



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
FACULDADE DE GEOLOGIA
CAMPUS II-MARABÁ

ANA NILZA DE OLIVEIRA

**CONTRIBUIÇÃO HIDROGEOLÓGICA NA
FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DAS CAVIDADES
NATURAIS DA SERRA LESTE, CARAJÁS-PA.**

**MARABÁ- PA
2015**

ANA NILZA DE OLIVEIRA

**CONTRIBUIÇÃO HIDROGEOLÓGICA NA
FORMAÇÃO E EVOLUÇÃO DAS CAVIDADES
NATURAIS DA SERRA LESTE, CARAJÁS-PA.**

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.

Orientadora: Prof^a Dr^a Ana Valéria dos
Reis Pinheiro.

MARABÁ- PA
2015

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

Oliveira, Ana Nilza de

Contribuição hidrogeológica na formação e evolução das cavidades naturais da Serra Leste, Carajás-PA / Ana Nilza de Oliveira ; orientadora, Ana Valéria dos Reis Pinheiro. — 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. Hidrogeologia. 2. Cavernas. 3. Imagens de sensoriamento remoto. 4. Mapeamento geológico. 5. Jazidas. I. Pinheiro, Ana Valéria dos Reis, orient. II. Título.

CDD: 19. ed.: 551.49

ANA NILZA DE OLIVEIRA

**CONTRIBUIÇÃO HIDROGEOLÓGICA NA FORMAÇÃO E
EVOLUÇÃO DAS CAVIDADES NATURAIS DA SERRA
LESTE, CARAJÁS-PA.**

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

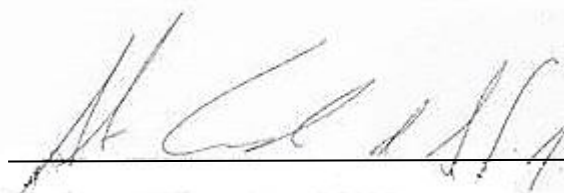
Data de aprovação: 24/10/2015

Conceito: EXC

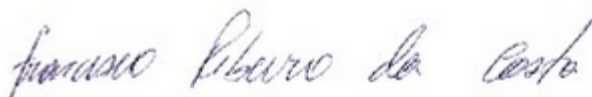
Banca examinadora:



Prof. Ana Valéria dos Reis Pinheiro-Orientadora
Doutora em Geologia
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará



Prof. Antônio Emídio Santos Júnior-Membro
Pós-Doutor em Sedimentologia e Estratigrafia
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará



Prof. Francisco Ribeiro da Costa
Mestre em Geologia
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

Aos meus pais. José Maria e Jaria Rosa,
tudo que eu sei e sou devo a eles.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda força que tem me dado durante esses cinco anos e pelo cuidado, pois sei que Ele cuida de mim em todo tempo.

À minha família, José, Jaria e Vinicius, eles são minha base, meu porto seguro, tudo que sou não seria possível sem eles, meus primeiros professores.

Aos meus tios e primos, Nelita, José Januário, Mateus e Lucas.

Aos amigos que mesmo distante sempre me apoiaram e torceram por mim, Jordanha, Andressa, Debora e Ronne.

À Ana Karita, meu exemplo de mulher forte e entusiasmada, você me ensinou muito sobre a vida. À Agda Dayane, pelas horas de distração e de longas conversas. À Maiara Vieira, pelo cuidado, amizade, e os cafezinhos durante os estudos. Ao Isaque Rodrigues, pelos anos amizade e de aprendizado. Vocês estavam ao meu lado durante todas as dificuldades e contratempos, tornaram esses cinco anos mais divertidos.

Ao meu amor, Allan Douglas, pela paciência, amor e carinho, por sempre me ajudar nos momentos de indecisões. Você é a minha melhor companhia nos momentos de tensão e nos momentos de alegrias.

Aos amigos que fiz durante o curso Viviane Andrade, Lourival Rodrigues, Rafael Lima, Francisco Félix. Amigos que vou levar por toda vida.

Ao Alan Rodrigo, meu exemplo de dedicação e esforço, Daneila Leite, pela alegria contagiante, Fabricia Sousa pela força e companheirismo.

À toda turma Geo 2010.

Aos professores da FAGEO, que se esforçaram em meio as dificuldades para formar verdadeiros geólogos, Ana Valéria, Antônio Emídio, Gilmara Regina, José de Arimatéia, Marivaldo Nascimento, Raimundo Nonato, Francisco Ribeiro, Leonardo Brasil, Aderson Lima. Eles aumentaram minha paixão pela geologia.

À minha orientadora Ana Valéria, por todo o apoio e dedicação durante todo o projeto e ao Profº Emídio pela grande ajuda e apoio durante os campos.

Aos parceiros da hidrogeologia, Maiara Vieira, Wilma Cléia, Marcio Henrique, Leandro Conceição, Anderson Silva e Lourival Costa.

À Empresa Vale, pelos dados fornecidos e pela disponibilidade de campo.

Ao Projeto PROCAV convênio VALE-FADESP-UFPA, pelo apoio financeiro com a concessão de bolsa de iniciação científica no período de março/2013 a março/2015. Agradecimento especial a Daniele Gonsalves Freitas, representante da empresa Vale e colaboradora do projeto.

A todos que passaram por minha vida durante a graduação e contribuíram para o meu crescimento como profissional.

RESUMO

A Província Mineral de Carajás é considerada uma das principais províncias minerais do planeta e compreende uma das maiores reservas mundiais de minério de ferro, manganês e cobre. Desde a última década, diversos estudos de prospecção, geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto, têm sido realizados na região, como forma de desenvolvimento de pesquisa científica e apoio a empresas de mineração atuantes na área. Tendo em vista o enorme número de cavernas mapeadas na área de Serra Leste – Carajás fez-se necessário um estudo de formação e evolução das cavidades naturais subterrâneas que são formadas frequentemente pela ação das águas que atuam dissolvendo e erodindo diferentes tipos de rochas e é o principal agente formador de cavidades. Aliado ao padrão estrutural presente nas cavidades, a água tanto em forma de drenagem, contidas nos poros da rocha e minerais ou ainda a água pluvial, são importantes agentes na dissolução e erosão da rocha, e com isso a evolução e progresso na formação das cavidades. O objetivo geral consiste em identificar e compreender como os processos hidrogeológicos contribuem para a formação das cavidades naturais de Serra Leste e para isso trabalhos preliminares foram realizados, em primeiro momento em grande escala com o auxílio de imagens de radar e de satélite, análise estrutural e pluviométrica e por fim um estudo de menor escala, onde foram visitadas cinco cavidades que permitem contar a história evolutiva das cavidades.

Palavras chaves: Hidrogeologia. Formação ferrífera. Estruturas Riedel

ABSTRACT

Carajás Mineral Province is considered one of the greatest mineral provinces in the world and comprises one of the world's largest reserves of iron ore, manganese and copper. Since last decade, several exploration studies (geological, geophysical and remote sensing) have been conducted in the region, as a means of scientific research and development support to mining companies operating in the area. Given huge number of caves mapped in the area of Serra Leste from Carajás, located in Curionópolis, southeast Pará. It's important the formation study and evolution of natural underground cavities that are often formed by water action that act dissolving and eroding different types of rocks and is the main cavity forming agent. Allied to structural pattern in the caves, water such drainage into the rock and minerals pores as river water are important agents in the dissolution and rock erosion, and thus evolution and progress in the formation of cavities. The overall objective is to identify and understand how hydrogeological processes contribute to formation of natural cavities from Serra Leste and for that preliminary work has been done. First instance, large-scale work corroborated with radar and remote sensing, structural analysis and rainfall; second, small-scale study with five caves founded that allow evolutionary history of caves.

Keyword: Hydrogeology. Iron formation. Riedel structures.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Mapa de localização da área de estudo.....	16
Figura 2: Mapa geológico do Domínio Carajás e áreas adjacentes mostrando os vários depósitos minerais (modificado por VASQUES <i>et al.</i> , 2008).....	23
Figura 3: Critérios para classificação da rede de drenagem de acordo com suas propriedades (SOARES & FIORI, 1976).....	30
Figura 4: Esquema de elipsoides de deformação de Riedel (VIALON <i>et al.</i> , 1991).	31
Figura 5- Mapa da rede de drenagem da área da Serra Leste.....	34
Figura 6- Mapas das zonas homólogas de drenagem na área da Serra Leste.....	35
Figura 7: Mapa de alinhamentos de drenagem e relevo.....	37
Figura 8: Mapas mostrando os elipsoides de deformação e as fraturas abertas encontradas na área de estudo.	38
Figura 9: Gráfico mostrando os meses de maior e menor pluviometria na Serra Leste.....	40
Figura 10: Isoieta média na área de Serra Leste, representando os meses de janeiro, fevereiro, março e abril.	41
Figura 11: Isoietas médias na área de Serra Leste, representando os meses de maio, junho, julho e agosto.....	42
Figura 12: Isoietas médias da área de Serra Leste, representando os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro.	43
Figura 13: Cavidades visitadas na Serra Leste.....	44
Figura 14- A: Flanco da dobra e fraturas, conferindo um controle estrutural da cavidade. B: Desenho Esquemático mostrando esse controle estrutural.....	46
Figura 15: Detalhe das falhas encontradas em toda a cavidade.	47
Figura 16: Flanco da dobra e fraturas com atitude de 170 Az, conferindo um controle estrutural a cavidade.	47
Figura 17- Foto mostrando a mudança litológica do teto (canga) com a parede (BIF'S) na cavidade SL-118.....	49

Figura 18: Foto mostrando a dimensão da caverna, o conduto hidráulico e a diferença litológica entre o teto e a parede da cavidade SL-118.....	49
Figura 19- A- Foto mostrando a formação do fosfato por dissolução seguida de precipitação e crosta branca. B-Espeleotemas (microestalactite) formados na canga. C- Condutos formados a partir da dissolução da sílica. D-Condutos formados a partir da dissolução da sílica. Cavidade SL-119.	50
Figura 20- Veios de quartzo com direções de 280°Az e 300°Az.....	50
Figura 21- Difícil acesso a cavidade, entrada da cavidade SL- 257.....	51
Figura 22- A- Blocos caídos na cavidade, tornando perigosa e dificultosa a movimentação no local. B- Umidade elevada da cavidade acentuando o processo de dissolução da rocha. C- Estrutura circular abundante na cavidade. D- Teto da cavidade (canga) e as falhas que controlam o abatimento de bloco.	52
Figura 23: Esquema mostrando o caminhamento da água na formação das cavidades. As falhas e dobras contribuem para a percolação e erosão de novas cavidades. Cavidade SL-201.	53
Figura 24: Esquema de percolação da água meteórica formando tubos; A) tubos formados em grande escala provavelmente responsável pela formação da cavidade; B) as mesmas formações em escala menor, mostrando que há um desenvolvimento na sua formação. Cavidade SL-118.	54
Figura 25: Cavidade com presença de água e apresenta forte evidência de abatimento de blocos formando vários patamares; A) estrutura circular desenvolvendo a erosão e formação de colunas; B) patamar superior da cavidade; C) blocos erodidos evidenciando a formação por erosão seguida de abatimento de blocos; D) piso da cavidade desenvolvendo erosão e posteriormente outro patamar poderá ser desenvolvido. Cavidade SL-257.....	55

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVO	15
1.3	LOCALIZAÇÃO E ACESSO	15
1.4	ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	16
1.4.1	Clima e Meteorologia	16
1.4.2	Relevo.....	18
2	GEOLOGIA REGIONAL	19
2.1	BACIA CARAJÁS	19
2.1.1	Supergrupo Itacaiúnas:.....	20
2.1.2	Granitos subalcalinos:.....	21
2.2	PETROGRAFIA E ESTRUTURA DE ROCHAS DA SERRA LESTE	24
2.2.1	Rochas Metabásicas.....	24
2.2.2	Rochas granitoides.....	26
2.2.3	Evolução Estrutural e Metamórfica da Serra Leste	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4	RESULTADOS	33
4.1	FOTOINTERPRETAÇÃO	33
4.1.1	Análise da Drenagem	34

4.1.2	Análise Estrutural	36
4.2	ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA	38
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS CAVIDADES.....	44
4.3.1	Cavidade SL-201.....	45
4.3.2	Cavidades SL-118, SL-119 e SL-120	48
4.3.3	Cavidade SL-257.....	51
5	DISCUSSÃO	53
6	CONCLUSÕES.....	57
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

As cavidades naturais subterrâneas são formadas frequentemente pela ação das águas que atuam dissolvendo e erodindo diferentes tipos de rochas, são comumente localizadas em rochas carbonáticas (calcários e dolomitos), pois são mais favoráveis aos processos de dissolução. Entretanto, arenitos e quartzitos são também muito susceptíveis a formar cavernas, aparentemente devido a fatores geomorfológicos e climáticos mais erosivos. Recentemente, constatou-se, em áreas de minério de ferro, a existência de um número expressivo de cavidades naturais. No Brasil encontram-se algumas das maiores reservas de minério de ferro do mundo e apresenta, portanto, um grande potencial espeleológico em cavidades nessa litologia. Com isso tornou-se necessário estudos mais detalhados nessas áreas, com o intuito de reconhecimento das estruturas e espeleotemas para assim catalogá-las e tomar medidas cabíveis para sua proteção diante da nova legislação sobre as cavernas, parte desse grande conjunto de cavernas será conservado, potencializando estudos e novas revelações para a espeleologia brasileira.

1.1 JUSTIFICATIVA

A Província Mineral de Carajás é considerada uma das principais províncias minerais do planeta e compreende uma das maiores reservas mundiais de minérios de ferro, manganês e ouro. Desde a última década, diversos estudos de prospecção (geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto) têm sido realizados na região, como forma de desenvolvimento de pesquisa científica e apoio a empresas de mineração atuantes na área. Tendo em vista que a formação de cavidades depende essencialmente da interação da água com as rochas solúveis, a Vale e UFPA tem realizado estudos hidrogeológico, em conjunto com outras linhas de pesquisas específicas, dando suporte à classificação das cavidades de acordo com seu grau de relevância, torna-se de fundamental importância o reconhecimento da viabilidade de lavra na área, de acordo com as leis federais de proteção ambiental. Os resultados irão contribuir para a classificação adequada das cavidades quanto ao grau de relevância e preservação antes da execução de qualquer tipo de manejo.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral identificar e compreender como os processos hidrogeológicos contribuem para a formação das cavidades naturais de Serra Leste. Para tal estudo faz-se necessário o reconhecimento e a caracterização de determinados aspectos geológicos como: reconhecimentos das estruturas presentes na área e como elas facilitam a percolação da água nas cavidades; aliar informações de rede de drenagem, pluviometria e estrutural para estabelecer um padrão de formação de cavidades e integrar estudos já realizados na área para se ter uma visão ampla dos processos que ocorrem em Serra Leste.

1.3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A Província Mineral de Carajás está localizada a sudeste do Cráton Amazônico e faz parte da Província Amazônia Central. Foi formada e estabilizada tectonicamente no Arqueano e pode ser dividida em duas unidades geotectônicas: a norte, localiza-se o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (ARAÚJO *et al.*, 1988); e ao sul, o Terreno Granito-Greenstone Rio Maria. A Serra Leste está inserida na Província Mineral de Carajás e localiza-se no município de Curionópolis estado do Pará. O acesso à área é feito através da PA-275 que liga os municípios de Curionópolis e Parauapebas (Figura 1). Partindo de Marabá, o acesso é feito pela BR-155 por 100 km até o município de Eldorado do Carajás seguindo em direção ao município de Curionópolis ao longo da rodovia PA-275 por mais 33 km.

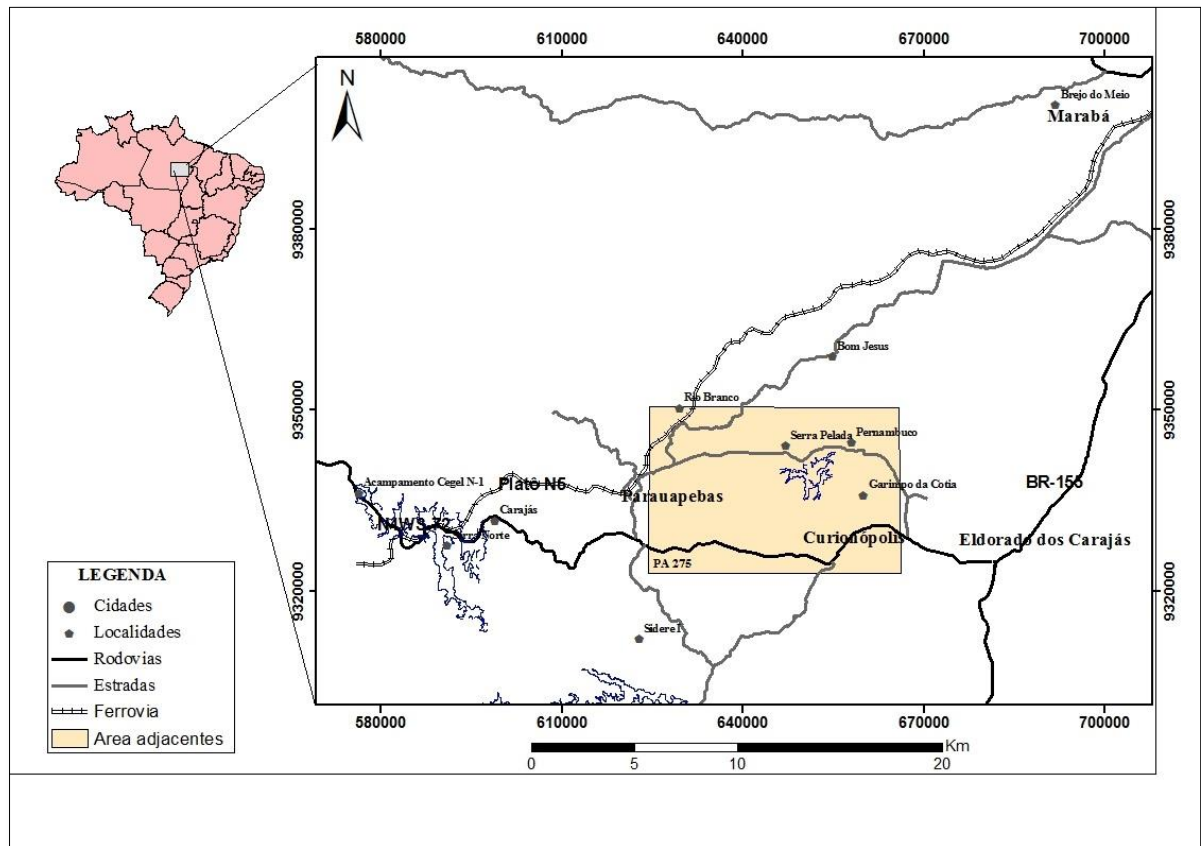


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo

1.4 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Os aspectos fisiográficos irão abordar as características gerais do clima, meteorologia, vegetação e relevo característicos de Serra Leste.

1.4.1 Clima e Meteorologia

O clima e as condições meteorológicas são relacionados à localização geográfica (latitude) e relevo, que em ação conjunta com os grandes sistemas atmosféricos, controlam a distribuição pluviométrica, evaporação, temperatura, umidade do ar e regime de ventos (VALENTIM; OLIVITO, 2009). Segundo a classificação de Köppen, o clima da Amazônia é

do tipo A, ou seja, tropical úmido com a temperatura média do mês mais frio superior a 18°C, com a seguinte subclassificação para o clima da região amazônica: **a)** clima tropical úmido, com precipitação média maior ou igual a 60 mm para o mês mais seco; **b)** clima tropical úmido de monção, com precipitação excessiva durante alguns meses; **c)** clima tropical úmido, com inverno seco e precipitação média menor que 60 mm para o mês mais seco.

1.4.2 Vegetação

A unidade espeleológica Carajás situa-se integralmente no Bioma Amazônico, de acordo com o mapa do IBGE (2004), mais especificamente na província do Xingu/Madeira. A subclasse de vegetação predominante desta região é a da Floresta Ombrófila, com até 4 meses secos por ano, podendo variar nas fisionomias Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Aberta. Estas fisionomias podem ser classificadas em formações pela posição no relevo: Aluvial (na Floresta Densa), Terras Baixas, Submontana e Montana (VELOSO *et al.*, 1991).

Apesar do predomínio das fisionomias florestais citadas, destaca-se ainda nesta região a ocorrência de uma vegetação sobre um substrato hematítico (vulgarmente denominado de canga), que possui aspecto savânico ou de vegetação rupestre (SILVA *et al.*, 1996). Recentemente foi ainda observada a presença da uma fisionomia florestal com caráter decidual, ocorrendo na forma de manchas ou fragmentos de floresta sobre solos rasos e bem drenados que condicionam esta fisionomia, ainda em estudo, mas provavelmente relacionada ao substrato raso (GOLDER, 2008 *apud* VALENTIM; OLIVITO, 2009).

Uma síntese dos estudos regionais mostra a ocorrência de aproximadamente 1580 espécies vegetais pertencentes a 130 famílias botânicas, com potencial para mais espécies, principalmente herbáceas e trepadeiras, que são menos estudadas. Em relação às famílias botânicas, observa-se nestes estudos uma maior riqueza de espécies em *Leguminosae* (259 espécies), *Sapotaceae* (66 espécies), *Euphorbiaceae* (52 espécies), *Annonaceae* (47 espécies) e *Burseraceae* (29 espécies) (VALENTIM; OLIVITO *op. cit.*).

1.4.2 Relevo

A Unidade Geomorfológica de Serra Leste, com 549 km² de área, caracteriza-se por cristas estruturais NE-SW que seguem por cerca de 50 km, e vales encaixados, desenvolvidos sobre rochas metavulcanossedimentares (anfíbólito, serpentinito, quartzito). Ocorre ainda, com menor expressão espacial, topos planos a ondulados recobertos por laterita, degradados pela atividade pecuária. As altitudes dos topos situam-se entre 400 e 600 m, com desníveis de até 200 m em relação aos fundos dos vales. As vertentes são íngremes, com declividades superiores a 45%. Tem o rio Parauapebas como seu limitante ocidental, e a Depressão Goiano-Paraense no limite oriental (VALENTIM; OLIVITO, 2009).

2 GEOLOGIA REGIONAL

A Província Carajás está localizada na porção sul-oriental do Cráton Amazônico. Para Costa & Hasui (1997), a estruturação do Cráton Amazônico resultou da articulação de blocos crustais que teriam se unido através de colisões no Arqueano/Proterozoico Inferior, compondo parte de um megacontinente. Além das colisões, teriam ocorrido eventos extensionais, acompanhados por intenso magmatismo e formação de bacias, cuja geometria foi controlada por estruturas pré-existentes. Entretanto, Cordani & Sato (1999), Tassinari & Macambira (1999, 2004), Santos *et al.* (2009) consideram que o Cráton Amazônico é dividido em províncias geocronológicas, formadas em torno de um núcleo Arqueano, denominado originalmente Província Amazônia Central (TEIXEIRA *et al.* 1989 *apud* TASSINARI; MACAMBIRA, 2004). As províncias proterozoicas resultaram de retrabalhamentos e acreção crustal ao longo de cinturões móveis e são, geralmente, alongadas na direção NW/SE.

Santos *et al.* (2009) denominaram a porção sudeste da Província Amazônia Central de Província Carajás que seria integralmente formada durante o Arqueano. Eles assumiram que esta província se prolongaria até o sul do Amapá, formando um bloco Arqueano de maiores dimensões. Embora trabalhos posteriores tenham demonstrado inequivocamente a existência de um bloco Arqueano no sul do Amapá (Bloco Amapá), e estudos desenvolvidos na região de Bacajá, ao norte de Carajás, revelaram que este domínio formou-se essencialmente durante o Paleoproterozoico, relacionado ao evento Transamazônico, e não no Arqueano (MACAMBIRA *et al.* 2001, VASQUEZ *et al.* 2005, MACAMBIRA *et al.* 2009). Em função disso, modelos mais recentes restringem a Província Carajás até o sul do Domínio Bacajá, correspondente ao extremo sul da Província Transamazonas (SANTOS *et al.*, 2000) ou Maroni-Itacaiúnas (TASSINARI; MACAMBIRA, *op. cit.*).

2.1 BACIA CARAJÁS

O evento magmático amplamente dominante na Bacia Carajás é representado pelo vulcanismo máfico do Supergrupo Itacaiúnas. Além do mesmo, tem-se o magmatismo

máfico-ultramáfico do Complexo Luanga e um grande número de intrusões de granitos subalcalinos (2,76 a 2,73 Ga), Complexo Granítico Estrela, Granito Serra do Rabo e similares (BARROS *et al.*, 2004), e Granito Velho Salobo (MACHADO *et al.*, 1991), sucedidos por extensa sedimentação, Formação Águas Claras (NOGUEIRA *et al.*, 1995).

2.1.1 Supergrupo Itacaiúnas:

DOCEGEO (1988) 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 por rochas vulcano-sedimentares, de idade arqueana, apresentando graus variáveis de metamorfismo e litologias distintas do Supergrupo Andorinhas (TGGRM). Esta megaunidade não foi reconhecida em síntese recente (Vasquez *et al.*, 2008) onde se optou por manter a individualidade estratigráfica dos diferentes grupos citados, aos quais foram ainda acrescentados os grupos Aquiri, São Félix e São Sebastião.

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, determinada em vulcânicas félsicas, pelo método U/Pb em zircão; (MACHADO *et al.* 1991) e jaspilitos com minério de ferro associado (Formação Carajás). Essa unidade preenche a maior parte da Bacia Carajás.

Grupo Igarapé Salobo: foi redefinido por DOCEGEO (1988) a partir da Sequência Salobo-Pojuca. Ele 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 vulcanosedimentares expostas na região de serra do Salobo, enquanto que aquelas das serras Cinzento e Redenção seriam supracrustais do Domínio Bacajá.

O Grupo Igarapé Pojuca, formalizado por DOCEGEO (1988), que o definiu em sua área tipo no igarapé Pojuca, afluente da margem esquerda do igarapé Azul, extremo norte da Serra dos Carajás, 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.

O Grupo Igarapé Bahia: abrange um pacote vulcano-sedimentar, metamorfisado em fácies xisto verde, de direção NNW, subverticalizado, que aflora como janelas dentro da formação Águas Claras.

Complexo Luanga: O Complexo Luanga (DOCEGEO 1988), localizado nas proximidades de Serra Leste, é formado por rochas máficas acamadadas - anortositos e gabros, metamorfisados em fácies xisto verde - apresenta idade de 2763 ± 6 Ma (U-Pb em zircão, Machado *et al.* 1991). Tais rochas cortam as supracrustais do Supergrupo Itacaiúnas.

2.1.2 Granitos subalcalinos:

Os granitos subalcalinos da Bacia Carajás são representados pelo Complexo Granítico Estrela, granitos Serra do Rabo, Igarapé Gelado e Velho Salobo (Figura 2).

Complexo Granítico Estrela aflora a sul da PA-275, entre os municípios de Parauapebas e Curionópolis, na porção norte-nordeste da Bacia Carajás. Foi inicialmente correlacionado, em função de dados aerogeofísicos que mostravam expressivas anomalias radiométricas em seus domínios, aos granitos paleoproterozoicos da Suíte Serra dos Carajás (DOCEGEO 1988). Entretanto, Meireles *et al.* (1984) chamaram a atenção de que tais rochas eram bastante deformadas e gnaissificadas e destoavam, portanto dos granitos anorogênicos paleoproterozoicos. É formado predominantemente por monzogranitos, com sienogranitos, granodioritos e tonalitos subordinados (BARROS *et al.*, 2010).

Granito Serra do Rabo, um stock alongado na direção EW, localizado próximo à terminação leste da Falha Carajás, nas proximidades da Serra do Rabo, é composto por álcalifeldspato granito e sienogranito (SARDINHA *et al.*, 2006 *apud* BARROS *et al.*, 2010).

Granito Igarapé Gelado, está localizado no extremo norte do Domínio Carajás. É formado por granodioritos e monzogranitos, com tonalitos, leucomonzogranitos e sienogranitos subordinados (BARROS *et al.*, 2010).

Formação Águas Claras: é uma cobertura siliciclástica arqueana, não metamorfisada, distribuída amplamente na porção central da estrutura sigmoidal da Serra dos Carajás. A seção-tipo da Formação Águas Claras está localizada na estrada de acesso à mina de Igarapé Bahia, a oeste do igarapé Águas Claras (NOGUEIRA *et al.*, 1995 *apud* BARROS *et al.*, 2010).

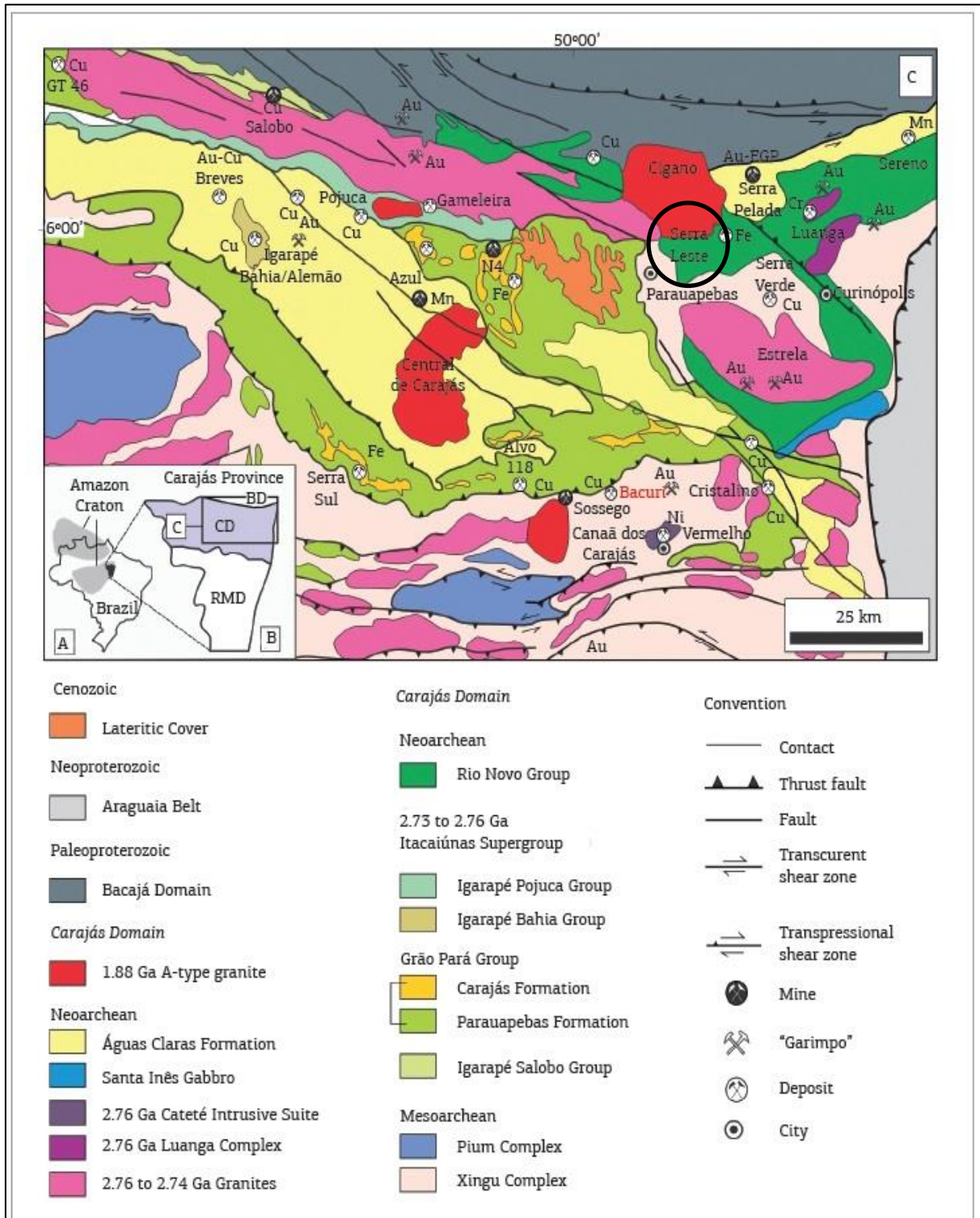


Figura 2: Mapa geológico do Domínio Carajás e áreas adjacentes mostrando os vários depósitos minerais (modificado por VASQUES *et al.*, 2008).

2.2 PETROGRAFIA E ESTRUTURA DE ROCHAS DA SERRA LESTE

Nos domínios da Serra Leste, as rochas metabásicas predominam sobre as formações ferríferas/metacherts, sobre as rochas máficas-ultramáficas do Complexo Luanga e sobre os granitoides. As rochas metabásicas são cortadas por diques de diabásio de direção NS e por raros corpos de gabro de pequena dimensão. As áreas com exposição de rochas metabásicas e de granitoides são topograficamente arrasadas, comparativamente às faixas de formações ferríferas/metacherts que formam serras alongadas e ressaltadas no terreno. Estas faixas se concentram na parte centro-oeste e norte da área estudada e podem estar alinhadas na direção ENE/ WSW. Entretanto, nas proximidades de Curionópolis, estas faixas de formação ferrífera prolongam-se com direção NW/SE e tendem a amoldar-se aos limites do Complexo Granítico Estrela em suas partes nordeste, leste e sudeste, onde podem formar dobras suaves de interferência de grande dimensão (BARROS *et al.*, 2001 *apud* BARROS *et al.*, 2010). Os corpos granitoides da Serra Leste são de pequenas dimensões e afloram sob a forma de lajedos descontínuos de dimensões variadas. Uma exposição de rochas granitoides, importante pela sua dimensão e pela qualidade com que se distinguem as estruturas, é representada pela pedreira CINCO, no sudeste da área segundo (BARROS *et al.* 2010).

2.2.1 Rochas Metabásicas

As rochas metabásicas de cor cinza escuro têm granulação fina e as de cor cinza médio granulação média a grossa. Estas rochas podem ter estrutura maciça ou apresentar foliações desenvolvidas em diferentes intensidades. As rochas de textura maciça mostram feições microtexturais primárias reliquiares, tais como as texturas subofítica, ofítica ou intergranular. Nestes casos, os cristais de plagioclásio são ripiformes e as formas originais dos cristais de opacos e de piroxênio são preservadas. Estes últimos foram substituídos por pseudomorfos de actinolita de cor verde pálido, resultando em uma textura blastofítica. Outra feição microscópica destas rochas é a parcial substituição das bordas da actinolita por hornblenda de cor verde oliva. Estas rochas são classificadas como metabasaltos e metagabros (BARROS *et al.*, 2010).

Em alguns afloramentos, as rochas metabásicas mostram uma foliação moderada, penetrativa na escala de afloramento, que é cortada por zonas de deformação de espessura decimétrica e de direção N70E. Nas proximidades dos contatos com alguns corpos granitoides, a rocha metabásica mostra foliação bastante desenvolvida e definida pela forte orientação preferencial de cristais de plagioclásio e hornblenda. Em geral, as foliações dos anfibolitos são concordantes com as foliações dos granitoides adjacentes. Vênulas finas de plagioclásio podem estar dispostas paralelamente à foliação do anfibolito. Estas vênulas podem também exibir padrões escalonados ou irregulares. Nos domínios com forte venulação, é comum a presença de veios de espessura centimétrica e comprimento decimétrico preenchidos por cristais grossos de anfíbólio. Estes veios assemelham-se aos descritos por Barros *et al.* (2002) em rochas metabásicas encaixantes do Complexo Granítico Estrela (BARROS *et al.*, 2010).

Na pedreira CINCO, porções decimétricas de rocha metabásica, inclusas nos granitoides, apresentam estrutura maciça e textura granoblástica fina, definida pelo domínio de finos cristais poligonais de clinopiroxênio, hornblenda verde oliva e verde acastanhada, além de plagioclásio límpido. A foliação do granitoide contorna as porções de rochas metabásicas. Essas feições estruturais juntamente com a textura granoblástica das rochas metabásicas permitem caracterizá-las como xenólitos. Alguns destes xenólitos são cortados por inúmeros veios aplíticos ou ainda mostram feições de parcial assimilação pelo granitoide. Nestes casos, os anfibolitos podem fragmentar-se em porções alongadas que amoldam-se à foliação do granitoide hospedeiro podendo dar origem a arranjos petrográficos complexos, simulando migmatitos. Quando o xenólito sofre digestão parcial pelo granitoide, desenvolve-se um incipiente acamamento composicional com padrão semelhante à estrutura schlieren (BARROS *et al.*, *op. cit.*).

Localizadamente, associadas aos metabasaltos, afloram rochas de cor verde escuro, constituídas por mais de 70% de epidoto, classificadas como epidositos, os quais possuem foliação algo homogênea de intensidade moderada a fraca.

2.2.2 Rochas granitoides

Na área de estudo foram caracterizados três conjuntos de granitoides: 1) granitoides aflorantes na pedreira CINCO; 2) granitoides aflorantes nas proximidades da Serra Pelada, denominados de Suíte Intrusiva Formiga (TALLARICO *et al.* 2000 *apud* BARROS *et al.*, 2010) um pequeno corpo situado na região centro-sul da área.

Na pedreira do CINCO, afloram tonalitos, trondhjemitos e quartzo dioritos com acamamento primário definido pela presença de níveis de espessura decimétrica, relativamente ricos em minerais máficos, alternados com níveis algo mais. Este acamamento possui direção N20E e mergulhos subverticais. Uma foliação subparalela ao acamamento é marcada pela orientação preferencial moderada dos minerais máficos e pelo achatamento dos cristais de quartzo. Esta foliação pode contornar porções anfibolíticas. Estas foliações têm, por vezes, ondulações e dobras abertas. Falhas discretas de rejeito centimétrico são preenchidas por epidoto (BARROS *et al.*, *op. cit.*).

Nos domínios da Suíte Intrusiva Formiga afloram quartzo dioritos, tonalitos, granodioritos e monzogranitos. Estas rochas podem mostrar fraca foliação, marcada pela orientação preferencial de biotita e/ou anfibólio e pelo achatamento fraco a moderado de cristais de quartzo. Em rochas porfiríticas de ocorrência localizada, a foliação pode ser delineada pela orientação preferencial de fenocristais pouco deformados de feldspato potássico. Esta foliação apresenta variações nas suas atitudes (N20W/66NE, N20E/35SE). Estas rochas localmente foram afetadas por zonas discretas de cisalhamento dúctil-rúptil N65W/40SW (BARROS *et al.*, *op. cit.*).

No pequeno corpo granítico do sul da área, situado a oeste da Pedreira CINCO, as rochas têm cor cinza esbranquiçado, granulação fina a média e composição granodiorítica. A foliação (N70E/87SE) é moderada a fraca e definida pela fraca orientação preferencial dos raros cristais finos de biotita e pelo moderado achatamento de quartzo (BARROS *et al.*, *op. cit.*).

2.2.3 Evolução Estrutural e Metamórfica da Serra Leste

A mudança textural das rochas metabásicas em associação com a natureza do zoneamento dos cristais de anfibólio tem sido empregada para reconstituir a história metamórfica de rochas de terrenos polimetamórficos (COOPER, 1972 *apud* BARROS *et al.* 2010). Particularmente na região de Carajás, estas características têm permitido entender a evolução metamórfica das rochas metabásicas encaixantes dos granitos Estrela, Igarapé Gelado e Serra do Rabo (SARDINHA *et al.*, 2006 *apud* BARROS *et al.* 2010).

Na Serra Leste, as texturas subofíticas preservadas de rochas metabásicas hidrotermalizadas indicam a natureza estática da primeira fase de metamorfismo (M0). As paragêneses apontam para temperaturas de fácies xisto verde, zona de clorita ou biotita, resultantes muito provavelmente de alterações hidrotermais de ambiente marinho. Os epidiositos teriam-se formado nesta fase, em resposta à forte interação de basaltos de fundo oceânico com a água do mar (BARROS *et al.*, *op. cit.*).

A segunda fase (M1) de metamorfismo, de natureza termal, causou modificações nas rochas metabásicas em condições de fácies hornblenda a clinopiroxênio hornfels, em resposta à colocação dos granitoides de 2,85 Ga da pedreira CINCO (BARROS *et al.*).

A terceira fase de metamorfismo (M2), bastante localizada ao redor do corpo granítico do sul da área, ocorreu em condições de fácies hornblenda hornfels e teria ligação com efeitos térmicos daqueles granitos que, pela orientação do seu eixo maior próxima de EW, provavelmente são cronocorrelatos aos plútons neoarqueanos sintectônicos (~2,76 Ga) presentes na região. Ao longo dos contatos com estes granitos, os hornfelses da auréola interna apresentam foliação S2 (N70E). Em alguns afloramentos de anfibolitos, a foliação S1 (N30E) é cortada pela foliação S2 (N70E), o que permite estabelecer a cronologia entre estas fases de deformação. O desenvolvimento da foliação S2 estaria relacionado aos efeitos de encurtamento regional segundo a direção N10E, somados aos esforços de expansão lateral daquele pequeno corpo granítico. Isto explica a pequena extensão lateral, da ordem de dezenas de metros em que a foliação S2 é impressa (BARROS *et al.*, *op. cit.*).

Veios de anfibólio e plagioclásio observados em hornfelses caracterizam a história de metamorfismo progressivo em rochas metabásicas previamente hidratadas. Nestas condições, é comum o aumento de pressão de fluidos provocado pelas reações de desidratação e

consequente produção de fraturas hidráulicas e veios (CESARE, 1994; DUTROW; NORTON, 1995 *apud* BARROS *et al.*, 2010). Feições semelhantes têm sido observadas na aúreola interna dos plútons Estrela, Serra do Rabo e Igarapé Gelado (SARDINHA *et al.*, 2006 *apud* BARROS *et al.* 2010).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho consiste em várias etapas de pesquisa e aplicação, sendo elas a pesquisa bibliográfica, confecção e interpretação de mapas, saídas de campo e a elaboração do relatório final.

Pesquisas bibliográficas: na primeira etapa do trabalho foram realizados levantamentos bibliográficos da área de Serra Leste onde encontrou-se certa dificuldade na obtenção de material devido à escassez de trabalhos realizados na área, no entanto, foram disponibilizados pela empresa Vale relatórios e dados internos, o que foi de grande ajuda para o desenvolvimento de métodos de pesquisa e melhor entendimento das cavidades já estudadas na região. Também foram utilizadas bibliografias referentes à hidrogeologia de cavernas em diversos litotipos em outras regiões para um melhor embasamento e compreensão do processo que ocorre em Serra Leste.

Análise de sensores remotos e fotointerpretação: através de fotos de radar e imagem de radar LIDAR, LANDSAT, IKONOS, SRTM foi possível a extração de drenagem realizada manualmente e confecção de mapas temáticos detalhados através de softwares de GIS e Global Mapper. Posteriormente os dados de relevo e drenagem foram analisados e interpretados seguindo o método de lógica e sistemática de Soares & Fiori (1976) (Figura 3) e divididos em zonas homólogas.

Para o estudo do comportamento tectônico da área foram utilizados diagramas esquemáticos para elaboração de elipsoides de deformação que será classificada segundo os padrões de Riedel (1929).

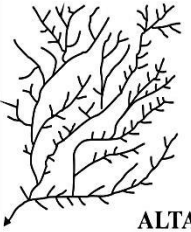
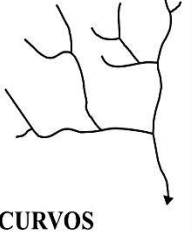
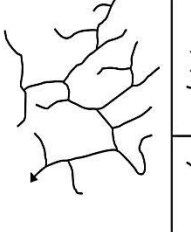
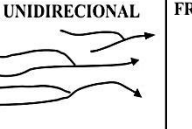
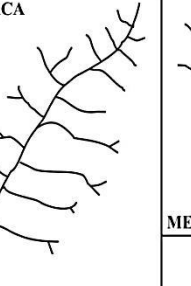
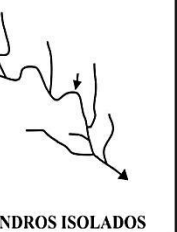
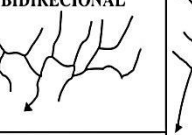
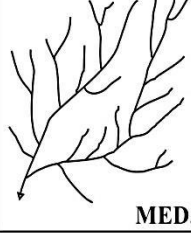
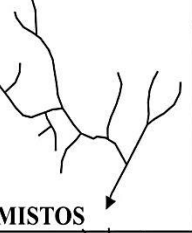
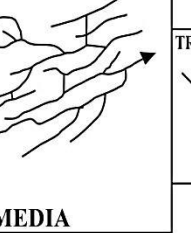
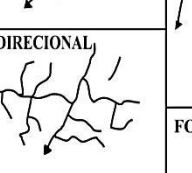
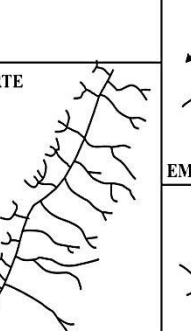


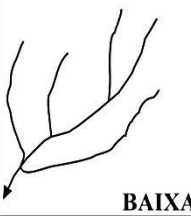

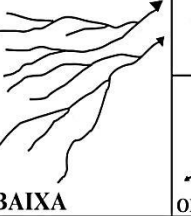


DENSIDADE	SINUOSIDADE	ANGULARIDADE	TROPIA	ASSIMETRIA	FORMAS ANOMALAS
 ALTA	 CURVOS		UNIDIRECIONAL 	FRACA 	 MEANDROS ISOLADOS
			BIDIRECIONAL 		
 MED.	 MISTOS	 MEDIA	TRIDIRECIONAL 	FORTE 	 EMARCO
			MULTIDIRECIONAL 		
 BAIXA	 RETILINEOS	 BAIXA	DESORDENADA 		
			ORDENADA 		

Figura 3: Critérios para classificação da rede de drenagem de acordo com suas propriedades (SOARES & FIORI, 1976).

As fraturas Riedel (Figuras 4) se desenvolvem com ângulos baixos (10° a 20°) em relação à falha principal, disposta em arranjo *en echelon*. As fraturas R são sintéticas à falha principal, subparalelas e têm o mesmo sentido de cisalhamento das bordas do sistema. As fraturas P são sintéticas à falha principal e são orientadas simetricamente às fraturas R na falha. As fraturas tipo R' são cisalhantes antitéticas orientadas sob altos ângulos em relação à falha principal (70° a 80°) e possuem sentido de cisalhamento oposto ao da falha principal (TWISS; MOORES, 1992).

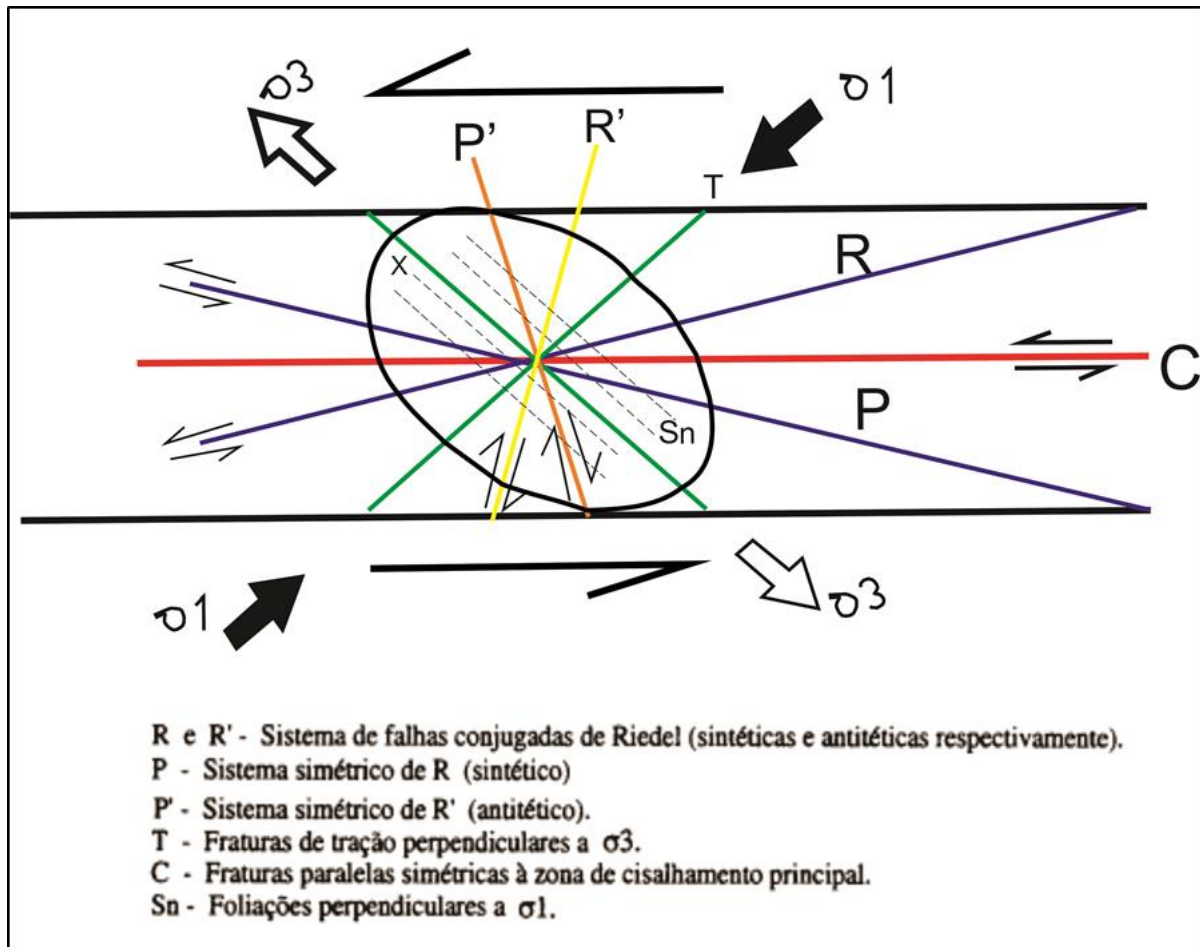


Figura 4: Esquema de elipsoides de deformação de Riedel (VIALON *et al.*, 1991).

Médias da Normal Climatológica: foram utilizadas para uma análise pluviométrica, essa normal climatológica, obtida segundo os dados da CPRM/SGB padronizadas em períodos de 30 anos (1977 – 2006), caracterizados por medições provenientes de dois tipos de equipamentos. O Pluviômetro: Tem suas leituras efetuadas por volta das 7 horas, registrando a chuva acumulada de 24 horas. Os pluviômetros possuem uma área de captação de 400 cm², dos quais 40 mL correspondem a 1 mm de chuva, representando 1 L despejado em uma área de 1 m², lido em proveta graduada. E o pluviógrafo: registra as informações durante 24 horas contínuas; os rolos gráficos são trocados no mesmo horário em que é lida a informação do pluviômetro. O registro no rolo do pluviógrafo informa a duração e a intensidade da chuva, pois se pode aferir, a partir do registro gráfico, o quanto choveu em determinado período com registro das épocas de maior e menor pluviosidade. Com base nos modelos acima citados, faz-se o estudo da fluviometria: caracterizada pelos registros de altura dos níveis dos rios, obtidos

a partir de estações fluviométricas, instaladas em seções transversais de cursos d'água estratégicos para determinada finalidade. As referidas seções compõem um conjunto de réguas niveladas, uma em função da outra, na relação de 1 m, obedecendo à declividade da margem escolhida, observada em centímetros, tendo a terminologia de cota fluviométrica, que é a altura da superfície da água referida a um plano pré-fixado (DNAEE, 1967). A seção de réguas é fixada de acordo com duas referências de nível, que determinam planos horizontais associados a cotas arbitrárias, pela impossibilidade de referi-las ao nível médio do mar. As observações são efetuadas às 7:00 e às 17:00 horas, diariamente (CPRM, 2013). A Partir desses aparelhos pode-se fazer um levantamento Pluviométrico Anual e mensal do Brasil, onde neste trabalho o enfoque será na área de estudo, a Serra Leste. Este método usa as isoietas: são definidas por linhas de igual precipitação (mm). Sendo curvas que delimitam uma área com igual precipitação, assim como uma alusão às cotas topográficas.

Campo: Foram realizadas duas etapas de campo, sendo a primeira no dia 07 de novembro de 2014 onde foi visitada uma cavidade (SL- 201) e no dia 26 de novembro de 2014 foram visitadas quatro cavidades (SL-118, SL-119, SL-120 e SL-257).

As saídas de campo foram feitas em caminhonete 4x4 com uma equipe de dois estudantes acompanhada de dois professores da faculdade de Geologia, dois funcionários da empresa Vale e um pesquisador. Para a localização das cavidades foi utilizado um mapa disponibilizado pela empresa Vale e GPS onde foram marcados todos os pontos de localização e estradas de acesso. Foi de grande importância o uso da bússola para a tirada de medidas estruturais e posteriormente uma melhor interpretação da percolação da água nas cavidades, foram tiradas fotos através de câmera profissional para o registro das principais feições e estruturas. Todas as informações coletadas estão registradas no presente relatório.

Confecção de relatório: Consiste na organização das ideias e conhecimentos adquiridos nas demais etapas em um texto que apresenta as informações levantadas e as conclusões do estudo realizado.

O relatório foi elaborado seguindo as normas propostas pelo manual “Instrumentação de trabalhos acadêmicos: orientação para alunos de graduação e pós-graduação”. Elaborado pela Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências (2009).

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os dados obtidos a partir do estudo detalhado da área, procurando caracterizar os padrões responsáveis pela formação de cavidades em Serra Leste. Estudos combinados da geologia local, mapas temáticos, geologia estrutural, pluviosidade e dados de campo irão levar à compreensão do caminhamento da água e sua contribuição para a formação das cavidades.

4.1 FOTOINTERPRETAÇÃO

De acordo com a interpretação visual das imagens de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi confeccionado um Mapa detalhado da rede de drenagem da área de Serra Leste (Figura 5) a partir de fotoanálise e fotointerpretação, sendo esta direcionada em um primeiro momento a identificação das propriedades da rede de drenagem, que foi traçada de forma sistemática e uniforme, onde pode-se fornecer informações de grande importância, especialmente quanto à estruturação geológica da área, variações no estilo estrutural, definir formas, zonas de partição dos elementos e seus limites.

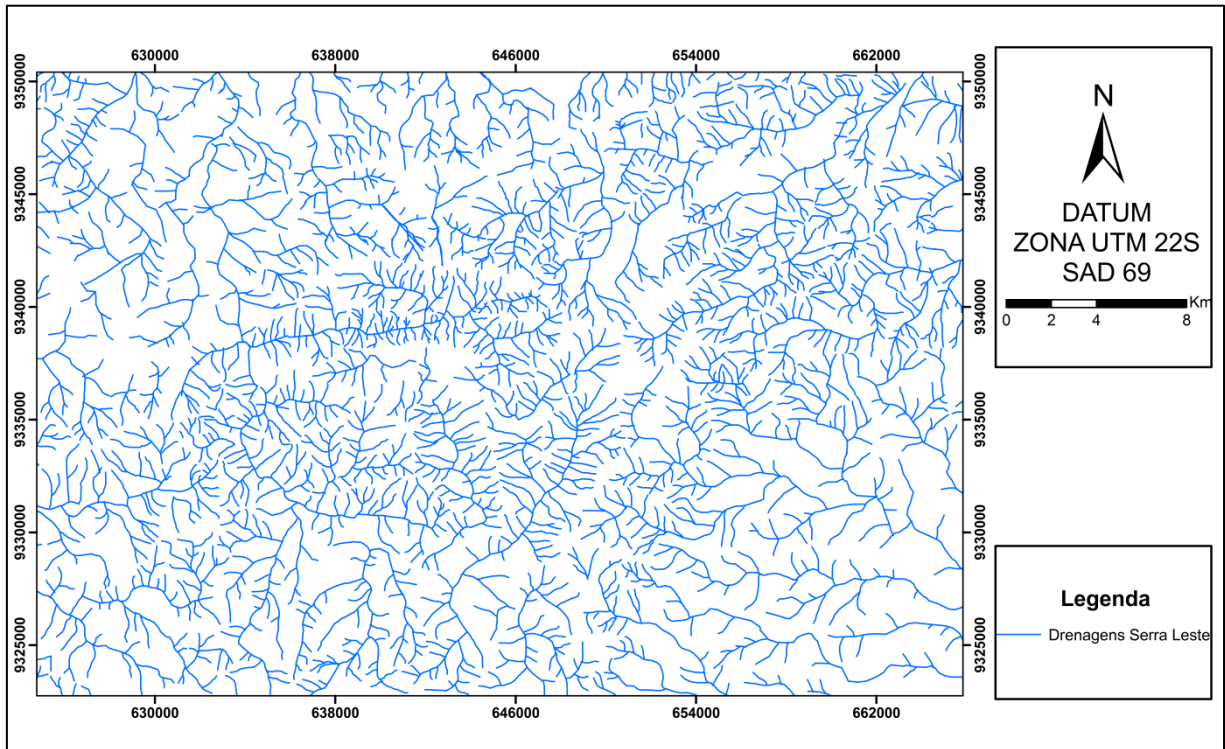


Figura 5- Mapa da rede de drenagem da área da Serra Leste.

4.1.1 Análise da Drenagem

A partir das análises de drenagem da área foram identificadas três zonas homólogas de drenagem (Figura 6). Baseados nos parâmetros de Soares & Fiori (1976). Essas zonas foram caracterizadas e individualizadas de acordo com seus atributos particulares, como a densidade de textura da drenagem, direção preferencial de escoamento, sinuosidade e assimetria.

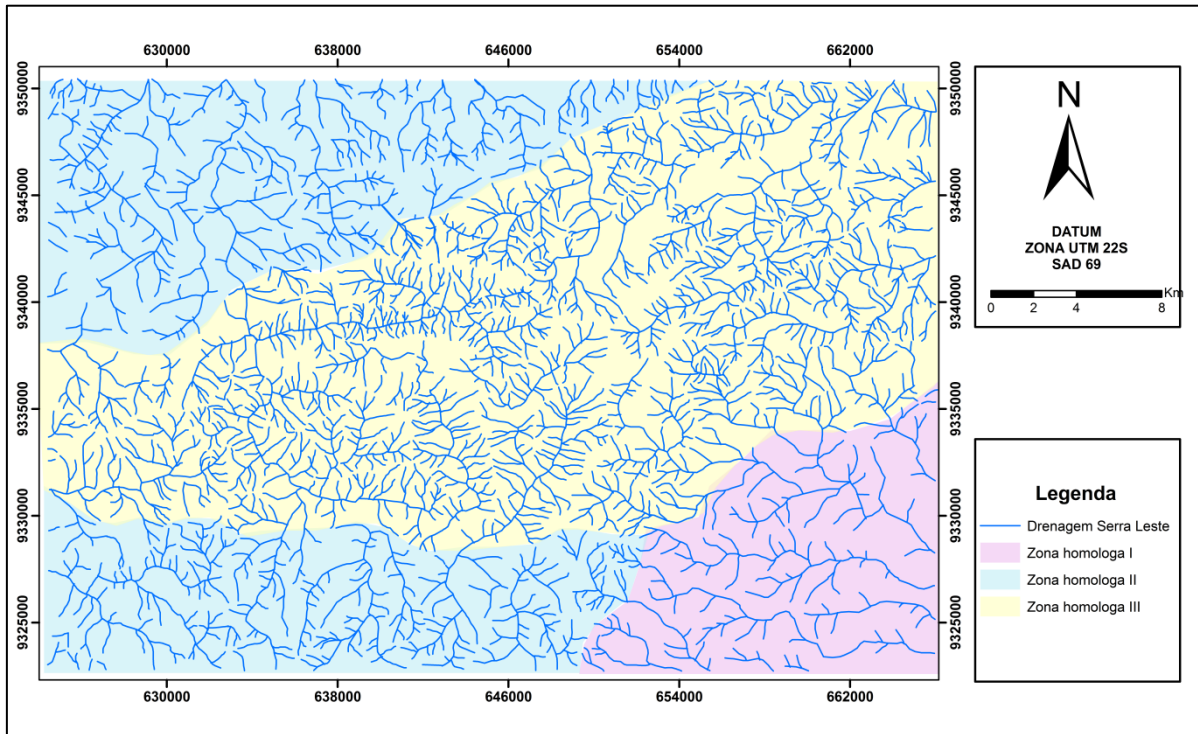


Figura 6- Mapas das zonas homólogas de drenagem na área da Serra Leste.

A zona homóloga I está localizada a sudeste sendo a porção mais baixa da área com altimetria entre 150 m a 200 m, apresenta baixa densidade de textura de drenagem, exibindo três direções principais NW-SE, E-W e NE-SW, densidade moderada, sinuosidade curva com tropia tridimensional, angularidade baixa e fraca assimetria. Possui formas anômalas do tipo arco. Padrão de drenagem dendrítico onde seus canais distributários encontram-se em todas as direções e se unem formando ângulos suaves de graduação variada.

Zona homóloga II localizada a sudoeste e noroeste da área exibe altimetria moderada entre 200 m e 350 m, com densidade moderada e direção NW-SE, NE-SW e N-S. Sinuosidade mista, média angularidade, fraca assimetria e tropia tridimensional. Formas anômalas do tipo arco e padrão de drenagem dendrítico.

Zona homóloga III localizada na porção central da área exibindo cotas mais altas variando de 200 m a 650 m. Apresenta multidirecionalidade (NW-SE, NE-SW, N-S e E-W), com alta densidade, sinuosidade mista, tropia multidirecional, angularidade média, assimetria fraca. Possuem formas anômalas do tipo arco e cotovelos. Padrão de drenagem radial centrífugo, pois seus canais estão dispostos em raios em relação a um ponto central. As cavidades estudadas estão inseridas nessa porção, onde o padrão da drenagem é mais denso e as vertentes mais íngremes.

Essas características de propriedades de drenagem foram sintetizadas e organizadas e forma de tabela (Tabela 1).

Tabela 1- Propriedades da drenagem segundo os parâmetros de Soares & Fiori (1976).

Zona homóloga	I	II	III
Densidade	Baixa	Media	Alta
Sinuosidade	Curvos	Misto	Misto
Angularidade	Baixa	Média	Média
Tropia	Tridimensional (NW-SE, E-W e NE-SW)	Tridimensional (NW-SE, NE-SW e N-S)	Multidirecional (NW-SE, NE-SW, N-S e E-W)
Assimetria	Fraca	Fraca	Fraca
Formas anômalas	Arco	Arco	Arco e cotovelo
Padrão	Dendrítico	Dendrítico	Radial centrífugo

4.1.2 Análise Estrutural

A partir de fotoanálise da disposição da rede de drenagem e relevo do terreno, foram obtidos os principais alinhamentos estruturais da área (Figura 7).

Os alinhamentos de drenagem foram individualizados de acordo com os diferentes domínios estruturais, apresentando direção principal NW-SE e secundariamente NE-SW, Refletindo o padrão estrutural da drenagem já descrita.

O alinhamento de relevo mais eminente possui um *trend* NE-SW e NW-SE e secundariamente N-S e E-W. Isso mostra que os alinhamentos de drenagem seguem um padrão muito semelhante aos alinhamentos de relevo, pois os padrões de drenagem estão ligados à forma do relevo da área.

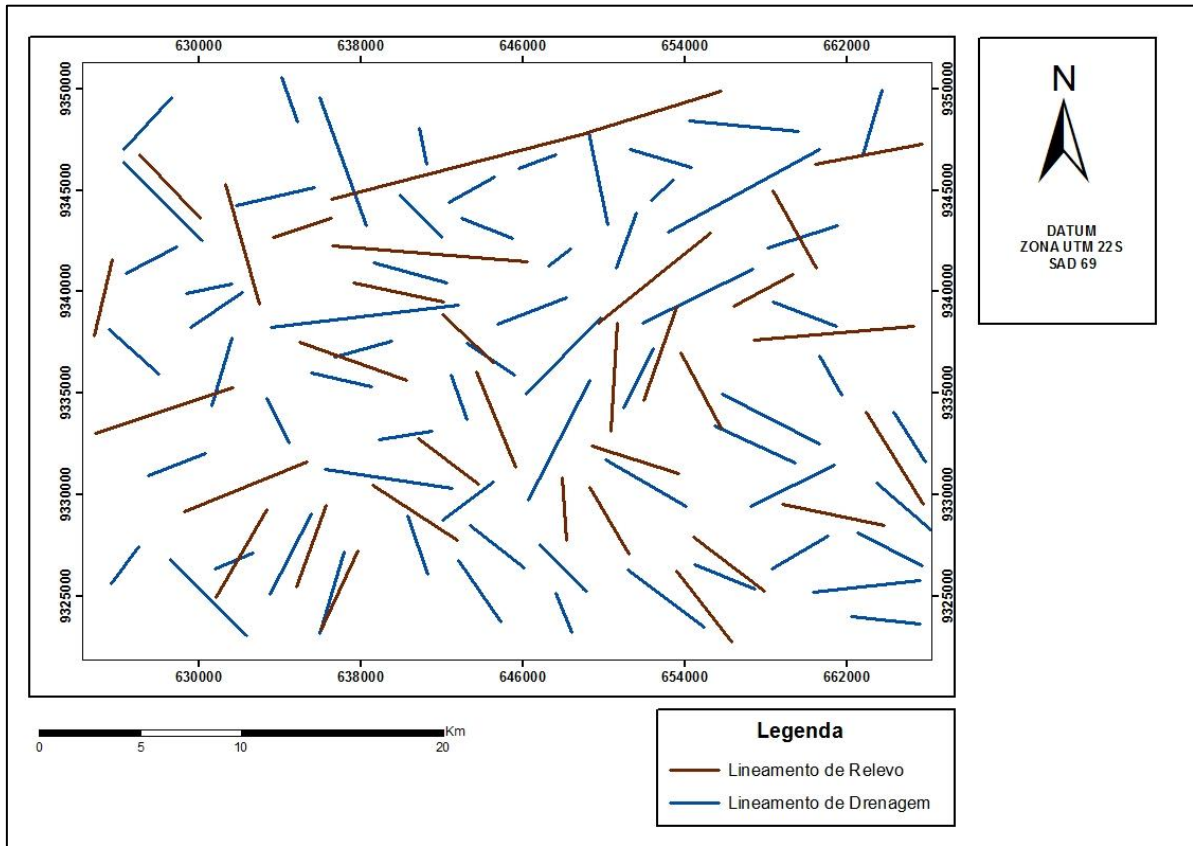


Figura 7: Mapa de alinhamentos de drenagem e relevo

4.1.2.1 Elipsoides de deformação e fraturas de Riedel.

Para uma análise estrutural mais detalhada foi adotado o modelo de fraturas e juntas de Riedel (1929), onde foram identificados elipsoides de deformação com o auxílio dos mapas temáticos da área, como a rede de drenagem (ver Figura 6) e alinhamentos de relevo e drenagem (ver Figura 7). A partir da identificação dos elipsoides foram interpretadas as possíveis fraturas abertas e com isso prever como funciona a percolação da água nas estruturas e as zonas de recarga condutoras da água subterrânea.

No mapa da Figura 8 estão dispostas as estruturas abertas (anti-riedels) e os elipsoides encontrados na área. O elipsoide com direção WNW-ESE apresenta estruturas anti-riedels com direção NNE-WEW. Os dois elipsoides principais possuem direção NNE-WEW e estruturas anti-riedels com direção NNE-WEW.

Nota-se que as cavidades de Serra Leste estão dispostas no elipsoide com estruturas anti-riedel de direção NNE-WEW.

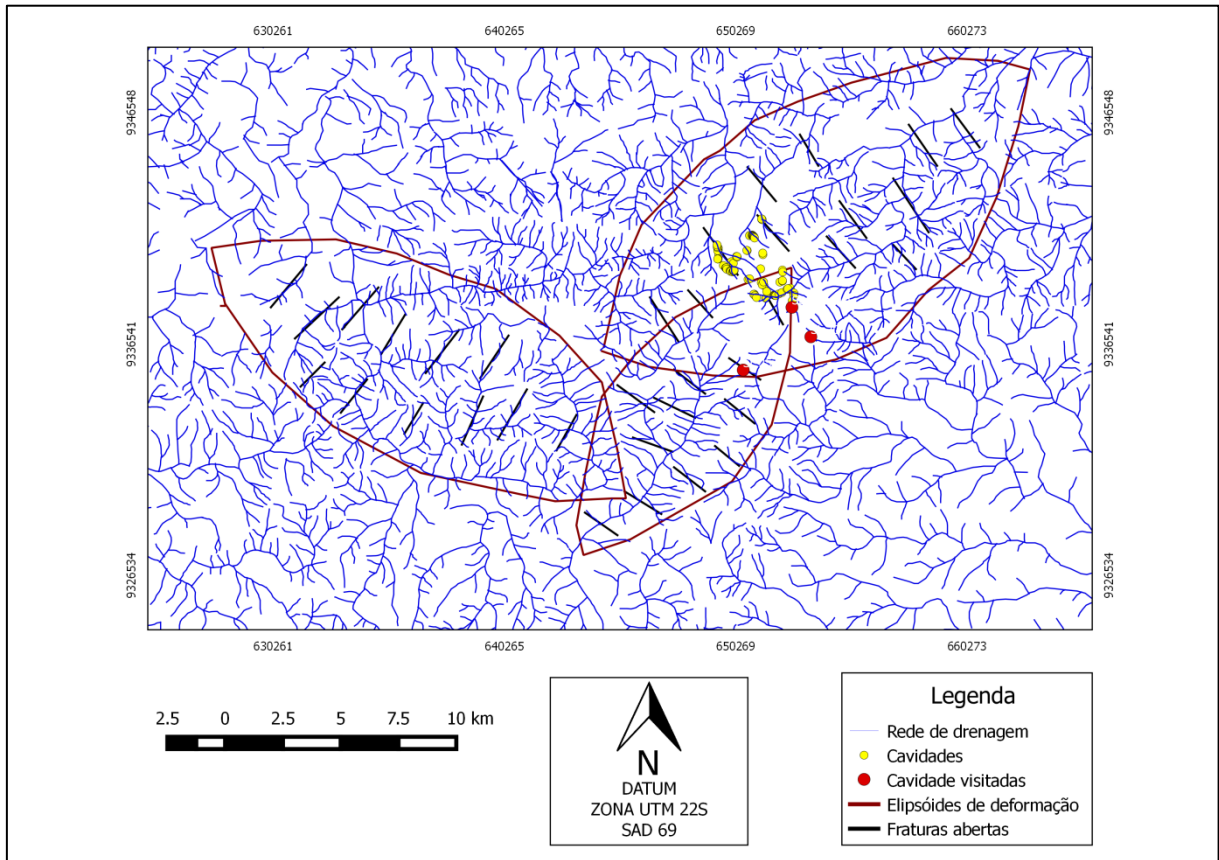


Figura 8: Mapas mostrando os elipsóides de deformação e as fraturas abertas encontradas na área de estudo.

4.2 ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA

A análise da normal climatológica foi interpretada de acordo com as isoietas, curvas de igual pluviometria que indicam a média de precipitação mensal de determinada área. Aplicado em Serra Leste foi possível determinar a média anual de pluviosidade e as mensais climatológicas (Tabela 2). Na estação chuvosa, os volumes mais expressivos concentram-se no período de janeiro a março, a precipitação média mensal desse intervalo é da ordem de 489 mm. O período seco inclui os meses de junho, julho, agosto e setembro, cuja média mensal de precipitação é da ordem de 35,5 mm (Figura 9) a estação chuvosa, novembro a abril, concentra aproximadamente 80% do total anual. Considerando os valores anuais, a precipitação que ocorre no período de estiagem corresponde a menos de 5% da precipitação total. Conforme consta nos estudos da STCP (2003), durante os meses mais chuvosos, entre dezembro e março, a existência de maior nebulosidade resulta em diminuição da insolação.

Desse modo, no verão, as temperaturas são mais amenas. Da mesma forma, no período seco, que corresponde ao inverno, a baixa nebulosidade possibilita maior incidência de radiação solar e as temperaturas são maiores.

Essa análise pluviométrica aliada às estruturas abertas, apresentadas no tópico anterior, e ao estudo geomorfológico leva à compreensão da entrada da água nas cavidades e suas zonas de recarga e descarga, sendo que em meses onde a precipitação é maior mesmo as cavidades secas recebem contribuição hidrogeológica e por conseguinte a ação da água como agente erosivo e formador das cavidades.

Tabela 2: Tabela com as médias pluviométricas para a região de Serra Leste.

Mês do ano	Medida de pluviosidade (Milímetros)
Janeiro	441 mm
Fevereiro	655 mm
Março	371 mm
Abril	237 mm
Mai	125 mm
Junho	42 mm
Julho	25 mm
Agosto	25 mm
Setembro	50 mm
Outubro	111 mm
Novembro	125 mm
Dezembro	212 mm
MÉDIA ANUAL	201,5 mm

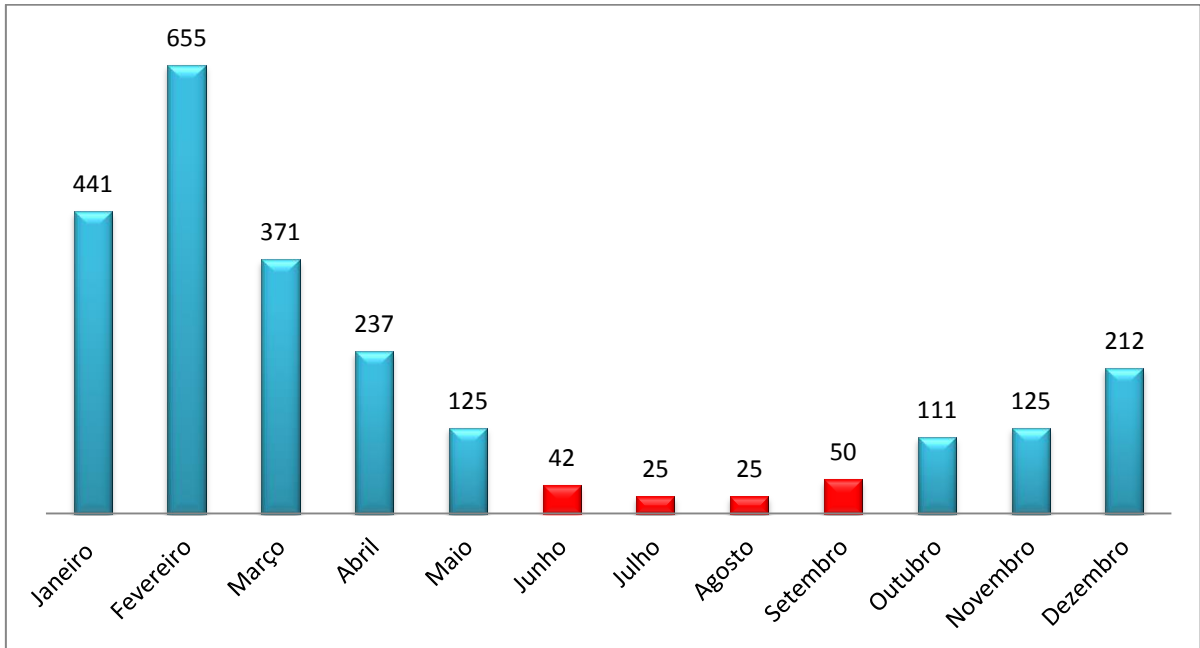


Figura 9: Gráfico mostrando os meses de maior e menor pluviosidade na Serra Leste.

A isoietas obtidas da região de Carajás foram plotadas na área de estudo e com isso foi possível uma melhor visão do comportamento pluviométrico, detalhado em Serra Leste. O resultado é representado nas Figuras 10, 11 e 12.

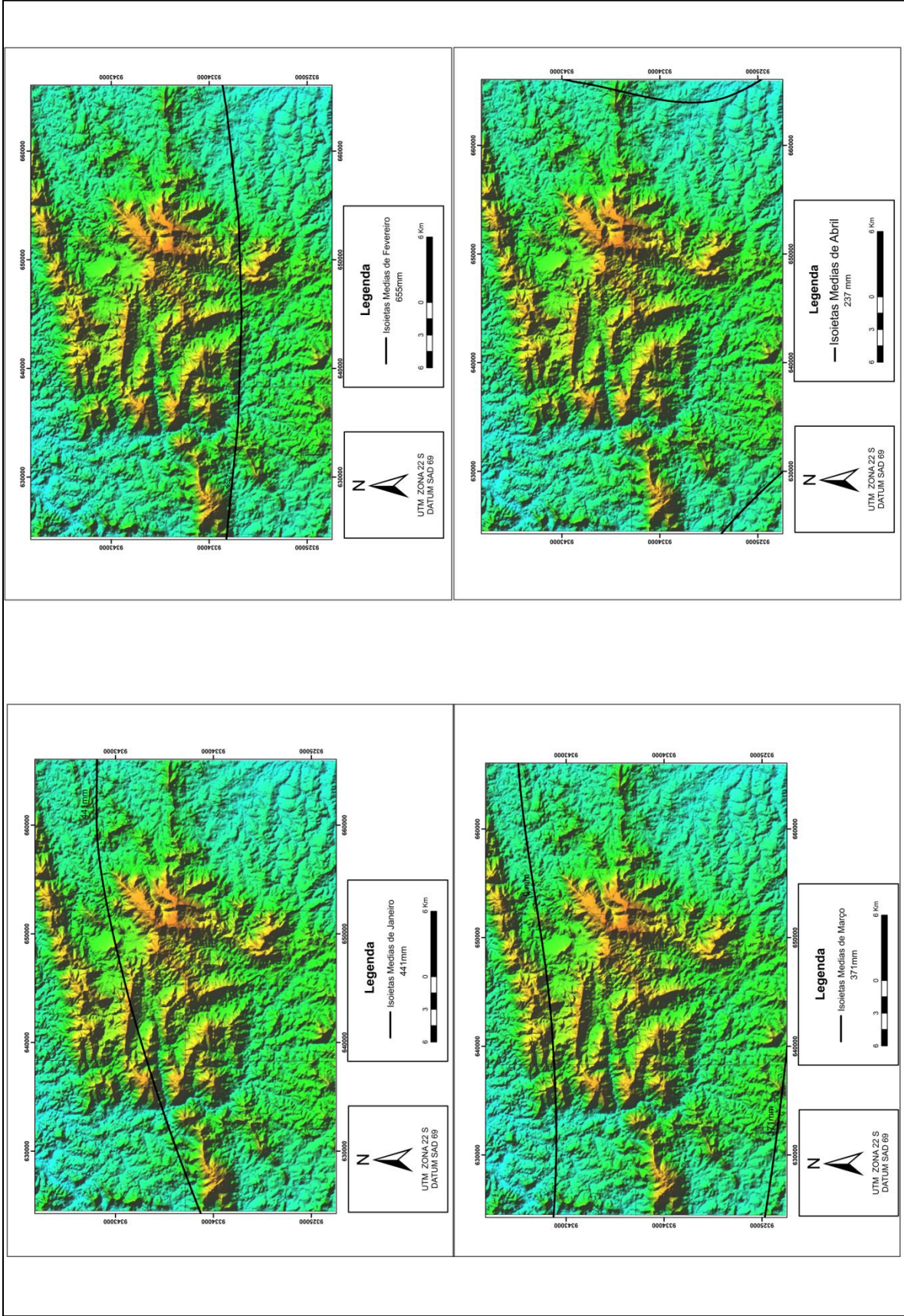


Figura 10: Isoieta média na área de Serra Leste, representando os meses de janeiro, fevereiro, março e abril.

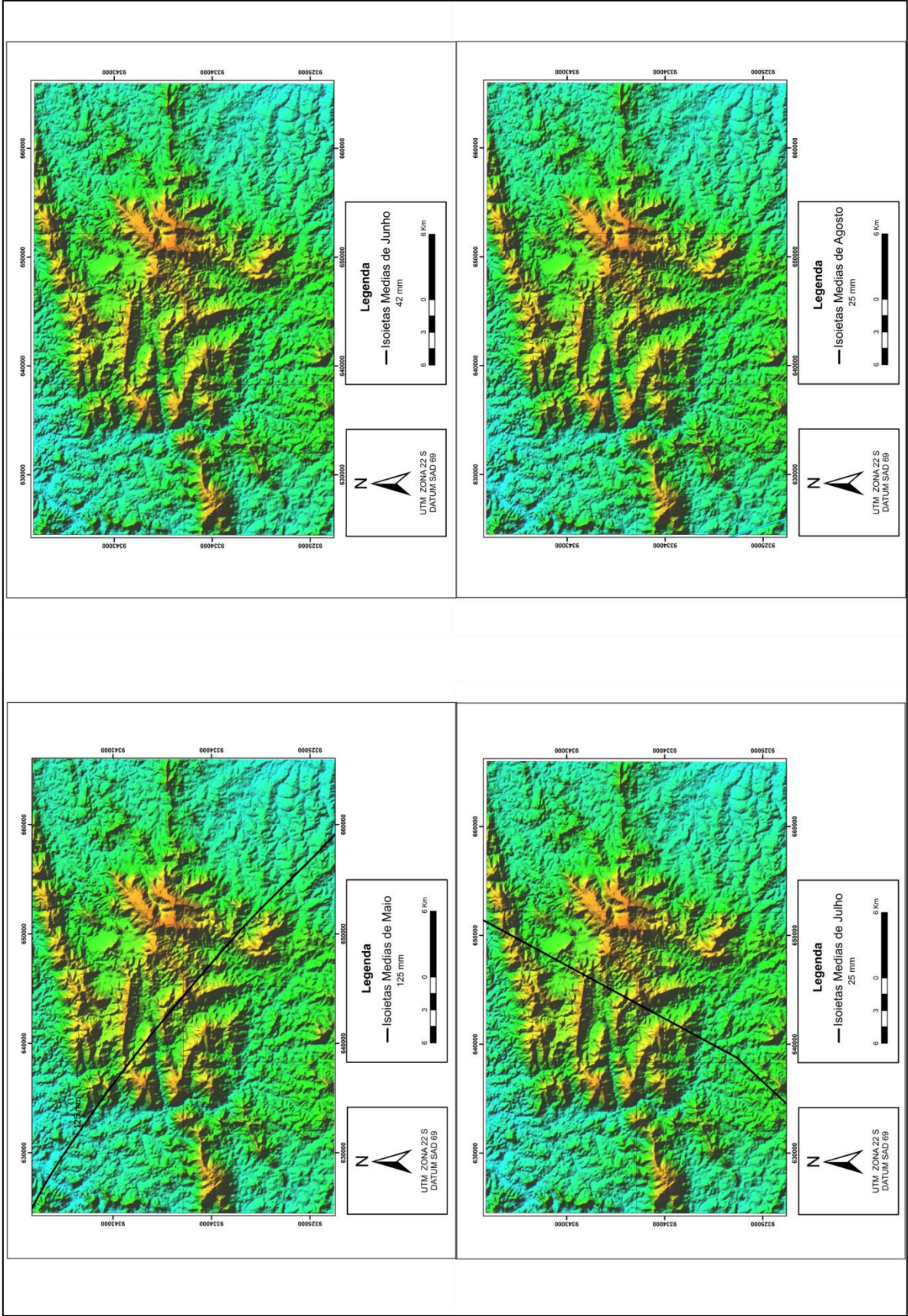


Figura 1: Isoietas médias na área de Serra Leste, representando os meses de maio, junho, julho e agosto.

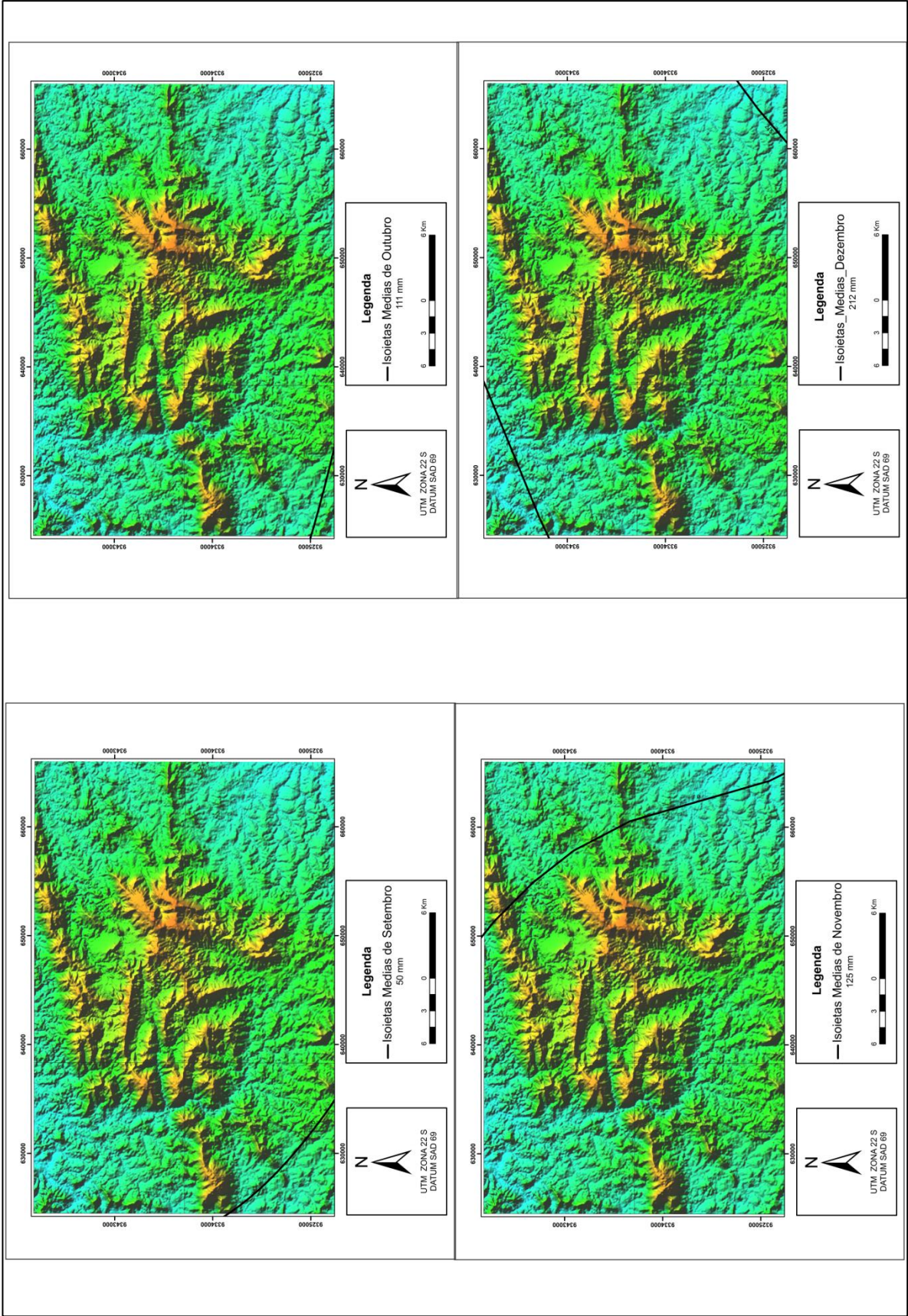


Figura 12: Isoietas médias da área de Serra Leste, representando os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS CAVIDADES

Durante as campanhas de campo cinco cavidades foram visitadas. As cavidades mostravam características particulares, estruturas bem definidas onde foi possível uma análise estrutural e uma melhor definição do controle hidrogeológico exercido nas cavidades.

Na Tabela 3 estão os dados topográficos e localização geográfica das cavidades, as mesmas estão inseridas nas encostas da serra (Figura 13).

Tabela 3: Coordenadas das cavidades visitadas e sua altitude

CAVIDADE	UTM leste	UTM norte	ALTITUDE
SL- 201	0653515	9336850	456m
SL- 118, SL- 119 e SL- 120	0652698	9338122	569m
SL- 257	0650591	9335413	471m



Figura 13: Cavidades visitadas na Serra Leste.

4.3.1 Caverna SL-201

Caverna localizada na encosta da serra, com uma área interna de 9 m² e aproximadamente 2,5 m de altura. Apresenta coloração roxo-avermelhada, estrutura maciça, com níveis composicionais. Nota-se que a caverna foi formada a partir de controle estrutural, pois se observa que a mesma está se formando em meio a uma dobra e um conjunto de falhas (Figura 14).

Composicionalmente infere-se uma formação em rochas máficas provavelmente de rochas vulcânica, com presença de grande quantidade de espeleotemas do tipo crosta branca.

Estruturas estudadas anteriormente foram descritas como icnofósseis, pois apresentam aspecto de ranhuras, agora foram analisadas e interpretadas como estrias de falhas (Figura 15). Essas estruturas ocorrem por toda a caverna e seguem uma mesma orientação (170 Az) e a presença de muitas falhas corrobora essa análise (79°/260 Az), além do tipo de rocha impossibilitar a ocorrência de fósseis (Figura 16).

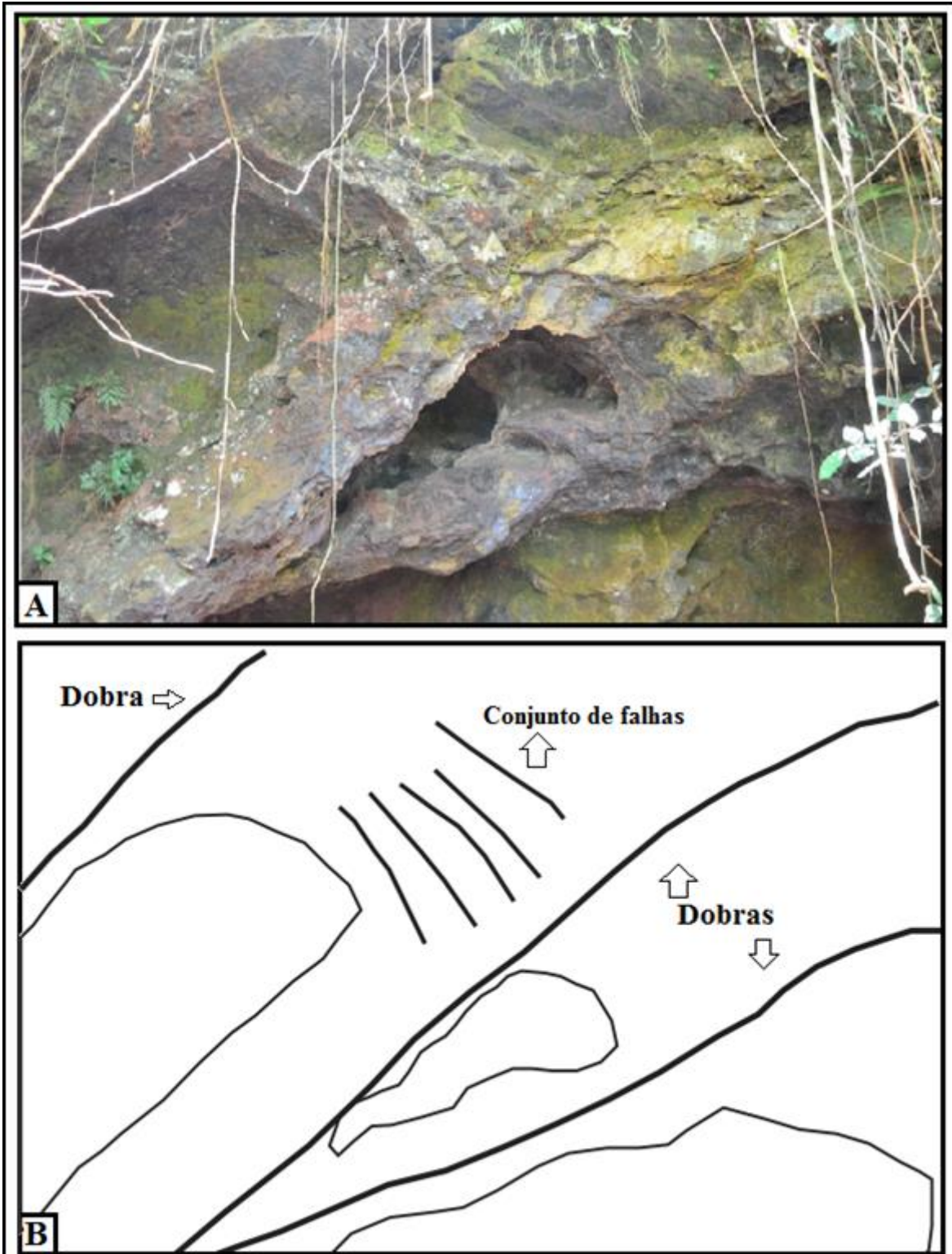


Figura 14- A: Flanco da dobra e fraturas, conferindo um controle estrutural da cavidade. B: Desenho Esquemático mostrando esse controle estrutural.

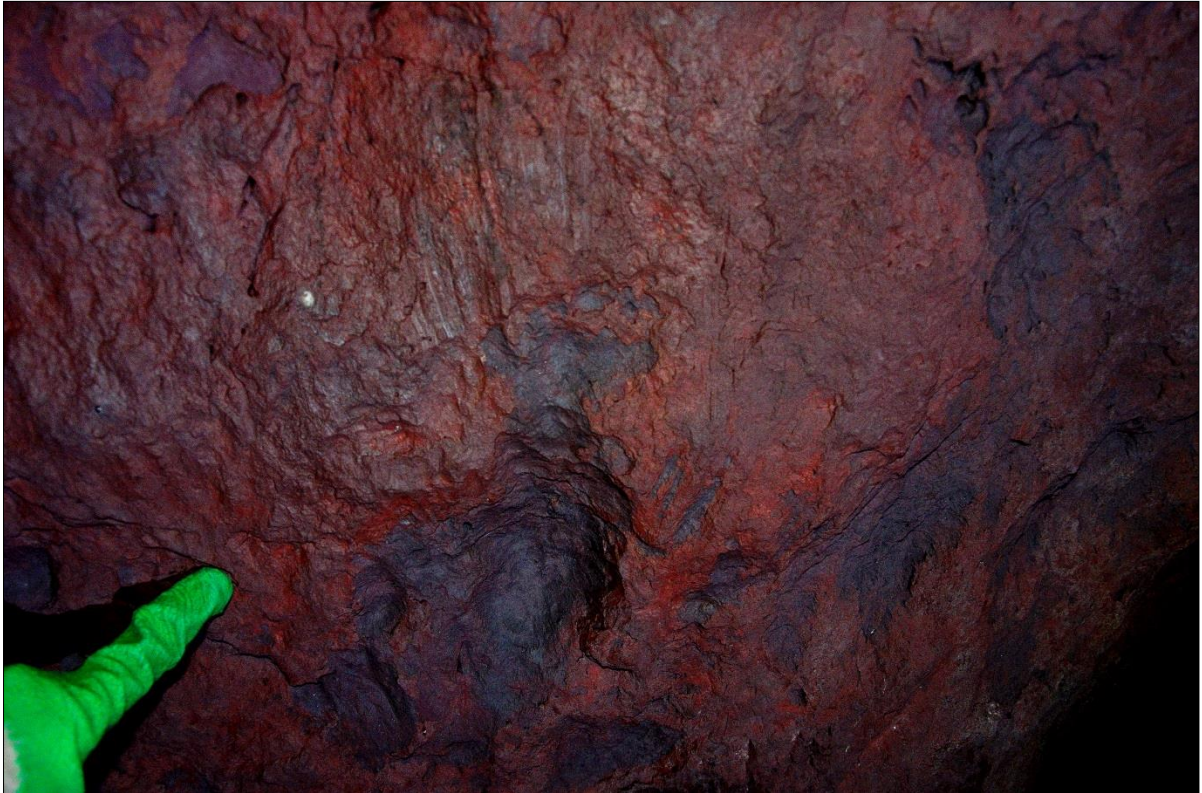


Figura 15: Detalhe das falhas encontradas em toda a cavidade.

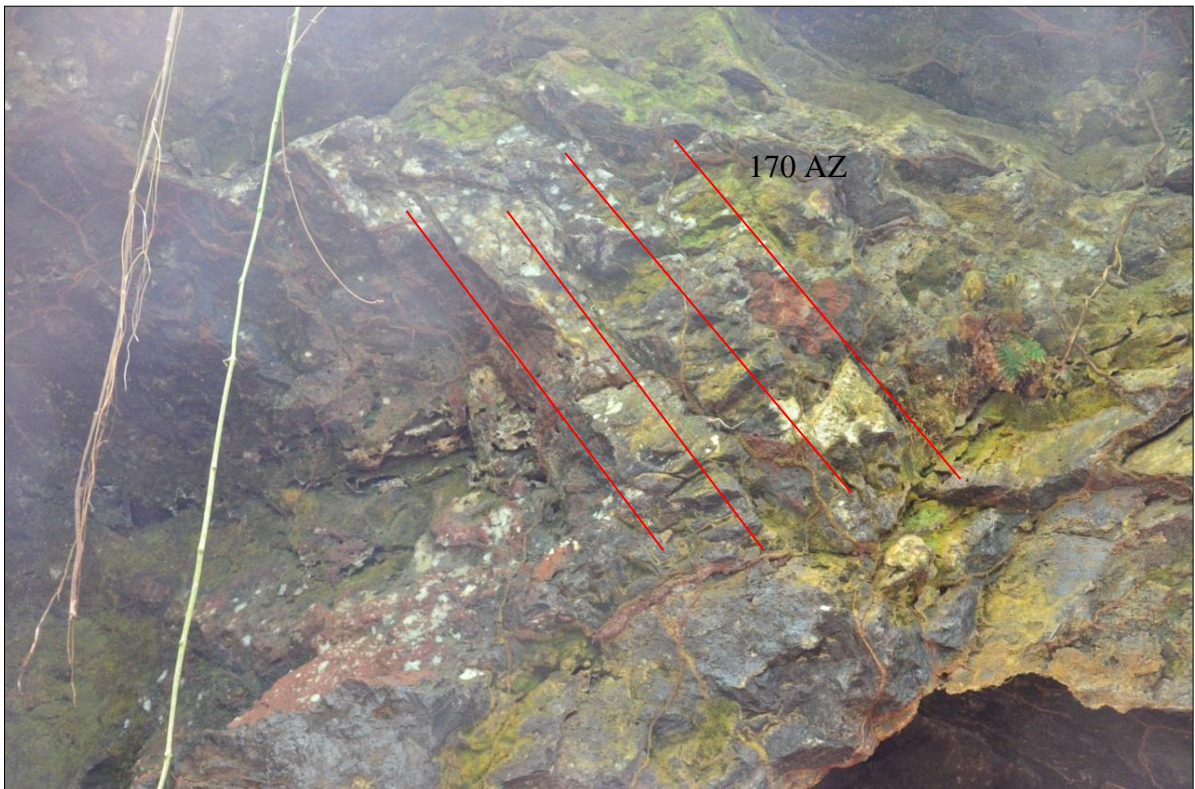


Figura 16: Flanco da dobra e fraturas com atitude de 170 Az, conferindo um controle estrutural a cavidade.

4.3.2 Cavidades SL-118, SL-119 e SL-120

As cavidades SL-118, SL-119 e SL-120 estão localizadas próximas umas das outras e possuem características semelhantes.

A cavidade SL-118 tem uma área interna de 15m² e aproximadamente uma altura de 1,90 m em sua parte mais alta, sendo essa a maior das três cavidades. Apresenta uma coloração avermelhada, observa-se uma diferença litológica entre a parede e o teto, sendo o teto formado por canga e as paredes formadas por BIF'S (Figura 17).

O controle estrutural da cavidade é dado pela formação de dobras cujos contatos entre litotipos nos seus flancos facilitam a percolação da água formando um conduto hidráulico (Figura 18) e proporcionando o processo de dissolução das bandas silicosas. Infere-se a formação de fosfato por dissolução seguida de precipitação e crosta branca, formado pelo processo de exsudação da rocha, foi observada a formação de espeleotemas do tipo microestalactite que se formam na canga (Figura 19 A e B).

Foram analisadas também estruturas antes descritas como icnofósseis formado por possíveis “ranhuras” de animais. Como resultado da observação nessa cavidade e, principalmente na cavidade SL-119, foi possível descartar essa hipótese pois, essas “ranhuras” ocorriam apenas em determinadas formações que podem ter sofrido exposição sub-área a qual possibilitou uma dissolução da sílica formando assim esses condutos (Figura 19 B e C)

Com isso, concluiu-se que o principal controle de formação dessas cavidades é o controle hídrico.

As atitudes estruturais medidas em campo serão fundamentais para o melhor entendimento da formação dessas cavidades, pois foram encontradas dobras com flanco 210 Az e mergulho 62°, fraturas com *trend* 230 Az e veios de quartzo com direções de 280 Az e 300 Az (Figura 20).



Figura 17- Foto mostrando a mudança litológica do teto (canga) com a parede (BIF'S) na cavidade SL-118.



Figura 18: Foto mostrando a dimensão da caverna, o conduto hidráulico e a diferença litológica entre o teto e a parede da cavidade SL-118.

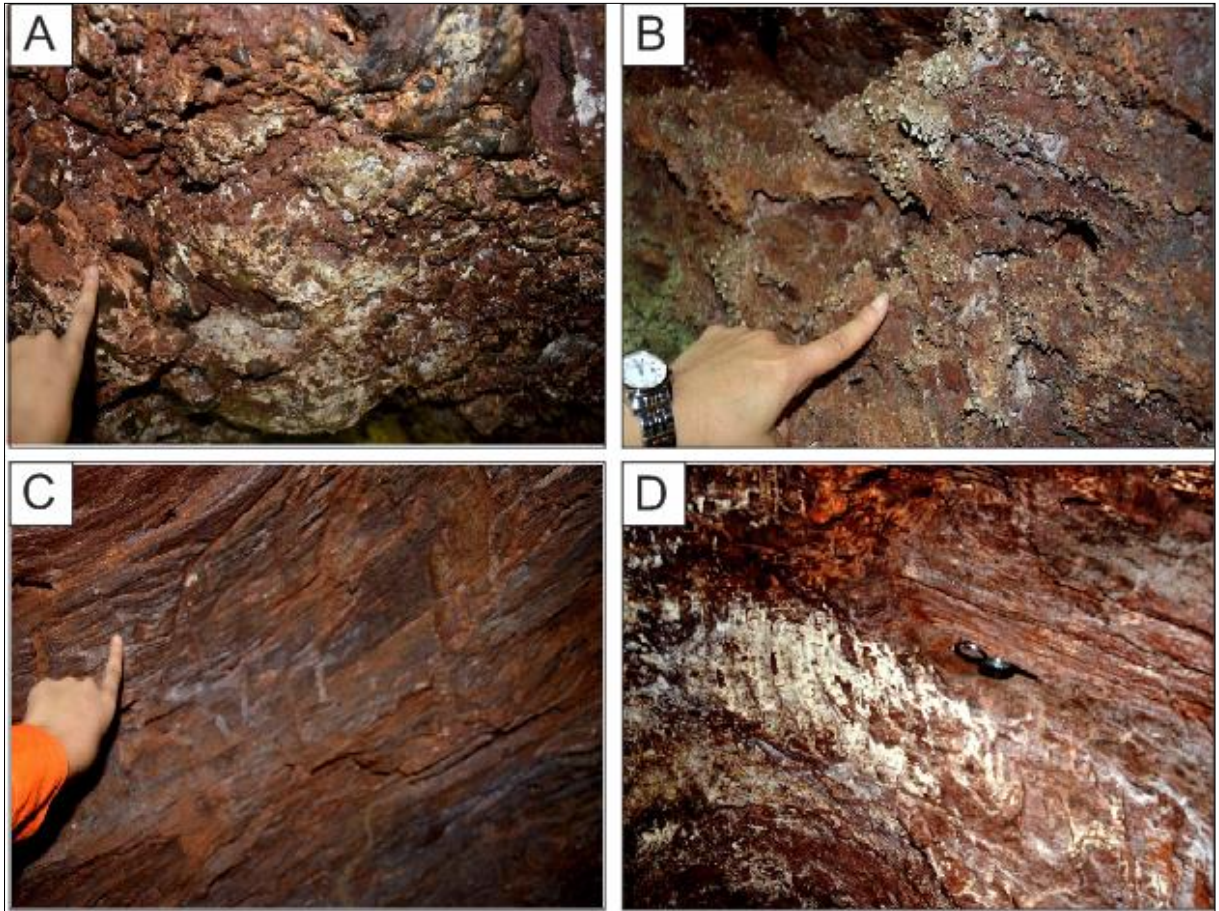


Figura 19- A- Foto mostrando a formação do fosfato por dissolução seguida de precipitação e crosta branca. B- Espeleotemas (microestalactite) formados na canga. C- Condutos formados a partir da dissolução da sílica. D- Condutos formados a partir da dissolução da sílica. Caverna SL-119.



Figura 20- Veios de quartzo com direções de 280°Az e 300°Az. Caverna SL- 119.

4.3.3 Caverna SL-257

Caverna muito grande formada por 4 galerias, cuja primeira mede cerca de 9m², descendo para a segunda galeria com aproximadamente o mesmo tamanho da anterior. A terceira galeria deve ter cerca de 6m² e a quarta, com formato aproximadamente retangular medindo cerca de 3 m de largura por 6 m de comprimento. Há uma grande dificuldade de acesso pelo fato de sua entrada ser estreita e no seu interior haver vários blocos soltos (Figura 21).

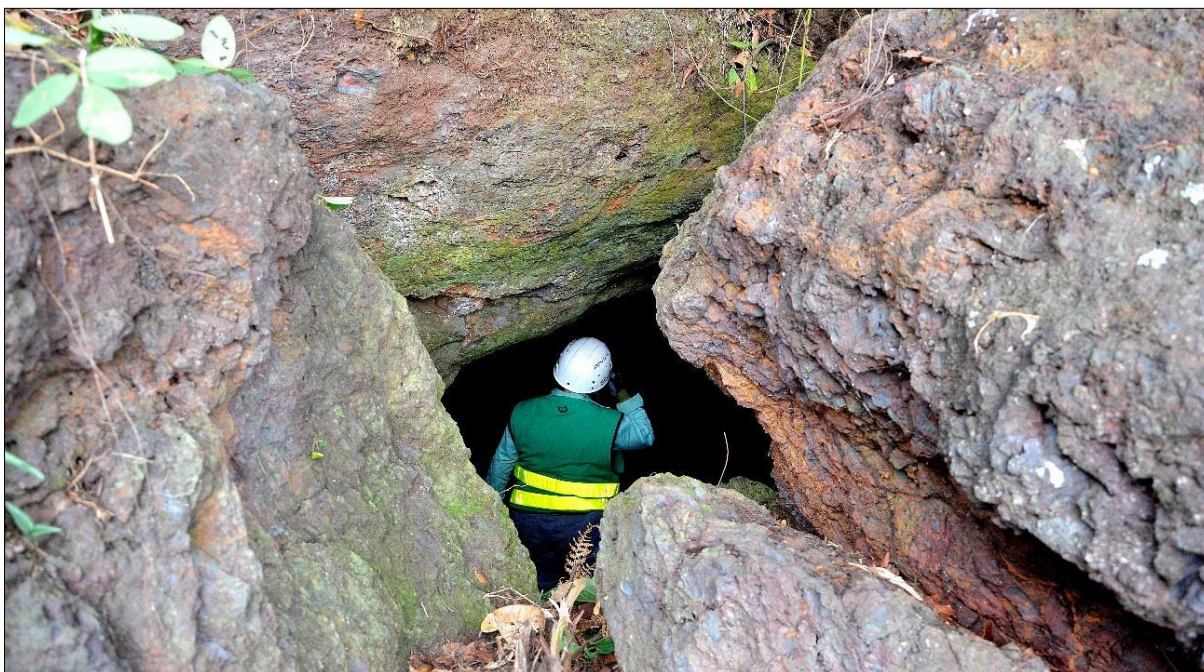


Figura 21- Dificil acesso a caverna, entrada da caverna SL- 257.

Essa caverna se diferencia das demais por apresentar uma umidade elevada, o que proporciona um processo de dissolução mais acentuado e grande quantidade de estruturas circulares. O teto é formado por canga e paredes formadas por BIF'S. Próximo à entrada da caverna foram descritas fraturas com *trend* 73°/52 Az (Figura 22 A, B, C e D).

De acordo com os aspectos gerais descritos concluiu-se que a caverna é formada, inicialmente, por turbilhonamento devido à uma grande massa de água, em declive, o que promove tanto a dissolução como a erosão da rocha, e que posteriormente é controlada pelo abatimento de blocos e percolação da água.

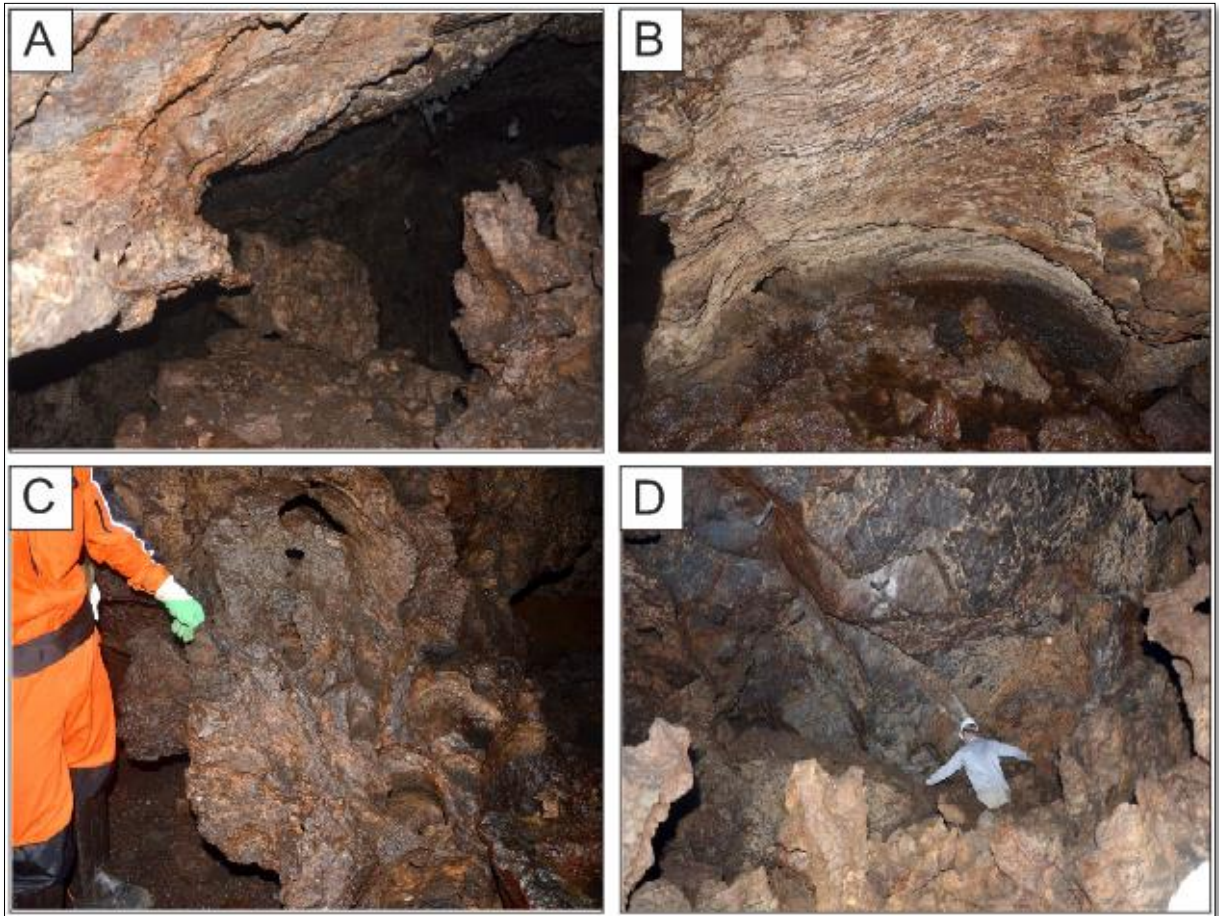


Figura 22- A- Blocos caídos na cavidade, tornando perigosa e dificultosa a movimentação no local. B- Umidade elevada da cavidade acentuando o processo de dissolução da rocha. C- Estrutura circular abundante na cavidade. D- Teto da cavidade (canga) e as falhas que controlam o abatimento de bloco.

5 DISCUSSÃO

A partir dos dados bibliográficos estudados e das análises fotointerpretadas foi possível relacionar aos dados de campo coletados nas cavidades e estabelecer uma relação entre eles.

As cavidades de Serra Leste possuem padrão hídrico distinto, na cavidade SL-201 nota-se um controle estrutural bastante evidente, onde é possível observar que a mesma é formada no flanco de uma dobra com presença de falhas por toda a cavidade formando também estrias de falhas (Figura 23). Tais falhas facilitam a infiltração, pois a densidade e a disposição do fraturamento exercem influência sobre a infiltração de água no maciço rochoso, com isso, em um maciço muito fraturado a quantidade de fraturas é tal que a infiltração verticalizada apresenta maiores possibilidade de atingir a caverna.



Figura 23: Esquema mostrando o caminhamento da água na formação das cavidades. As falhas e dobras contribuem para a percolação e erosão de novas cavidades. Cavidade SL-201.

As cavidades SL-118, SL 119 e SL 120 apresentam uma estruturação semelhante à cavidade SL-201, no entanto o padrão hídrico é mais evidente. A cavidade composta por teto de canga e paredes de hematita foi provavelmente formada por tubos de percolação de água

que estão presentes em pequena e grande escala (Figura 24). As estruturas presentes são evidências da forte ação da água na formação das cavidades, como as microestalactites que são formadas por gotejamento e dissolução de minerais presentes na rocha.

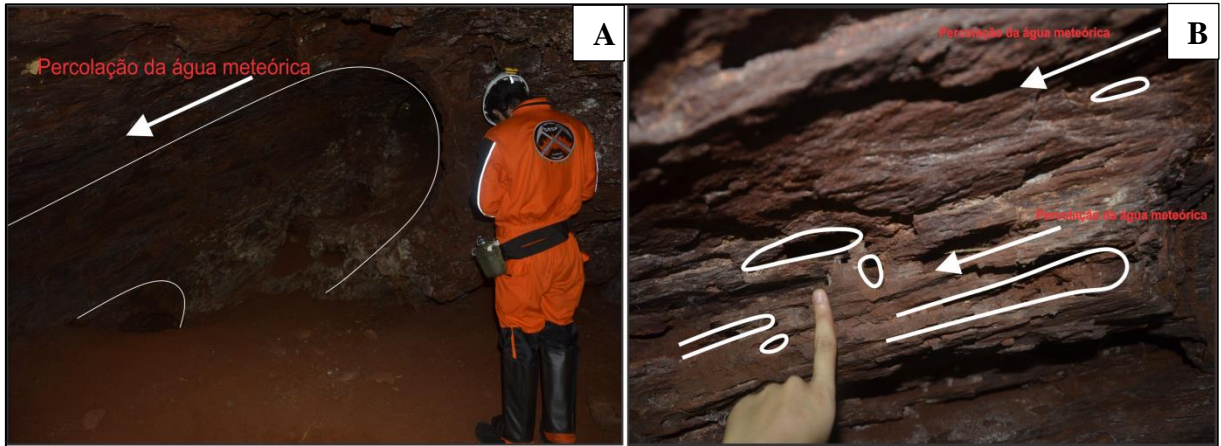


Figura 24: Esquema de percolação da água meteórica formando tubos; A) tubos formados em grande escala provavelmente responsável pela formação da cavidade; B) as mesmas formações em escala menor, mostrando que há um desenvolvimento na sua formação. Cavidade SL-118.

A cavidade SL-257 se enquadra nos padrões de falhas presentes nas demais cavidades de Serra Leste, apresenta laminas d'água no piso. A ação da água proporciona a formação de estruturas circulares (Figura 25) que podem ser responsáveis pela formação da cavidade. Devido ao progresso dessas formações há o abatimento de blocos ocasionando o surgimento dos vários patamares na cavidade.

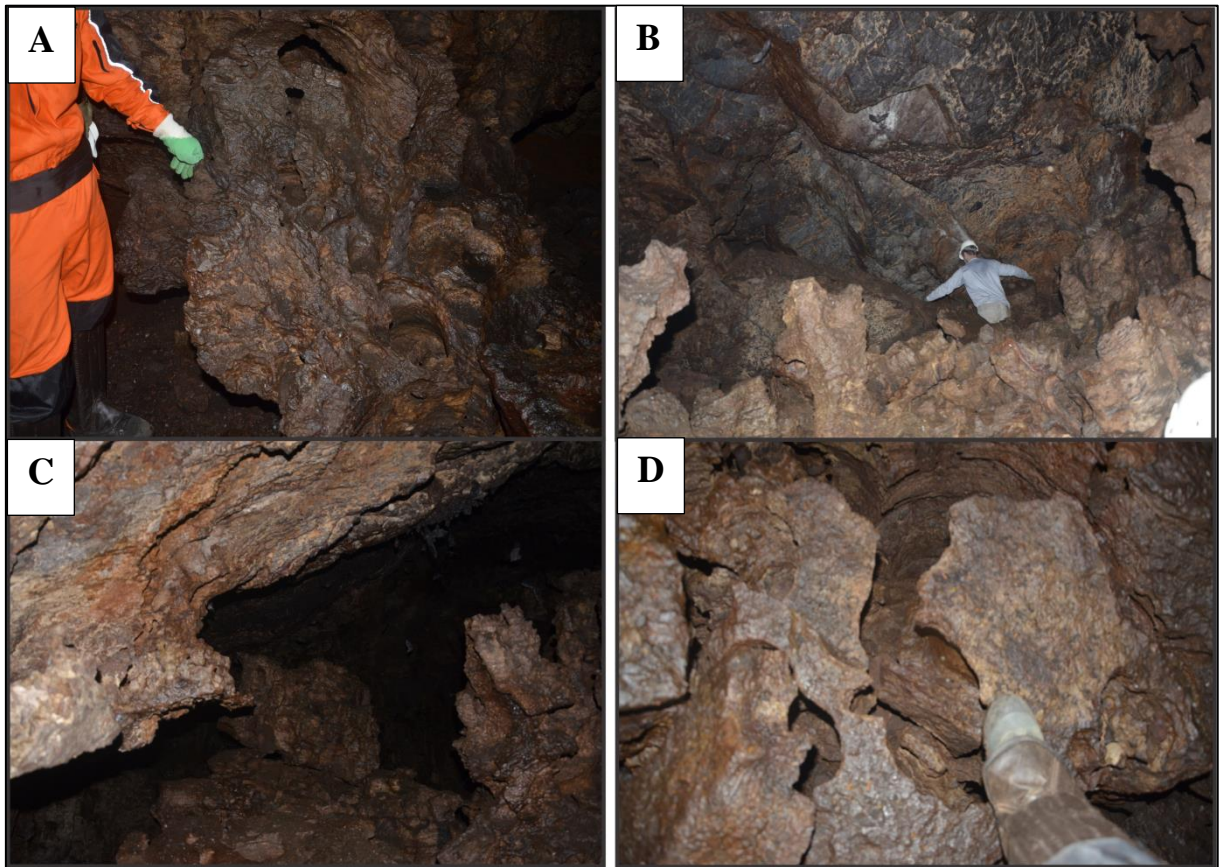


Figura 25: Caverna com presença de água e apresenta forte evidência de abatimento de blocos formando vários patamares; A) estrutura circular desenvolvendo a erosão e formação de colunas; B) patamar superior da caverna; C) blocos erodidos evidenciando a formação por erosão seguida de abatimento de blocos; D) piso da caverna desenvolvendo erosão e posteriormente outro patamar poderá ser desenvolvido. Caverna SL-257.

As condições pluviométricas e estruturais em que as cavernas estão inseridas facilitam a recarga hídrica e favorece no avanço na sua formação. A partir dessa análise foi constatado que a gênese das cavernas de Serra Leste segue os padrões propostos por Pinheiro & Maurity (1988). Durante a primeira fase, inteiramente na zona freática, ocorre a formação de complexos alumino-ferrosos e argilo-minerais instáveis de ferro, alumínio e sílica que preenchem os vazios da canga e da formação ferrífera bandada.

A remoção deste material residual instável leva à formação de orifícios irregulares que podem ser observados nas paredes da caverna SL-201 (Figura 23). A segunda etapa, ainda na zona freática, envolve processos erosivos e a formação de tubos presentes nas cavernas SL-118, SL-119 e SL-120 (Figura 24), que basicamente expandem as cavernas geradas na primeira etapa, levando então à formação de condutos e salões. Esses processos erosivos serão intensificados quando a caverna passar a ser exposta a atuação da água meteórica, propiciando também a atuação de processos de abatimento de blocos, como na caverna SL- 257.

Pinheiro & Maurity (1988) e Pilo & Auler (2005) consideram a existência de duas etapas distintas na formação das cavernas de minério de ferro e canga. A primeira delas com predominância de processos dissolutivos (químicos) e a segunda sob a ação de processos erosivos (físicos). A primeira etapa, endógena, envolve reações químicas no interior da massa rochosa na zona freática, gerando zonas de alta porosidade. Posteriormente o material friável resultante será lixiviado para o exterior.

Essa segunda etapa, iniciada na zona freática, pode ter continuidade na ação da água meteórica, quando os processos de formação de tubos podem vir a ser favorecidos. Iniciada a etapa erosiva das cavidades e sendo estabelecida uma saída para o exterior, os processos físicos serão incrementados e facilitados devido ao padrão de falhamento das cavidades. Material de granulometria fina será aportado para o interior das cavidades, principalmente, via canalículos, de onde era evacuado para o exterior. Nas cavidades de Serra Leste esse modelo pode ser aplicado a praticamente todas as que foram visitadas, onde as mesmas estão localizadas nas vertentes da serra e o seu padrão erosivo pode ser claramente reconhecido assim como sua evolução.

6 CONCLUSÕES

O estudo hidrogeológico nas cavidades de Serra Leste, primeiramente realizado em grande escala, permitiu a realização de importantes análises como a estrutural e a pluviométrica que aliadas foram a chave para a construção da evolução das cavidades.

Logo depois foi realizado o estudo em detalhe, com a visita a cinco cavidades bastante representativas. Com isso, os dados de macro e micro escala somados tornou possível estabelecer a formação e evolução das cavidades.

Em primeiro momento a formação das cavidades é dada pela estruturação tectônica bastante favorável para sua gênese, permitindo a percolação da água em suas estruturas abertas anteriormente identificadas segundo o modelo de Riedel e por estarem sendo formadas em flancos de dobras facilitando a ação da água.

Sua evolução a partir desse primeiro momento é predominantemente hídrica que por sua vez, ocupam normalmente as porções mais rebaixadas da paisagem, onde os fluidos ferruginosos se acumularam por tempo suficiente para que fosse formada uma crosta bastante enrijecida. Após a formação desta crosta de ferro o rebaixamento do nível de base que favorece a formação de protocondutos ou tubos (cavidade SL-118, SL-119 e SL-120) no contato entre a crosta rígida e o substrato subjacente, onde há uma descontinuidades textural pela formação da canga, facilita o fluxo subterrâneo de fluidos coloidais e soluções ampliando a ação desses protocondutos responsável pela formação das primeiras galerias subterrâneas.

A fase final de formação das cavidades ocorre com o abatimento de blocos, segundo a sua estruturação. A exsudação de soluções por fissuras e poros promove a geração de algumas estruturas como as formas circulares e colunas presentes na cavidade SL-257. A partir do momento que há instalação de uma rede de drenagem associada à formação dos lagos, muito embora algumas cavidades não tenham condições estruturais e hídricas que permitam desenvolver essas feições, pode-se dar início também à formação das cavidades bem desenvolvidas e várias galerias.

Não só o trabalho da hidrogeologia, mas outros trabalhos aliados a este podem desenvolver mais detalhadamente o processo responsável pela gênese das cavidades de Serra Leste.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, O.J.B.; MAIA, R.G.N.; JORGE JOÃO, X. da S. e COSTA, J.B.S.,. A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás. Anais VII Congresso Latino-Americano de Geologia, Belém, 1, 324-338. 1988.
- AULER, A.; CALUX, A. Geoespeleologia e Análise de Relevância, estudos espeleológicos Serra Leste. Belo Horizonte, Setembro de 2011
- BARROS, C.E.M; NASCIMENTO, V.M; FILHO, C.A.M Revisão da estratigrafia das rochas da Serra Leste Província Mineral de Carajás, Revista brasileira de geociências 40(2): 167-174, junho de 2010
- CORDANI, U.G.; SATO, K. Crustal evolution of the South American Platform, based on Nd 7 isotopic systematic on granitic rocks. Episodes. 1999. 22 (3):167-173.
- COSTA, J.B.S. & HASUI, Y. 1997. Evolução Geológica da Amazônia. In: ROSACOSTA, M.L.; ANGÉLICA, R.S. (Coord.). Contribuições à geologia da Amazônia. Belém: FINEP/SBG–Núcleo Norte. v. 5, p. 15-90.
- CPRM, C. – C. D. P. D. R. M. CPRM SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2013. Disponível em: www.cprm.gov.br/.
- DNAEE, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica/MME.
- DOCEGEO (Rio Doce Geologia e Mineração - Distrito Amazônia) 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás, Pará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém. Anexos, vol. Província Mineral de Carajás - Litoestratigrafia e Principais Depósitos Mineraiis.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Mapa de Biomas do Brasil. Diretoria de Geociências. Rio de Janeiro 2004.
- I.G - Instrumentação de trabalhos acadêmicos: orientação para alunos de graduação e pós-graduação / Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências. – Belém: Edufpa, 2009.

- MACAMBIRA J.B. 2003. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. 217 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
- MACHADO, N; LINDENMAYER, Z.; KROGH, T.H.; LINDENMAYER, D. 1991. U-Pb geochronology of Archaean magmatism and basement reactivation in the Carajás área, Amazon shield, Brazil. *Precambrian Research*, 49:329-354.
- MEIRELES *et al.* Geologia das folhas Carajás e Rio Verde, Província Mineral dos Carajás, estado do Pará. In: Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Rio de Janeiro: SBG, 1984. v.5, 1984. 2164-2174p.
- 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.
- PILO L. B. & A. S. AULER. 2005. Cavernas em minério de ferro e canga de capão Xavier, quadrilátero ferrífero, MG. *O Carste*. Vol.17(3):92---105.
- PINHEIRO, R.V.L.; MAURITY, C.W. 1988. 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: Sociedade Brasileira de Espeleologia, 1988. p. 179-186
- RIEDEL, W. 1929. Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. *Centralblatt Min.Geol. Pal., Abt. B.*, p:354-369..
- SANTOS, R.V. 2009. Geologia, petrografia e geocronologia de dois stocks graníticos associados ao magmatismo tipo-Planalto da região de vila Feitosa, Canaã dos Carajás- Província Mineral de Carajás. Trabalho de Conclusão do Curso. Marabá. Universidade Federal do Pará. 110p.
- Santos, J.O.S., Groves, D.I., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J. and Moura, M.B., (2000) A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology

- SILVA, M.F.F; SECCO, R. de S; LOBO, M. da G. Aspectos ecológico da vegetação rupestre da Serra dos Carajás,, Estado do Pará, Brasil. *Acta da Amazonia* 26(1/2), p 17-44, 1996
- SOARES, P.C.; FIORI A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Campinas, *Notícia Geomorfológica*, 1976. 16 (32): 71–104
- 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. Evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso Neto, V., Bartorelli, A., Carneiro, C.D.R., Brito Neves, B.B. de (org). *Geologia do continente Sul Americano. Evolução da obra de F. F. M. de Almeida*. São Paulo BECA, 2004, v., p. 471-486. 15
- TWISS, R.J & MOORE, E.M. 1992 .*Structural Geology*, Freeman & Company, New York, 532p.
- VALENTIM, R. F; OLIVITO, J. P Unidade Espeleológica Carajás: Delimitação dos Enfoques Regional e Local, Conforme Metodologia da IN-02/2009 MMA
- 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. *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*. Organizadores, Vasquez M.L., Rosa- Costa L.T. Escala 1:1.000.000. Belém: CPRM. 2008.
- VELOSO, HP. RANGEL FILHO, A.C.R. LIMA, J.C. A - Classificação da vegetação Brasileira adaptada a um sistema universal. IBGE 1991.
- VIALON, P; RUHLAND, M.; GROLIER, J. 1991. *Élèments de tectonique analytique*. Masson, Paris. 118p