



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA

ANA KARITA DA CUNHA SOUSA

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DE
CAVERNAS DESENVOLVIDAS COMO PRODUTOS DE
ALTERAÇÃO DE ROCHAS MÁFICAS NA UNIDADE
ESPELEOLÓGICA DE CARAJÁS – SUDESTE DO PARÁ

MARABÁ – PA
2015

ANA KARITA DA CUNHA SOUSA

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DE
CAVERNAS DESENVOLVIDAS COMO PRODUTOS DE
ALTERAÇÃO DE ROCHAS MÁFICAS NA UNIDADE
ESPELEOLÓGICA DE CARAJÁS – SUDESTE DO PARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geologia da
Universidade Federal do Sul e Sudeste
do Pará – UNIFESSPA, em
cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em
Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Joel Buenano
Macambira

Marabá – PA
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca II da UNIFESSPA. CAMAR, Marabá, PA

Sousa, Ana Karita da Cunha

Caracterização petrográfica e mineralógica de cavidades desenvolvidas como produtos de alteração de rochas máficas na unidade espeleológica Carajás – sudeste do Pará / Ana Karita da Cunha Sousa ; orientador, Joel Buenano Macambira, co-orientadora, Daniele Freitas Gonçalves. — 2015.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Campus Universitário de Marabá, Instituto de Geociências e Engenharias, Faculdade de Geologia, Marabá, 2015.

1. Petrologia – Carajás, Serra dos (PA). 2. Mineralogia. 3. Espeleologia. 4. Cavernas. 5. Intemperismo. 6. Rochas. I. Macambira, Joel Buenano, orient. II. Título.

ANA KARITA DA CUNHA SOUSA

CARACTERIZAÇÃO PETROGRÁFICA E MINERALÓGICA DE
CAVERNAS DESENVOLVIDAS COMO PRODUTOS DE
ALTERAÇÃO DE ROCHAS MÁFICAS NA UNIDADE
ESPELEOLÓGICA DE CARAJÁS – SUDESTE DO PARÁ

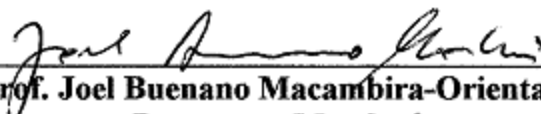
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geologia da
Universidade Federal do Sul e Sudeste
do Pará – UNIFESSPA, em
cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em
Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Joel Buenano
Macambira


Data de Aprovação: 24/02/2015

Conceito: ExC

Banca Avaliadora:


Prof. Joel Buenano Macambira-Orientador
Doutor em Metalogênese
Universidade Federal do Pará


Prof. Dr. Antônio Emídio de A. Santos Júnior
Doutor em Sedimentologia e estratigrafia
Universidade Federal do Pará


Profª. Drª. Ana Valéria dos Reis Pinheiro
Doutora em Hidrogeologia
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
(UNIFESSPA)

A Deus, meu refúgio e fortaleza, nos momentos de alegrias e tristezas.
À minha família, em especial, à minha mãe por ser minha heroína e meu maior
exemplo de vida.
A meu pai, JOSÉ RAIMUNDO RIBAMAR DE SOUSA (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser “minha” fonte inesgotável de bênçãos, ter me dado paz de espírito para que eu pudesse superar os obstáculos, por colocar pessoas maravilhosas e insubstituíveis na minha vida e por criar todas as situações favoráveis a mim, para que no fim eu saísse sem sequelas.

Aos meus irmãos (Gil, Jeferson, Rangles, Jeremias, Neto, Cris, Lydia e Elder). Em especial, minha irmã Cris, meus irmãos Neto e Elder, por em todos esses cinco anos de luta, estarem comigo me dando apoio não somente financeiro, mas principalmente, psicológico. Amo vocês.

À minha mãe por todo incentivo e confiança. Te amo mãe!

Às “meninas dos meus olhos” (Vivianne Andrede, Jéssica Kerina e Elyda Lima) por toda dedicação, força, carinho e principalmente, por todo amor dedicado a mim durante nossa convivência. Que seja eterno!

Às GDs (Agda Daiane, Ana Nilza de Oliveira, Maiara Santos e Raquel Dauth) por toda paciência, ajuda e incentivo durante esses cinco anos. Esses cinco anos de curso seria mais difíceis se não as tivesse ao meu lado.

A todos os amigos da geologia, com quem convivi os cinco anos mais produtivos da minha vida. Em especial, aos amigos Fabricia, Wilma, Katiane, Dorília, Fernando, Daniella, Alan e Silmara, pela confiança e ajuda nos momentos difíceis.

Ao meu “PRETINHO BÁSICO” favorito (Isaque Rodrigues), afinal, quem não tem um? Por ser meu amigo e companheiro.

Ao futuro geólogo, Allan Douglas, por sua, sempre, disponibilidade em me ajudar.

Aos professores da faculdade de geologia, José de Arimatéia, Marivaldo Nascimento, Raimundo Nonato, Francisco Ribeiro, Leonardo Brasil Felipe, sem vocês não teríamos chegado tão longe. Um agradecimento mais que especial para os professores; Antônio Emídio, Ana Valéria Pinheiro, Gilmara Regina e Aderson Lima, por exercerem, além do papel de professores, o papel de amigos educadores, obrigada pela paciência, dedicação e incentivo.

Ao meu orientador, Joel Buenano Macambira, por sua disponibilidade e ensinamentos.

Ao PROCNAV (projeto de cavidades) que tornou possível a realização deste trabalho a partir seu financiamento.

À minha Co-Orientadora Daniele Freitas pelos ensinamentos que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigada Daniele, por todo carinho e amizade.

Aos meus amigos (Priscila neves, Priscila Morais, Rodrigo, Junior, Talyane e Dione), por acreditarem que eu seria capaz e por encorajar meus sonhos.

Ao Sr Cassiano e família, pelo incentivo e ajuda durante esses cinco anos.

À Joelma, técnica do laboratório de laminação da Universidade Federal do Pará, pela disponibilidade e paciência.

À Ana Paula, técnica do laboratório de microscopia eletrônica de varredura da Universidade Federal do Pará, pela disponibilidade.

Aos meus parentes, amigos e vizinhos que não foram citados aqui, mas que de alguma forma, contribuíram para meu crescimento pessoal.

RESUMO

O platô S11D está inserido no conjunto de 45 platôs da Serra Sul que situa-se na Província Mineral de Carajás, no sudeste do estado do Pará. A região encontra-se no domínio geomorfológico do Planalto Dissecado do Sul do Pará. Os platôs exibem topo geralmente plano a ondulado, com cotas variando de 500 a 800 m. Na porção mais arrasada, ocorre um pediplano regional com cotas variando de 250 a 350 m. Nesta porção, observa-se a ocorrência de platôs e serras isoladas, com cotas superiores a 500 m, dentre os quais a Serra Sul, que constituem resquícios da Superfície Sul Americana, desenvolvida entre o Cretáceo e Terciário Superior. Nesta área ocorre uma grande quantidade de cavidades que se desenvolveram como produtos de intemperismo de formações ferríferas e rochas associadas do Grupo Grão-Pará. O presente estudo consistiu na caracterização mineralógica e petrográfica de uma cavidade (S11D-47) localizada em Serra Sul, precisamente no platô S11D. Os métodos utilizados neste estudo foram essencialmente, levantamento bibliográfico referente ao assunto, petrografia e difratometria de raios – X. A partir das análises macro, microscópica e análise mineralógica por DRX feitas em amostras de rocha da parede, piso, teto, observou-se que essas porções são constituídas pelo mesmo material. Rocha de coloração vermelho amarelado, aspecto terroso, textura porosa/cavernosa, localmente friável. Foram observadas cavidades circulares a subcirculares centimétricas, preenchidas por um material esbranquiçado, com textura sedosa e material gelatinoso com coloração amarelada. A rocha encontra-se bastante porosa; esses poros exibem contornos irregulares, por vezes, interconectados tornando-se alongados. Mineralogicamente, a rocha constitui-se predominantemente de hematita, gibbsita, goethita. O material esbranquiçado constitui-se de montmorillonita, rancieíta e caulinita, enquanto que o material de coloração amarelada com textura gelatinosa constitui-se, predominantemente de hematita, nissonita, gibbsita e ferrowyllieita. Microscopicamente, foi observado que a hematita ocorre preferencialmente como cristais granulares dispersos em um plasma criptocristalino de goethita e apresentam-se também como finos revestimentos que circundam as bordas dos poros. A gibbsita ocorre preenchendo parcial ou totalmente os poros e preenchendo microfraturas. A goethita ocorre como um plasma criptocristalino. Os minerais: montmorillonita, rancieíta, caulinita nissonita e ferrowillieita foram identificados somente na análise por DRX, possivelmente, por se tratar de minerais de granulação muito fina. As texturas e assembleia mineral observadas sugerem que a mesma seja produto de uma intensa alteração supergênica e, estruturas como fraturas e falhas presentes na cavidade apontam para uma gênese fortemente favorecida pelo tectonismo da área. Essa hipótese também é corroborada pela interpretação da imagem LIDAR. Nesta imagem foi possível a visualização de um mega lineamento que corta, mais ou menos, N-S a Caverna estudada.

Palavras-chave: Rochas Máficas. Grupo Grão Pará. Intemperismo. Mineralogia. Cavernas.

ABSTRACT

S11D plateau is inserted into the set of Serra Sul plateaus that is located in the Província Mineral de Carajás in the southeast of Pará State. The region is in the area of Dissected Plateau South of Pará. Plateaus generally exhibit top plan wavy, with dimensions ranging 500-800 m. In the most devastated portion, there is a regional pediplain with quotas ranging 250-350 m. In this portion, there is occurrence of plateaus and isolated hills, with elevations above 500 m, of which Serra Sul é remnants of South American area, developed between Cretaceous and Tertiary Superior. There are a lot of cavities that developed as weathering products of iron formation and associated rocks of Grão Pará Group in this area. This study consisted of mineralogical and petrographic characterization of a cavity (S11D-47) located in Serra Sul, precisely on S11D plateau. Methods used were essentially literature related to the subject, petrography and X-Ray Diffraction (XRD). Application of these methods in rock samples from wall, floor, ceiling of this cavity. Description showed that the rock samples from wall, floor and ceiling of the cavity are made of the same material, which is a reddish yellow staining rock, soil aspect and friable. Locally, centimeter circular, subcircular features were observed filled with a whitish material, with silky texture and gelatinous yellowish material. Pores exhibit irregular contours sometimes interconnected becoming elongated. Mineralogically, the host rock consists of hematite, gibbsite, goethite and gibbsite. Whitish material are of montmorillonite, kaolinite and rancieite, while the yellowish material with gelatinous texture is constituted predominantly of hematite, nissonite, gibbsite and ferrowyllieite. Microscopically, it was observed that hematite is preferably as granular crystals dispersed in a goethite cryptocrystalline plasma and also show up as thin tapes that surround pores edges of gibbsite occurs partially or completely filling the pores and filling existing microfractures. Goethite occurs as a cryptocrystalline plasma. Minerals: montmorillonite, rancieite, nissonite kaolinite and ferrowyllieite were identified only in the XRD analysis, possibly because it is very fine-grained minerals. Textures observed that assembly and mineral rock, suggest that it is product of an intense supergene change, and fractures and structures present in the cavity strongly suggest a genesis area controlled by tectonics.

Keywords: Mafic Rocks. Grão Pará. Weathering. Mineralogy. Caves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Mapa de localização e acesso da Serra Sul.....	14
FIGURA 2 – Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico.....	18
FIGURA 3 – Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás.....	19
FIGURA 4 – Aspectos geomorfológicos da Serra Sul demonstrando topos aplainados característico.....	28
FIGURA 5 – Mapa geológico da Serra Sul, Corpo S11D, com destaque à cavidade de estudo. Modificado de Cabral (2014).	29
FIGURA 6 – Planta Baixa da Cavidade S11D-47 de aspecto morfológico esponjiforme, com a localização dos pontos de coleta das amostras estudadas.....	30
FIGURA 7 – Aspectos gerais da caverna S11D-47. (A) amostra de mão evidenciando (seta vermelha) cavidades irregulares parcialmente preenchidas por material amarelado. (B) amostra de mão mostrando a crosta branca (C) amostra de mão com textura porosa/cavernosa. (D) observar as fraturas na parede da caverna.....	31
FIGURA 8 – Características gerais da rocha estudada. (A) Poros irregulares, arredondados e interconectado.(10X) luz refletida. (B) Hematita granular imersa em um plasma criptocristalino de goethita. (20x) Luz refletida. Nicóis //. (C) Hematita como finos revestimentos bordejando espaços vazios. (20X). Luz refletida. Nicóis //. (D) Plasma goethítico criptocristalino. (50X). Luz refletida. Nicóis //. (E) Goethita com hábito fibroradial intercrescida nas paredes dos poros. (20X). Luz refletida. Nicóis //. (F) Gibbsita preenchendo parcialmente microfissuras. (4X).Luz transmitida. Nicóis cruzados.	33
FIGURA 9 – (A) Agregados de gibbsita com maclamento plissintético. (4X). Luz transmitida. Nicóis cruzados. (B) Agregados fibroradiados de gibbsita intercrescida na borda da cavidade. (10x). Luz transmitida. Nicóis cruzados.....	34
FIGURA 10 - Difratoograma mostrando o grau de cristalinidade dos minerais da porção avermelhada da caverna. (Gbs = Gibbsita, Hem = Hematita, Gt = goethita).....	35
FIGURA 11 – Difratoograma mostrando o grau de cristalinidade dos minerais da crosta branca da caverna.(Mnt = Montmorilonita, Klm = Caulinita).	36
FIGURA 12 – Difratoograma mostrando o grau de cristalinidade dos minerais da porção amarelada da caverna. (Gbs = Gibbsita, Hem = Hematita).	36
FIGURA 13 – (A) Imagem LIDAR da Serra Sul com o posicionamento da caverna. (B) Detalhe da imagem LIDAR mostrando o mega lineamento que a caverna está inserida e	

perpendicular ao lineamento, o vale. (C) Detalhe mostrando a intersecção dos alinhamentos NW-SE, NE-SW e NNW-SSE com a planta baixa da caverna no centro. 39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO	14
1.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	15
2 MATERIAIS E MÉTODOS	16
3 GEOLOGIA REGIONAL	18
4 GEOLOGIA LOCAL.....	23
4.1 GEOLOGIA DO GRUPO GRÃO PARÁ (GGP)	23
4.2 SÍNTESE SOBRE ALTERAÇÃO SUPERGÊNICA DE ROCHAS MÁFICAS DO GRUPO GRÃO PARÁ.....	25
4.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	27
5 PETROGRAFIA.....	29
5.1 ASPECTOS MACROSCÓPICOS DA CAVERNA (S11D-47)	29
5.2 ASPECTOS MICROSCÓPICOS	32
6 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DRX	35
6.1 PORÇÃO AVERMELHADA	35
6.2 CROSTA BRANCA.....	35
6.3 PORÇÃO AMARELADA COM TEXTURA GELATINOSA	36
7 DISCUSSÃO	37
8 CONCLUSÃO.....	40
9 REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste, fundamentalmente, na caracterização petrográfica e mineralógica de uma caverna (S11D-47), originada a partir do intemperismo de rochas máficas do Grupo Grão Pará, mais precisamente, da Formação Parauapebas. Esta cavidade está localizada na unidade espeleológica de Carajás, situada no Sudeste do Pará. O presente trabalho tem como objetivo, detalhar os processos que levaram a formação dessa caverna.

Os estudos relacionados à gênese de cavernas ainda é bem restrito, principalmente quando se trata de cavidades desenvolvidas como produtos de intemperismo de rochas máficas. Há alguns anos, quando se falava em cavernas no Brasil, estava subentendido que se tratava de cavidades desenvolvidas em calcário, afinal, a grande maioria delas, principalmente as maiores, estavam inseridas nessa litologia. Porém, com o avanço dos estudos espeleológicos foi possível a identificação de cavidades desenvolvidas sob diversas litologias. Na região da Serra dos Carajás a primeira referência a cavernas deve-se a Tolbert *et al.* (1971), que relata a ocorrência de grandes cavidades encontradas sob o manto de canga, posteriormente, com a progressão dos trabalhos realizados pelo Grupo Espeleológico do Pará (GEP), a partir do ano de 2000, o qual consistiu na prospecção nas Serras Norte, Sul, Leste, Tarzan e Bocaína, foi possível a descoberta de mais de 1.100 cavidades na região, a maioria dessas cavidades, já registradas, é constituída por duas litologias: em Formação Ferrífera Bandada (FFB) e em canga detrítica. Em outras litologias, tais como arenitos, máficas alteradas e ferricretes foram também identificadas, porém, em menores quantidades (PILÓ; AULER, 2009).

É importante ressaltar que os estudos referentes à gênese de cavernas desenvolvidas sob rochas máficas alteradas são bem escassos, destacando-se apenas, os estudos feitos pela CARSTE (PILÓ; AULER, 2009), que buscou caracterizar macroscopicamente, as litologias identificadas, estruturas como fraturas, juntas de alívio, dobras e falhas, sem se prender a mineralogia e petrografia da mesma e por Maurity e Kotschoubey (1994) que busca o entendimento da gênese de cavernas em lateritas. Por esse motivo, este trabalho é de suma importância, pois o mesmo busca detalhar, macro e microscopicamente os minerais presentes na rocha para entender os processos que levaram a formação dos mesmos, assim como, procurar entender quais fatores propiciaram o desenvolvimento da cavidade estudada.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal a caracterização petrográfica e mineralógica de rochas que compõem a caverna S11D-47, através da análise macro e microscópica, além de análises feitas a partir do DRX. Todas essas análises foram de suma importância para o reconhecimento e descrição de texturas, assembleia mineral e microestruturas presentes, que darão, por sua vez, subsídio ao entendimento dos processos de formação da caverna.

1.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O corpo S11D está localizado na porção sul de Carajás, no município de Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará. O acesso à área, a partir de Marabá, se dá pela PA 150 até a cidade de Eldorado dos Carajás, a partir desta, segue-se pela PA 275 até Parauapebas. Em seguida, através da rodovia Raimundo Mascarenhas, chega-se ao Núcleo Urbano de Carajás, segue-se pelos platôs N4 e N5, de onde se continua, através de uma estrada de chão até a Serra Sul (Figura 1).

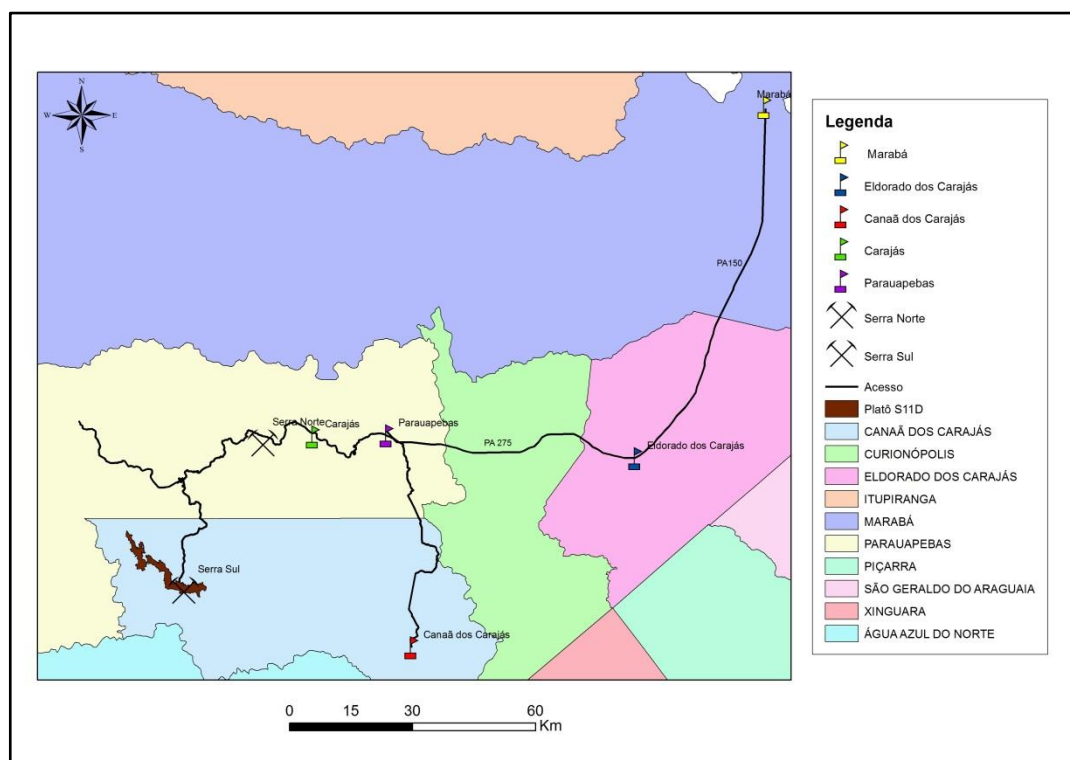


FIGURA 1 – Mapa de localização e acesso da Serra Sul.

1.3 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

A Província Mineral de Carajás exibe padrão de relevo marcado pela presença de serras de topos aplainados denominados de planaltos residuais. Os topos dessas serras são comumente sustentados por litotipos mais resistentes, tais como meta-arenitos da Formação Águas Claras, Formação Ferríferas, Jaspilitos e rochas vulcânicas do Grupo Grão Pará, além de crostas lateríticas ferruginosas (VALENTIM; OLIVITO, 2009).

Sobre esses terrenos desenvolve-se, originalmente, floresta Ombrófila densa ou aberta submontana, essas variações são locais e estão associadas a mudanças de relevo. Nas áreas escarpadas, predomina a vegetação de médio porte, enquanto que nos platôs, a floresta fica mais densa com vegetação de grande porte e é interrompida por clareiras naturais onde ocorrem depósitos lateríticos denominados, genericamente de “Canga” (ARAÚJO; MAIA, 1991).

O solo predominante na região é do tipo Latossolo Vermelho distrófico; originado pela alteração das rochas máficas presentes (ARAÚJO; MAIA, 1991).

O clima dominante na região em questão é o tropical úmido, com precipitação pluviométrica média anual de 1.600 mm e temperatura média anual de 26°C. Segundo a distribuição anual das precipitações pluviométricas, distinguem-se duas estações; a estação chuvosa, onde os volumes mais expressivos concentram-se no período de dezembro a maio e a precipitação média mensal é da ordem de 300 mm. O período seco inclui os meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro, cuja média mensal de precipitação é da ordem de 30 mm (VALENTIM; OLIVITO, 2009).

A bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas responde pela drenagem da região, caracteriza-se por uma rede hidrográfica fortemente condicionada à estruturação tectônica do local, consistindo de padrão retangular e subretangular (VALENTIM; OLIVITO, 2009).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos aplicados a este trabalho são representados nas seguintes etapas:

✓ Levantamento bibliográfico

Esta etapa foi realizada no decorrer deste trabalho e, compreendeu ao levantamento bibliográfico referente à geologia regional e local da área estudada, principalmente sobre cavidades desenvolvidas em formações ferríferas, que consiste na formação com maior número de cavernas e, cavernas desenvolvidas sobre outros litotipos, como as desenvolvidas em rochas máficas, foco do presente trabalho.

✓ Etapa de Campo

Nesta etapa foram coletadas, no dia 26/06/2013, pela coordenadora do projeto (PROCAV), Daniele Freitas Gonçalves, 7 amostras referentes a porções do teto, parede e piso da caverna S11D-47. Essas amostras foram coletadas com o intuito de observar, macro e microscopicamente de forma clara e precisa as texturas, assembleia mineral e microestruturas presentes.

✓ Petrografia

Esta etapa foi de suma importância para o avanço deste trabalho. Primeiramente, foi feita análise macroscópica das amostras, com a utilização da lupa binocular, onde foi possível identificar alguns minerais, a quantidade relativa dos vazios, coloração e aspectos texturas da rocha. Em seguida, foram confeccionadas cinco lâminas delgadas no laboratório de Laminação da UFPA, infelizmente, não foi possível a confecção de lâminas delgadas de duas amostras que foram coletadas (S11D-47-AM-04 e S11D-47-AM-06), a primeira, por se tratar de uma rocha friável e a segunda, por se tratar de restos de Guano, sendo inviável a confecção de lâmina. Em seguida, com a utilização do microscópio óptico em luz transmitida e refletida, foi feita a análise microscópica das lâminas, no laboratório de mineralogia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, onde foi possível reconhecer os minerais e as microestruturas presentes.

✓ Difração de Raios-X (DRX)

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

3 GEOLOGIA REGIONAL

O Cráton Amazônico é uma das maiores áreas cratônicas do mundo e ocorre ao norte da América do Sul. Abrange uma superfície de aproximadamente 4.500.00 km², sendo dividido em dois escudos, o do Guaporé e o das Guianas, separados pelas rochas sedimentares da Bacia paleozoica do Amazonas. O Cráton é limitado por cinturões orogênicos neoproterozoicos (Tucavaca, na Bolívia, Araguaia-Cuiabá e Tocantins, no Brasil) e tem permanecido estável desde 1.0 Ga. É dividido em seis províncias geocronológicas (Amazônia Central, Maroni – Itacaiúnas, Ventuari – Tapajós, Rio Negro – Juruena, Rondonian – San Ignácio e, Sunsás), representadas na figura 2 (TASSINARI; MACAMBIRA, 1999).

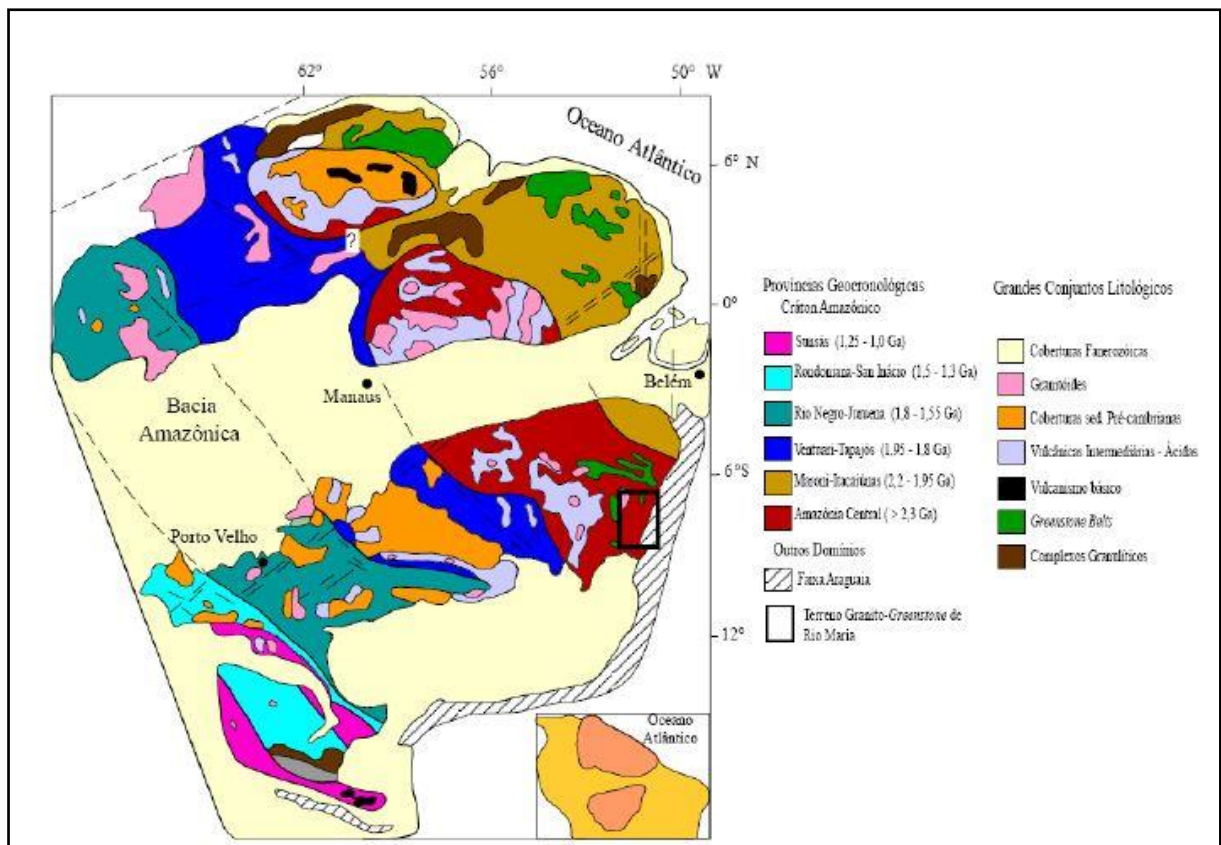


FIGURA 2 – Províncias geocronológicas do Cráton Amazônico.
Fonte: Tassinari e Macambira (1999).

A evolução do Cráton Amazônico é resultado de sucessivos episódios de acreção crustal durante o Paleo e Mesoproterozoico, em volta de um núcleo mais antigo, estabilizado no Arqueano (TASSINARI; MACAMBIRA, 2004).

A Província Mineral de Carajás (PMC) está situada no sudeste do Cráton Amazônico, sudeste do estado do Pará (ALMEIDA *et al.*, 1981). Encontra-se limitado pelo

Cinturão Araguaia a leste, pelo Rio Xingu a oeste, pela Serra do Bacajá ao norte e pela Serra dos Gradaús ao sul (DOCEGEO, 1988). Esta província, corresponde uma das mais importantes reservas minerais do Brasil, contendo os maiores depósitos de Fe do mundo, além de Au, Cu, Mn, Ni e Pt. Pertence à Província Amazônia Central, de idade arqueana, e divide-se em três domínios tectônicos: Terreno Granito-*Greenstone* Rio Maria, ao sul; Bloco Carajás, ao norte; e Domínio de Transição, localizado na porção central (Figura 3) (DALL'AGNOL *et al.* 1997).

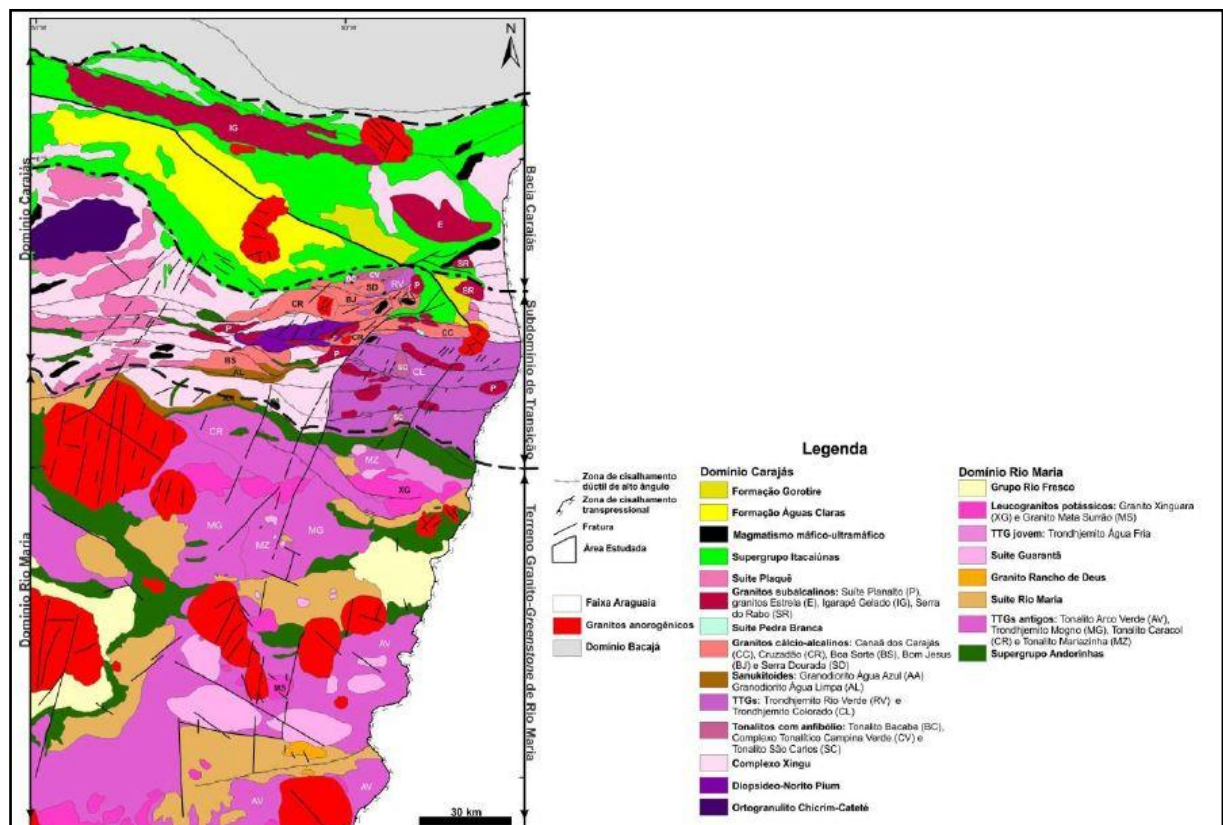


FIGURA 3 – Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás.

Fonte: Gabriel e Oliveira (2013).

O Terreno Granito *Greenstone* Rio Maria (TGGRM) é formado por *greenstone belts* do Supergrupo Andorinhas e por cinco principais grupos de granitoides (MACAMBIRA; LAFON¹, 1995; ALTHOFF; BARBEY; BOULLIER², 2000; LEITE³, 2001; LEITE *et al.*⁴,

¹ MACAMBIRA, M. J. B.; LAFON, J. M. Geocronologia da Província Mineral de Carajás; Síntese dos dados e novos desafios. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. 7 p. 263-287, 1995.

² ALTHOFF, F. J.; BARBEY, P.; BOULLIER, A. M. 2.8-3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral province, Brazil). *Precambrian Research*, v. 104, p. 187-206, 2000.

³ LEITE, A. A. S. *Geoquímica, petrogênese e evolução estrutural dos granitoides arqueanos da região de Xinguara, SE do Cráton Amazônico*. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém.

2004; DALL'AGNOL *et al.*⁵, 2006; OLIVEIRA *et al.*⁶, 2009; ALMEIDA *et al.*⁷, 2010, 2011⁸ *apud* FEIO, 2011). 1) Séries TTGs mais antigas formadas em dois episódios distintos, sendo o mais antigo (2,96 ± 0,02 Ga), representado pelo Tonalito Arco Verde e Trondhjemitógeno Mogno, seguido em 2,93 ± 0,02 Ga pela formação do Complexo Tonalítico Caracol, Tonalito Mariazinha e algumas rochas do Tonalito Arco Verde; 2) granitóides predominantemente granodiorítica com alto Mg (2,87 Ga), formado pelo Granodiorito Rio Maria, rochas intermediárias e máficas associadas e com afinidade sanukitóide; 3) leucogranodioritos e leucomonzogranitos cálcico-alcálico enriquecidos em Ba e Sr, representados pela Suíte Guarantã e granitos similares (2,87 Ga), 4) TTGs mais jovens, correspondentes ao Trondhjemitógeno Água Fria (2,86 Ga); 5) leucogranitos potássicos (2,86 Ga), representados pelos granitos Xinguara, Mata Surrão e similares.

O Bloco Carajás, corresponde à Bacia de Carajás, situa-se na porção norte da Província Mineral de Carajás. O evento magmático amplamente dominante na Bacia Carajás é representado pelo vulcanismo máfico do Supergrupo Itacaiúnas, com idade de aproximadamente 2,76 Ga (FEIO, 2011). Gibbs *et al.* (1986) e Macambira (2003) consideram que, a evolução dessa Bacia está ligada a rift continental, porém, Meirelles e Dardene (1991), Lobato *et al.* (2005) e Silva *et al.* (2005) a consideram como um bloco com evolução relacionada a arcos magmáticos.

DOCEGEO (1988 *apud* VASQUEZ *et al.*, 2008), propôs a designação Supergrupo Itacaiúnas para englobar o Grupo Grão Pará e unidades supracrustais similares, grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Igarapé Bahia e Rio Novo, que ocorrem na Serra dos Carajás. A principal característica das unidades deste supergrupo é serem formadas predominantemente

⁴ LEITE, A. A. S.; DALL'AGNOL, R.; MACAMBIRA, M. J. B.; ALTHOFF, F. J. Geologia e Geocronologia dos granitóides Arqueanos da região de Xinguara (PA) e suas implicações na evolução do Terreno Granito-Greenstone de Rio Maria. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, p. 447-458, 2004.

⁵ DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M. A.; ALMEIDA, J. A. C.; ALTHOFF, F. J.; LEITE, A. A. S.; OLIVEIRA, D. C.; BARROS, C. E. M. Archean and paleoproterozoic granitoids of the carajás metallogenic province, eastern amazonian cráton. In: SYMPOSIUM ON MAGMATISMO, CRUSTAL EVOLUTION, AND METALLOGENESIS OF THE AMAZONIAN CRATON, *Excution Guide*, Belém, 2006. p. 99-150.

⁶ OLIVEIRA, M. A.; DALL'AGNOL, R.; ALTHOFF, F. J.; LEITE, A. A. S. Mesoarchean sanukitoid rocks of the Rio Maria Granite-Greenstone Terrane, Amazonian craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 27, p. 146-160, 2009.

⁷ ALMEIDA, J. A. C.; DALL'AGNOL, R.; DIAS, S. B.; ALTHOFF, F. J. Origin of the Archean leucogranodiorite-granite suites: Evidence from the Rio Maria terrane and implications for granite magmatism in the Archean. *Lithos*, v. 187, p. 201-221, 2010.

⁸ ALMEIDA, J. A. C.; DALL'AGNOL, R.; OLIVEIRA, M. A.; MACAMBIRA, M. J. B.; PIMENTEL, M. M.; RÂMÔ, O. T.; GUIMARÃES, F. V.; LEITE, A. A. S. Zircon geochronology and geochemistry of the TTG suites of the Rio Maria granite-greenstone terrane: Implications for the growth of the Archean crust of Carajás Province, Brazil. *Precambrian Research*, v. 120, p. 235-257, 2011.

por rochas vulcano-sedimentares, de idade arqueana, apresentando graus variáveis de metamorfismo e litologias distintas do Supergrupo Andorinhas (TGGRM) (VASQUEZ *et al.*, 2008).

O Grupo Grão Pará é formado por uma espessa sequência de rochas vulcânicas, nas quais são, geralmente, distinguidos dois estratos, superior e inferior (Formação Parauapebas, com idade de 2759 ± 2 Ma (FEIO, 2011) e jaspilitos com minério de ferro associado (Formação Carajás) (VASQUEZ *et al.*, 2008). Este grupo, por conter a formação em que a cavidade de estudo está inserida, será melhor detalhada no capítulo de geologia local.

O Grupo Igarapé Salobo engloba rochas vulcano-sedimentares ocorrentes na porção NW da mina de ferro Carajás. Entretanto, Vasquez *et al.* (2008) sugerem uma nova definição para o Grupo Igarapé Salobo, que passa a incorporar somente rochas vulcano - sedimentares expostas na região de Serra do Salobo, enquanto que aquelas das serras Cinzento e Redenção seriam supracrustais do Domínio Bacajá (HIRATA *et al.* 1982).

O Grupo Igarapé Pojuca é formado por uma sequência metavulcano-sedimentar Arqueana, metamorfisada na fácies xisto verde alto a anfibolito baixo, que constitui uma faixa estreita e alongada, segundo a direção N50°W, com mergulhos variando entre 50°NE e 60°SW (FARIAS *et al.*, 1984; DOCEGEO 1984) e é constituído, predominantemente, por anfibolitos, BIFS e Xistos (MACAMBIRA, 2003).

O Grupo Igarapé Bahia abrange um pacote vulcano-sedimentar, metamorfisado em fácies xisto verde, de direção NNW, subverticalizado, composta predominantemente por pelitos, arenitos, grauvacas, tufos, diabásios e gabros. O Grupo Burutinama é composto por quartzitos micáceos e micaxistos intensamente alterados (DOCEGEO, 1988; MACAMBIRA, 2003).

Na Bacia Carajás também estão presentes coberturas siliciclásticas, representadas pela Formação Águas Claras (NOGUEIRA, 1995) e a Formação Gorotire (LIMA; PINHEIRO, 2001). A Formação Águas Claras é uma cobertura siliciclástica arqueana, não metamorfisada, distribuída amplamente na porção central da estrutura sigmoidal da Serra dos Carajás. A porção inferior dessa formação contém uma associação de pelitos, siltitos e arenitos sobrepostos por arenitos (NOGUEIRA, 1995).

A Formação Gorotire é composta por arenitos arcoseanos imaturos, associados a conglomerados polimíticos que afloram na porção leste da Folha Carajás e está relacionada à reativação da Falha Carajás ocorrida no Mesoproterozoico (LIMA; PINHEIRO, 2001).

O Domínio de Transição está situado entre o Terreno Granito Greenstone de Rio Maria e a Bacia Carajás. Devido à escassez de dados geológicos e geocronológicos, o

domínio de transição é pouco conhecido, porém, as informações disponíveis apontam a presença de ortogranulito Chicrim-Cateté (VASQUEZ *et al.*, 2008 *apud* FEIO, 2011), Diopsídio-norito Pium (SANTOS *et al.*⁹, 2008 *apud* FEIO 2011), granitoides e gnaisses indiferenciados do Complexo Xingu (FEIO, 2011), seguidas pela Suíte Intrusiva Cateté (MACAMBIRA; VALE¹⁰, 1997 *apud* FEIO, 2011), da Suíte Pedra Branca (SARDINHA *et al.*¹¹, 2004; GOMES; DALL'AGNOL¹², 2007 *apud* FEIO, 2011) e dos plútons das Suítes Plaquê e Planalto (FEIO, 2011).

⁹ SANTOS, R. D.; OLIVEIRA, D. C.; BORGES, R. M. K. Geologia e Petrografia das rochas máficas e ultramáficas do Complexo Pium-Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44., 2008. Curitiba. *Anais...*, Curitiba: SBGeo, 2008. p. 535.

¹⁰ MACAMBIRA, E. M. B.; VALE, A. G. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. São Felix do Xingu. Folha SB.22-Y-B. Estado do Pará. Brasília: DNPM/CPRM, 1997. 384p.

¹¹ SARDINHA, A. S.; DALL'AGNOL, R.; GOMES, A. C. B.; MACAMBIRA, M. J. B.; GALARZA, M. A. Geocronologia Pb-Pb e U-Pb em zircão de granitoides arqueanos da região de Canaã dos Carajás, Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42., 2004. CD-ROM.

¹² GOMES, A. C. B.; DALL'AGNOL, R. Nova associação tonalítica-trondhjemitica neoarqueana na região de Canaã dos Carajás: TTG com altos conteúdos de Ti, Zr e Y. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 37, p. 182-193, 2007.

4 GEOLOGIA LOCAL

4.1 GEOLOGIA DO GRUPO GRÃO PARÁ (GGP)

Este grupo, segundo Macambira (2003) é a sequência Vulcano-sedimentar que teria preenchido a “Bacia Grão Pará” no Arqueano. O GGP é parte importante da Província Mineral de Carajás, contém numerosos depósitos e ocorrências minerais e apresenta potencial para valiosas descobertas, mas é pouco conhecida nos seus aspectos ambiental e metalogenético (MACAMBIRA, 2003). A proposta cronolitoestratigráfica de Macambira (2003) para o Grupo Grão Pará está representada na TABELA 1 e será detalhada mais adiante.

TABELA 1 – Coluna cronolitoestratigráfica do Grupo Grão Pará.

ARQUEANO	GRUPO GRÃO PARÁ	Formação Igarapé Boa Sorte	Siltitos e folhelhos carbonáticos, com arenitos subordinados
		Formação Igarapé Cigarra	Basaltos, tufos, BIF, chert, quartzo wacke e quartzo arenito
		Formação Carajás	BIFs com soleiras de basalto
		Formação Parauapebas	Basaltos e riolitos

Fonte Macambira (2003).

Macambira (2003) dividiu o GGP em quatro unidades: Formação Parauapebas, Formação Carajás, Formação Igarapé Cigarra e Formação Igarapé Boa Sorte.

A Formação Parauapebas tem aproximadamente 4 a 6 km de espessura (GIBBS *et al.* 1986). Esta formação é representada por rochas vulcânicas máficas, hidrotermalmente alteradas e com feições primárias preservadas, tais como amígdalas e textura intergranular. As estruturas primárias sugerem a ocorrência de vários derrames e contribuições piroclásticas, que forma um corpo estratiforme em contato concordante com a Formação Carajás, acima (ZUCCHETTI, 2007).

Os basaltos dessa formação apresentam ainda, segundo Gibbs e Wirth¹³ (1990 *apud* ZUCCHETTI, 2007), topos brechados e escurecidos com clorita, quartzo, pirita e outros minerais secundários que preenchem amígdalas.

A Formação Parauapebas é composta essencialmente por basaltos e diabásio, além de ocorrências localizadas de riolitos (MACAMBIRA *et al.*, 1990)

Gibbs *et al.* (1986), realizou um estudo de datação radiométrica pelo método Rb-Sr em rocha total nos basaltos desta formação que indicou uma idade de 2.687 ± 54 Ma. Enquanto que Wirth *et al.* (1986), utilizando o método U-Pb em zircões de riolitos, dataram uma idade de 2.758 ± 39 Ma.

Macambira (2003) realizou o estudo de mais de uma centena de amostras de rochas vulcânicas máficas e, identificou três grupos: 1) Basaltos com mineralogia e texturas preservadas e pouco ou nada hidrotermalizadas, 2) Basaltos fortemente hidrotermalizados e, 3) Meta – Basaltos.

As rochas máficas do grupo 1, apresentam, macroscopicamente, coloração cinza escura a esverdeada, meso e melanocráticas, de granulação fina a média, compostas mineralogicamente por plagioclásio, piroxênio, quartzo, titanita, biotita, clorita, zeólita e carbonatos. As estruturas encontradas ocorrem localmente e são representadas por microfraturas e amígdalas preenchidas por carbonatos, quartzo e clorita. A composição média do plagioclásio An₃₇ faria com que a rocha fosse classificada como andesito, porém, o teor de minerais máficos é superior a 40% fazendo com que a mesma seja classificada como basalto. A composição do plagioclásio seria atribuída ao hidrotermalismo que as afetou, tornando a composição do plagioclásio mais sódica. O quartzo encontra-se em menor proporção (4 %), apresentam forma subédricas e extinção ondulante. As amígdalas estão preenchidas por clorita, carbonatos e quartzo, muitas vezes com arranjo concêntrico (MACAMBIRA; SILVA, 1998).

O grupo 2 apresenta rochas de coloração verde, granulação fina, fraturadas, com presença de epidoto, calcedônia, carbonato, e outros minerais secundários. O plagioclásio apresenta composição sódica e, a ausência do piroxênio é relacionada a sua uralitização, enquanto que a clorita e os anfibólios são os minerais principais.

O grupo 3 compreende rochas de coloração verde clara, granulação muito fina, composta quase exclusivamente por clorita e quartzo. Essas rochas são predominantes em

¹³ GIBBS, A.K., WIRTH, K.R. Geologic setting of the Serra dos Carajás Iron Deposits, Brazil. In: CHAUVEL, J-J et al. (Eds.). *Ancient Banded Iron Formations*. Athens: Theophrastus Publications, p. 83-102. 1990.

faixas associadas os planos de falhas de rejeito de até 100m, de orientação NW – SE, largura de até dezenas de metros. Essas zonas de movimentação atingiram os basaltos da Formação Parauapebas e provocaram a recristalização e mobilização de fluidos, que geraram rochas de ocorrência localizadas denominadas de meta-basaltos (MACAMBIRA, 2003).

A Formação Carajás é constituída essencialmente por formação ferrífera bandada de fácies óxido do tipo jaspilito (MACAMBIRA 2003).

A Formação Igarapé Cigarra foi proposta por Macambira *et al.* (1990) para o conjunto de rochas que Gibbs *et al.* (1986) denominaram de Sequência Paleovulcânica Superior, formada por rochas vulcânicas básicas semelhantes àquelas da Sequência Paleovulcânica Inferior, das quais se diferem por intercalações lenticulares de formação ferrífera.

A Formação Igarapé Boa Sorte foi definida por Macambira *et al.* (1990) constituindo a unidade mais superior do Grupo Grão Pará. Outros autores, como Gibbs e Wirth (1990 *apud* MACAMBIRA, 2003) também interpretam essas rochas como sendo parte superior do GGP, porém, Nogueira *et al.* (1995), consideram-nas como Membro Inferior da Formação Águas Claras. A Formação Igarapé Boa Sorte é composta essencialmente por siltitos com intercalações de folhelhos, ambos carbonosos e carbonáticos, com níveis arenosos em direção à base. Esses siltitos e folhelhos são finamente laminados, cinza-escuros, constituídos por quartzo, rodocrosita, muscovita e caulinita, além de matéria carbonosa (MACAMBIRA, 2003).

4.2 SÍNTESE SOBRE ALTERAÇÃO SUPERGÊNICA DE ROCHAS MÁFICAS DO GRUPO GRÃO PARÁ

Antes de se começar a detalhar de fato os aspectos petrográficos e mineralógicos da caverna estudada; desenvolvida em produtos do intemperismo de rochas básicas, achou-se necessário o desenvolvimento de um breve resumo baseado no trabalho de Lemos (1981).

O trabalho de Lemos (1981) focaliza a alteração supergênica das rochas vulcânicas básicas do Grupo Grão Pará. As rochas básicas são de idade pré-cambriana e foram classificadas como basaltos toleíticos. A assembleia mineralógica primária, segundo esta autora, é composta predominantemente por labradorita e pigeonita-augita, tendo como acessórios

principais zircão, ilmenita e opacos. Eventos hidrotermais causaram modificações mineralógicas nessas rochas, produzindo clorita, epidoto, calcita, sericita, anfibólio e quartzo.

Em seu trabalho, Lemos (1981) ressalta que os processos supergênicos são resultado da intensa transferência de massa, da rocha para a solução aquosas percolante e na formação de uma nova suíte mineralógica compatível com as condições reinantes na superfície da Terra.

Na assembleia de minerais primários das rochas básicas de composição basáltica, onde piroxênio, plagioclásio cálcico e olivina dominam, verifica-se que este último mineral pode se transformar em serpentina através de reações isovolumétricas em que os excessos de magnésio e sílica são removidos em solução (TURNER; VERHOOGEN, 1960 *apud* LEMOS, 1981).

Em um estágio mais avançado de alteração, a serpentina se transforma em montmorilonita e clorita, porém, com a lixiviação mais intensa ocorre também a destruição desses minerais, obtendo-se como produto, a caulinita, óxidos e hidróxidos de ferro que se acumulam formando um horizonte argiloso rico em ferro. Os piroxênios nos primeiros estágios de alteração produzem clorita e/ou montmorilonita. Com a lixiviação mais intensa, obtém-se um resíduo enriquecido em caulinita e óxidos de titânio e ferro. Os plagioclásios, por sua vez, podem transforma-se em haloisita, caulinita e montmorilonita mal cristalizada (LOUGHNAN, 1969; SIEGEL, 1974 *apud* LEMOS, 1981).

Com o avanço do processo de lixiviação, a própria caulinita pode vir a ser destruída, liberando alumina que, por cristalização, gera gibbsita. Se condições propícias impostas pelo clima, vegetação, topografia e movimento das águas subterrâneas forem suficientemente prolongadas, pode restar material residual apenas enriquecido em gibbsita ou óxidos e hidróxidos de ferro, resultando em um horizonte bauxíticos ou laterítico a depender da predominância de Al ou do Fe (HARDEN; BATESON, 1963 *apud* LEMOS, 1981).

Estudos simulados de intemperismo nas rochas, mostram que a velocidade de dissolução da sílica dos silicatos por solução aquosa aumenta consideravelmente com o aumento da temperatura e decréscimo do pH, sendo a sílica amorfa mais solúvel do que os hidróxidos de ferro e alumínio por toda a variação de pH esperado nas soluções dos solos e águas subterrâneas (LEMOS, 1981).

Segundo Lemos (1981), a migração do alumínio pode ocorrer na forma de complexos iônicos em soluções com pH abaixo de 4 ou acima de 10. Dentro desta faixa de pH a concentração de alumínio é muito baixa, de forma que a alumina pode ser acumulada como um resíduo insolúvel (GARNDNER, 1980 *apud* LEMOS, 1981).

O ferro é considerado imóvel dentro da faixa normal de pH de grande parte das soluções aquosas naturais (pH = 6-9), seja como simples íon ou como complexo inorgânico, pode, porém, ser transportado em alguma extensão como íon complexo orgânico ou como hidróxido em suspensão coloidal (águas superficiais) (LEMOS, 1981).

4.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

O platô S11D está inserido no conjunto de 45 platôs da Serra Sul que situa-se na Província Mineral de Carajás, no sudeste do estado do Pará. A região encontra-se no domínio geomorfológico do Planalto Dissecado do Sul do Pará. Os platôs exibem topo geralmente plano a ondulado, com cotas variando de 500 a 800 m. Na porção mais arrasada, ocorre um pediplano regional com cotas variando de 250 a 350 m. Nesta porção, observa-se a ocorrência de platôs e serras isoladas, com cotas superiores a 500 m, dentre os quais a Serra Sul, que constituem resquícios da Superfície Sul Americana, desenvolvida entre o Cretáceo e Terciário Superior. Nesta área ocorre uma grande quantidade de cavidades que se desenvolveram como produtos de intemperismo de formações ferríferas e rochas associadas do Grupo Grão Pará (VALENTIM; OLIVITO, 2009).

A Serra Sul (Figura 4) possui aproximadamente 73 km de extensão e 845km² de área. Engloba relevo de serra alinhada com orientação WNW, com alturas que variam de 100 a 300 m, atingindo frequentemente altitudes superiores a 600 m. É sustentada predominantemente por litotipos do Grupo Grão Pará e subordinadamente por metassedimentos terrígenos da Formação Águas Claras. Este relevo apresenta geralmente topo aplainado, angulares e até arredondados, e com vertentes côncavas – convexas mais acentuadas na base. Os topos mais aplainados são sustentados por formações ferríferas e canga de minério de ferro (VALENTIM; OLIVITO, 2009).



FIGURA 4 – Aspectos geomorfológicos da Serra Sul demonstrando topos aplainados característico.

5 PETROGRAFIA

5.1 ASPECTOS MACROSCÓPICOS DA CAVERNA (S11D-47)

A caverna estudada encontra-se inserida na borda SE do platô S11D, em área de ocorrência da Formação Parauapebas, observado na FIGURA 5. Sua entrada apresenta altitude de 725,0 m, projeção horizontal de 72,0 m e área total de 359,0 m². O padrão morfológico desta caverna se enquadra no padrão espongiforme definido pela CARSTE (PILÓ; AULER, 2009). Este padrão caracteriza-se por apresentar condutos de tamanhos variados, em alguns casos, de formato globular, que se interconectam, normalmente, por passagens mais estreitas, como poros de uma esponja (Figura 6).

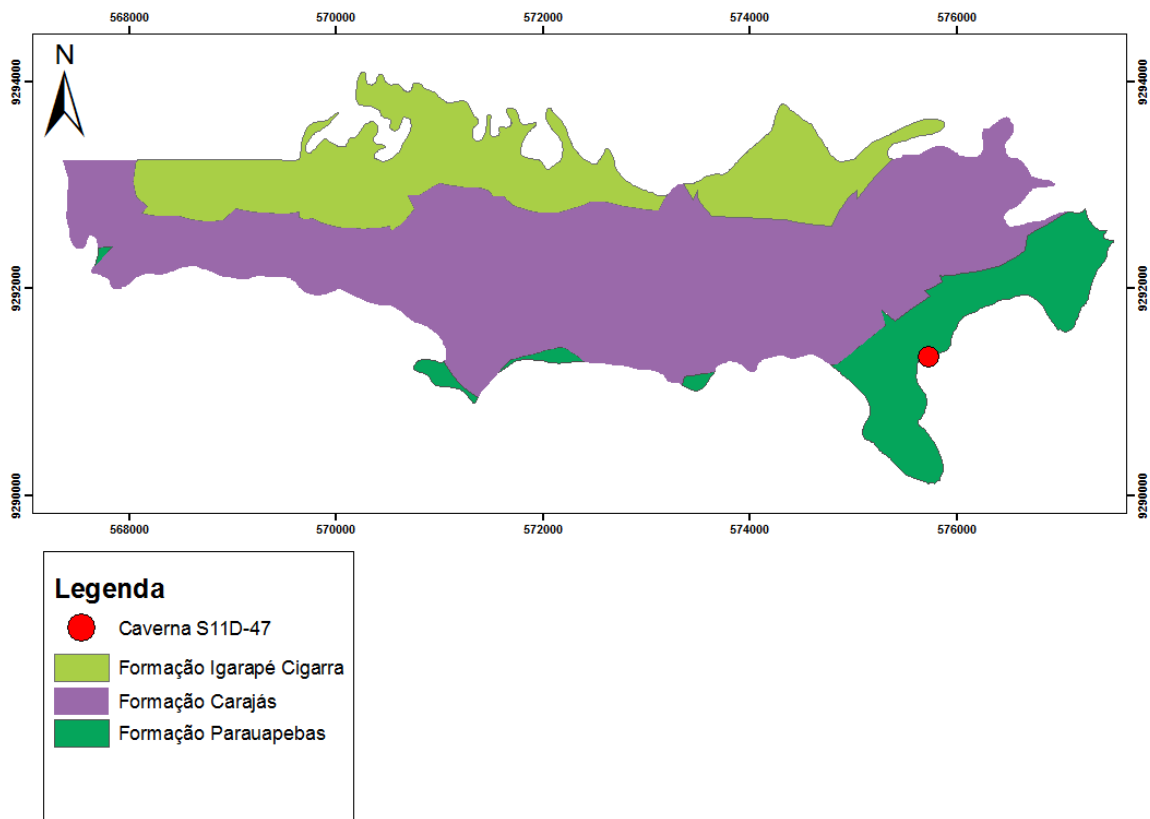


FIGURA 5 – Mapa geológico da Serra Sul, Corpo S11D, com destaque à cavidade de estudo. Modificado de Cabral (2014).

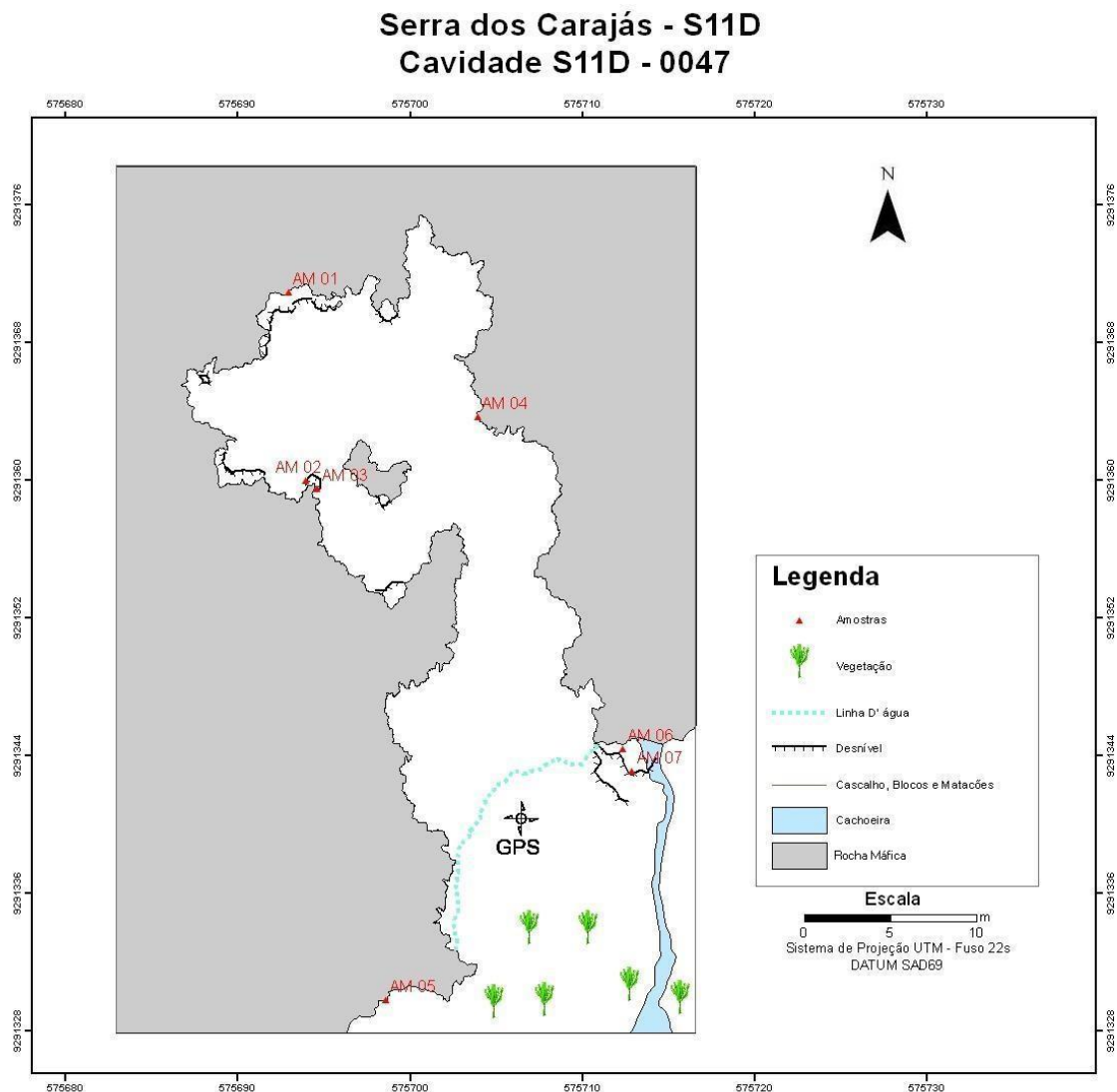


FIGURA 6 – Planta Baixa da Cavidade S11D-47 de aspecto morfológico espongiiforme, com a localização dos pontos de coleta das amostras estudadas.

Na descrição macroscópica observou-se que todas as amostras (teto, parede e piso) exibem coloração vermelho amarelada, aspecto terroso, por vezes apresentam-se friáveis. Exibem cavidades circulares e subcirculares de 2 a 3,5 cm preenchidas por material amarelado (Figura 7A) com textura gelatinosa e em algumas porções observa-se a presença de uma crosta branca (Figura 7B). A rocha apresenta elevado grau de porosidade (Figura 7C).

Foram observadas fraturas que sustentam a parede da caverna (Figura 7D). O piso exhibe, por vezes, porções mais escuras devido à umidade, não apresenta crosta branca e não contém material amarelado com textura gelatinosa, feições comuns no teto e da parede, entretanto, a coloração e aspectos texturais, de modo geral, são semelhantes ao restante da caverna.

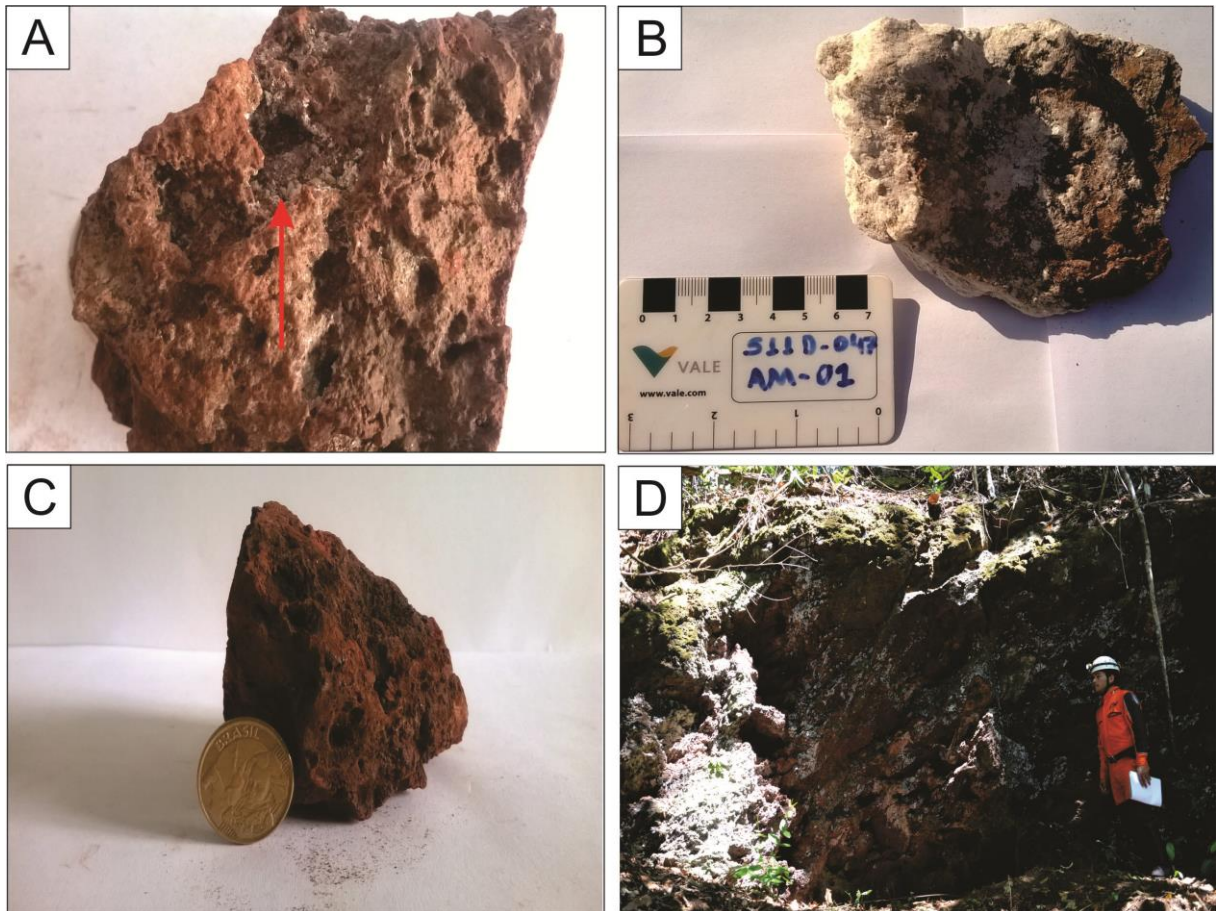


FIGURA 7 – Aspectos gerais da caverna S11D-47. (A) amostra de mão evidenciando (seta vermelha) cavidades irregulares parcialmente preenchidas por material amarelado. (B) amostra de mão mostrando a crosta branca (C) amostra de mão com textura porosa/cavernosa. (D) observar as fraturas na parede da caverna.

5.2 ASPECTOS MICROSCÓPICOS

Ao microscópio, essas rochas mostram-se bastante alteradas, com textura porosa bem desenvolvida (Figura 8A). De forma geral, apresenta cristais de hematita com textura granular imersos em um plasma goethítico criptocristalino de coloração vermelho amarelado (Figura 8B). Em algumas porções da lâmina foi identificado cristais de gibbsita que preenchem parcial ou totalmente, poros e microfissuras.

Os poros dessa rocha exibem formas irregulares, às vezes arredondados e, em algumas porções essas feições encontram-se interconectados tornando-se alongados (Figura 8A). Apresentam dimensões que variam de 0,1mm a 1mm.

Os cristais de hematita exibem, predominantemente, textura granular, coloração branca acinzentada, birreflectância ausente e, anisotrópico. Esses cristais encontram-se, na maioria das vezes, com contornos irregulares e tamanhos que variam de 0,001mm a 2mm. Foi observado também, cristais de hematita que se apresentam como finos revestimentos que bordejam espaços vazios (Figura 8C).

A goethita apresenta-se, geralmente, como um plasma criptocristalino de coloração vermelho amarelada (Figura 8D). Observa-se, pontualmente, cristais de goethita com hábito fibroradial, intercrescido nas paredes dos vazios (Figura 8E).

Os cristais de gibbsita são subédricos, ocorrem preenchendo parcial ou totalmente zonas porosas e microfissura, exibindo maclamento polissintético característico. Encontram-se também como cristais microcristalinos sob a forma agregados fibrorradiados com maclamento polissintético, dispersos em um plasma goethítico (Figura 9A e Figura 9B).

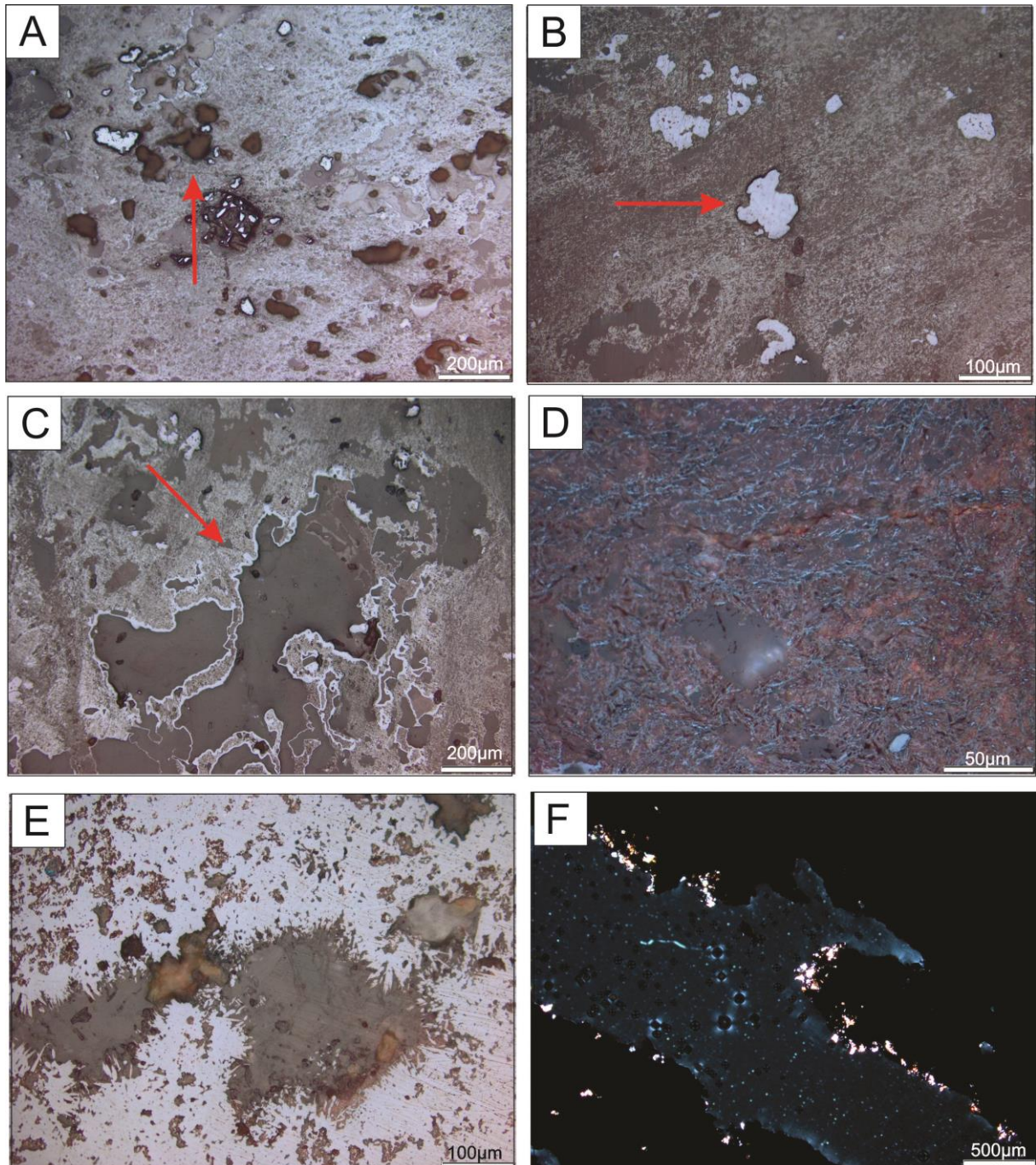


FIGURA 8 – Características gerais da rocha estudada. (A) Poros irregulares, arredondados e interconectado.(10X) luz refletida. (B) Hematita granular imersa em um plasma criptocristalino de goethita. (20x) Luz refletida. Nicóis //. (C) Hematita como finos revestimentos bordejando espaços vazios. (20X). Luz refletida. Nicóis //. (D) Plasma goethítico criptocristalino. (50X). Luz refletida. Nicóis //. (E) Goethita com hábito fibroradial intercrescida nas paredes dos poros. (20X). Luz refletida. Nicóis //. (F) Gibbsita preenchendo parcialmente microfissuras. (4X).Luz transmitida. Nicóis cruzados.

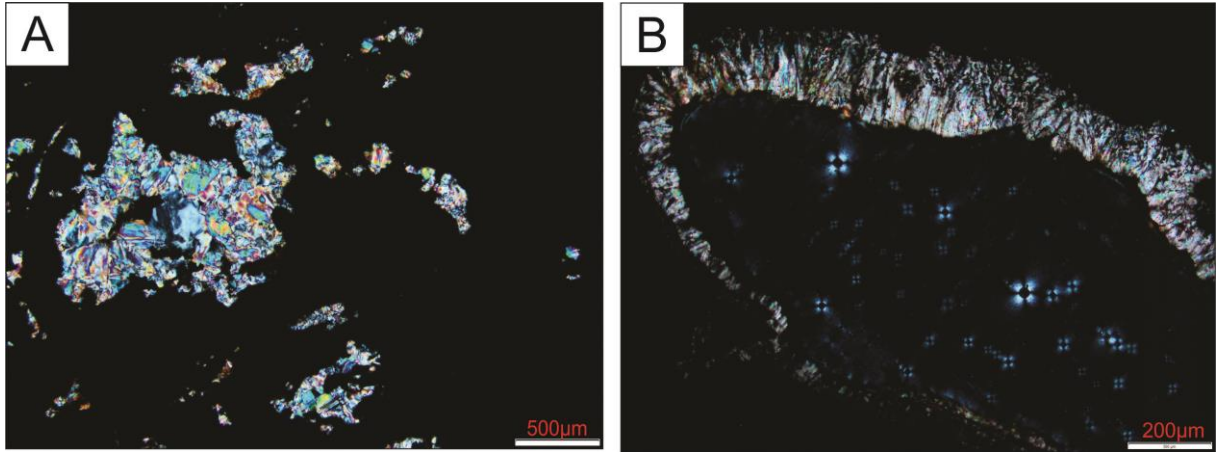


FIGURA 9 – (A) Agregados de gibbsita com maclamento plissintético. (4X). Luz transmitida. Nicóis cruzados. (B) Agregados fibrorradiados de gibbsita intercrescida na borda da cavidade. (10x). Luz transmitida. Nicóis cruzados.

6 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DRX

As análises por DRX foram feitas levando em consideração a coloração e os aspectos texturais da rocha, com isso, levou-se para análise criteriosa porções de coloração avermelhada, coloração branca e porções de coloração amarelada com textura gelatinosa. Os resultados dessas análises serão apresentados a seguir.

6.1 PORÇÃO AVERMELHADA

Esta porção apresentou cristais de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), hematita (Fe_2O_3) e goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$). O difratograma de raios X revelou elevado grau de cristalinidade para a gibbsita enquanto que a hematita e goethita apresenta grau de cristalinidade inferior (Figura 10).

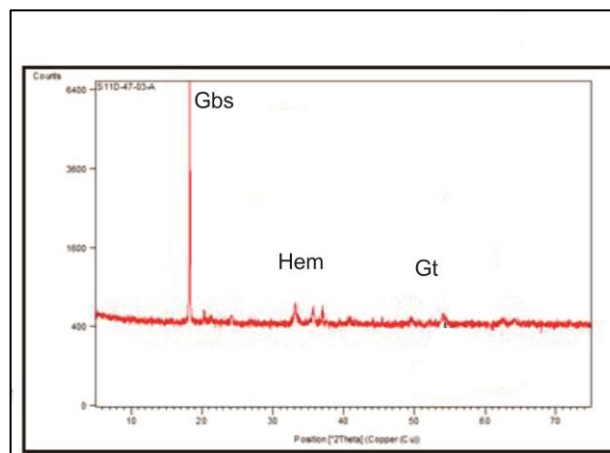


FIGURA 10 - Difratograma mostrando o grau de cristalinidade dos minerais da porção avermelhada da caverna. (Gbs = Gibbsita, Hem = Hematita, Gt = goethita).

6.2 CROSTA BRANCA

O difratograma de raio x dessa porção, revelou a presença de montmorilonita ($\text{Al}(\text{OH})_2\text{Al}_2\text{SiO}_{10}(\text{OH})_2$), rancieita ($(\text{Ca}, \text{Mn})\text{Mn}_4\text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), sendo a montmorilonita é o mineral de maior grau de cristalinidade, enquanto que a rancieita e a caulinita apresentaram menor grau de cristalinidade. Esses minerais não foram visualizados

ao microscópio óptico, possivelmente, devido apresentarem granulação muito fina (Figura 11).

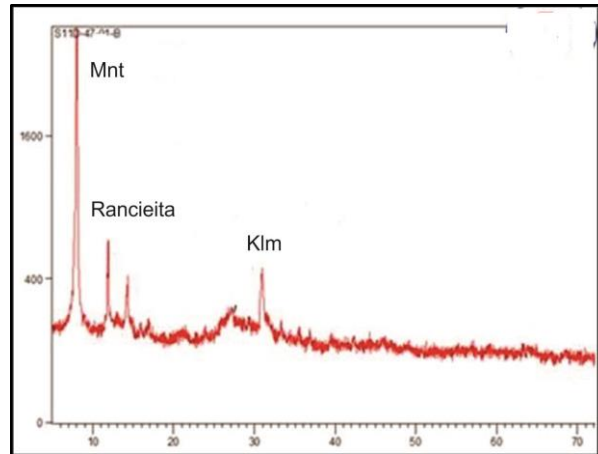


FIGURA 11 – Difratoograma mostrando o grau de cristalinidade dos minerais da crosta branca da caverna. (Mnt = Montmorilonita, Klm = Caulinita).

6.3 PORÇÃO AMARELADA COM TEXTURA GELATINOSA

A análise por DRX dessa porção revelou a presença de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), hematita (Fe_2O_3), ferrowillieita ($\text{AlFe}_2\text{Na}(\text{PO}_4)_3$) e nissonita ($\text{Cu}_2\text{Mg}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})$). Sendo a gibbsita e hematita os minerais com grau de cristalinidade mais elevado e os dois últimos minerais com grau de cristalinidade bem inferior (Figura 12).

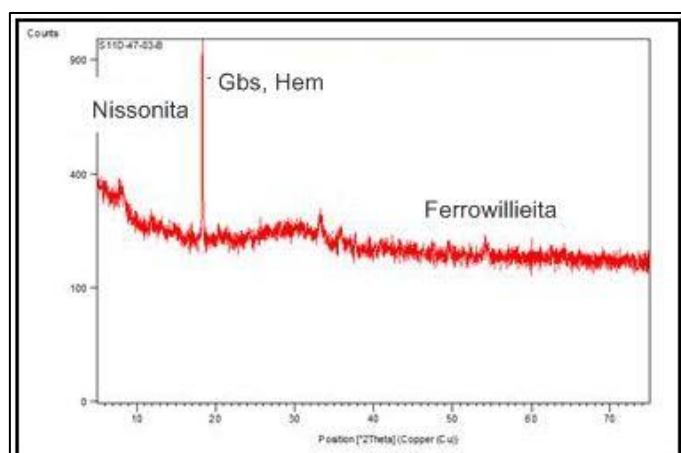


FIGURA 12 – Difratoograma mostrando o grau de cristalinidade dos minerais da porção amarelada da caverna. (Gbs = Gibbsita, Hem = Hematita).

7 DISCUSSÃO

A caverna, alvo deste estudo, está inserida no platô S11D, desenvolvida sob rochas vulcânicas da Formação Parauapebas. As rochas vulcânicas dessa formação são constituídas, segundo Macambira e Silva (1998), por plagioclásio, piroxênio, quartzo, titanita, biotita, clorita e carbonato. Segundo Lemos (1981) e Macambira (2003) essas rochas são constituídas, predominantemente por plagioclásio e piroxênios.

Nesse trabalho, infelizmente, não se teve contato com rocha inalterada, portanto, não foi possível a identificação de minerais primários e de estruturas reliquias, entretanto, a partir da assembleia mineralógica presente, constituída por hematita, gibbsita, goethita, montmorilonita, caulinita, ferrowillieita, nissonita, sugere-se que a rocha estudada se tratava de uma rocha basáltica enriquecida em piroxênio e plagioclásio. Baseado em Lemos (1981), foi feita uma relação dos supostos minerais primários com os minerais secundários, estes teriam se originados pela intensa alteração supergênica superimposta nestas rochas. Primeiramente, os piroxênios, por serem os minerais mais instáveis com relação ao plagioclásio, nos primeiros estágios de alteração, transformaram-se em montmorilonita e, com a intensa lixiviação foi possível a formação de cristais de caulinita pouco cristalizada. O plagioclásio também pode ter sido alterado para montmorilonita e caulinita.

Com o avanço dos processos de lixiviação, pode ter ocorrido a dessilicificação da caulinita, liberando alunina para o sistema e reprecipitando na forma de gibbsita nas microfissuras e zonas porosas.

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

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

A rancieita ($(\text{Ca}, \text{Mn})\text{Mn}_4\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), silicato de manganês com cálcio, provavelmente se formou a partir de processos supergênicos, onde minerais contendo

manganês, em contato com a atmosfera se desestabilizaram e oxidaram. Esse processo foi citado por Creus (2012), que afirma se tratar de uma substituição pseudomórfica por oxidação.

A gênese de cavernas desenvolvidas em produtos intempéricos (Lateritas) foi discutida por Maurity e Kotschoubey (1994). Segundo esses autores, a formação destas feições está associada ao rebaixamento do nível de base, provavelmente resultante do tectonismo epirogenético, que pode ter afetado toda a região no Terciário Superior ou Quaternário.

Maurity e Kotschoubey (1994) relacionam a evolução dessas formas com a geração de zonas de baixa densidade, através da eluviação química e da degradação da parte inferior, abaixo da crosta. A erosão física é mais atuante nas bordas do platô, com o aumento dos fluxos aquosos em regime vadoso, remove os materiais menos coesos gerando as cavidades.

Quanto aos fatores que propiciaram a formação da caverna em estudo, ainda é bem complexo, entretanto, os docentes participantes do PROCAV (Projeto de Cavidades em Carajás) têm discutido sobre o assunto e listaram uma série de fatores propícios à gênese de cavernas na região. São eles:

- 1) Litologia: haveriam rochas naturalmente mais suscetíveis à dissolução que teriam maior possibilidade de desenvolver cavidades;
- 2) Estrutural: estruturas, tais como dobras, falhas, contatos litológicos, etc, desenvolveriam caminhos preferenciais para as soluções, facilitando a percolação e dissolução em determinadas zonas, cujo o arranjo espacial seria propício para o desenvolvimento de cavidades;
- 3) Hidrológico: o controle da infiltração, percolação, oscilação do lençol freático e presença de zonas menos permeáveis poderia favorecer a concentração de migração de água em determinados locais, onde a dissolução seria mais efetiva e haveria o desenvolvimento das cavernas.
- 4) Estratigráfico: haveriam níveis estratigráficos mais propícios à dissolução dentro de uma determinada camada de rocha ou de uma formação litoestratigráfica. Vale ressaltar que existem outros fatores que, além desses, foram citados por Cabral (2014).

Entre os controles acima citados, foi observado que a caverna em estudo, possivelmente, teve como controle fundamental para seu desenvolvimento a estruturação do terreno. Através da análise da imagem LIDAR (Figura 13A) foi possível identificar que a caverna está inserida sobre um mega lineamento e perpendicular ao lineamento nota-se a

presença de um vale (Figura 13B). Essa hipótese é corroborada pela presença de fraturas que ocorrem na entrada da caverna (ver página 31, figura 7D).

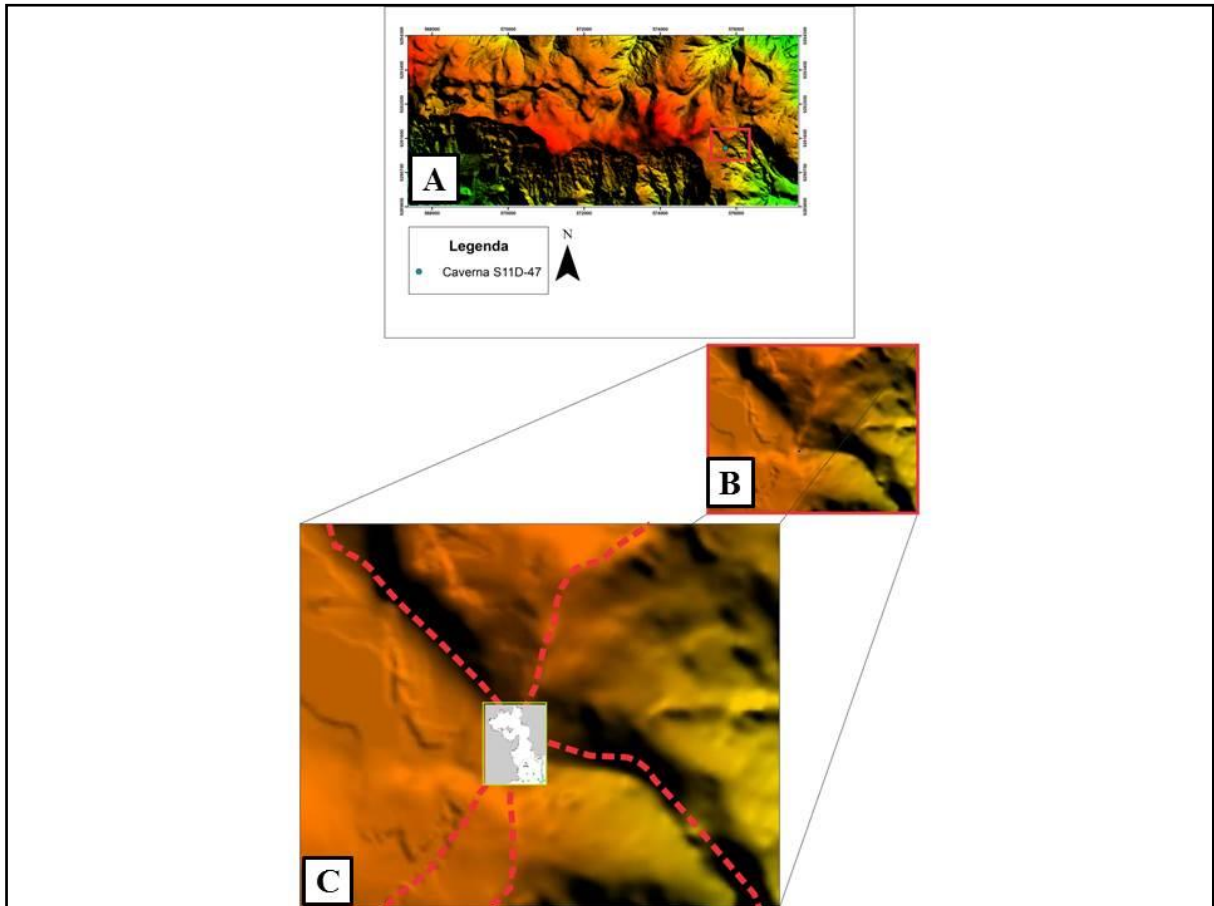


FIGURA 13 – (A) Imagem LIDAR da Serra Sul com o posicionamento da caverna. (B) Detalhe da imagem LIDAR mostrando o mega lineamento que a caverna está inserida e perpendicular ao lineamento, o vale. (C) Detalhe mostrando a intersecção dos alinhamentos NW-SE, NE-SW e NNW-SSE com a planta baixa da caverna no centro.

8 CONCLUSÃO

Os estudos mineralógicos e petrográficos, além da análise de imagem LIDAR permitiu concluir que:

✓ A caverna desenvolveu-se em basaltos da Formação Parauapebas, hoje, constituiu-se por saprólito de basalto, em vias de lateritização.

✓ Não existem mais minerais primários, sendo composta, atualmente, por hematita, gibbsita, goethita, montmorilonita, caulinita, nissonita, rancieita e ferrowillieita, todos são produtos do intemperismo.

✓ Há uma crosta laterítica que recobre e protege a caverna, evitando seu desabamento.

✓ A caverna localiza-se ao lado de uma drenagem ativa, mostrando intenso fluxo de água, que seria responsável pela dissolução do saprólito em planos preferenciais NNW-SSE (Ver página 30, Figura 6).

✓ Existe um nítido controle estrutural registrado por fraturas e lineamentos (Ver página 31, Figura 7D e página 39, Figura 13C, respectivamente).

✓ As fraturas presentes serviram como condutos para percolação de água. O avanço desse processo provocou alargamento das estruturas e lixiviação dos minerais primários.

✓ As evidências indicam que a caverna é condicionada pela existência de uma crosta superposta e, por um intenso fluxo de água meteórica em planos preferenciais NNW-SSE.

✓ O fato da caverna ter se desenvolvido em saprólito de basaltos mostra que esses fatores são suficientes para gerar caverna, independentemente do tipo de rocha pretérita, ou seja, o intemperismo e o condicionante estrutural são os responsáveis diretos pela gênese desta caverna.

9 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Review*, v. 17, p. 1-19. 1981.

ARAÚJO, O. J. B.; MAIA, R. G. N. 1991. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos. Programa Grande Carajás. Serra dos Carajás. Folha SB.22-Z-A. Estado do Pará*. Brasília: CPRM/DNPM, 1991. 136p. (Texto Explicativo).

CABRAL, E. S. *Petrografia de formações ferríferas (bif's) associadas a cavernas da Serra Sul (Serra Dos Carajás – PA)*. 2014. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências e Engenharias, Marabá.

CREUS, A. J. Rancièita, bustamita, cummingtonita y neotocita, nuevos hallazgos en la mina la Serrana, el molar, torragona. *Revista de Minerales*, Barcelona, v. 2, n. 1, p. 17-17, 2012.

DALL'AGNOL, R.; RÄMÖ, O. T.; MAGALHÃES, M. S.; MACAMBIRA, M. J. B. Archean granitoids as magma sources for the anorogenic Paleoproterozoic Jamon and Musa granites (Eastern Amazonian Craton): new constraints based on geochemical and Sm-Nd isotopic data. In: SOUTH AMERICAM SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 1997, Campos do Jordão. *Extended abstracts...* Campos do Jordão: 1997. p. 96-97.

DOCEGEO. *Relatório de pesquisa do projeto Cobre Carajás-Pojuca*. Belém, 1984. v. 1, 149 p.

DOCEGEO. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. *Anais...* Belém: SBG: 1988. p. 10-54.

FARIAS, N. F.; SANTOS, A. B. S.; BIAGINI, D. O.; VIEIRA, E. A. P.; MARTINS, L. P. B.; SAUERESSIG, R. Jazidas Cu-Zn da área Pojuca, Serra dos Carajás, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984. Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1984. v 8, p. 3658-3668.

FEIO, G. R. L. 2011. *Magmatismo granitóide arqueano da área de Canaã dos Carajás: implicações para a evolução crustal da Província Carajás*. 2011. 190 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Petrologia) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém.

GABRIEL, E. O.; OLIVEIRA, D. C. 2013. Petrologia magnética dos granodioritos Água Azul e Água Limpa, porção sul do Domínio Carajás – Pará. *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, v. 13, n. 4, p. 89-110, 2013.

GIBBS, A. K.; WIRTH, K. R.; HIRATA, W. K.; OLSZESWKI, J. R. W.S. Age and Composition of the Grão Para Group Volcanics, Serra dos Carajás. *Rev. Bras. Geociências*, v. 16, n. 2, p. 201-211, 1986.

GONÇALVES, D. F. *Cobertura de alteração laterítica-bauxítica da serra do Piriá e fosfatos associados – NE do estado do Pará*. 2002. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém.

HIRATA, W. K.; RIGON, J. C.; KADEKARU, K.; CORDEIRO, A. A. C.; MEIRELES, E. M. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. In: SIMP. GEOL. AMAZ., 1., 1982. Belém. *Anais...* Belém: SBG, 1982. p. 100-108.

LEMONS, V. P. *Alteração supergenica das rochas básicas do Grupo Grão Pará- implicações sobre a gênese do depósito de bauxita de N5- Serra dos Carajas*. 1981 (Tese de Mestrado.)

LIMA, F. D.; PINHEIRO, R. V. L. Formação Gorotire: Consideração sobre uma unidade siliciclástica particular da Serra dos Carajás-PA. In: REIS, N. J; MONTEIRO, M. A. S. (Eds.). *Contribuição à Geologia da Amazônia*. Manaus: SBG-Núcleo Norte, v.2, p. 205-229. 2001.

LOBATO, L. M; FIGUEREDO, E.; SILVA, R. C.; ROSIÈRE, C. A.; ZUCCHETTI, M.; BAARS, F. J.; PIMENTEL, M; RIOS, F. J.; SEOANE, J. C. S.; MONTEIRO A. M. Hydrothermal origin for the iron mineralization, Carajás Province, Pará State, Brazil. In: *Proceedings Iron Ore 2005*. Melbourne: p. 99-110, 2005.

MACAMBIRA J. B. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. 2003. 217 f. Tese (Doutorado em Metalogênese) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, 2003.

MACAMBIRA, J. B.; RAMOS, J. F. F.; ASSIS, J. F. P.; FIGUEIRAS, A. J. M. *Projeto Serra Norte, Projeto Pojuca: relatório final*. Belém: UFPA/DOCEGEO/SEPLAN/DNPM, 1990. 150 p.

MACAMBIRA, J. B.; SILVA, S. A. A. 1998. Caracterização petrográfica dos basaltos do grupo Grão Pará na Serra Norte – Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1998. Belo Horizonte, *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1998, p. 127.

MACHADO, N., LINDENMAYER, Z.G., KROGH, T.E., LINDENMAYER, D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research* 49, 329-354

MAURITY, C. W.; KOTSCHUBEY, B. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1- Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, v. 7, p. 331-362, 1995.

MEIRELLES, M. R., DARDENE, M. A. Vulcanismo basáltico de afinidade shoshonítica em ambiente de arco Arqueano, Grupo Grão-Pará, Serra dos Carajás, Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1991. Rio de Janeiro, *Anais...* Rio de Janeiro: SBG, 1991. v. 5, p. 2164-2174.

NOGUEIRA, A. C. R. *Análise Faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, Região Central da Serra dos Carajás – Pará*. 1995. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém.

PILÓ, L. B.; AULER, A. Geoespeleologia das cavidades em rochas ferríferas da região de Carajás, PA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30., 2009, Montes Claros. *Anais...* Montes Claros: SBE, 2009. p. 181-186.

SILVA, M. G.; TEIXEIRA, J. B. G.; PIMENTEL, M. M.; VASCONCELOS, P. M.; ARIELO, A.; ROCHAW, J. S. F. Geologia e mineralização de Fe-Cu-Au do alvo GT-46 (Igarapé Cinzento), Carajás. In: MARINI, J.; QUEITZ, E. T.; RAMOS, B. W. *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília: DNPM-CT/MINERAL, p 97-151, 2005

TASSINARI, C. C. G., MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, v. 22, n. 3, p. 174-182, 1999.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Orgs.). *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca, p. 471-485, 2004.

TOLBERT, G. E.; TREMAINE, J. W.; MELCHER, G. C.; GOMES, C. B.; The recently discovered **Serra** dos Carajás iron deposits, Northern Brazil. *Econ. Geol.*, v. 66, p. 985-99, 1971.

VALENTIM, R. F.; OLIVITO, J. P. R. Unidade espeleológica de Carajás: delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da IN-02/2009 MMA. *Espeleotema*, v. 22, n. 1, p. 41-60, 2009.

VASQUEZ, L.V., ROSA-COSTA, L.R., SILVA, C.G., RICCI, P.F., BARBOSA, J.O., KLEIN, E.L., LOPES, E.S., MACAMBIRA, E.B., CHAVES, C.L., CARVALHO, J.M., OLIVEIRA, J.G., ANJOS, G.C., SILVA, H.R. Unidades Litoestratigráficas. In: VASQUEZ, M. L.; ROSA-COSTA, L. T. da (Orgs.). *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM, p. 113-215, 2008.

WIRTH, K.R., GIBBS, A.K., OLSZEWSKI JR., W.J. U-Pb zircon ages of the Grão Pará group and Serra dos Carajás granite, Para, Brazil. *Revista Brasileira Geociências* 16(2), 195-200. 1986.

ZUCCHETTI, M. *Rochas máficas do Grupo Grão Pará e sua relação com a mineralização de ferro dos depósitos N4 e N5, Carajás – PA*. 2007. 165 f. Tese (Doutorado em Geologia Econômica e Aplicada) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte.