metros de desenvolvimento, além de representarem apenas 7% do universo espeleológico da área de estudo (Figura 6). Justifica ainda o fato das mesmas, em sua maioria, apresentarem padrões planimétricos inibidos. Logo, nesta porção oeste, acredita-se em uma contribuição predominante de fluxo autogênico, por meio de recarga em dolina. Portanto, considera-se

que o contexto geográfico diferenciado nas porções leste e oeste dessa superfície cárstica de estudo acabou contribuindo para a ocorrência de tipos diferenciados de recarga hídrica, e, conseqüentemente, para a formação de feições endocársticas diferenciadas nestas duas áreas.

Nota-se, assim, a individualização de duas unidades cársticas na área, aqui denominadas: *unidade marginal* e *unidade interiorana* (Figura 9). Processos diferenciados de gênese e evolução do carste nessas duas áreas resultaram em padrões morfológicos também diferenciados no carste das mesmas.

A unidade marginal corresponde à porção do extremo leste da área, em contato direto com os quartzitos da Serra do Cipó. Trata-se da área mais afetada pela tectônica neoproterozóica, apresentando mármore mais alterados pela recristalização mineral, com geologia estrutural mais desenvolvida em relação à porção oeste. É composta por maciços cársticos que abrigam a grande maioria das cavernas da região e as mais desenvolvidas em termos de projeção horizontal e variedade de formas endocársticas, em meso e micro escala. Os principais fatores controladores desse maior desenvolvimento possivelmente se associam à porosidade secundária bem desenvolvida, bem como à recarga alogênica, associada ao alto gradiente hidráulico, com elevada relação Q/L. Os episódios de forte inundação nestas condições possivelmente favoreceram a formação de condutos paralelos e adjacentes, como na Gruta da Viola, Pináculo da Fenda e Consolo do Raul.

A unidade cárstica interiorana, por sua vez, corresponde à porção oeste da área de estudo, tendo sido menos afetada pela tectônica neoproterozóica do que a porção leste. Este aspecto ocasionou a formação de um relevo pouco dissecado, onde se desenvolvem dolinas, paredões cársticos e pequenas cavidades. Acredita-se que a recarga nessa unidade morfológica tenha ocorrido predominantemente por meio de dolinas, com grande contribuição autogênica. O baixo gradiente hidráulico nesses planaltos, se comparado ao da SdEM, não criou condições de elevada descarga, necessárias para a geração de cavernas labirínticas, formando, assim, cavidades pouco desenvolvidas. Acredita-se que a menor densidade de descontinuidades estruturais dessa porção oeste, devido ao maior distanciamento em relação à área de maior deformação (contato), também pode ter influenciado no baixo desenvolvimento dessas cavidades.

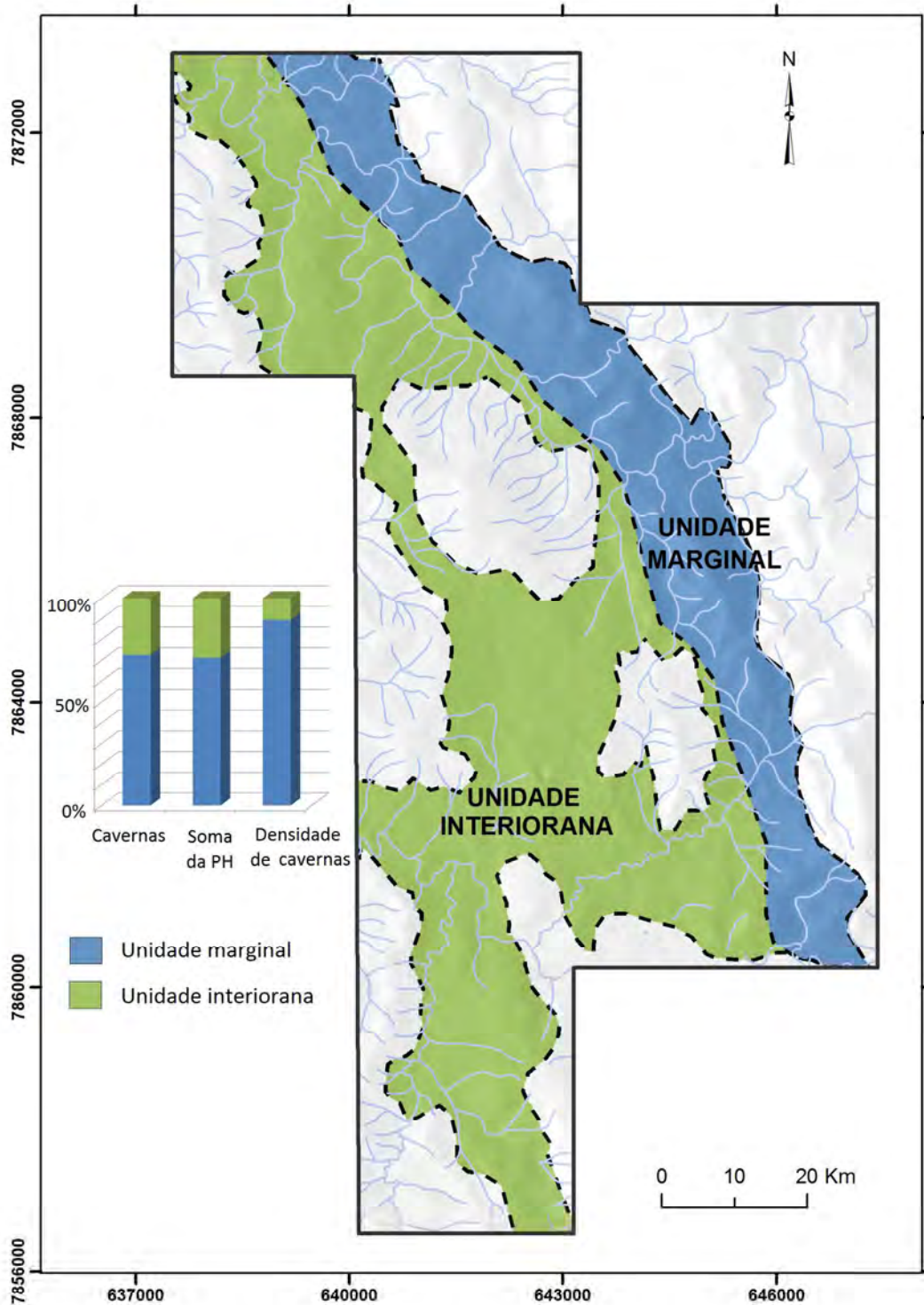


Figura 9 – Localização das unidades cársticas.

Conclusões

A área de ocorrência dos mármore na borda oeste da Serra do Cipó apresenta um quadro geográfico bastante complexo no que se refere à sua conformação fisiográfica. As características morfo-estruturais, em

especial, se apresentam claramente diferenciadas em função da maior ou menor proximidade da faixa de dobramentos. Esse aspecto remete ao alto grau de influência da estruturação brasiliana sobre o modelado cenozóico nessa região, e, conseqüentemente, sobre a dinâmica cárstica na área. Diante desse contexto,

verifica-se que as diferenciações morfo-estruturais na borda oeste da Serra do Cipó implicam em diferentes formas de atuação e ocorrência dos fatores controladores do desenvolvimento cárstico na área. A *unidade marginal*, graças ao contato direto com os quartzitos da Serra do Espinhaço Meridional e com suas águas, apresenta um carste muito mais desenvolvido, enquanto que a *unidade interiorana*, por ter sido menos afetada pelos dobramentos oriundos do Brasileiro, e pela recarga predominantemente autogênica, possui um conjunto de formas cársticas menos pronunciadas, em termos de diversidade, dimensões e padrões.

Estas conclusões permitem traçar considerações mais amplas sobre o desenvolvimento de carste em mármore, visto que a área de estudo segue o exemplo do que é defendido para a ocorrência de formas cársticas nesse litotipo (Lauritzen, 2001; Skoglund e Lauritzen, 2011). Ou seja, mesmo em regiões tropicais como a Serra do Espinhaço Meridional, feições cársticas em mármore tendem a se desenvolver de forma mais acentuada sob condições específicas, sendo elas: porosidade secundária (estrutural) bem desenvolvida, recarga autogênica e alto gradiente hidráulico.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES (Projeto CAPES COFECUB 869-15) e ao CNPq (561715/2008-4) pelo apoio financeiro. Agradecemos ainda ao Parque Nacional da Serra do Cipó, principalmente a sua direção, por todo apoio logístico para os trabalhos de campo.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA ABREU, P. A.; PFLUG, R. The geodynamic evolution of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Zbl. Geol. Paläont.*, Teil I, H. 1/2, p. 21-44, 1994.

ALMEIDA ABREU, P. A. Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais): O Rifte, a Bacia e o Orógeno. *Geonomos - Revista de Geociências*. v 3, n 1, p. 1-18, 1995.

ALMEIDA ABREU, P.A.; RENGER, F.E. Serra do Espinhaço Meridional: um orógeno de colisão do mesoproterozóico. *Revista Brasileira de Geociências*, 32, p. 1-14, 2002.

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (2009). **Base digital de dados geoespacializados de regiões cársticas do Brasil**. Instituto Chico Mendes. Brasília.

Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/cecav/projetos-e-atividades/provincias-espeleologicas.html>.

DRAY, M. J. Surface roughness as a discriminator of tropical karst styles. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF, 32, p. 1-8, 1979.

FERRARI, J. A.; HIMURA, S. T.; KARMANN, I. Caracterização Morfométrica de uma Superfície Cárstica do Vale do Ribeira, São Paulo (Núcleo Cablocos - PETAR). *Revista do Instituto Geológico*, 19, p. 9-17, 1998.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P.W. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. Chichester: Wiley, 2007, 561p.

GAMS, I. Types of accelerated corrosion. O. Stelcl (ed.), Problems of the speleological research. In: **Anais International Congress of Speleology**, Brno, Czechoslovakia, 1965, p. 133-139.

IBGE (1975). **Folha Baldim/MG. SE. 23-Z-ZVIZ1**. Rio de Janeiro: IBGE (Mapa topográfico. Escala 1:100.000).

KARMANN, I. **Evolução Dinâmica Atual do Sistema Cárstico do Alto Vale do Ribeira de Iguape, Sudeste do Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências/USP, São Paulo. 1994.

KARMANN, I.; FERRARI, J. A. (2002). Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), sul do Estado de São Paulo. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A.; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. (Edit.) **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. DNPM e SIGEP, Brasília: p. 401-413.

LAURITZEN, S.E. Marble stripe karst of the Scandinavian Caledonides: An end-member in the contact karst spectrum. *Acta Carsologica*, v. 30, n. 2, p. 47-79, 2001.

MAGALHÃES Jr., A. P.; BARROS, L. F. P.; FELIPPE, M. F. (2015). Southern Serra do Espinhaço: The Impressive Plateau of Quartzite Ridges. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (org). **Landscapes and Landforms of Brazil**. Editora Springer, Dordrecht: p. 359 - 370.

OLIVEIRA, M. J. R.; FOGAÇA, A. C. C.; FONSECA, E. da. (1997). **Geologia da Folha Baldim**. GROSSI-SAD, J. H.; LOBATO, L. M.; PEDROSA-SOARES, A. C. & SOARES-FILHO, B. S. (coordenadores e editores). PROJETO ESPINHAÇO EM CD-ROM (textos, mapas e anexos). Belo Horizonte: COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais, p. 2437-2531.

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

- PALMER, A. N. Dynamics of Cave Development by Allogenic Water. *Acta Carsologica*, v. 30, p. 13-32, 2001.
- PALMER, A. N. **Cave Geology**. Dayton, Ohio: Cave Books, 2007, 454p.
- PEREIRA, R.G.F. de A. **Caracterização Geomorfológica e Geoespeleológica do Carste da Bacia do Rio Una, Borda Leste da Chapada Diamantina (Município de Itaetê, Estado da Bahia)**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, USP, São Paulo, 1998.
- PILÓ, L. B. **Morfologia cárstica e materiais constituintes: dinâmica e evolução da depressão poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG**. Tese de Doutorado. Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 1998.
- SILVA, G. L., FREITAS, M. A.; SILVEIRA, V. N. **Geologia da região centro-oeste do Parque Nacional da Serra do Cipó, MG: Municípios de Jaboticatubas e Santana do Riacho**. Monografia. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- SKOGLUND R.O., LAURITZEN S.E. Subglacial maze origin in low-dip marble stripe karst: examples for Norway. *Journal of Cave and Karst Studies*, v. 73, n. 1, p. 31-43, 2011.
- WILLIAMS, P.W. Illustrating morphometric analysis of karst with examples from New Guinea. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge*, v. 15, p. 40-61, 1971.