

PKS

PUBLIC
KNOWLEDGE
PROJECT

REVISTA DE
GEOGRAFIA

Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPE

OJS

OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

<https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia>

MORFOLOGIA E GÊNESE DE CAVERNAS DA SERRA SUL - PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS/PA

Adam Barros Fernandes¹, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2686-278X>

Ricardo Perobelli Borba², Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1162-409X>

Iuri Viana Brandi³, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8593-6654>

Ramon Nunes Araújo⁴, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5948-8210>

Gabrieli Santos Boulhosa⁵, Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8347-0838>

¹ Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil*

² Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil**

³ Vale S.A., Nova Lima, MG, Brasil***

⁴ Vale S.A., Nova Lima, MG, Brasil****

⁵ Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, Brasil*****

Artigo recebido em 19/01/2024 e aceito em 26/03/2024

RESUMO

Os estudos espeleológicos realizados nas Serras de Carajás vêm mostrando cada vez mais a importância desse local quanto a abundância e diversidade de cavernas em litotipos ferríferos. No âmbito desta temática, o presente trabalho tem como objetivo estudar as feições morfológicas/geométricas, relação da hipsometria com a ocorrência de cavernas, estruturas geológicas, litotipos e espeleometria, com o intuito de correlacionar com os aspectos genéticos de uma amostra de cavernas existentes na Serra Sul, Província Mineral de Carajás (PA). Para que isso fosse possível, o presente trabalho foi subdividido em três macro etapas: (1) levantamento bibliográfico; (2) coleta, compilação e organização do banco de dados; (3) análise, interpretação e discussão dos dados. Por meio da presente pesquisa foi possível constatar que o padrão planigeométrico Simples Retilíneo Retangular possui alta correlação com cavernas em que o controle estrutural é predominante. Além disso, com relação ao modelo genético das cavidades estudadas da Serra Sul é perceptível, através deste estudo, que há uma grande influência supergênica no processo de formação dessas cavernas com participação concomitante dos fatores controladores (estrutural, litológico, topográfico e hidrológico).

Palavras-chave: espeleogênese; dissolução; minério de ferro.

* Doutorando em Geociências pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, Brasil. E-mail: adambarrosgeo@gmail.com

** Doutor em Geociências pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e Professor do Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. E-mail: borba@ige.unicamp.br

*** Doutor em Geotecnia pelo Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Gerente Geral de Meio Ambiente - Estudos Técnicos na Vale S.A., Nova Lima, MG, Brasil. E-mail: iuri.brandi@vale.com

**** Mestre em Engenharia Geotécnica pelo Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e Gerente de Meio Ambiente - Espeleologia e Arqueologia na Vale S.A., Nova Lima, MG, Brasil. E-mail: ramon.araujo@vale.com

***** Mestra em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, SP, Brasil. E-mail: gabrieli.boulhosa@gmail.com

MORPHOLOGY AND GENESIS OF CAVES ON THE SERRA SUL - MINERAL PROVINCE OF CARAJÁS/PA

ABSTRACT

The speleological studies conducted in the Carajás Mountains have been increasingly demonstrating the importance of this area in terms of the abundance and diversity of caves in iron-rich lithotypes. Within this theme, the present work aims to study the morphological/geometric features, the relationship of hypsometry with the occurrence of caves, geological structures, lithotypes, and speleometry, with the purpose of correlating with the genetic aspects of a sample of caves existing in the Serra Sul, Carajás Mineral Province (PA). In order to achieve this, the present work was divided into three macro stages: (1) literature review; (2) collection, compilation, and organization of the database; (3) analysis, interpretation, and discussion of the data. Through this research, it was possible to observe that the Simple Rectilinear Rectangular planigeometric pattern has a high correlation with caves where structural control is predominant. Furthermore, regarding the genetic model of the studied cavities in the Serra Sul, it is noticeable, through this study, that there is a significant supergenic influence in the formation process of these caves with the concomitant participation of controlling factors (structural, lithological, topographic, and hydrological).

Keywords: speleogenesis; dissolution; iron ore.

MORFOLOGÍA Y GÉNESIS DE LAS CUEVAS DE LA SERRA SUL - PROVINCIA MINERAL DE CARAJÁS/PA

RESUMEN

Los estudios espeleológicos realizados en las Serras de Carajás han venido demostrando cada vez más la importancia de este lugar en términos de la abundancia y diversidad de cuevas en litotipos ricos en hierro. Dentro de esta temática, el presente trabajo tiene como objetivo estudiar las características morfológicas/geométricas, la relación de la hipsometría con la ocurrencia de cuevas, las estructuras geológicas, los litotipos y la espeleometría, con el fin de correlacionar con los aspectos genéticos de una muestra de cuevas existentes en la Serra Sul, Provincia Mineral de Carajás (PA). Para lograr esto, el presente trabajo se dividió en tres macroetapas: (1) revisión bibliográfica; (2) recolección, compilación y organización de la base de datos; (3) análisis, interpretación y discusión de los datos. A través de esta investigación, fue posible constatar que el patrón planigeométrico Simple Rectilíneo Rectangular tiene una alta correlación con cuevas en las que el control estructural es predominante. Además, en relación con el modelo genético de las cavidades estudiadas en la Serra Sul, es perceptible, a través de este estudio, que hay una gran influencia supergénica en el proceso de formación de estas cuevas con la participación concomitante de los factores controladores (estructural, litológico, topográfico e hidrológico).

Palabras-clave: espeleogénesis; disolución; mineral de hierro.

INTRODUÇÃO

As pesquisas em cavernas encontradas em litotipos ferruginosos ainda são escassas, mas vem crescendo no mundo e em especial no Brasil. Isso se deve no Brasil, principalmente, ao fato dessas cavidades naturais subterrâneas ocorrerem normalmente em locais onde há um teor elevado de minério de ferro. Sendo viável nesses locais o aproveitamento econômico de uma jazida mineral após a obtenção de licenças ambientais que abrangem entre outros itens a prospecção de cavernas, estudos de relevância,

definição de áreas de influência e análise de impactos aprovados nos órgãos ambientais nos processos de licenciamento. Dessa forma, tendo em vista esse cenário, desde o início da década de 1970, com a descoberta das grandes jazidas de ferro da Província Mineral de Carajás, ocorreu também de forma concomitante a descoberta de cavernas em formações ferríferas nas serras de Carajás (TOLBERT et al., 1971).

A partir dessa “descoberta” espeleológica, com o passar do tempo, universidades, empresas privadas, centros de pesquisa e grupos de espeleologia realizaram pesquisas sobre cavernas da região de Carajás. Porém, destaca-se os grandes avanços obtidos por meio das pesquisas do Grupo Espeleológico Paraense (GEP), Fundação Casa da Cultura de Marabá e Grupo de Espeleologia de Marabá que se iniciaram em meados da década de 1980 e seguem até os dias atuais (PINHEIRO et al., 1985; ATZINGEN et al., 2009; FREIRE, 2018).

O presente trabalho tem como objetivo estudar a influência das feições morfológicas/geométricas, da hipsometria, das estruturas geológicas, dos litotipos e da espeleometria com a ocorrência e gênese de 99 cavidades naturais subterrâneas existentes no corpo mineralizado D, situado na Unidade Geomorfológica da Serra Sul na Província Mineral de Carajás (PA). O Corpo D possui grandes jazidas de minério de ferro de alto teor e está situado em uma Unidade de Conservação em meio a floresta amazônica (Floresta Nacional de Carajás). A região carece de estudos do ponto de vista espeleológico.

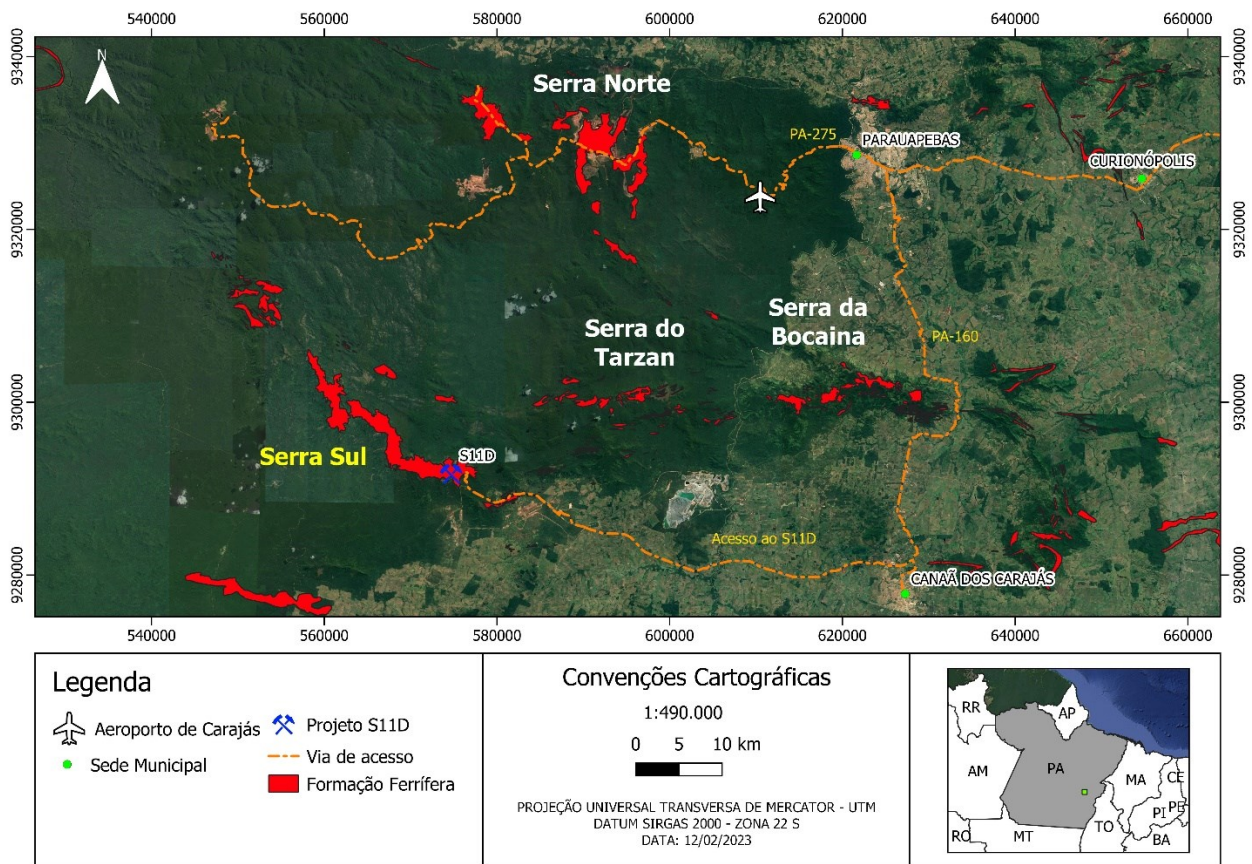
Dessa forma, a partir da definição dos aspectos genéticos dessas cavidades, pretende-se promover o conhecimento para assegurar a conservação dessas cavernas de modo a conciliar com a realização das atividades de mineração que ocorrem no seu entorno.

METODOLOGIA

Localização da Área de Estudo

O platô ou corpo geológico de S11, onde está localizado o Projeto Ferro Carajás S11D (maior projeto de mineração de ferro do mundo), é situado no município de Canaã dos Carajás, na porção sudeste do estado do Pará (Figura 1).

Figura 1 – Localização e vias de acesso do platô S11 localizado na Serra Sul, Província Mineral de Carajás (PA).



Fonte: Banco de dados - Vale S.A., (2021). Mapa elaborado pelos Autores, (2023).

Geologia local

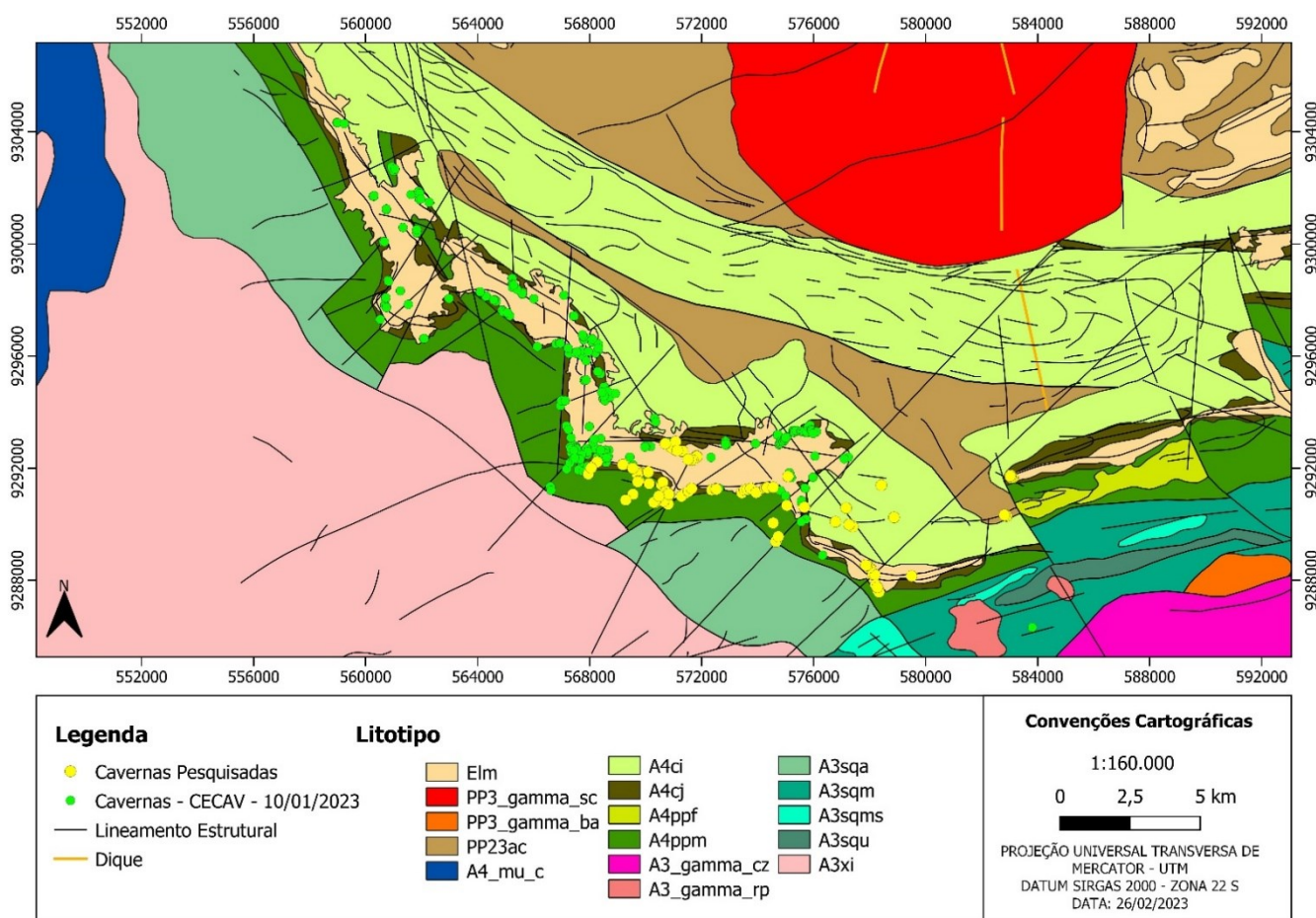
A Província Mineral de Carajás está localizada no setor oriental do Escudo Brasil Central (sudeste do Cráton Amazônico), limitada a leste pelo Cinturão Araguaia e a oeste pelo rio Xingu. O embasamento da província é formado pelo Complexo Xingu, constituído por gnaisses graníticos, granodioríticos e tonalíticos, migmatitos, anfibolitos, rochas máficas e ultramáficas, que compõem o embasamento cristalino (CARSTE, 2010).

O Supergrupo Itacaiúnas é uma sucessão neoarqueana que engloba o Grupo Grão Pará e suas unidades correlacionadas (Igarapé Salobo, grupos Igarapé Pojuca e Igarapé Bahia) (CVRD, 1972; BEISEGEL et al., 1973; DOCEGEO, 1988).

Os litotipos predominantes na Serra Sul, mais especificamente no corpo S11, são rochas metavulcanossedimentares do Grupo Grão Pará de idade neoarqueana, compostos por metavulcânicas máficas a félsicas. Na base do Grupo ocorre a Formação Parauapebas, com idade por volta de 2,75 Ga, constituída de rochas metavulcânicas (basaltos e riolitos). Na unidade intermediária ocorre a Formação

Carajás, com idade por volta de 2,74 Ga, composta por Formações Ferríferas Bandadas (FFB) com soleiras de basalto, além de corpos de hematititos e magnetititos, compondo os depósitos de minério de ferro de classe mundial. Já sobre a Formação Carajás, no topo do Grupo, ocorre a Formação Igarapé Cigarra, composta por sequência metavulcanossedimentar (basaltos, tufos, FFB, chert, quartzo wacke e quartzo arenito), o contato das rochas dessa unidade com a Formação Carajás é marcado localmente na Serra Sul por um horizonte de brecha na formação ferrífera (MACAMBIRA et al., 1990) (Figura 2).

Figura 2 – Mapa Geológico da Serra Sul com a localização das cavernas pesquisadas (amarelo) e do banco de dados de cavernas do CECAV (verde) datado de 10/01/2023.



Legenda: A3xi - Complexo Xingu; A3squ - Sequência greenstone belt com níveis de rochas ultramáficas, talco xistos, talco-tremolita xistos, clorita xistos, localmente com textura spinifex; A3sqms - Sequência greenstone belt com mica xistos, biotita xistos, paragnaisses finos; A3sqm - Sequência greenstone belt com predomínio de rochas metavulcânicas máficas; A3sqa - Sequência greenstone belt intercaladas a rochas metavulcânicas ácidas a intermediárias; A3_gamma_rp - Metatonalito Racha Placa; A3_gamma_cz - Metagrano Cruzadão; A4ppm - Metabasaltos da Formação Parauapebas; A4ppf - Metabasaltos com níveis amigdaloidais e rochas vulcânicas e metavulcânicas ácidas da Formação Parauapebas; A4cj - Formação Carajás; A4ci - Formação Igarapé Cigarra; A4_mu_c - Suíte Intrusiva Cateté; PP23ac - Formação Águas Claras; PP3_gamma_ba - Granito Fazenda Bananal; PP3_gamma_sc - Granito Serra dos Carajás; Elm - Cobertura Laterítica.

Fonte: Banco de dados - Justo e Lopes (2014); CECAV, (2023). Mapa elaborado pelos Autores, (2023).

Tectônica

A evolução tectônica das Serras de Carajás foi iniciada com o desenvolvimento da zona de cisalhamento dúctil Itacaiúnas de idade arqueana com direção preferencial E-W. Posteriormente, a ocorrência de um evento transpressivo causou a deformação de litotipos, tendo em sequência um evento transtrativo dextral, responsável pela subsidência no interior da Bacia de Carajás. O limite dos litotipos que receberam a subsidência, bem como o deslocamento dextral transtensivo das estruturas de Carajás marcam a existência da Falha regional denominada Carajás. Essa falha é por vezes preenchida por sills e diques máficos que datam de 2,6 bilhões de anos. Após esse fato um evento de transpressão sinistral entre 2,6 Ga e 2,0 Ga reativou a Falha Carajás (PINHEIRO e HOLDSWORTH, 1997).

O Cinturão Itacaiúnas é a principal estrutura geotectônica de idade arqueana da Província Mineral de Carajás. Na porção norte do cinturão ocorre o domínio transcorrente com sequências vulcanossedimentares associadas. Já ao sul do cinturão existe um domínio composto por lentes de granulitos, gnaisses, granitóides e rochas supracrustais (ARAÚJO et al., 1988; ARAÚJO e MAIA, 1991). Conforme proposto por esses mesmos autores, o domínio situado na porção norte do Cinturão Itacaiúnas, pode ser dividido em dois sistemas principais:

- 1) Sistema Serra dos Carajás: estrutura sigmoidal, alongada na direção WNW-ESE e limitada pelas Serras Norte e Sul;
- 2) Sistema Cinzento: sequência vulcanossedimentar tipo greenstone belt pertencente ao Grupo Rio Novo, rochas do Complexo Xingu e gnaisses, localizada na porção NE da Província Mineral de Carajás.

Geomorfologia, pedologia e vegetação

A área do presente estudo está contida no domínio dos Planaltos Residuais do Sul da Amazônia, que é caracterizado por maciços residuais de topo aplainado ou ondulado, além de poucas cristas e picos envolvidos por faixas de terrenos rebaixados.

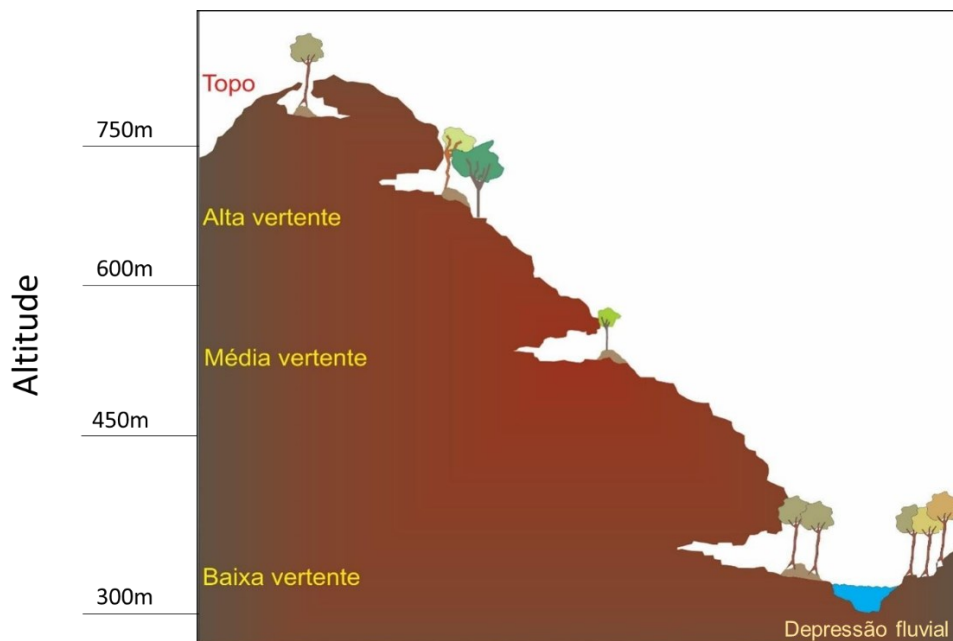
As principais serras da região estudada são Serra Norte, Leste, da Bocaina, do Tarzan e Serra Sul. Essas serras apresentam amplitude de aproximadamente 300 m, com altitude média de 700 m e com trechos que chegam a atingir mais de 800 metros em relação ao nível do mar (PROJETO RADAMBRASIL, 1974).

Nos níveis mais altos do planalto dissecado dessas serras, também denominados de platôs, ocorrem litotipos mais resistentes, tais como metarenitos da Formação Águas Claras, formações ferríferas bandadas (FFB), jaspilitos e rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará, além de crostas lateríticas ferruginosas (canga) provenientes da alteração intempérica das FFB (VALENTIM e OLIVITO, 2011).

Vale destacar também que os solos que possuem gênese relacionada às rochas do Grupo Grão Pará são formados principalmente por processos de lixiviação e erosão da rocha matriz (CAMPOS e CASTILHO, 2012). Além disso, podem ser encontrados normalmente em 9 geofácies nativas na área da Floresta Nacional de Carajás (vegetação rupestre aberta, vegetação rupestre arbustiva, mata baixa, mata alta, campo graminoso, lajedo, campo brejoso, buritizal e lagoa) (SCHAEFER et al., 2018).

O relevo da área é composto por três geoformas principais: topos de platôs (áreas relativamente planas em topo), vertentes (áreas de encostas montanhosas) e depressões fluviais (fundos do vale). Os topos de platôs situados sobre as formações ferríferas são ondulantes, podem atingir mais de 800 metros de elevação e apresentam vegetação rasteira de campos ferruginosos. As vertentes, limitadas entre os platôs e depressões, ocorrem em grandes desníveis topográficos podendo chegar a mais de 300m de intervalo. Já as depressões fluviais constituem as áreas localizadas abaixo de 300 metros de altitude e correspondem à parte inferior dos taludes e ao fundo dos vales dos “igarapés” e córregos locais, compostos por basaltos cobertos por florestas em solos espessos (VALE S.A., 2021) (Figura 3).

Figura 3 – Imagem esquemática do relevo da área de estudo evidenciando os topos de platô, vertentes e depressões fluviais, onde estão inseridas as cavidades na paisagem.



Fonte: Adaptado de BRANDT, (2020).

Clima e pluviometria

A região da Serra dos Carajás apresenta duas compartimentações climáticas principais: o Clima Equatorial Continental e o Clima Equatorial Mesotérmico de Altitude. O primeiro corresponde a extensa região das áreas colinosas de altitudes baixas, geomorfologicamente incluídas na classificação da Depressão Periférica do Sul do Pará. Já o segundo é condicionado pelo fator altitude que faz com que as temperaturas médias anuais fiquem com valores mais baixos por conta das oscilações do relevo, acarretando o aparecimento de um clima equatorial mesotérmico de altitude (IBAMA, 2004).

O clima da região de estudo é do tipo tropical chuvoso ("AWi" - segundo a classificação de Köppen). Esse clima é caracterizado pela presença de um longo período de estiagem, altos níveis médios de precipitação de chuva anuais e temperaturas mensais acima de 18°C (KÖPPEN, 1918). Nas serras de Carajás existem dois subtipos climáticos existentes: 1) de Encostas, localizado em regiões abaixo de 300m em relação ao nível do mar, apresentando temperaturas médias anuais em torno de 26°C, fraca circulação de ventos e médias anuais de precipitação que variam de 1.900 a 2.000mm; 2) de Topos, situado em regiões acima de 700m em relação ao nível do mar, possui temperaturas médias que variam entre 23°C e 25 °C, média circulação de ventos e médias anuais de precipitação que variam entre 2.000 e 2.400mm (IBAMA, 2004).

Procedimentos Metodológicos

O presente trabalho foi subdividido em três macro etapas: (1) levantamento bibliográfico; (2) coleta, compilação e organização do banco de dados; (3) análise, interpretação e discussão dos dados.

Na primeira etapa de levantamento bibliográfico buscou-se informações sobre aspectos geológicos, tectônicos, geomorfológicos, pedológicos, clima, pluviometria e da vegetação da região da Serra Sul de Carajás, bem como sobre o processo de gênese de cavidades naturais subterrâneas em terrenos ferruginosos. Para que fosse possível esses levantamentos foram consultados artigos científicos, livros, teses, dissertações e relatórios técnicos de processos de licenciamento ambiental.

A segunda etapa compreendeu a coleta, compilação e organização do banco de dados obtido de 99 cavernas presentes na unidade geomorfológica da Serra Sul. As informações utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho, foram: coordenadas geográficas da entrada das cavernas, altitude, parâmetros espeleométricos obtidos com grau de precisão 5D (com base no sistema *British Cave Research Association* – BCRA) área, volume e projeção horizontal, inserção na paisagem, estruturas geológicas, litotipo, hidrologia, plantas baixas e perfis topográficos.

Na terceira etapa, com base no banco de dados construído na segunda etapa, foi possível realizar a análise, interpretação e discussão dos dados obtidos. Dessa forma, foi realizada a análise planigeométrica, conforme padrões morfológicos planimétricos propostos por Palmer (1991; 2003) e geométricos por Calux (2013), tendo por base a relação geométrica entre as paredes e linha d'água, ou seja, leva em consideração as partes mais limítrofes das cavidades. Além da correlação com dados geológicos e estruturais e consequentemente a proposição dos processos de gênese e evolução geológica para o grupo de cavidades naturais estudadas da Serra Sul.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

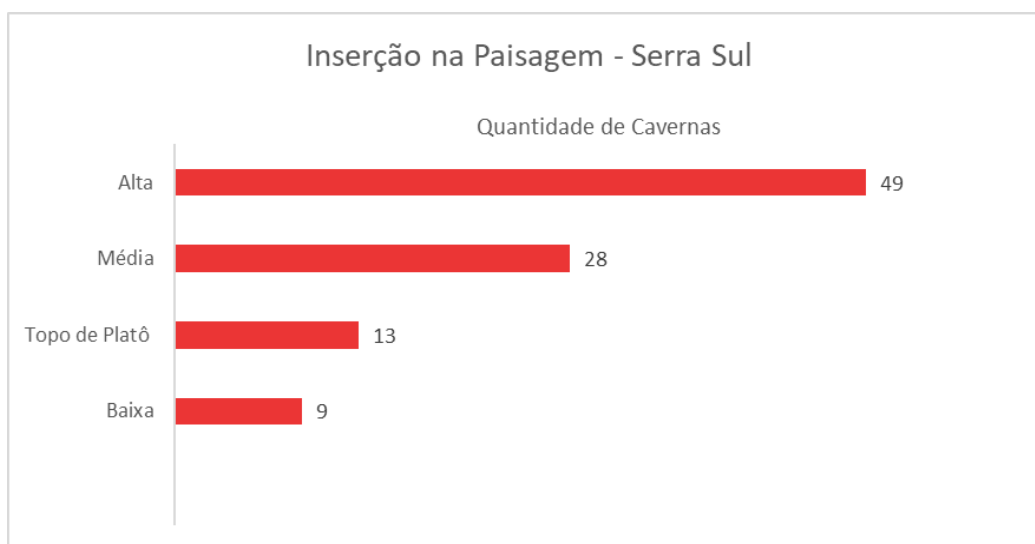
Inserção das cavernas no relevo

A distribuição espacial das cavernas estudadas da Serra Sul pode ser dividida em quatro classes principais: alta, média ou baixa vertente (bordas do platô) em relação ao nível de base local e topo de platô.

Dessa forma, as cavernas estudadas estão situadas em maior concentração na alta vertente, com cerca de 50%. Em média vertente estão situadas aproximadamente 28% das cavidades estudadas. Já nos topos de platô foram identificadas cerca de 13% das analisadas e destacam-se nesse intervalo topográfico do topo de platôs as cavidades nas bordas de lagos (12 das 13 encontradas). Por fim, as demais cavernas ocorrem em baixa vertente representando cerca de 9% da população amostral (Figura 4).

Outro ponto importante a se destacar é que a grande maioria das cavernas estudadas (cerca de 87%) está situada nas escarpas ou bordas dos platôs e não no interior ou topo dos platôs. Isso ocorre em decorrência do aumento da capacidade erosiva nas bordas em relação aos topos de platô, por conta do aumento do gradiente hidráulico nas bordas dos platôs.

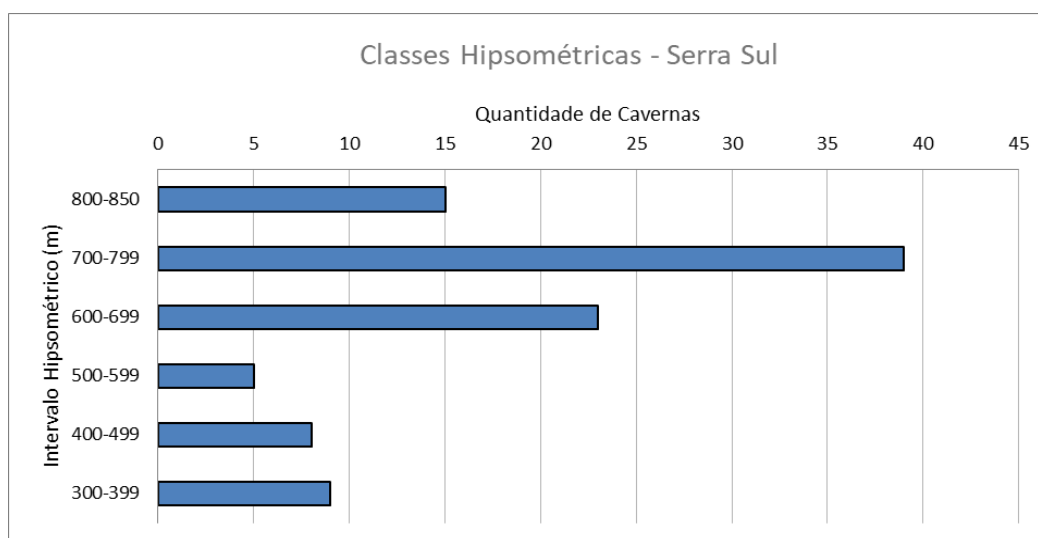
Figura 4 – Distribuição das cavidades de acordo com intervalo topográfico do relevo.



Fonte: Autores, (2023).

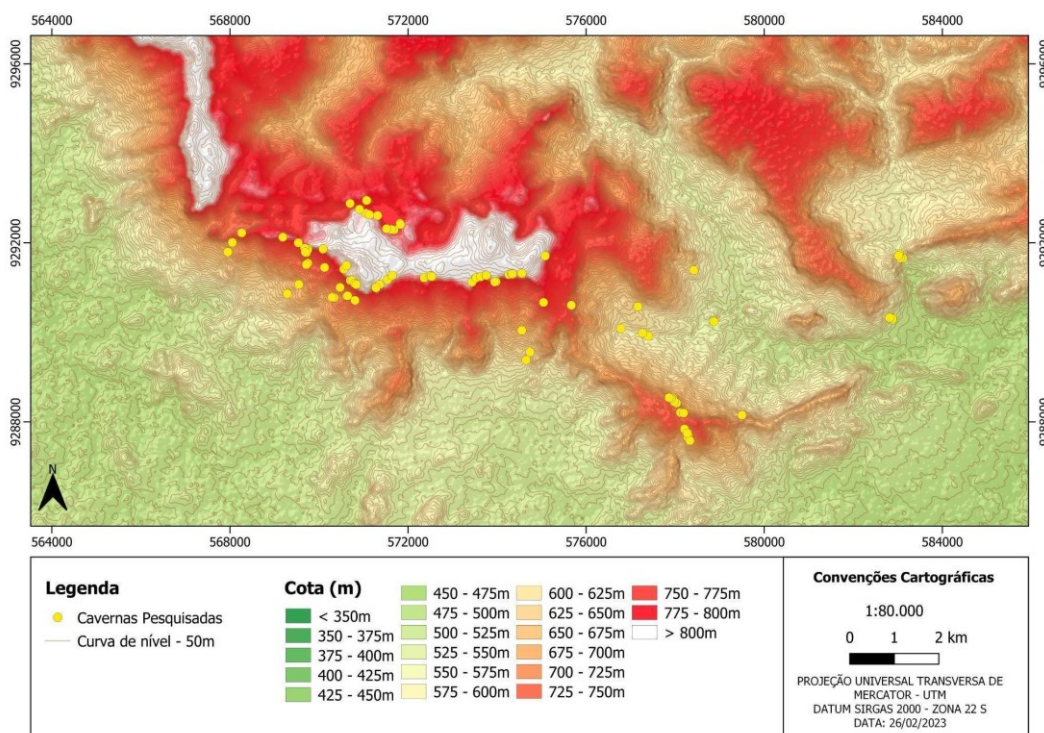
Com relação ao posicionamento das cavernas em relação às classes hipsométricas (nível do mar) o intervalo altimétrico de 700 a 799m se destacou com maior frequência de cavernas com cerca de 40%, seguido pela classe hipsométrica de 600 a 699m (23%). Todas as cavidades juntas que ocorrem abaixo de 600m representam cerca de 22%, já as cavernas acima de 799m representam aproximadamente 15% da população amostral (Figuras 5 e 6). Vale ressaltar que essa distribuição das classes hipsométricas também foi relatada por Silva (2021) em estudo desenvolvido sobre cavernas de Carajás. Porém, Pinheiro et al. (1985) e Scherer (2019), colocam o intervalo de 600 a 700m, como o mais relevante para a ocorrência de cavernas nas regiões das Serras Norte e da Bocaina em Carajás, respectivamente.

Figura 5 – Distribuição das cavidades de acordo com classes hipsométricas.



Fonte: Autores, (2023).

Figura 6 – Mapa hipsométrico da Serra Sul com a localização das cavernas pesquisadas (amarelo).



Fonte: Banco de dados - Justo e Lopes (2014); Farr et al., (2007). Elaborado pelos Autores, (2023).

É importante destacar que as cavernas do presente estudo ocorrem de forma abrangente na vertente inclinada (alta e média) e de forma mais restrita nos platôs. A restrição da formação das cavernas no interior dos platôs se deve a presença de afloramentos rochosos de formações ferríferas bandadas cobertas por uma carapaça de canga ferruginosa ou até mesmo depósitos de tálus nas vertentes (Figura 7). Já nas áreas mais baixas no sopé da Serra Sul as cavernas estão normalmente contidas nas bordas de canais de drenagem, onde são encontradas as carapaças de ferricrete (rocha argilosa ferruginizada de origem coluvionar).

Figura 7 – Cobertura de canga cobrindo as formações ferríferas bandadas em alta vertente na cavidade S11D_0010 (A) e depósito de tálus com blocos de ferricrete na cavidade CAV_0018 (B).



Fonte: Autores, (2023).

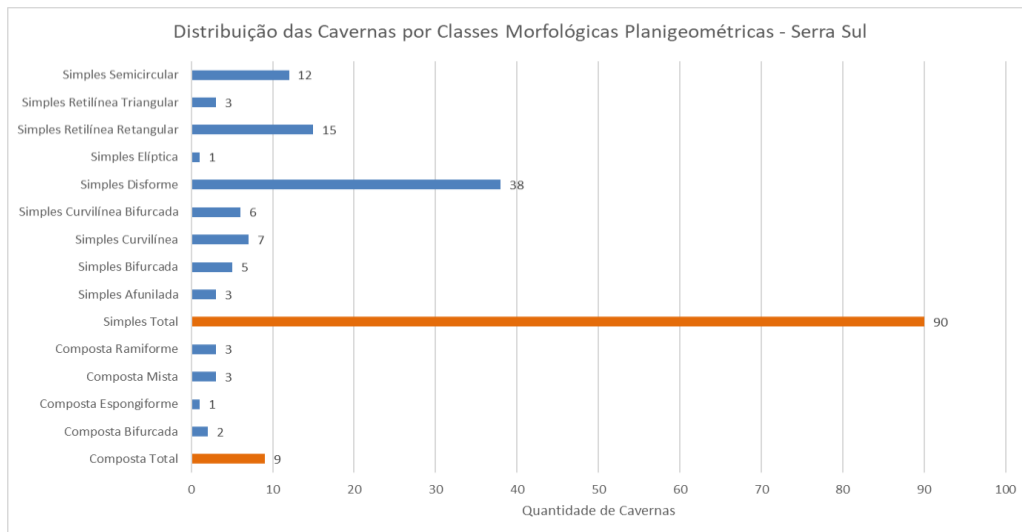
Padrões Morfológicos

Com base na análise das plantas topográficas das 99 cavidades naturais pesquisadas, partindo dos modelos de classificação Planimétrica e Geométrica propostos por Palmer (2003) e Calux (2013), respectivamente, foi possível definir 13 padrões planigeométricos, que são a combinação dos padrões planimétricos e geométricos, conforme proposto por Scherer, (2019). Sendo eles em ordem decrescente de abundância na área de estudo: 1) Simples Disforme; 2) Simples Retilínea Retangular; 3) Simples Semicircular; 4) Simples Curvilínea; 5) Simples Curvilínea Bifurcada; 6) Simples Bifurcada; 7) Composta Mista; 8) Composta Ramiforme; 9) Simples Afunilada; 10) Simples Retilínea Retangular; 11) Composta Bifurcada; 12) Composta Espongiforme; 13) Simples Elíptica.

Vale destacar que a maior parte das cavernas apresenta câmara simples (90%), ou seja, composta por compartimento único e que foram descritas através de 9 padrões identificados. Já as demais cavernas (10%) possuem câmaras compostas com compartimentos mais complexos e foram descritas através de 4 padrões identificados.

Cabe ressaltar que para a distribuição das classes morfológicas planigeométricas, a classe que se destacou sendo encontrada na grande maioria das cavernas foi a Simples Disforme em 38 cavernas, seguida pela Simples Retilínea Retangular (15 cavernas) e Simples Semicircular (12 cavernas). As demais classes ocorreram de maneira mais restrita, representando menos de 10% do total cada um dos grupos (Figura 8).

Figura 8 – Distribuição das cavernas da Serra Sul por classes morfológicas planigeométricas.



Fonte: Autores, (2023).

Dessa forma, com base no banco de dados construído foi possível organizar em ordem decrescente de abundância os padrões identificados e elencar quais são as principais características identificadas em cada classe, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Principais características dos padrões morfológicos planigeométricos das cavernas da Serra Sul.

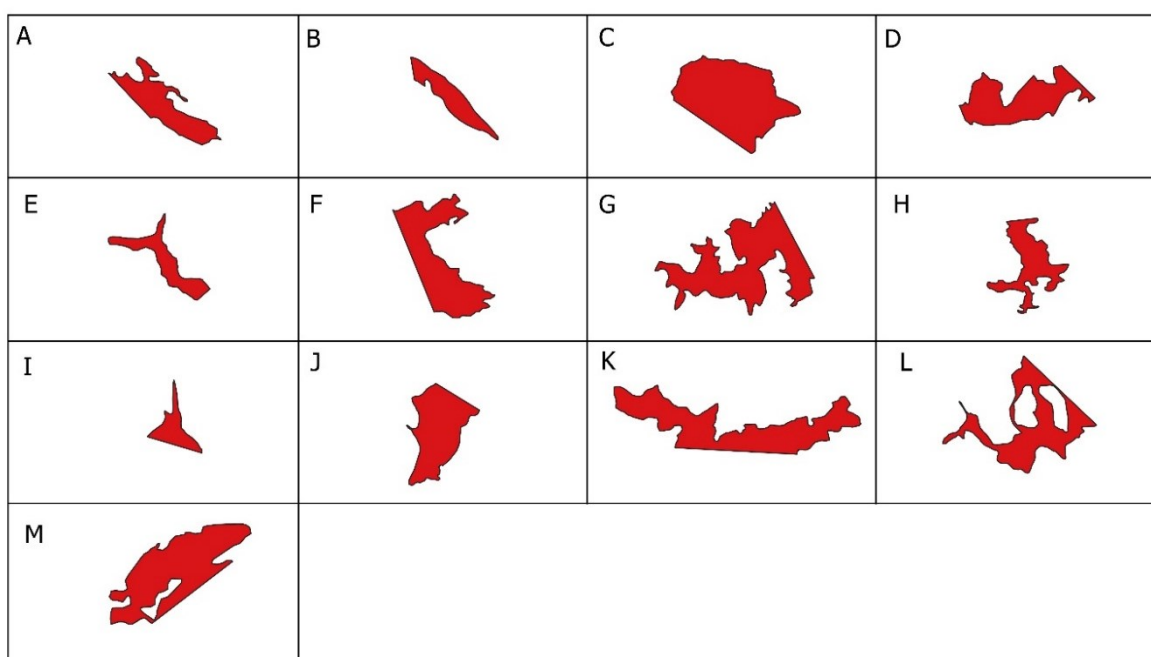
Item	Padrão Planigeométrico	Principais características identificadas
1	Simples Disforme	Salão único com arranjo da planta baixa não se assemelha a nenhuma forma geométrica ou planimétrica
2	Simples Retilínea Retangular	Salão único com direção preferencial do conduto em um só sentido, normalmente controlada pela presença de estruturas geológicas (bandamento, fratura, falha ou dobra). As paredes formam ângulos aproximadamente retos entre si, gerando uma morfologia retangular da planta baixa
3	Simples Semicircular	Salão único com morfologia semicircular da planta baixa
4	Simples Curvilínea	Salão único com eixo principal do conduto de desenvolvimento curvilíneo. Essa curvatura normalmente é controlada pelo contato entre diferentes estruturas geológicas (planos de falha ou juntas, ou contato entre plano de fratura e bandamento).
5	Simples Curvilínea Bifurcada	Salão único com dois eixos de desenvolvimento curvilíneos. Essas curvaturas normalmente são controladas pelo contato entre diferentes estruturas geológicas (planos de falha ou juntas, ou contato entre plano de fratura e bandamento)
6	Simples Bifurcada	Salão único que se desdobra para dois sentidos
7	Composta Mista	Conjunto de vários salões, condutos e canalículos composto por mais de um tipo de padrão planigeométrico

8	Composta Ramiforme	Conjunto de vários salões, condutos e canalículos apresentando condutos de tamanho variado, que se desenvolvem em diversas direções e normalmente não se interconectam
9	Simples Afunilada	Salão único que se estreita na direção distal, apresentando forma que se assemelha a um funil
10	Simples Retilínea Triangular	Salão único com paredes que seguem em direções transversais e se conectando no eixo de desenvolvimento
11	Composta Bifurcada	Conjunto de vários salões, condutos e canalículos em que os salões se dividem em duas direções preferenciais
12	Composta Espongiforme	Conjunto de vários salões, condutos e canalículos que apresenta condutos de tamanho variado, que se interconectam normalmente por passagens mais estreitas com ocorrência de diversos pilares.
13	Simples Elíptica	Salão único na forma elíptica. Geralmente não é influenciado por controle estrutural para a sua gênese

Fonte: Autores, (2023).

A Figura 9 apresenta as imagens das plantas baixas das cavidades que melhor representam os padrões planigeométricos identificados nas cavidades da Serra Sul.

Figura 9 – Morfologias extraídas das plantas baixas que representam os 13 padrões morfológicos planigeométricos para as cavernas da Serra Sul.



Legenda: A - Simples Disforme; B - Simples Retilínea Retangular; C - Simples Semicircular; D - Simples Curvilínea; E - Simples Curvilínea Bifurcada; F - Simples Bifurcada; G - Composta Mista; H - Composta Ramiforme; I - Simples Afunilada; J - Simples Retilínea Triangular; K - Composta Bifurcada; L - Composta Espongiforme; M - Simples Elíptica.

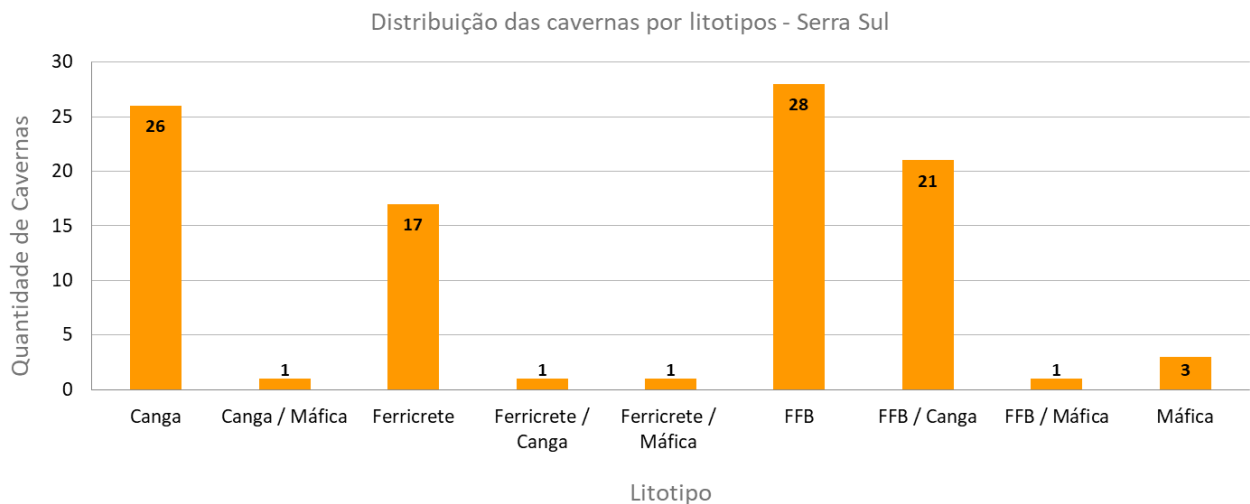
Fonte: Autores, (2023).

Litotipos

Com relação aos aspectos litológicos, as cavernas pesquisadas da Serra Sul são encontradas em 4 litotipos principais, são eles: canga, formação ferrífera bandada (FFB), ferricrete e rocha máfica (metabasalto). Em FFB, foram registradas 28 cavernas, 26 em canga e 21 no contato entre FFB/canga. Essa soma representa cerca de 76% de todas as cavernas mapeadas no presente estudo na Serra Sul.

Após os litotipos supracitados, destaca-se o ferricrete que foi registrado em 17 cavernas de forma isolada, mas em outras pode ser visualizado em contato com canga (1 caverna) e máfica (1 caverna). Além disso, foram registradas 3 cavidades em metabasalto de forma isolada, mas também foram encontradas cavernas que apresentam essa rocha máfica em contato com canga (1 caverna), ferricrete (1 caverna) e FFB (1 caverna) (Figura 10).

Figura 10 – Distribuição das cavernas da Serra Sul por litotipos.

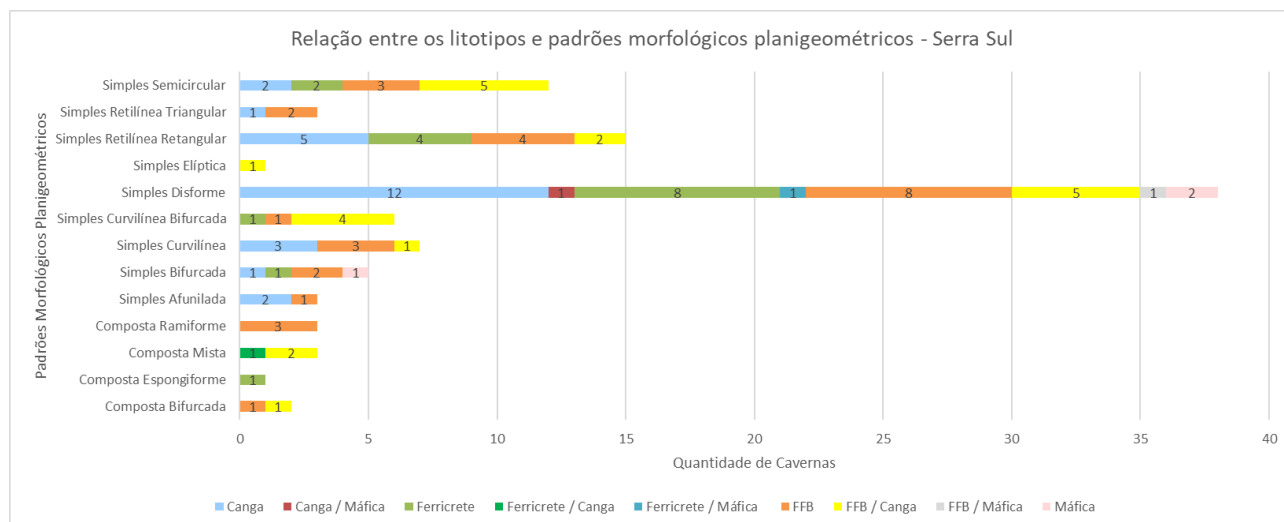


Fonte: Autores, (2023).

No que se refere a relação dos litotipos com os padrões morfológicos planigeométricos, percebe-se que o padrão Simples Disforme é o mais abundante em quantidade de cavernas e apresenta a maior diversidade de litotipos, só não ocorrendo no contato ferricrete/canga (Figura 11).

Os litotipos canga de forma restrita, máfica e o contato entre esses dois grupos ocorre apenas na tipologia de simples câmaras, não sendo identificados em câmaras compostas. Já a FFB e contato FFB/canga ocorrem na maior parte dos padrões morfológicos identificados.

Figura 11 – Relação entre os litotipos e padrões morfológicos planigeométricos.



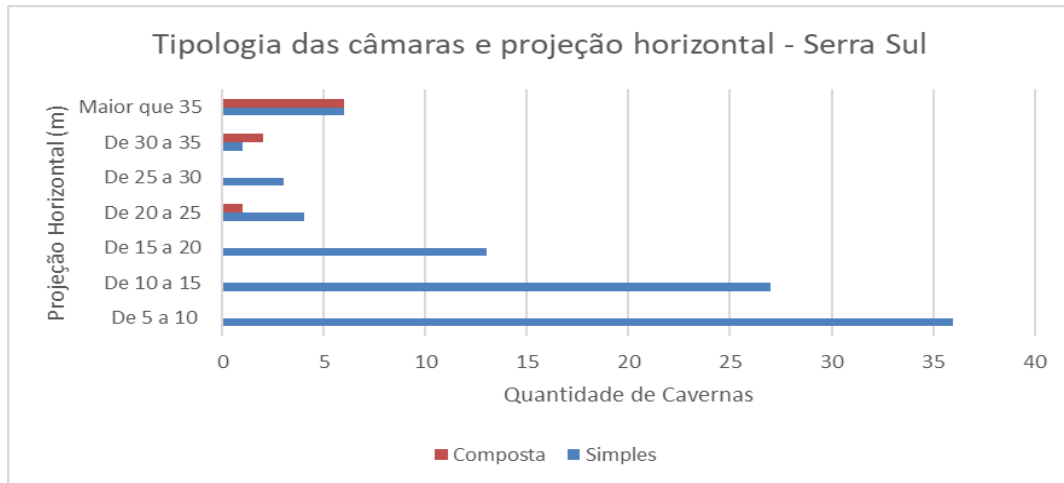
Fonte: Autores, (2023).

Espeleometria

Com relação à análise espeleométrica das cavernas, quando é comparada a tipologia das câmaras (simples ou composta) com os dados de projeção horizontal (PH), verificamos que a grande maioria das cavernas analisadas (76 cavidades) possui tipologia de câmaras simples com PH no intervalo de 5 a 20m, ou seja, apresentam normalmente um salão único com pequenas dimensões (Figura 12). Vale destacar que as cavernas de tipologia composta possuem PH superior a 22m, com maior frequência de ocorrência em valores próximos a 65m de PH (6 cavernas).

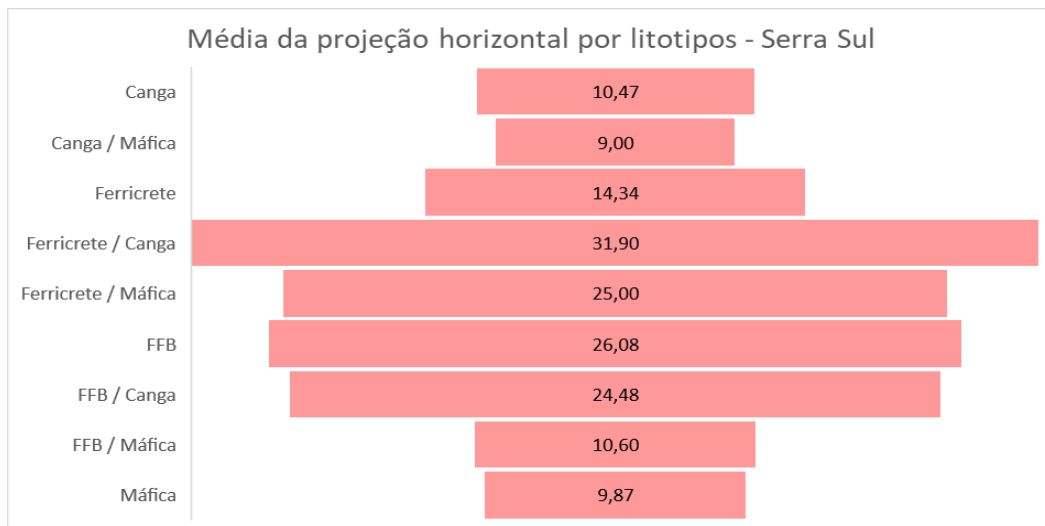
Quando analisamos os dados estatísticos da variável PH, percebemos que a média geral do banco de dados é igual a 18,85 m, com valor mínimo e máximo de 5,1 e 111m, respectivamente. Além disso, quando comparamos as médias de PH de cada litotipo, percebemos que os contatos entre ferricrete/canga (31,9m), ferricrete/máfica (25m) e FFB/Canga (24,48m), juntamente com cavernas exclusivamente em FFB (26,08) representam litotipos com PH acima da média do banco de dados analisado (Figura 13).

Figura 12 – Relação entre tipologia das câmaras e projeção horizontal (PH) das cavernas da Serra Sul.



Fonte: Autores, (2023).

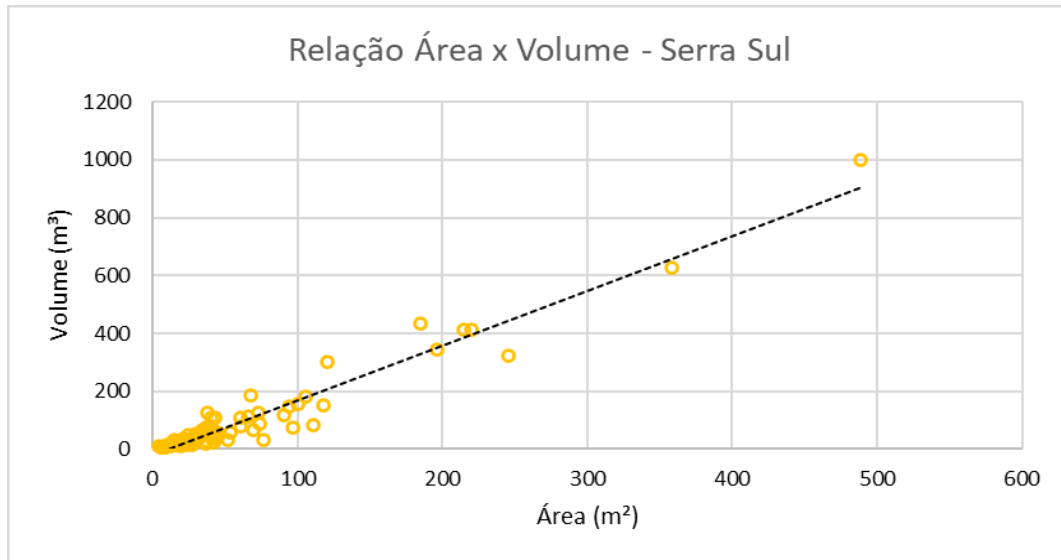
Figura 13 – Média da projeção horizontal em metros por litotipos das cavernas da Serra Sul.



Fonte: Autores, (2023).

Quando realizamos uma correlação entre os dados de volume e área das cavernas estudadas, podemos verificar que a maior parte das cavidades possui baixos valores de área e volume, pois cerca de 87% das cavernas pesquisadas apresentam área menor que 100m² e 91% possuem volume menor que 200m³ (Figura 14). Dessa forma, essas informações corroboram com os resultados obtidos sobre PH, pois cerca de 76% das cavidades apresentam projeção horizontal de 5 a 20m. Mostrando assim que a grande maioria das cavernas estudadas da Serra Sul possuem pequenas dimensões.

Figura 14 – Correlação entre dados de área e volume das cavernas da Serra Sul.

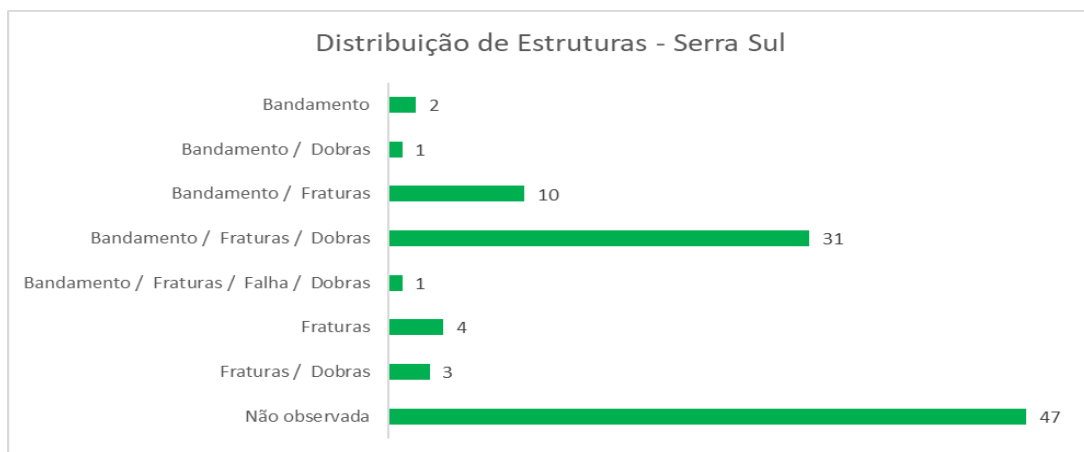


Fonte: Autores, (2023).

Estruturas Geológicas/Hidrologia

No que se refere às estruturas geológicas presentes nas cavernas amostradas da Serra Sul, a maior parte das cavidades analisadas (52) apresenta no mínimo um tipo de estrutura identificada (bandamento, fratura ou junta, falha e dobra) e nas outras 47 cavernas não foi possível identificar estruturas (Figura 15). Dessa forma, podemos perceber que o controle estrutural é um dos importantes fatores para a gênese e desenvolvimento dessas cavidades.

Figura 15 – Distribuição das Estruturas Geológicas por quantidade de cavernas da Serra Sul.



Fonte: Autores, (2023).

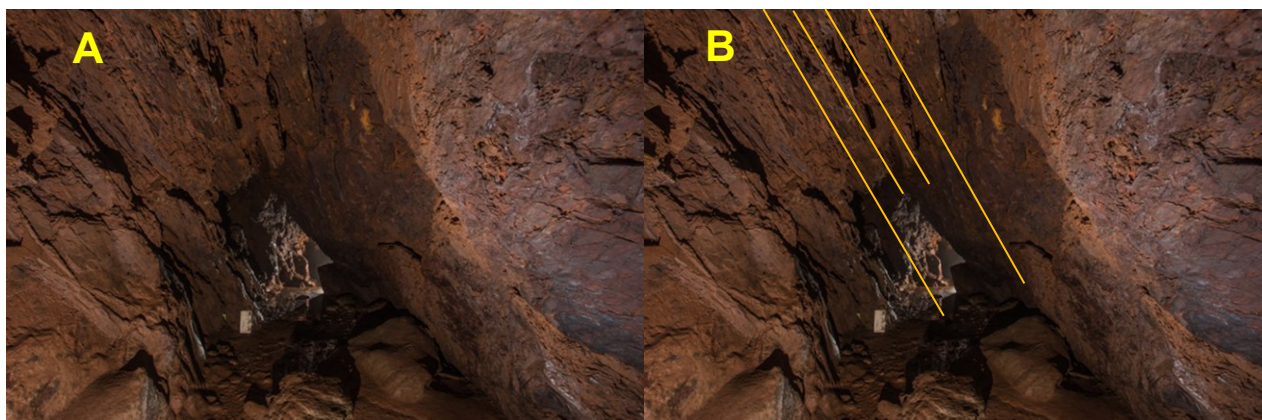
Por meio da relação entre a presença de estruturas e a descrição dos litotipos nas cavernas, é possível definir os seguintes padrões:

- Na maior parte das cavernas em canga (88%) e todas em ferricrete (100%) não foram identificadas estruturas geológicas;
- Cerca de 96% das cavernas em FFB e 95% no contato FFB/canga apresentam estruturas geológicas possíveis de identificar.

Esses fatos correlacionados com as projeções horizontais das cavernas mostram que cavernas que ocorrem em litotipos com a presença de estruturas geológicas normalmente têm a capacidade de se desenvolver com PH superior quando comparadas com cavidades com ausência ou pequena concentração de estruturas.

Além disso, essas descontinuidades (bandamento, dobras, juntas e falhas) presentes principalmente na FFB e contato FFB/canga possuem orientação preferencial nas direções NE-SW e NW-SE, sendo a mesma direção preferencial da maior parte dos condutos identificados nas cavernas estudadas e a mesma orientação das estruturas presentes nos litotipos da Serra Sul (Figura 16).

Figura 16 – Controle estrutural para desenvolvimento dos condutos da caverna CAV_0034 em formação ferrífera bandada, sem interpretação (A) e com indicação da direção preferencial do bandamento da FFB que coincide com o desenvolvimento do conduto (B).



Fonte: Autores, (2023).

Gênese

Dentre os fatores controladores para espeleogênese das cavernas da amostra estudada na Serra Sul, destacam-se:

1 - Estrutural: Os contatos entre litotipos e as estruturas geológicas servem como caminhos preferenciais para a água meteórica, o que favorece a dissolução, mobilização da sílica e até mesmo do ferro, gerando microcavidades, assim como verificado em cavernas na Serra Norte por Braga et al., (2017). Além disso, após a abertura dessa porosidade secundária nas rochas se iniciam os processos de intemperismo e

erosão (diminuindo o volume da rocha alterada) possibilitando o desenvolvimento dos salões dessas cavernas por abatimento de blocos do teto e das paredes, influenciando a morfologia dessas cavidades. Logo em sequência as cavidades podem ficar expostas na superfície através do recuo das vertentes com a evolução dos processos erosivos.

2 - Litológico: Conforme verificado na área de estudo as cavernas em litotipos ferríferos (FFB, canga e contato entre os dois) apresentaram-se em maior quantidade e distribuição geográfica, ou seja, marcam um controle litológico associado a espeleogênese, pois representam cerca de 76% das cavernas na área analisada da Serra Sul. Além disso, os contatos geológicos de fato favorecem a espeleogênese, proporcionando a formação de cavernas com maiores PH.

3 - Topográfico: As cavernas pesquisadas encontram-se em maior parte em alta vertente, com cerca de 50% da amostra pesquisada. Além disso, o intervalo hipsométrico de 600 a 800 m se destacou com maior frequência de cavernas com cerca de 63%. Dessa forma, percebe-se também um forte controle topográfico na área de estudo em decorrência da percolação e infiltração da água meteórica de montante para jusante, moldando a morfologia dos platôs e favorecendo a formação das cavidades subterrâneas. Vale ressaltar que esse comportamento das classes hipsométricas é um fator secundário, pois apenas reflete a principal faixa de ocorrência das FFB nas vertentes, mas isso também é relatado por Silva (2021) em estudo desenvolvido sobre cavernas de Carajás. Porém, Pinheiro et al. (1985) e Scherer (2019), colocam o intervalo de 600 a 700m, como o mais relevante para a ocorrência de cavernas nas regiões das Serras Norte e da Bocaina, respectivamente.

4 - Hidrológico: A percolação da água meteórica e consequentemente sua infiltração favorece a criação de canalículos e condutos contribuindo com a formação das microcavidades no ambiente subterrâneo. Nesse ambiente o processo de dissolução predomina em detrimento aos processos erosivos, pois com a presença de água a sílica é lixiviada, diminuindo o volume total da rocha e formando poros. Esse fato é validado pela presença de poros em substituição as bandas silicosas nas formações ferríferas e na ausência de sílica em algumas porções das cangas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme mostrado no presente estudo a classificação planigeométrica, conforme padrões morfológicos planimétricos propostos por Palmer (1991; 2003) e geométricos por Calux (2013), se mostrou como muito importante para cavernas em que o controle estrutural é predominante. Porém, essa classificação não se mostrou muito eficaz para as cavernas que apresentaram padrão simples disforme, ou seja, não se assemelham a nenhuma forma geométrica ou planimétrica definida na literatura. Sendo necessário a

criação de novos métodos para classificar de forma qualitativa e quantitativa as morfologias da maior parte dessas cavernas ferríferas.

Com relação ao modelo genético das cavernas estudadas da Serra Sul é perceptível a grande influência das estruturas geológicas, pois elas criam condições favoráveis para o processo de dissolução que influencia na espeleogênese com participação concomitante dos fatores controladores (estrutural, litológico, topográfico e hidrológico).

AGRADECIMENTOS

À empresa Vale S.A., por investir em pesquisa e inovação no âmbito espeleológico. Ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) por proporcionar uma estrutura de excelência de ensino e pesquisa que contribuiu fortemente para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N.; JOÃO, X.S.J.; COSTA, J.B.S. A megaestruturação arqueana da folha Serra dos Carajás. In: Congresso Latino- Americano de Geologia, 7, 1988, Belém. **Anais[...]** Belém: SBG, 1988. p. 324-328.

ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil**. Projeto especial mapas de recursos minerais, de solos e de vegetação para a área do Programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Serra dos Carajás, Folha SB.22-Z-A. Brasília: DNPM/CPRM, 1991.

ATZINGEN, N.V.; CRESCÊNCIO, G.; CUNHA JR., W.R. Estudos espeleológicos na Serra dos Carajás, município de Parauapebas-PA. **Boletim Informativo da Fundação Casa da Cultura de Marabá**, Marabá, p. 51-73, 2009.

AULER, A.S.; BARTON, H.A.; ZAMBELLI, B.; SENKO, J.; PARKER, C.W.; SASOWSKY, I.D.; SOUZA, T.A.R.; PUJONI, D.; PEÑARANDA, J.; DAVIS, R. Silica and Iron Mobilization, Cave Development and Landscape Evolution in Iron Formations in Brazil. **Geomorphology**, v. 398, n. 1, p. 1-15, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X21004761>. Acesso em: 26 fev. 2023.

BEISIEGEL, V.R.; BERNARDELLI, A.L.; DRUMMOND, N.F.; RUFF, A.W.; TREMAINE, J.W. Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.3 n.4, p. 215-242, 1973.

BRAGA, A.A.J; FIORI, A.P.; GONÇALVES, D.F.; COSTA, F.R. Influência estrutural sobre cavernas em formações ferríferas, Carajás-PA. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 25 n. 1, p. 24-39, 2017.

BRANDT. **Projeto Bloco 8 – Estudo de Relevância de Cavidades – Barragem do Rio Vacaria**. Nova Lima: Brandt, 2020.

CALUX, A.S. **Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em rochas ferríferas no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. 2013. 220p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CARSTE. **Espeleologia do S11D Serra Sul, Região de Carajás – PA**. Belo Horizonte: Carste, 2010.

CAMPOS, J.F.; CASTILHO, A.F. Uma visão geográfica da região da Flona de Carajás. In: Martins, F.D.; Castilho, A.F.; Campos, J.; Hatano, F.M.; Rolim, S.G. (Org.). **Fauna da Floresta Nacional de Carajás: estudos sobre vertebrados terrestres**. São Paulo: Nitro Imagens, 2012. p.16-27.

CECAV. **Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas - CANIE**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/centros-de-pesquisa/cecav/cadastro-nacional-de-informacoes-espeleologicas/canie>. Acesso em: 26 fev. 2023.

CVRD. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 26, 1972, Belém. **Anais[...]** Belém: SBG, 1972. p. 78-80.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35, 1988, Belém. **Anais[...]** Belém: SBG, 1988. p. 11- 54.

FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Review of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1-33, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005RG000183> Acesso em: 21 mar. 2023.

FREIRE, L.; LIMA, J.; VERÍSSIMO, C.; SILVA, E. Estudo Geomorfológico em Cavernas de Arenito da Amazônia Paraense. **Revista de Geografia (Recife)**, Recife, v. 35. n. 4, p. 14-31, 2018.

IBAMA. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Plano de Manejo para Uso Múltiplo da Floresta Nacional de Carajás**. Brasília: MMA, 2004.

JUSTO, A.P.; LOPES, E.S. **Programa Geologia do Brasil-PGB. Serra dos Carajás**. Folha SB.22-Z-A-II. Estado do Pará. Carta Geológica. Belém: CPRM, 2014.

KÖPPEN, W. Classification of climates according to temperature, precipitation and annual run. **Petermanns Geographische Mitteilungen**, v. 64, p. 193-203, 1918.

MACAMBIRA, M.J.B.; RAMOS, J.F.F.; ASSIS, J.F.P.; FIGUEIRAS, A.J.M. **Projeto Serra Norte e Projeto Pojuca**. Belém: UFPA, 1990.

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

PALMER, A.N. Speleogenesis in carbonate rocks. **Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers**, v. 1, p. 1-11, 2003.

PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W.; HENRIQUES, A.L.; SILVEIRA, L.T.; MOREIRA, J.R.A.; LOPES, P.R.C.; SILVEIRA, O.T.; PAIVA, R.S.; LINS, A.L.F.A.; VERÍSSIMO, C.U.V.; PINHEIRO,

S.H.S., HENRIQUES, R.V.L. **Considerações Preliminares sobre a Espeleologia da Serra dos Carajás (PA)**. Grupo Espeleológico Paraense - GEP. Relatório inédito, 1985. 38p.

PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W. As cavernas em rochas intempéricas da Serra dos Carajás (PA) – Brasil. In: Congresso de Espeleologia da América Latina e do Caribe, 1, 1988, Belo Horizonte. **Anais[...]** Belo Horizonte: SBE, 1988. p. 179-186.

PINHEIRO, R.V.L.; HOLDSWORTH, R.E. The structure of the Carajás N-4 ironstone deposit and associated rocks: relationship to the archaean strike-slip tectonics and basement reactivation in the Amazon region, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 10, n. 3-4, p. 305-319, 1997.

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

PROJETO RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais - Folha SA.22 Belém**. Rio de Janeiro: MME, 1974.

SCHAEFER, C.E.; CÂNDIDO, H.G.; CORRÊA, G.R.; SIMAS, F.; CAMPOS, J.F. Ecossistemas e Geoambientes de Canga Ferruginosa em Carajás: Paisagens Singulares em Risco de Extinção. In: MARTINS, F.F.; KAMINO, L.H.Y.; RIBEIRO, K.T. **Projeto Cenários Conservação de Campos Ferruginosos diante da Mineração em Carajás**. Tubarão: Copiart, 2018, p. 39-103.

SCHERER, B.S. **Morfologia e aspectos geométricos das cavidades de ambientes cársticos na Serra da Bocaina em Canaã dos Carajás-PA**. 68 p. Monografia (Bacharel em Geografia) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá-PA, 2019. Disponível em: <http://repositorio.unifesspa.edu.br/handle/123456789/2085>. Acesso em: 21 mar. 2023.

SILVA, A.G.A. **Caracterização morfométrica de cavidades naturais subterrâneas: perspectivas para uma classificação morfológica e planimétrica das cavernas ferríferas no Brasil**. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - UFMG, Belo Horizonte - MG, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/41020>. Acesso em: 21 mar. 2023.

TOLBERT, G. E.; REMAINE J.W.; MELCHER, G.C.; GOMES, C.B. The recently discovered Serra dos Carajás iron deposits, northern Brazil. **Economic Geology**, v. 66, n. 7, p. 985, 1971. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.66.7.985>. Acesso em: 21 mar. 2023.

VALE S.A. **Resumo do Relatório Técnico de recursos e reservas minerais das minas do Complexo Serra Norte**. Parauapebas: Vale S.A., 2021.

VALENTIM, R.F.V.; OLIVITO, J.P.R. Unidade Espeleológica Carajás: Delimitação dos Enfoques Regional e Local, Conforme Metodologia da IN-02/2009 MMA. **EspeleoTema**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 41-60. 2011.