



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ**

MARLOS ELIAS BORGES

**ESTUDO DA DEFORMAÇÃO RÚPTIL NO COMPLEXO ALCALINO-
CARBONATÍTICO DE SALITRE I**

ARAXÁ-MG

2018

MARLOS ELIAS BORGES

**ESTUDO DA DEFORMAÇÃO RÚPTIL NO COMPLEXO ALCALINO-
CARBONATÍTICO DE SALITRE I**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer

ARAXÁ-MG

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARLOS ELIAS BORGES

**ESTUDO DA DEFORMAÇÃO RÚPTIL NO COMPLEXO ALCALINO-
CARBONATÍTICO DE SALITRE I**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

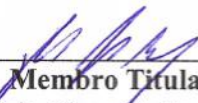
Araxá, 28 de novembro de 2018

**Presidente e Orientador: Hildor José Seer**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

**Membro Titular: Francisco de Castro Valente Neto**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

**Membro Titular: Guilherme Mendonça Alzamira**

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família que sempre me deu todo o apoio necessário para passar por mais esta etapa em minha vida, em especial ao meu pai e minha mãe, que em toda minha vida se sacrificaram e me incentivaram a continuar meus estudos.

Também quero agradecer aos meus amigos, que tornaram muito mais fácil passar por esta fase e a minha namorada que sempre me suportou por todo este período.

Ao meu orientador Hildor, obrigado por todo o suporte dado não só durante a graduação, pois ele é um professor que me acompanha desde o curso Técnico em Mineração e sempre se mostrou prestativo e dedicado ao trabalho.

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados de um estudo sobre a deformação rúptil do complexo Alcalino-carbonatítico Salitre I e seu entorno, próximo a cidade de Patrocínio, Minas Gerais. O complexo é uma intrusão magmática alcalino-carbonatítica com idade de 86 Ma e possui jazimentos de fosfato formados através de enriquecimento supergênico.

Estudos estruturais na região são escassos e a história da deformação das rochas é pouco explorada. Tendo isso em vista, este estudo foi realizado com o objetivo de reconhecer padrões de fraturamento. O estudo foi realizado a partir de dois pontos de vista, um deles utilizando o sensoriamento remoto de forma a trabalhar de forma mais regional, e outro com pesquisa de campo visando reconhecer as principais famílias de fraturas presentes no entorno do complexo. Os dados fornecidos pelos dois estudos foram analisados e comparados.

Foram coletados o mergulho e direção do mergulho de 687 fraturas em 10 afloramentos na região, sendo destes 9 no entorno do complexo e 1 no seu interior. Os estereogramas e diagramas de roseta das estruturas dos afloramentos do entorno do complexo revelaram que duas famílias de fraturas têm maior relevância com direções NW-SE e NE-SW. Estas famílias possuem expressão regional e já eram esperadas.

Também foram estudados diques de kamafugito presentes nos afloramentos ao redor do complexo e em um afloramento no seu interior. Nestes, pode-se notar que a família de fraturas mais relevantes tem sentido W-E, o que indica que este padrão de fraturamento é posterior ao evento magmático intrusivo responsável pela intrusão dos diques e do complexo Salitre I e indica também que o fraturamento no interior do complexo possivelmente tem este padrão de fraturamento como principal estrutura rúptil. Neste caso a inexpressividade dos padrões NE e NW indica que estas famílias têm formação no cretáceo (época de formação do complexo) ou até mesmo anterior.

Palavras-chave: Complexo Alcalino Salitre I, deformação rúptil, geologia estrutural.

ABSTRACT

The results of a study on brittle deformation of the Salitre I Alkaline-Carbonatite Complex and its surroundings, near the city of Patrocínio, Minas Gerais, are presented. The complex is an alkaline-carbonatite magmatic intrusion emplaced at ca. 86 Ma and has phosphate deposits formed through supergenic enrichment.

Structural studies in the region are scarce and the history of rock deformation is little explored. With this in mind, this study was carried out with the objective of recognizing fracturing patterns. The study was conducted from two points of view, one using remote sensing to work in a more regional way, and the other with field research aiming to recognize the main families of fractures present in the surroundings of the complex. The data provided by the two studies were analyzed and compared.

The dip and dip direction of 687 fractures were collected in 10 outcrops in the region, of which 9 were in the vicinity of the complex and one in the interior. The stereograms and rose diagrams of the outcrop structures surrounding the complex, revealed that two fracture families have greater relevance with NW-SE and NE-SW directions. These families have regional expression and were already expected.

Dikes of kamafugite were also studied in the outcrops around the complex and in an outcrop in the interior. In these, it can be noted that the most relevant family of fractures has E-W direction, which indicates that this fracturing pattern is younger than the intrusive magmatic event responsible for the intrusion of the dikes and the Salitre I complex. Also indicates that the fracture in the interior of these complexes possibly have this fracturing pattern as the main structure. In this case the inexpressiveness of the NE and NW patterns indicates that these families formed in the Cretaceous (the time of formation of the complex) or even before that.

Key words: Salitre I Alkaline Intrusive Complex, brittle deformation, structural geology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Mapa de acesso e localização à cidade de Patrocínio	12
Figura 2. 2 - Mapa magnetométrico de Patrocínio e região	14
Figura 2. 3– Mapa Geofísico dos complexos Salitre e Serra Negra.....	15
Figura 2. 4 – Mapa geológico de Salitre I com base em furos de sonda e geofísica	17
Figura 2. 5 – Exemplo de mapa geológico da Mina Bananeira em Miguel Calmon-BA	19
Figura 2. 6 – Exemplo de estereograma com projeção polar representando os grupos de fraturas no complexo Embu em São Paulo-SP	19
Figura 2. 7 – Exemplo de utilização de diagramas de roseta para a direção de fraturas (preto) e diques (cinza) no complexo alcalino do Barreiro.....	20
Figura 2. 8 – Três tipos de fraturas.....	21
Figura 2. 9 – Modos de Fratura utilizados em mecânica do fraturamento	23
Figura 2. 10 – Fraturas menores na terminação de fraturas de cisalhamento	24
Figura 2. 11- Imagem de satélite da cidade de Patrocínio e dos complexos Serra Negra e Salitre	25
Figura 3. 2– Mapa de parte do complexo Salitre I composto por fotografias aéreas e pontos de coleta de fraturas.....	27
Figura 4. 1 – Mapa de fraturas fotointerpretadas da região do Complexo de Salitre I. As regiões onde existe maior frequência de fraturas correspondem a rochas quartzíticas do Grupo Canastra, enquanto que os locais com menor frequência são de metargilitos do Grupo Bambuí.	29
Figura 4. 2 – Diagrama de roseta quanto a frequência das fraturas.....	30
Figura 4. 3 – Diagrama de roseta quanto ao comprimento das fraturas.....	31
Figura 4. 4 – Mapa geofísico dos complexos da região de Patrocínio e diagrama de roseta da área com sensoriamento remoto.....	31
Figura 4. 5 - Dique cortando o metargilito em MS 01.....	32
Figura 4. 6 – Estereograma e diagrama de roseta referentes ao metargilito em MS 01.....	33
Figura 4. 7 – Estereograma referente ao dique de kamafugito em MS 01.....	34
Figura 4. 8 – Estereogramas e diagramas de roseta do metargilito em MS2.	36
Figura 4. 9 – Estereograma e diagrama para as fraturas encontradas nos diques em MS 02.....	37
Figura 4. 10 – Quartzito fraturado aflorante em corte de estrada	38
Figura 4. 11 – Estereograma e diagrama de roseta de MS 03.	39
Figura 4. 12 – Estereograma e diagrama de roseta para o quartzito presente em MS 04.	40
Figura 4. 13 – Estereograma e diagrama de roseta da atitude dos diques presentes no afloramento que ocorrem com direção preferencialmente radial à borda do complexo.....	41
Figura 4. 14 – Estereograma e diagrama de roseta do ponto MS 05.	42
Figura 4. 15 – Estereograma e diagrama de roseta do ponto MS 06.	44
Figura 4. 16 – Estereograma e diagrama de roseta referentes à MS 07.....	45
Figura 4. 17 – Estereograma e diagrama de roseta referentes à MS 08.....	46
Figura 4. 18 – Estereograma e Diagrama de roseta de MS 09.....	47
Figura 4. 19 – Estereograma e diagrama de roseta referente à MS 10.	48
Figura 4. 20 – Estereograma e Diagrama de roseta compostos por todos os dados levantados em campo.....	50

Figura 5. 1 - Mapa com diagramas de roseta em sua posição geográfica.	51
Figura 5. 2 – Contexto regional da província Salitre. Fonte: Borges e Drews (2001).....	52
Figura 5. 3 – Modelo simplificado da evolução do complexo Salitre I.....	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 Origem dos depósitos de Fosfato do Brasil.....	11
2.2 O complexo alcalino-carbonatítico de Salitre I.....	12
2.2.1 Geologia dos complexos Serra Negra, Salitre I, II e III.....	14
2.3 Geologia estrutural	17
2.3.1 Organização dos dados coletados.....	20
2.3.2 Deformação Rúptil	21
2.3.3 Fraturas.....	21
2.3.4 Terminação das fraturas	23
2.4 SIG (Sistema de Informações Geográficas).....	24
3. METODOLOGIA	26
4. RESULTADOS	29
4.1 Fraturamento regional	29
4.2 Fraturamento por afloramento.....	32
4.2.1 MS 01	32
4.2.2 MS 02	35
4.2.3 MS 03	38
4.2.4 MS 04	40
4.2.5 MS 05	42
4.2.6 MS 06.....	43
4.2.7 MS 07	44
4.2.8 MS 08.....	46
4.2.9 MS 09	47
4.2.10 MS 10.....	48
4.2.11 Resultados gerais do campo	49
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
6. CONCLUSÕES	54
7. BIBLIOGRAFIA	55

1. INTRODUÇÃO

A Província Ígnea do Alto Paranaíba (APIP) destaca-se entre as áreas de ocorrência de complexos alcalino-carbonatíticos no Brasil por sua complexidade petrológica decorrente da associação entre carbonatitos e rochas alcalinas ultrapotássicas e também pelo grande número e variedade de depósitos minerais desenvolvidos nesses complexos (Brod et al., 2000; Brod et al., 2004). Nesse contexto encontra-se o Complexo Alcalino-Carbonatítico de Salitre I (Barbosa et al., 2012) com importantes mineralizações de fosfato resultantes dos processos magmáticos e enriquecidos de forma supergênica, gerando depósitos economicamente viáveis. Estes depósitos estão sendo explorados pelas empresas Mosaic Fertilizantes e Iara Fertilizantes.

O trabalho teve por objetivo realizar um levantamento da deformação rúptil presente na região. As fraturas foram coletadas levando-se em conta informações quanto a sua localização, direção, mergulho, e principais famílias de fraturas. Os dados levantados foram tratados em programas computacionais visando a análise rúptil regional e o entendimento da atual condição estrutural através de ferramentas como estereogramas, diagramas de roseta e mapas de fraturas.

A partir da análise dos dados pode-se fazer uma interpretação geológica regional e inferir as prováveis estruturas presentes no interior de Salitre I, mesmo que as áreas externas à mina (local de foco do estudo) não contenham bons afloramentos para análise estrutural visto a ação do intemperismo sobre as rochas do complexo.

Este trabalho seria inicialmente realizado em parceria com a empresa Mosaic Fertilizantes, com foco na análise estrutural na mina de fosfato, entretanto atrasos na colaboração entre a Mosaic e o CEFET-MG impossibilitaram a realização do trabalho que teve uma mudança de objetivo de forma a tratar da deformação rúptil regional e do entorno e interior do complexo Salitre I. Esta proposição torna-se, ao final, extremamente interessante, uma vez que poderá subsidiar os trabalhos futuros de geologia estrutural na região da mina especialmente ao permitir a correlação geométrica das fraturas em relação ao arcabouço regional.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Origem dos depósitos de Fosfato do Brasil

Os depósitos de fosfato podem ter origem magmática (complexos alcalino-carbonatíticos), sedimentar (fosforitos marinhos) ou nos chamados guanos, que são acumulações de excrementos de pássaros e/ou morcegos ao longo de milhares de anos.

Dados do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) de 2008 mostram que cerca de 80% das jazidas de fosfato no Brasil são de origem ígnea com presença acentuada de rocha carbonatítica e minerais micáceos e são relacionados a processos de alteração intempérica, o que lhes confere alta complexidade mineralógica e baixo teor se comparados aos fosforitos sedimentares marinhos, tipo de depósito fosfático presente em países como Marrocos, Rússia, China e Estados Unidos.

Ainda segundo o DNPM o Brasil apresenta uma reserva de mineral fosfático oficialmente aprovada até 2008, de 4.769 milhões de toneladas (Mt). Minas Gerais concentra cerca de 67,5% dessas reservas e possui os 4 maiores municípios produtores de fosfato do país. Tapira que é detentora de cerca de 32,6% de todo o fosfato do país, Serra do Salitre com 13,5%. Patos de Minas com 11,9% e Araxá com 8,8%.

2.2. O complexo alcalino-carbonatítico de Salitre I

O complexo Salitre I apresenta diâmetro de aproximadamente 8 km na direção NNW e cerca de 5 km na direção ENE e se localiza a cerca de 20 km à sudeste do município de Patrocínio-MG, Patrocínio é um município localizado na Mesorregião Alto Paranaíba distando cerca de 73 quilômetros ao norte de Araxá e a 340 quilômetros a noroeste de Belo Horizonte (Figura 2.1).

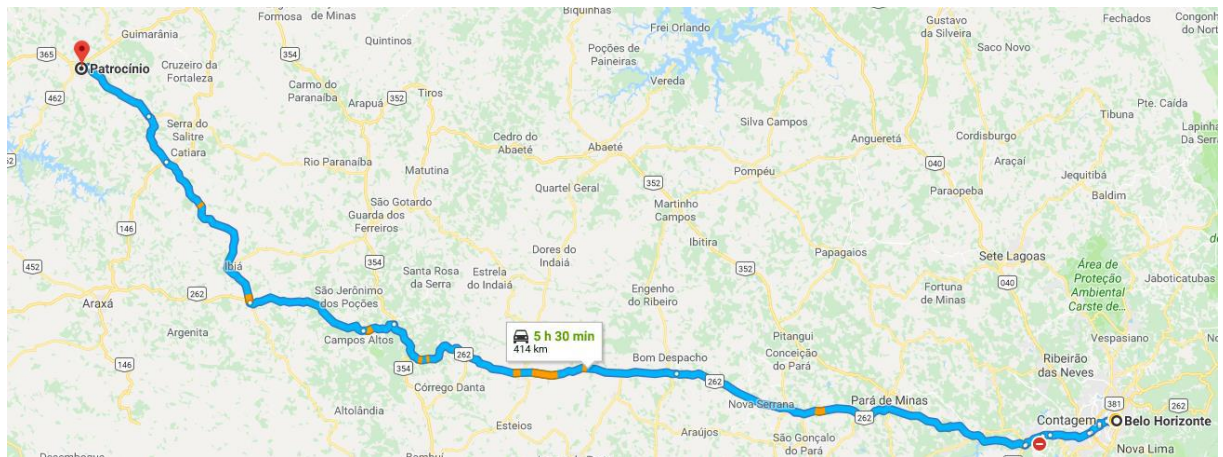


Figura 2.1 – Mapa de acesso e localização à cidade de Patrocínio. Fonte: Google Maps.

O complexo Salitre I está inserido na Província Ignea do Alto Paranaíba (APIP), que segundo Gibson et al. (1995) é resultado de intenso magmatismo máfico-ultramáfico ultrapotássico e possui intrusões ultramáficas carbonatíticas de até 65 Km². Catalão I e II em Goiás, e Araxá, Tapira, Salitre I, II e III e Serra Negra, em Minas Gerais são os complexos carbonatíticos pertencentes a APIP. Essas intrusões são caracterizadas por rochas das séries bebedourítica, carbonatítica, sienítica e foscorítica, com magma parental de afinidade kamafugítica (Brod et al., 2000). Uma descrição breve das rochas do complexo e sua mineralogia baseada em Barbosa (2009) é descrita a seguir:

Bebedourito – Varia de fino a grosso, por vezes com aspecto pegmatóide, e é composto essencialmente de clinopiroxênio (com ou sem olivina), flogopita, perovskita, titanita, melanita, magnetita e apatita. Localmente apresenta texturas de acamamento magmático e pode ocorrer como diques.

Sienito – se apresenta como diques em Salitre I e é uma rocha fina, composta essencialmente por feldspato potássico tabular e aegirina prismática, com pequenos cristais de titanita euédrica como principal acessório. Pode apresentar textura traquítica e, por vezes, porfirítica, com fenocristais de piroxênio e feldspato potássico de até 1 cm.

Foscorito – geralmente apresenta granulação grossa e é composto por apatita, olivina, flogopita e magnetita e está restrita à porção norte do complexo.

Carbonatito – Apresenta-se no complexo em forma de diques centimétricos compostos quase que exclusivamente por carbonato, com pouca flogopita e alguns sulfetos. Quando em corpos maiores vai de carbonatito puro a porções mais ricas em magnetita, flogopita, apatita, olivina e pirocloro.

Segundo Uliana (2010), a complexidade mineralógica e tipológica dos minérios provenientes de complexos alcalino-carbonatíticos é acentuada pelo zoneamento vertical causado pelos processos de alteração intempérica e, no Brasil, normalmente se apresentam com formas ovaladas a subcirculares, com diâmetro variando de centenas de metros a alguns quilômetros.

2.2.1. Geologia dos complexos Serra Negra, Salitre I, II e III

Os complexos de Salitre e Serra Negra fazem parte de um contexto regional de complexos alcalino-carbonatíticos dentre os quais se destacam os complexos Araxá e Tapira, conhecidos por seus importantes depósitos minerais ricos em Fósforo, Nióbio, Titânio e elementos de terras raras. Estes complexos, assim como Salitre e Serra Negra, apresentam anomalia magnética característica que pode ser facilmente visualizada a partir dos mapas do levantamento aerogeofísico realizado pela CODEMIG no ano de 2006 (Figura 2.2). Uma exceção à regra está na região de Pratinha-MG que apesar de possuir uma anomalia magnética significativa não apresenta rochas aflorando que possam ser responsáveis pela anomalia.

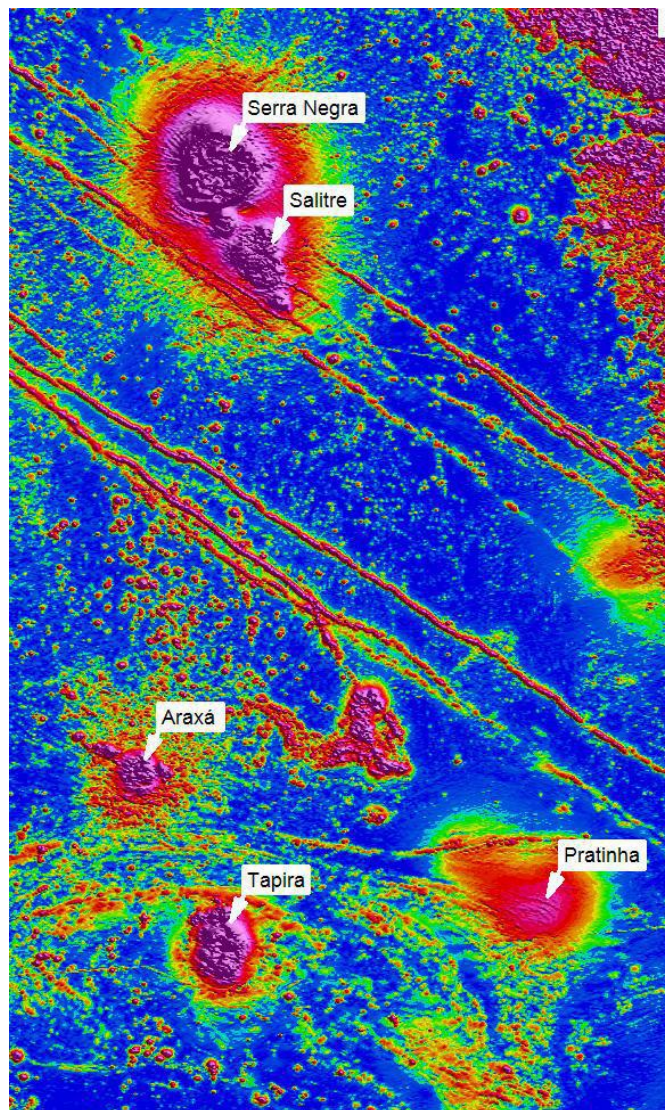


Figura 2. 2 - Mapa magnetométrico de Patrocínio e região. Os menores valores de magnetismo estão representados em azul enquanto os maiores estão representados em rosa. Fonte: CODEMIG.

Segundo Brod et al. (2004) na região de Patrocínio existem quatro intrusões alcalinas distintas, de dimensões variadas. As anomalias magnéticas provenientes dos complexos assim como a separação aproximada entre eles podem ser visualizada na figura 2.3.

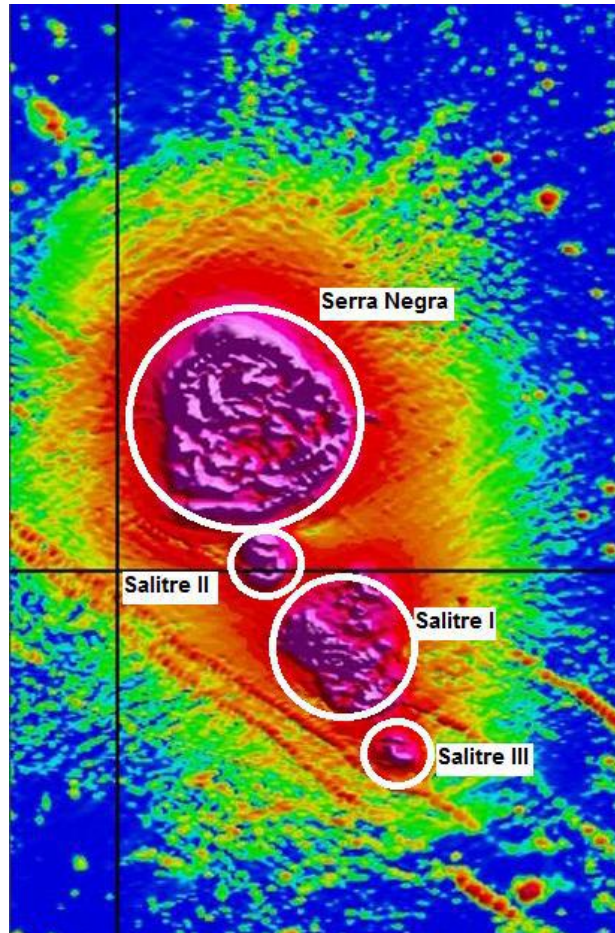


Figura 2. 3– Mapa Geofísico dos complexos Salitre I, II e III e Serra Negra. Adaptado de: CODEMIG.

O complexo Serra Negra, é o maior de todos e situa-se a poucos quilômetros do complexo Salitre I. Pode-se notar que apresenta estrutura circular muito bem definida, sendo facilmente visível através de aerofotografias e imagens de satélite. Apresenta diâmetro aproximado de 11 a 14 km e é composto principalmente por dunitos, peridotitos, serpentinitos, piroxenitos, magnetita clino-piroxenitos glimeritos e carbonatitos, sendo raramente aflorantes devido ao espesso manto laterítico originado a partir de intenso intemperismo no período Terciário (Uliana, 2010).

Salitre I tem forma aproximadamente oval, com cerca de 7 km na direção N-S e 5 km na direção E-W, e é o segundo maior corpo dos quatro. É composto basicamente por bebedourito, tinguaito, traquito, fenito, apatita-carbonatito, calcita carbonatito e foscorito. De acordo com Araújo (2015) o complexo de Salitre I tem ao centro do corpo bebedouritos ricos em perovskita (B1), com ou sem olivina e na porção sul, bebedouritos ricos em Ti-andradita, piroxênio e flogopita, sendo essa uma intrusão independente e mais tardia (B2) (Barbosa et al., 2012). A figura 2.4 mostra a geologia do complexo. Segundo Melo et al. (1997), a mineralização de Salitre, assim como Tapira, Barreiro e Catalão, é constituída por hidroxiapatita, concentrada por intemperismo e lixiviação sobre as rochas originalmente ricas naquele mineral. Esse fenômeno é mais comum em regiões tropicais como o Brasil, mas também pode ocorrer em outras regiões.

Salitre II se situa entre Salitre I e Serra Negra, tem cerca de 2,5 km² e contém principalmente rochas ultramáficas. Salitre III é um pequeno corpo ao sul de Salitre I formado basicamente por piroxenitos com foscoritos subordinados e apresenta rochas piroclásticas subordinadas (Seer et al., 2015).

Os complexos de Salitre I, II e III e Serra Negra estão encaixados em rochas metassedimentares dos Grupos Canastra e Bambuí. Uma descrição mais detalhada dos grupos Canastra e Bambuí presentes na região é dada por Seer et al. (2015). Segundo aqueles autores, o Grupo Canastra se constitui basicamente de um conjunto de camadas de filitos e quartzitos com texturas e composições variadas e possuem laminação ou estratificação plano-paralela. No grupo Bambuí, por sua vez, predominam ardósias, com presença também de metasiltitos, metaargilitos, metarenitos, quartzitos e filitos.

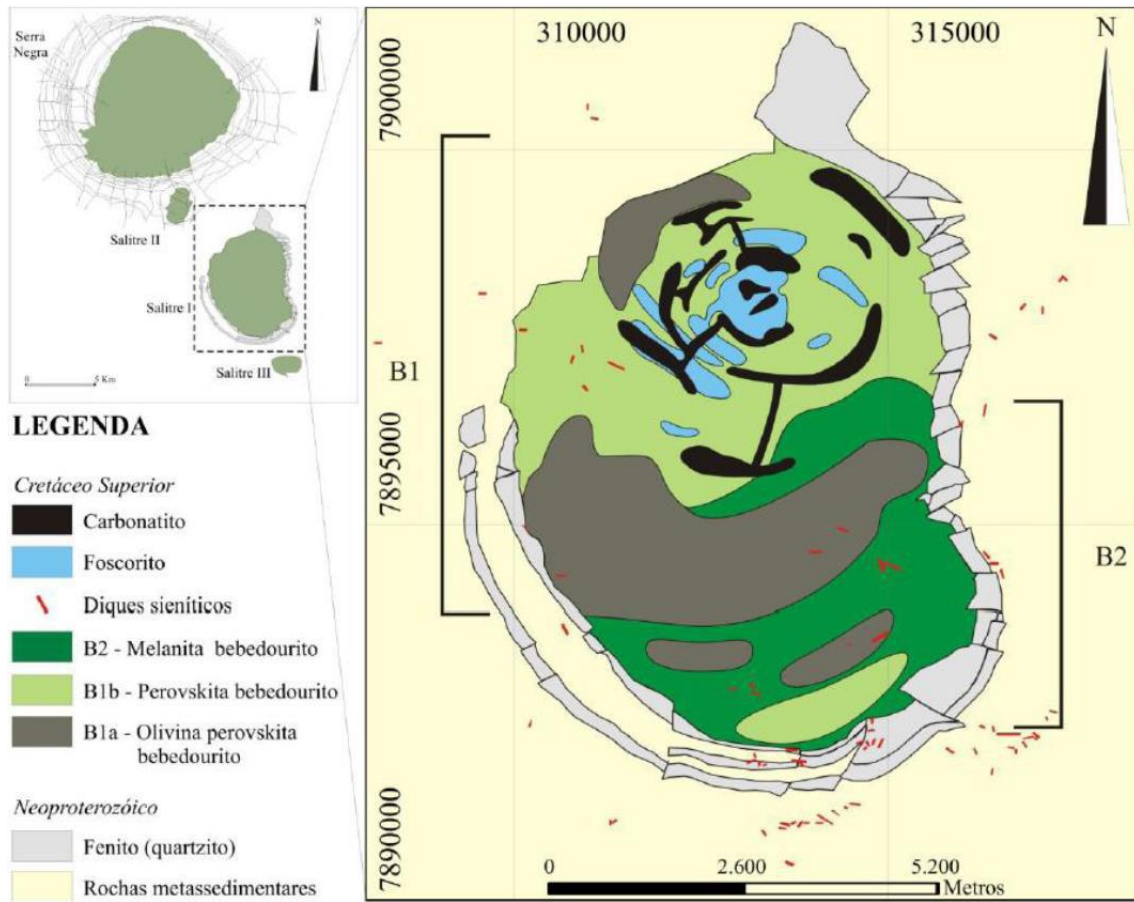


Figura 2. 4 – Mapa geológico de Salitre I com base em furos de sonda e geofísica. Fonte: Barbosa et al. (2012).

2.3. Geologia estrutural

Os principais métodos de observação da deformação de rocha para definir os fenômenos que deram origem a sua formação são as observações de campo, os experimentos de laboratório e as modelagens numéricas. Este trabalho teve como principal foco as observações de campo que retratam principalmente a forma final da deformação não se importando tanto com o histórico deformacional.

O trabalho de observação de campo envolve o uso de ferramentas como trena, mapas topográficos, lupas, bússola, GPS, imagens de satélite e aerofotografias. Trabalhos com na tectônica rúptil, como o realizado por Fernandes et al. (2016), tem como objetivo da coleta em campo, a descrição de fraturas a partir de observações pontuais nas quais são coletados dados como número de fraturas, comprimento das fraturas, orientação, mergulho e distância entre estruturas.

Estruturas dúcteis e rúpteis podem também ser mapeadas através de fotos de alta resolução de satélite e de aerofotografias. A comparação desses mapas feitos através de sensoriamento remoto com o mapa dos dados coletados em campo, pode fornecer uma boa visão geral e validar o método de coleta em campo por sensoriamento remoto.

Existem 4 principais tipos de análises estruturais que podem ser realizadas. A análise geométrica, análise cinemática, a análise dinâmica e a análise tectônica.

A análise geométrica é o tipo de análise das estruturas que se detém na forma, orientação geográfica, tamanho e relações geométricas entre a estrutura principal (de primeira ordem) e as estruturas de menor escala associadas (de segunda ordem) (Fossen, 2012). Vários métodos são utilizados para a medição e descrição das estruturas e associações estruturais.

A fim de definir essas estruturas usa-se algumas ferramentas como a atitude da camada, direção (strike), mergulho (dip) e direção do mergulho (dip direction). O Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2018), possui em seu site uma descrição de cada um destes termos.

A atitude é a definição da disposição espacial de um plano ou linha (camada, fratura, falha, eixo de dobra...) com relação ao plano horizontal e à linha meridiana N-S verdadeira. A direção (strike) é dada pelo ângulo entre a linha N-S e a linha da interseção do plano geológico com o plano horizontal sempre referida ao N verdadeiro. E o mergulho é definido pelo ângulo diedro entre o plano geológico e o plano horizontal.

No presente trabalho utilizou-se da nomenclatura alemã para descrever a atitude das camadas e das fraturas. Nesta nomenclatura são utilizados somente a direção do mergulho (ângulo entre a linha N-S e a linha da interseção do plano geológico com o plano horizontal acrescida de 90°) e o valor do mergulho. Ex: $290^\circ/70^\circ$ (direção do mergulho = 290° , valor do mergulho = 70°).

Segundo Fossen (2012), a geometria pode ser apresentada sob a forma de mapas (Fig. 2.5), perfis, projeções estereográficas (Fig. 2.6), diagramas de roseta (Fig. 2.7) ou modelos tridimensionais.

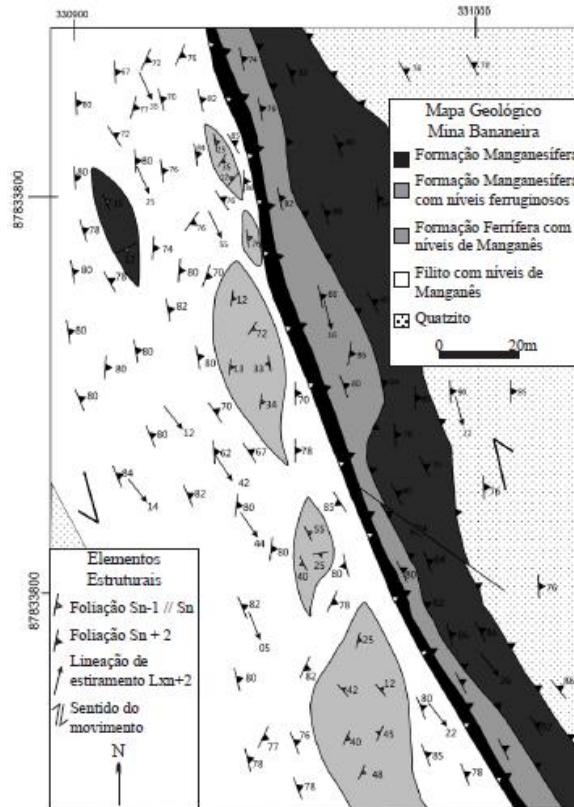


Figura 2. 5 – Exemplo de mapa geológico da Mina Bananeira em Miguel Calmon-BA. Fonte: Cruz, Leite, Conceição (2012).

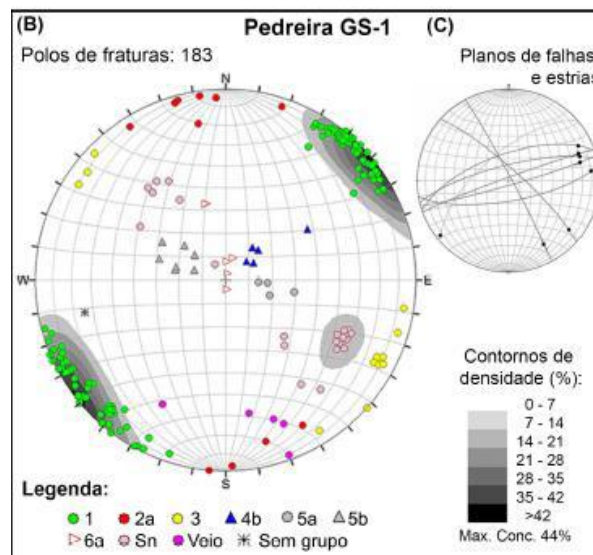


Figura 2. 6 – Exemplo de estereograma com projeção polar representando os grupos de fraturas no complexo Embu em São Paulo-SP. Fonte: Fernandes et al. 2016.

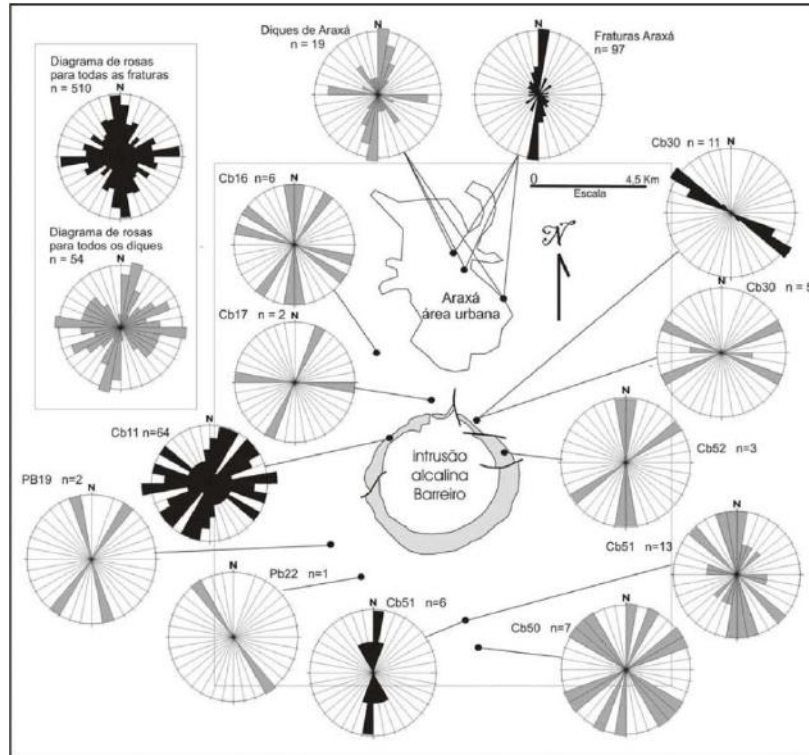


Figura 2. 7 – Exemplo de utilização de diagramas de roseta para a direção de fraturas(preto) e diques(cinza) no complexo alcalino do Barreiro. Fonte: Moraes et al. 2008.

2.3.1. Organização dos dados coletados

Após a coleta de dados estruturais da área deve-se organizá-los em planilhas e tratá-los em programas que permitam análise estatística. Uma grande quantidade de dados coletada tornará a sua coleta e processamento lentos, porém dados insuficientes podem ter resultados ainda piores fazendo com que um segundo levantamento de campo seja necessário. Dessa forma um bom planejamento anterior à pesquisa de campo é necessário.

De acordo com Fossen (2012) os dados devem ser adequadamente agrupados e organizados para posterior análise. Em alguns casos os dados são homogêneos e podem ser agrupados em um único diagrama. Em outros casos pode-se dividí-los em subpopulações ou sub-áreas de acordo com sua heterogeneidade e/ou distribuição geográfica. Dados estruturais completamente assistemáticos ou caóticos são raros. Como exemplo disto, a figura 2.7 mostra diagramas de roseta para representação de fraturas e diques de diferentes áreas pertencentes ao complexo alcalino do Barreiro Araxá feitas por Moraes et al. (2008).

Cada subárea pode também ser estudada individualmente, e a variação em cada uma delas pode ser representada em diagramas estereográficos diferentes.

2.3.2. Deformação Rúptil

De acordo com Fossen (2012), estruturas rúpteis acontecem normalmente na crosta superior sendo condicionadas aos fatores magnitude dos esforços ou quantidade de deformação acumulada, anisotropia, temperatura, taxa de deformação, fluidos dos poros e pressão confinante. Este fenômeno implica em um rompimento instantâneo da estrutura cristalina em escala atômica e tende a ser mais rápido e localizado que a deformação dúctil.

2.3.3. Fraturas

Uma fratura é qualquer descontinuidade plana ou subplana, delgada em uma direção em comparação às outras duas e formada por esforço interno ou externo (Fossen, 2012). As fraturas podem ser divididas em fraturas de cisalhamento e fraturas abertas ou de extensão.

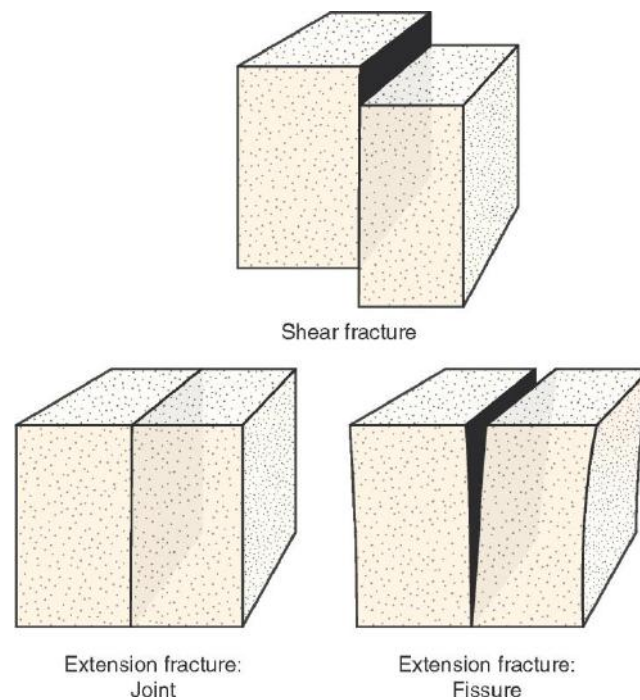


Figura 2. 8 – Três tipos de fraturas: shear fracture = fratura de cisalhamento; joint = junta; fissure = fissura. Fonte: Fossen (2012)

As fraturas de cisalhamento são aquelas onde há movimento relativo paralelo à fratura. Normalmente fratura de cisalhamento é usado para fratura com deslocamentos na ordem de mm a dm e o termo falha é utilizado para discontinuidades com maiores rejeitos.

As fraturas extensionais, por sua vez, apresentam extensão perpendicular às paredes. Juntas apresentam deslocamento raramente visível a olho nu. Fissuras são fraturas extensionais preenchidas por ar ou outro fluido, e veios são fraturas preenchidas por minerais. Quando são preenchidas por magma são classificadas como diques (Fossen, 2012).

No campo da mecânica das fraturas é comum a classificação das fraturas em três diferentes modos (Figura 2.9). O modo I é o modo de abertura (extensional), onde o deslocamento é perpendicular às paredes da fratura. O modo II (deslizamento) apresenta cisalhamento perpendicular à borda, e o modo III (rasgamento) refere-se ao deslizamento paralelo à borda da fratura. Os modos II e III ocorrem em diferentes partes de uma mesma fratura de cisalhamento (Fossen, 2012). Há também o modo IV (fechamento que ocorre em feições contracionais).

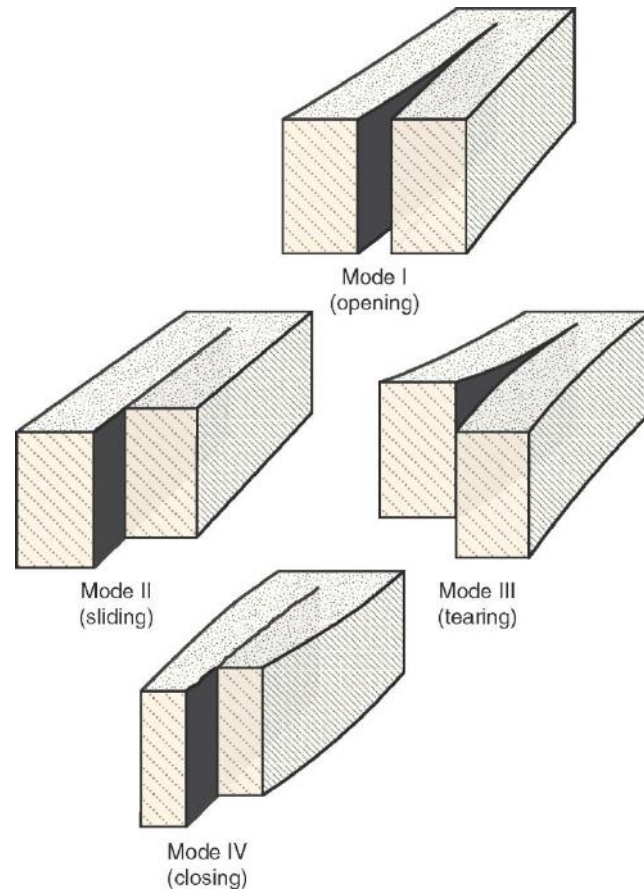


Figura 2. 9 – Modos de Fratura utilizados em mecânica do fraturamento. Fonte: (Fossen, 2015)

2.3.4. Terminação das fraturas

Fossen (2015) diz que os estudos da terminação de fraturas de cisalhamento revelam que elas algumas vezes se dividem em duas ou mais fraturas com orientações distintas (fig 2.10).

As wing cracks são fraturas extensionais na terminação de uma fratura de cisalhamento e estão relacionadas à súbita diminuição do deslocamento próximo a essas extremidades. Fraturas do tipo rabo de cavalo são populações de fraturas menores e extensionais que tem arranjo simétrico em relação à fratura principal. Splay faults são fraturas secundárias em forma de leques na extremidade de uma estrutura principal.

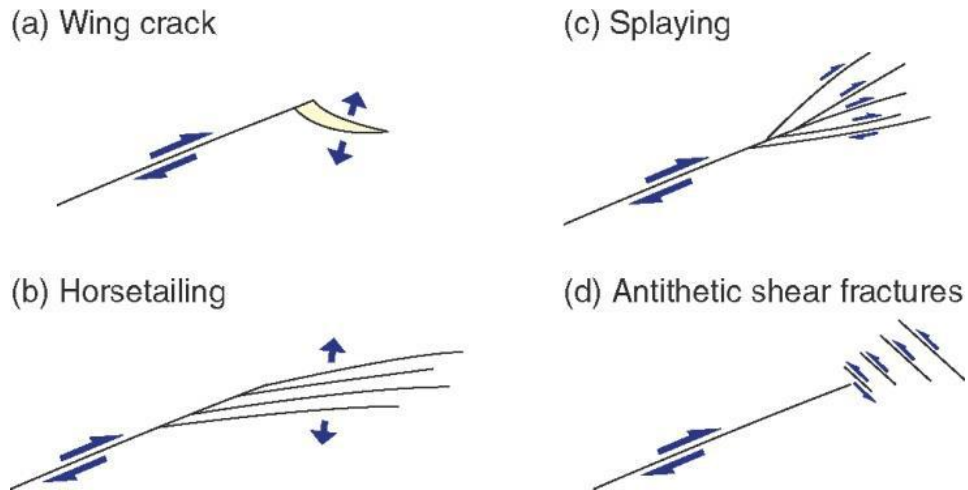


Figura 2. 10 – Fraturas menores na terminação de fraturas de cisalhamento. Fonte: Fossen (2015)

2.4. SIG (Sistema de Informações Geográficas)

Os mapas convencionais em papel ainda são úteis no mapeamento em campo. Porém, a digitalização de mapas tem se tornado uma ferramenta cada vez mais importante para o estudo geológico. O uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite a combinação de diversos mapas para um melhor entendimento do local estudado. Pode combinar mapas de fraturas com mapas topográficos digitais tipo DEM (sigla do inglês que significa modelo de elevação digital), e mesmo com fotografias aéreas, imagens de satélite e mapas geológicos já que cada mapa é georreferenciado num mesmo sistema de coordenadas. Dessa forma, pode-se entender mais facilmente a condição estrutural da região e realizar um melhor estudo de um maciço rochoso e utilizá-lo no planejamento de lavra, por exemplo.

As imagens de satélite (figura 2.11), cada vez com melhor resolução espacial (pixels menores), podem ser valiosas ferramentas quando aplicadas corretamente para o mapeamento estrutural. Pode-se combinar o crescente acervo de imagens disponível com modelos digitais de relevo, formando modelos tridimensionais. As chamadas aerofotografias ortorretificadas podem fornecer outros detalhes com maior precisão do que as disponíveis atualmente por satélite e tem ficado cada vez mais comuns com a popularização do uso de drones para realização do trabalho de fotografia, fornecendo, de acordo com Fossen (2012) imagens com resolução de até poucos decímetros. Imagens com tal resolução podem ser úteis não só no mapeamento de estruturas dúcteis como dobras e foliações, como no estudo de estruturas rúpteis como fraturas e falhas, que são o objetivo deste trabalho.

Um dos programas especializados em SIG e amplamente utilizados especialmente na geologia é o ArcGIS. Trata-se de um pacote de programas desenvolvidos pela empresa ESRI, e que tem como principais funções o desenvolvimento de mapas temáticos, análise espacial, análise de dados, interpolação de dados, tratamento de imagens e análises e construção de mapas em 3D. O uso apropriado deste programa pode auxiliar muito a construção de mapas necessários à mineração, como mapas de teores, topográficos e de fraturas.



Figura 2. 11- Imagem de satélite da cidade de Patrocínio e dos complexos Serra Negra e Salitre. Fonte: Google Earth.

3. METODOLOGIA

O trabalho consistiu em três partes principais. Sendo a primeira delas o levantamento de mapas e fotografias aéreas com boa resolução, a segunda no levantamento de dados no campo e a última no tratamento e interpretação dos dados obtidos.

Na primeira etapa foram usadas fotografias aéreas da região oriundas do IBGE e imagens do satélite Sentinel 2. As fotografias aéreas são coloridas e apresentam tamanho de pixel de 1m x 1m, podendo-se observar o fraturamento com facilidade. Estas fotografias não possuem referência geográfica, sendo necessário uma imagem base já dotada de coordenadas para seu georreferenciamento. Neste caso foi utilizada uma imagem do satélite europeu Sentinel 2.

Imagens de satélite são compostas de bandas, cada uma com uma função específica e que correspondem a determinados intervalos de comprimentos de onda da energia eletromagnética solar. Nesse caso procurava-se apenas uma forma de georreferenciar fotografias, sendo assim, fez-se uma composição colorida RGB (Red, Green, Blue) a partir das bandas fornecidas pelo satélite usando o programa ArcGIS. A composição de bandas fornecida pelo satélite tem como vantagem o fato de já estarem georeferenciadas o que facilita o entendimento geográfico local. Porém possuem tamanho do pixel de 20m x 20m, o que torna seu uso para definição do fraturamento e presença de estradas mais limitado.

O referenciamento geográfico é realizado através de pontos identificáveis entre as fotografias aéreas e a composição RGB, devendo-se utilizar pelo menos 7 pontos bem distribuídos por fotografia. Desta forma, assegura-se diminuir deformações provenientes do georreferenciamento.

Depois que todas as fotografias aéreas estão georreferenciadas, parte-se para o levantamento e demarcação das fraturas que são desenhadas diretamente sobre as fotografias aéreas e registradas como arquivos shapefile do tipo linha e delimitação de estradas, o que posteriormente é usado para definir o deslocamento em campo e facilitar a coleta de dados. As fraturas são identificáveis como alinhamentos retilíneos que condicionam todo o sistema de drenagens da superfície.

Com a ajuda da extensão Azimuth finder, pode-se encontrar o número de fraturas, seu comprimento e sua direção. Como se trata de fotografias aéreas não é possível achar o mergulho, e desse modo considerou-se um mergulho de 90° para todas. Foi possível

identificar 1514 fraturas através desse método. Desse ponto, partiu-se para a segunda parte do trabalho, o levantamento de dados no campo. Com o mapa de estradas em mãos, fez-se o levantamento de fraturas em 10 afloramentos. Neles, coletou-se mergulho e direção do mergulho de 689 fraturas em diferentes tipos de rochas. Para isto utilizou-se de GPS, martelos de geólogo, caderneta, placa de alumínio lisa, bússola e do aplicativo para smartphones Field Move Clino. Os Pontos de coleta nomeados de MS 01 a MS 10 podem ser visualizados na figura 3.1. Não foram coletados dados para estudos de geomecânica como distância entre fraturas, persistência, etc em função do tempo limitado para o levantamento. Os afloramentos MS 01 e MS 02 foram encontrados em corte de ferrovia e representam metargilitos do Grupo Bambuí na borda oeste do complexo. No anel de quartzitos da borda oeste relacionados ao Grupo Canastra foram descritos os afloramentos MS 03 e MS 04. O afloramento MS 05 foi o único relacionado às rochas alcalinas internas do complexo. Na borda leste foram descritos os afloramentos MS 06 e MS 07 em anel de quartzitos do Grupo Canastra. Nos metargilitos do Grupo Bambuí na borda leste foram descritos os afloramentos MS 08, MS 09 e MS 10.

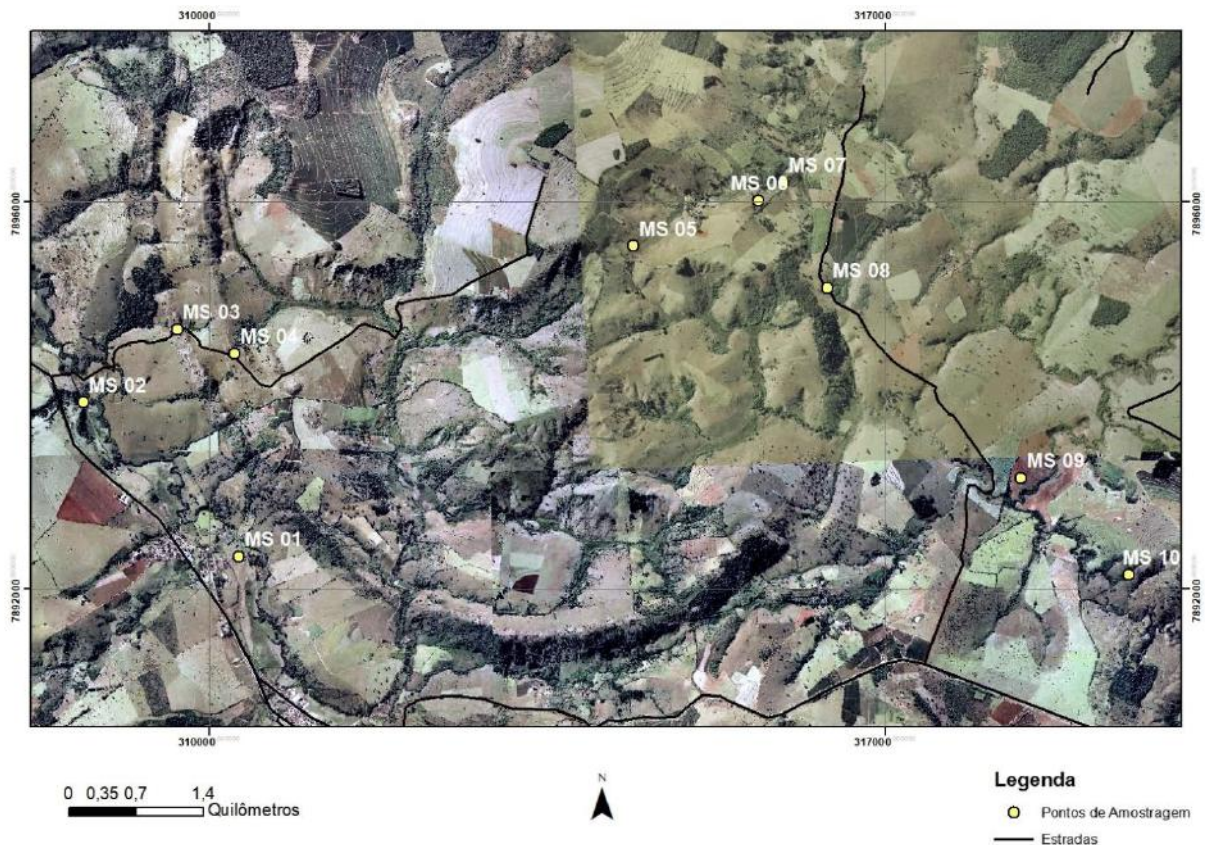


Figura 3. 1– Mapa de parte do complexo Salitre I composto por fotografias aéreas e pontos de coleta de fraturas.

Após o trabalho de campo, os dados foram organizados em planilha Excel preparando-se uma planilha para cada afloramento e uma planilha com todos os dados. Utilizou-se o programa Dips da empresa Rockscience para o tratamento dos dados, importando-se as planilhas e a seguir, gerando-se os estereogramas e diagramas de roseta.

Para analisar os dados obtidos usou-se de diagramas de roseta e estereogramas. Os diagramas de roseta apresentam a direção do fraturamento obtido, já os estereogramas representam os polos das fraturas, estes polos indicam a direção do mergulho (dip direction) e o valor do mergulho (dip), desta forma eles apresentam uma maior gama de informações que o diagrama de roseta, porém são de interpretação mais complexa.

Com o uso destes diagramas e os mapas obtidos pode-se finalmente interpretar a deformação dútil existente.

4. RESULTADOS

Os dados foram tratados separados quanto ao método de entrada (sensoriamento remoto ou dados de campo), fraturas na rocha encaixante ou em diques e por afloramento. No tratamento dos dados foram criados estereogramas e diagramas de roseta. Para facilitar a compreensão dos estereogramas as principais famílias de fraturas foram destacadas usando círculos coloridos conforme sua importância, círculos vermelhos (famílias mais importantes no afloramento), amarelos (segundo grupo de fraturas mais importantes) e azuis (terceira família de fraturas mais importante). Os resultados obtidos desta análise podem ser vistos a seguir.

4.1 Fraturamento regional

Com o programa ArcGIS obteve-se o mapa de fraturas identificáveis na região (figura 4.1).

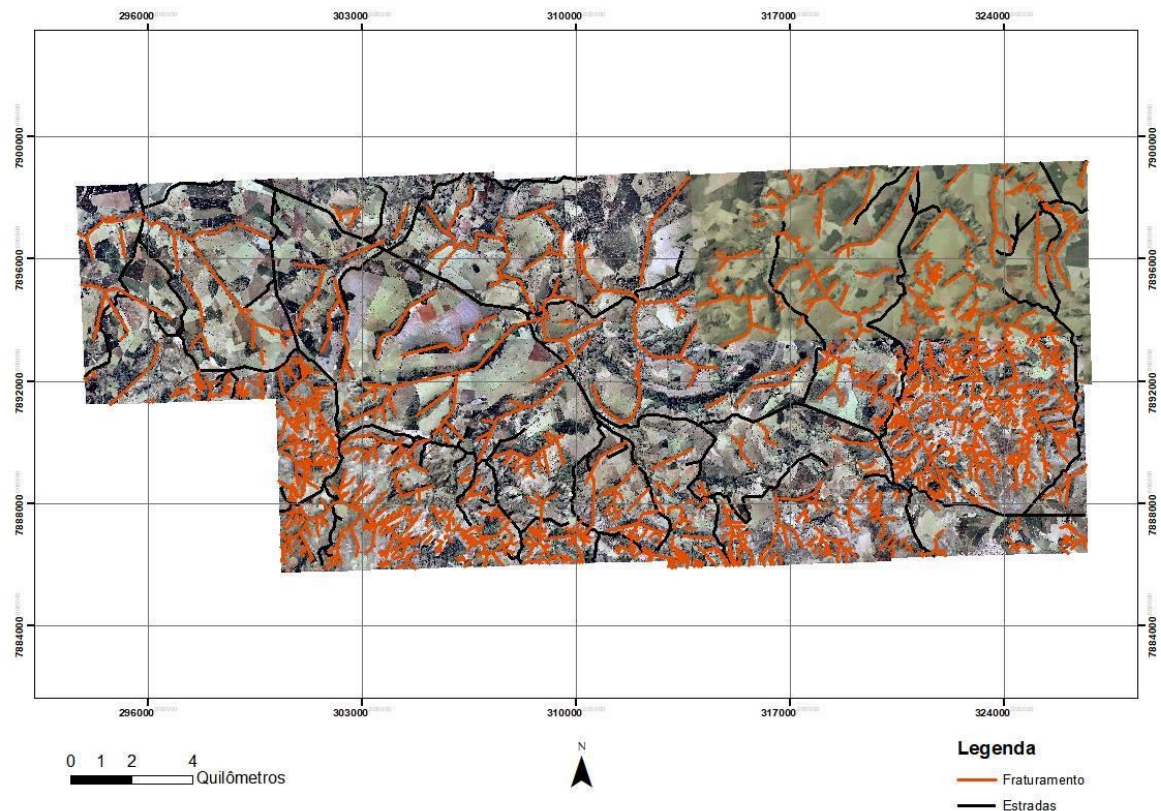


Figura 4. 1 – Mapa de fraturas fotointerpretadas da região do Complexo de Salitre I. As regiões onde existe maior frequência de fraturas correspondem a rochas quartzíticas do Grupo Canastra, enquanto que os locais com menor frequência são de metargilitos do Grupo Bambuí.

Ao todo foram identificadas 1514 fraturas no programa ArcGIS e através do uso da extensão Azimuth Finder, pode-se identificar sua direção e comprimento, considerou-se que todas elas são verticais, ou seja, possuem mergulho de 90°. Com este mergulho estimado, o fraturamento foi tratado no programa Dips quanto à sua frequência e comprimento separadamente. Os diagramas de roseta analisando a frequência (Fig. 4. 2) e comprimento (Fig. 4.3) demonstram uma direção preferencial de fraturamento 320° e correspondem às fraturas com maior comprimento (figura 4.1) e ilustram uma segunda família de fraturas com direção aproximadamente E-W – 80°. Alinhamentos com direção 300° correspondem ao alojamento de diques de idade 132 Ma e ligados ao magmatismo da Bacia do Paraná (figura 3.3). Nesta mesma figura percebe-se que os quatro complexos alcalinos, intrudidos entre 80 e 90 Ma, parecem estar alojados na direção 320°, portanto um pouco discordantes da direção 300°, mais antiga. De qualquer modo, os diagramas mostram as direções preferenciais de fraqueza da crosta por onde ascenderam magmas.

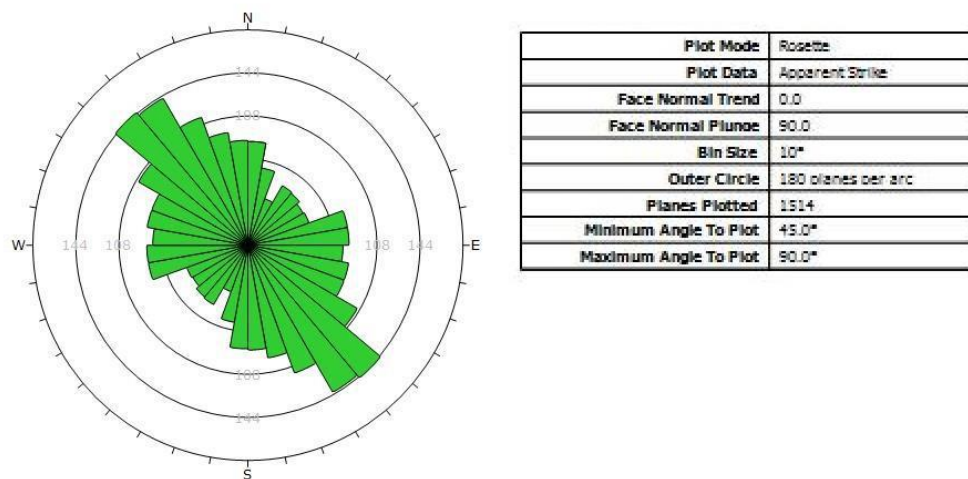


Figura 4. 2 – Diagrama de roseta quanto a frequência das fraturas.

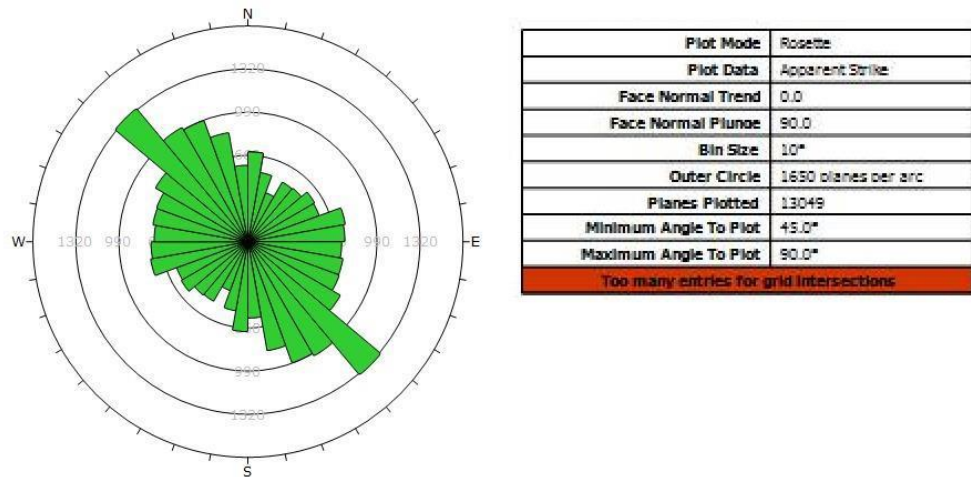


Figura 4. 3 – Diagrama de roseta quanto ao comprimento das fraturas. O número de fraturas de 13049 é resultado da tabela de saída da extensão Azimuth Finder para expressar comprimento, não sendo o número real de fraturas.

Uma comparação entre o diagrama de roseta de frequência das fraturas obtidas no sensoriamento remoto pode ser feita em relação ao mapa de anomalias magnéticas (Fig. 4.4), com isso pode-se notar que a direção preferencial do fraturamento obtido no sensoriamento é a mesma dos diques derivados do magmatismo da bacia do Paraná a 132 Ma, cerca de 310°, indicando a eficiência do processo. Os complexos alcalinos por outro lado se desviam deste padrão e tem uma leve inclinação (direção aproximada de 320°) em relação a este alinhamento o que também se mostra significativo no diagrama de roseta.

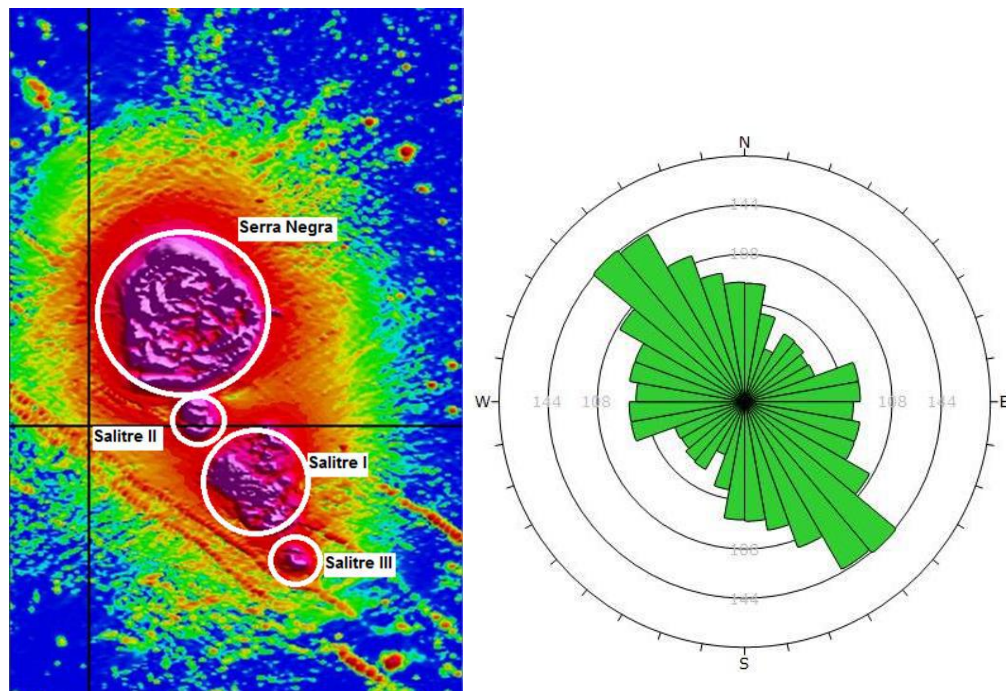


Figura 4. 4 – Mapa geofísico dos complexos da região de Patrocínio e diagrama de roseta da área com sensoriamento remoto.

4.2 . Fraturamento por afloramento

4.2.1. MS 01

O primeiro ponto de coleta de campo foi em um metargilito do Grupo Bambuí com clivagem ardosiana e acamamento sedimentar de atitude $230^{\circ}/46^{\circ}$ cortado por diques de kamafugito subparalelos e ortogonais as suas camadas (Fig. 4.5) com atitudes $214^{\circ}/63^{\circ}$ e $329^{\circ}/89^{\circ}$, este último com direção radial em relação à borda do complexo, que se encontra na margem de ferrovia e exterior ao complexo Salitre I e aos quartzitos encaixantes ao complexo. Foram analisados separadamente estereogramas e diagramas de roseta referentes ao fraturamento no metargilito (Fig. 4.6) e nos diques existentes (Fig. 4.7).



Figura 4. 5 - Dique cortando o metargilito em MS 01.

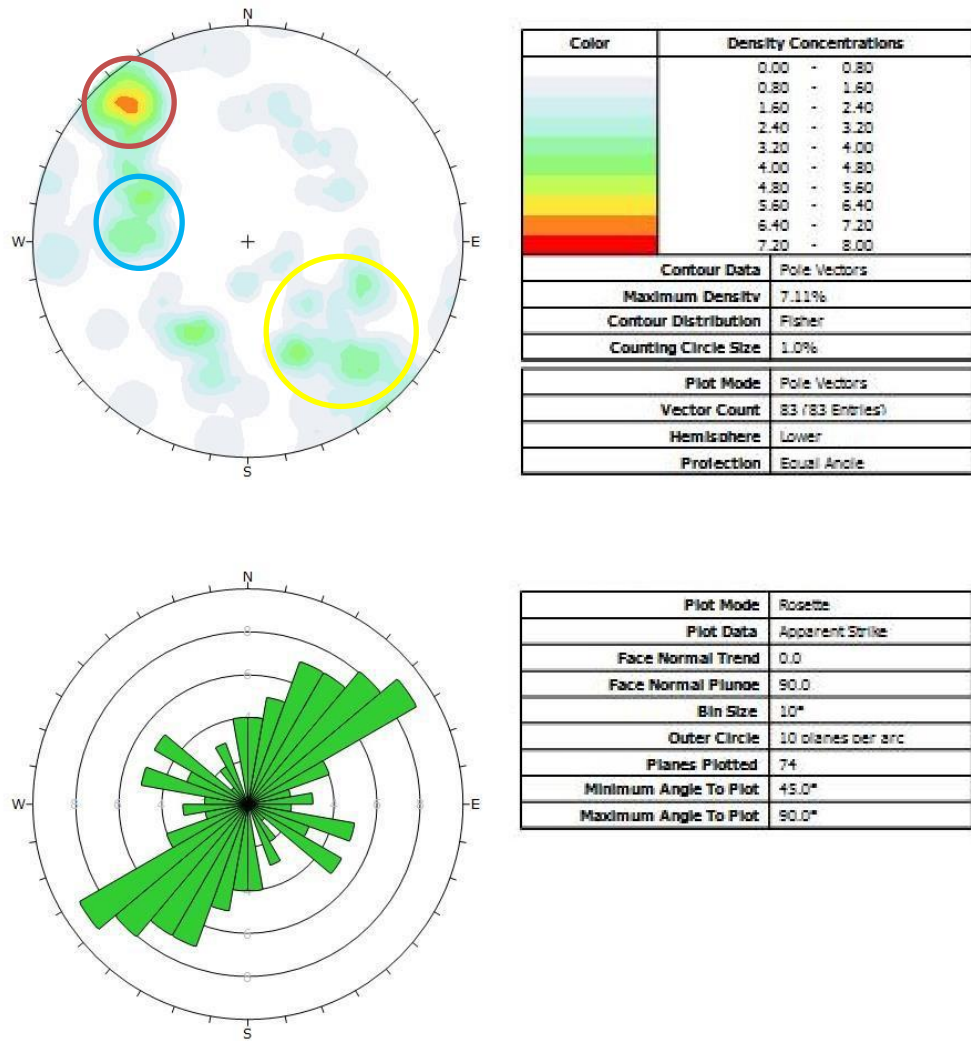


Figura 4. 6 – Estereograma e diagrama de roseta referentes ao metargilite em MS 01. Círculo vermelho = família principal; círculo azul = segunda família; círculo amarelo = terceira família.

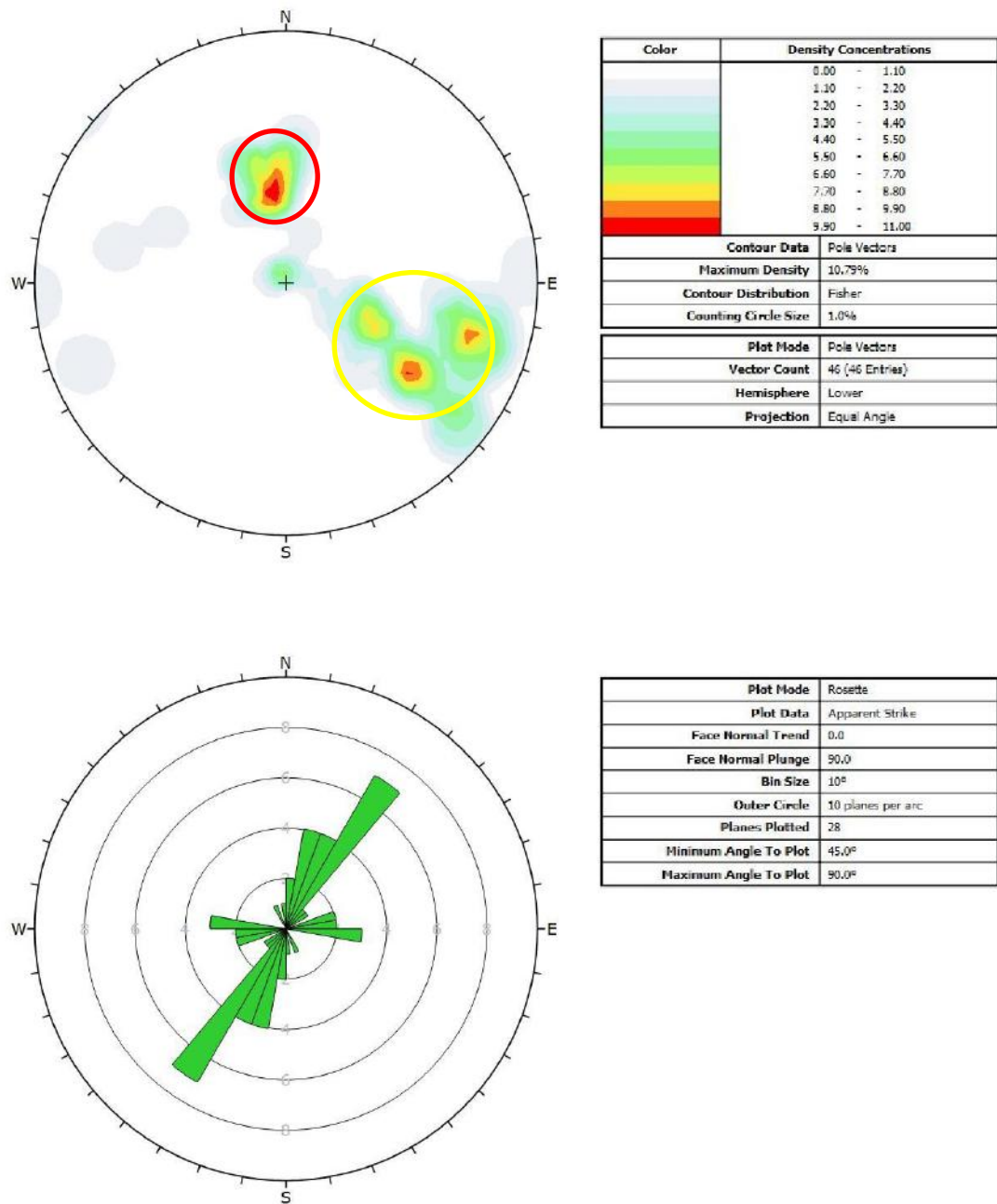


Figura 4. 7 – Estereograma referente ao dique de kamafugito em MS 01.

Pelos estereogramas e diagramas de roseta, pode-se notar que a principal família de fraturas presentes em MS 01 possui direção de 50° com mergulhos de $80-90^\circ$ ora para NW ora para SE. Uma segunda família possui direção de 20 a 40° com mergulhos de $30-80^\circ$ para NW, e uma terceira família apresenta direção de $10-20^\circ$ mergulhando 50° para ESE.

Já os diques que cortam o metargilito apresentam como famílias mais relevantes um grupo de fraturas com direção 85° que mergulha à SSE com ângulo de $30-40^\circ$ aproximadamente. E um grupo com direção $30-50^\circ$ e mergulhando a NW com ângulo entre $30-80^\circ$. O primeiro grupo pode representar fraturas de contração no dique devido ao seu resfriamento, o que explica sua inexpressão no metargilito. O segundo grupo dos diques pode ser correlacionado à segunda família de fraturas presentes no metargilito.

4.2.2. MS 02

O segundo afloramento estudado também é um metargilito do Grupo Bambuí cortado por dique com atitude $334^\circ/83$ posição similar à de um dos diques do ponto MS01 e discordante da clivagem da rocha encaixante. A clivagem ardosiana do metargilito apresenta atitude $248^\circ/43^\circ$ muito parecida com a encontrada no ponto MS01. Novamente o argilito e o dique foram tratados separadamente e os dados podem ser vistos nas figuras 4.8 e 4.9.

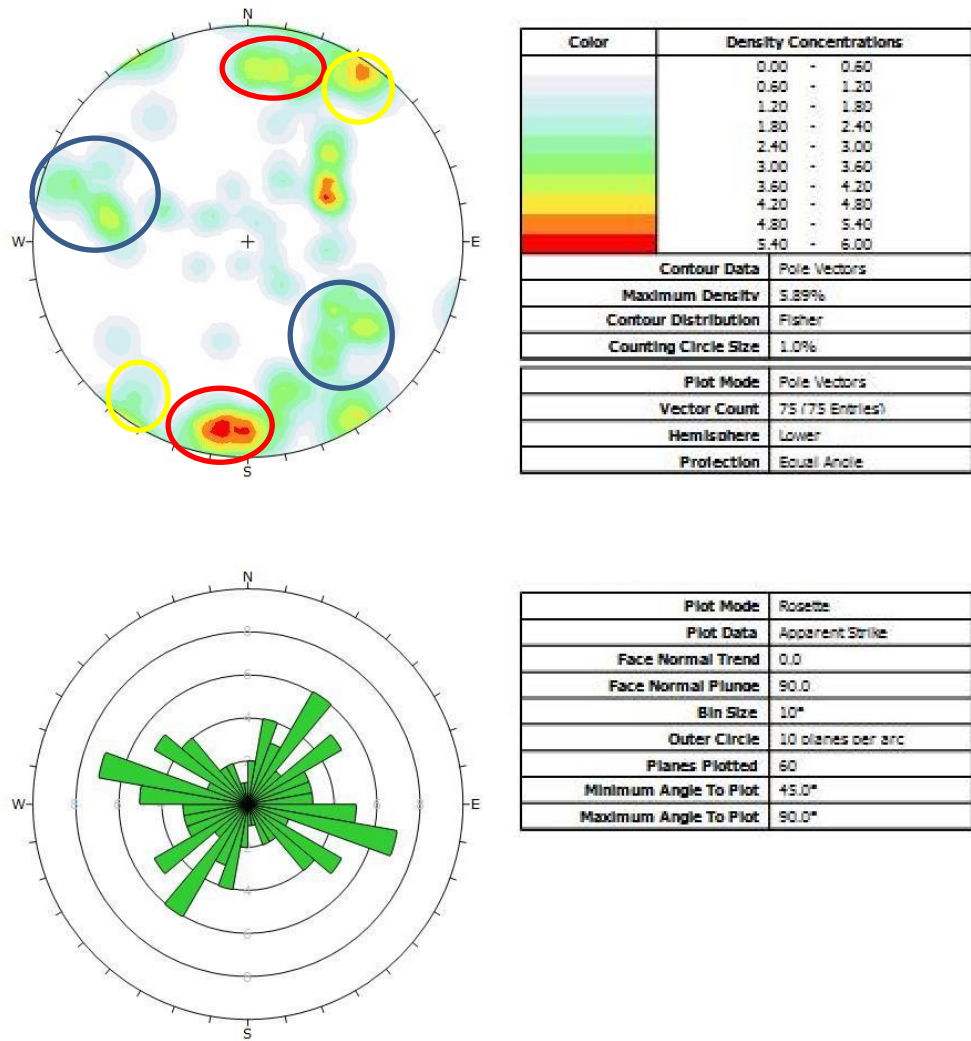


Figura 4. 8 – Estereogramas e diagramas de roseta do metargilite em MS2.

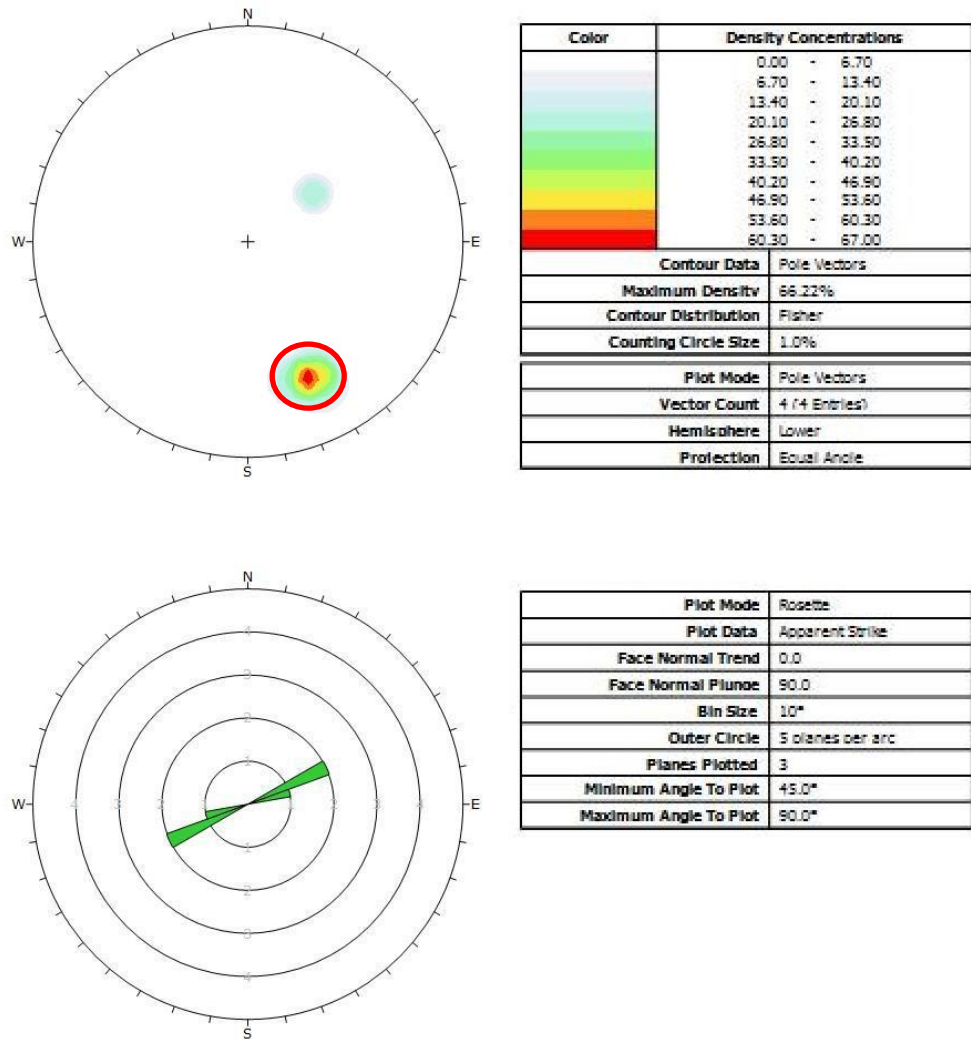


Figura 4.9 – Estereograma e diagrama para as fraturas encontradas nos diques em MS 02.

O metargilito apresenta uma quantidade maior de famílias de fraturas que no primeiro afloramento, tendo destaque duas famílias com mergulho aproximadamente vertical. A mais importante possui direção 285° com mergulhos subverticais ora para NNE ora para SSW, mas com concentração de valores para NNE. A segunda família possui direção 310° com mergulhos subverticais ora para SSW ora para NNE, mas com valores principais de mergulho para SSW.

Já o dique que corta o metargilito apresenta como famílias mais relevantes um grupo de fraturas que mergulham à NW com ângulo de 70° , embora a quantidade de medidas seja muito pequena. Pode-se notar que este grupo de fraturas está presente também no metargilito e que sua atitude e mergulho são bem próximos às fraturas encontradas nos diques em MS 01, o que indica que o grupo de fraturas distoantes em MS 01 realmente pode se relacionar a fraturas de contração devido ao resfriamento no dique, pois não se repetem em MS 01 ou em MS 02 e seus diques.

4.2.3. MS 03

Ao contrário dos pontos MS 01 e 02, o afloramento MS 03 está localizado em quartzito do grupo Canastra em corte de estrada rural, com clivagem ardosiana $255^\circ/62^\circ$ (Fig. 4.10). O quartzito apresenta zonas de elevadas e baixas concentrações de fraturas.



Figura 4. 10 – Quartzito fraturado aflorante em corte de estrada. Notar a forte inclinação do acamamento sedimentar do quartzito (que é paralelo à clivagem; S0//clivagem), devido ao basculamento provocado pela intrusão alcalina.

Depois do tratamento com o programa Dips obteve-se os diagramas (Fig. 4.11).

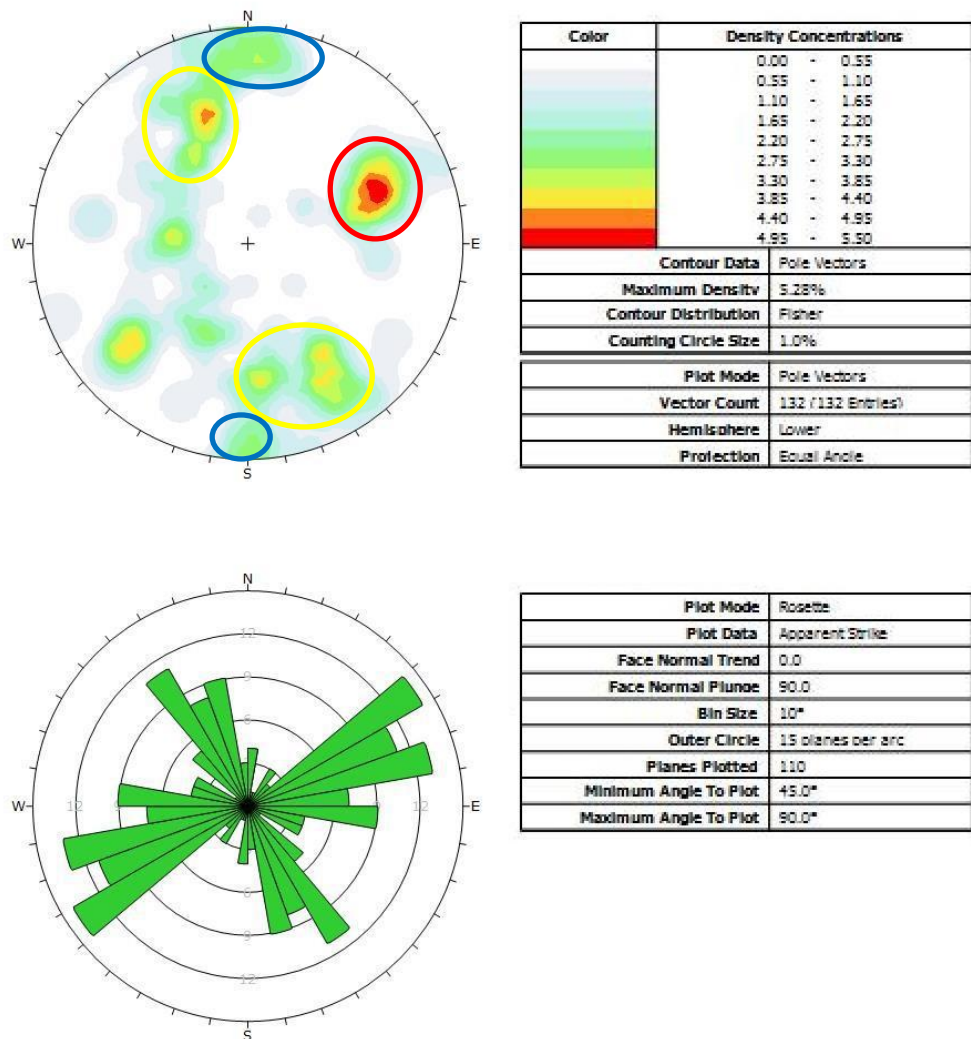


Figura 4. 11 – Estereograma e diagrama de roseta de MS 03.

A principal família de fraturas apresenta direção 335° e possui mergulho de cerca de 70° a SW, outras famílias em destaque no quartzito têm direção 65° e mergulham cerca de 60° à NW e SE. Nota-se ainda famílias de fraturas de direção E-W mergulhando quase verticalmente a N e S. Apesar de se tratarem de diferentes tipos de rochas, nota-se novamente famílias de fraturas com direção NE e NW tendo grande importância.

4.2.4. MS 04

No ponto MS 04, o quartzito analisado era aflorante na estrada, possuía atitude de S0 244°/52° e se mostrava fenitizado e cortado por 5 diques de kamafugito. Os diques variam de 30 cm de espessura a 1 cm com atitudes semelhantes às dos diques do ponto MS01 e MS02. Os diagramas referentes ao quartzito (Fig. 4.12) e à posição espacial dos diques (Fig. 4.13) se encontram a seguir.

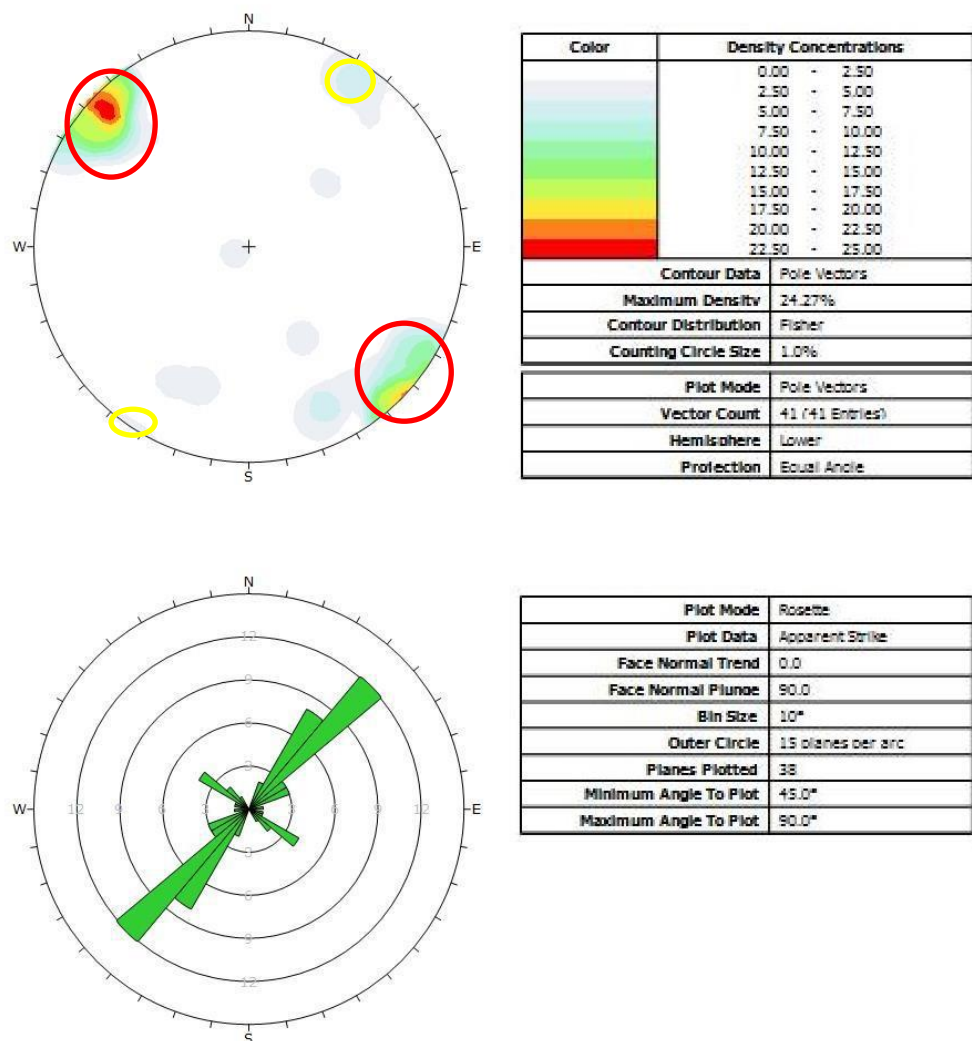


Figura 4. 12 – Estereograma e diagrama de roseta para o quartzito presente em MS 04.

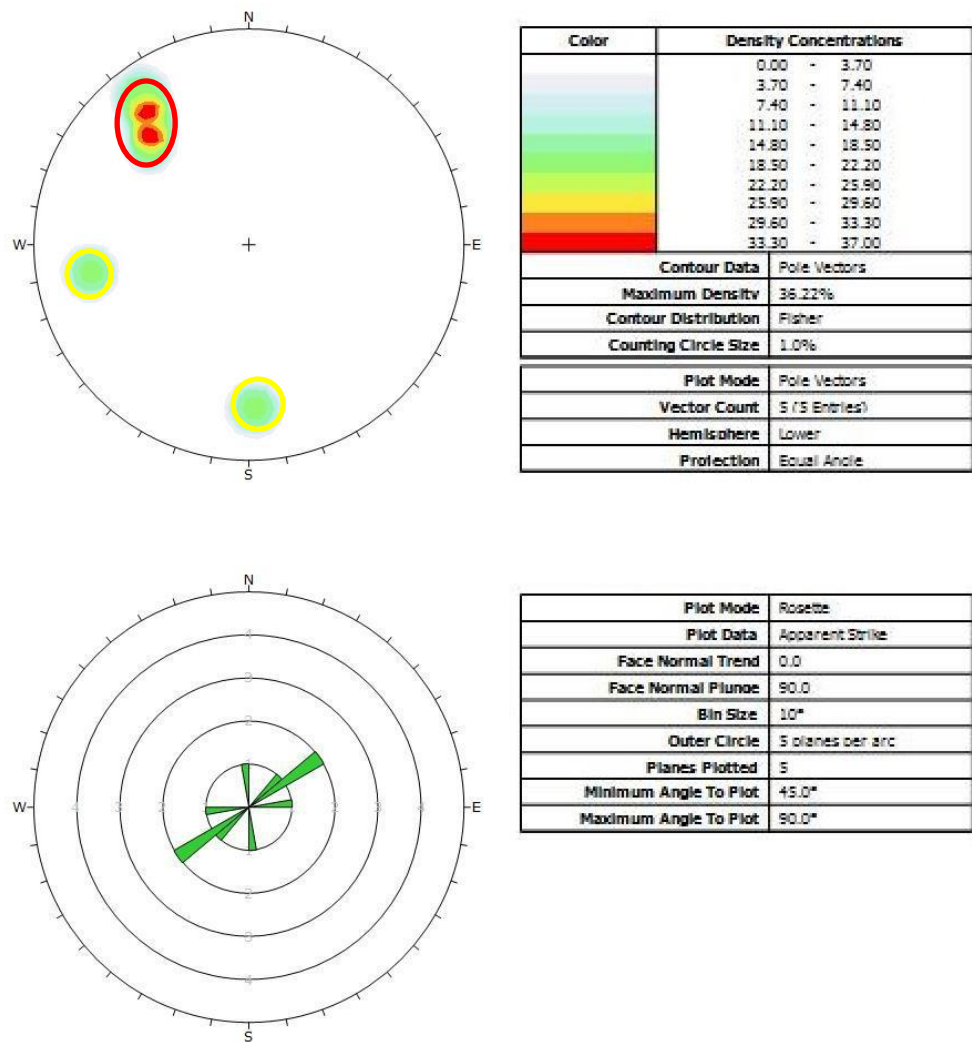


Figura 4. 13 – Estereograma e diagrama de roseta da atitude dos diques presentes no afloramento que ocorrem com direção preferencialmente radial à borda do complexo.

Neste afloramento a família de fraturas mais relevantes tem direção 40° e mergulho próximo a 90° nas direções SE e NW, observando-se também famílias menos significantes com direção NW. Um diferencial presente neste afloramento em relação aos passados é o mergulho quase vertical em todas as famílias de fraturas.

4.2.5. MS 05

O afloramento MS 05 está contido no interior do complexo Salitre I, e se trata de intrusões de bebedourito e de um dique de carbonatito de cerca de 40 cm de espessura com atitude de $337^{\circ}/75^{\circ}$ similar a de alguns diques fora do complexo. O estereograma e diagrama de roseta do afloramento são mostrados a seguir.

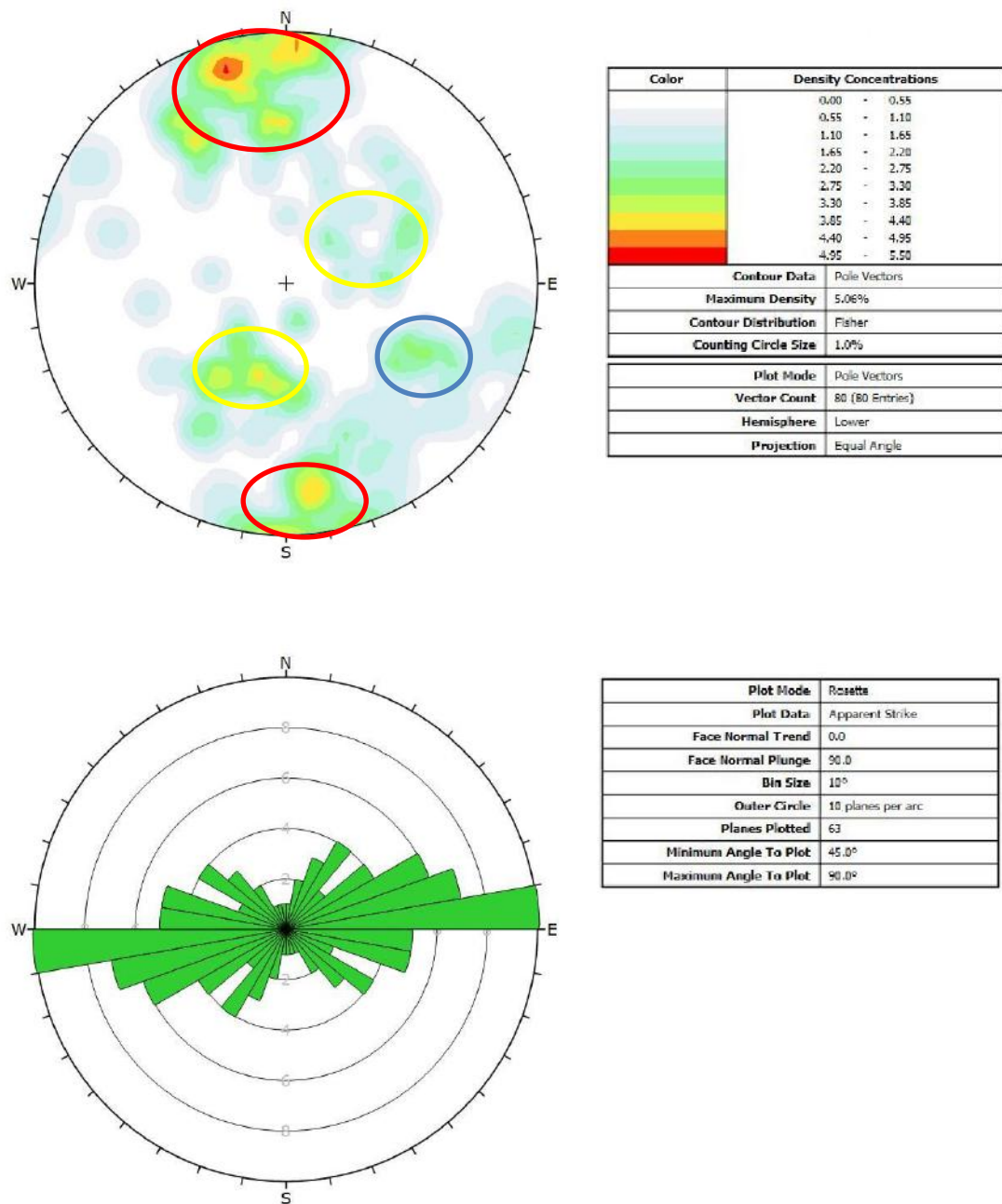


Figura 4. 14 – Estereograma e diagrama de roseta do ponto MS 05.

Apesar de apresentar famílias de fraturas com direções NE e NW, as fraturas mais relevantes tem direção W-E e mergulham quase verticalmente à norte e sul. Famílias com atitudes similares podem ser notadas nos afloramentos MS 02 e MS 03 podendo representar um evento de deformação posterior à formação de Salitre I não presente em todos os afloramentos.

4.2.6. MS 06

Depois de cruzar o complexo no sentido E, este afloramento de quartzito fenitizado se localiza do lado oposto (nordeste do complexo) de onde se começou o estudo.

Novamente os principais sistemas de fraturas tem direção NW (310°), mergulhando a NE e SW e um segundo sistema apresenta direção 330° com mergulho de 50° para SW. Uma terceira família possui direção 25° de 30 a 80° para NW. NE (mergulhando a SE). Pode-se notar uma inversão quanto a posição espacial das famílias de fraturas entre os quartzitos presentes no outro lado do complexo e esses. Enquanto a direção de fraturamento predominante no lado sudoeste do complexo era NE, aqui a direção de fraturamento que se mostra mais influente é NW o que provavelmente se deve à intrusão do complexo.

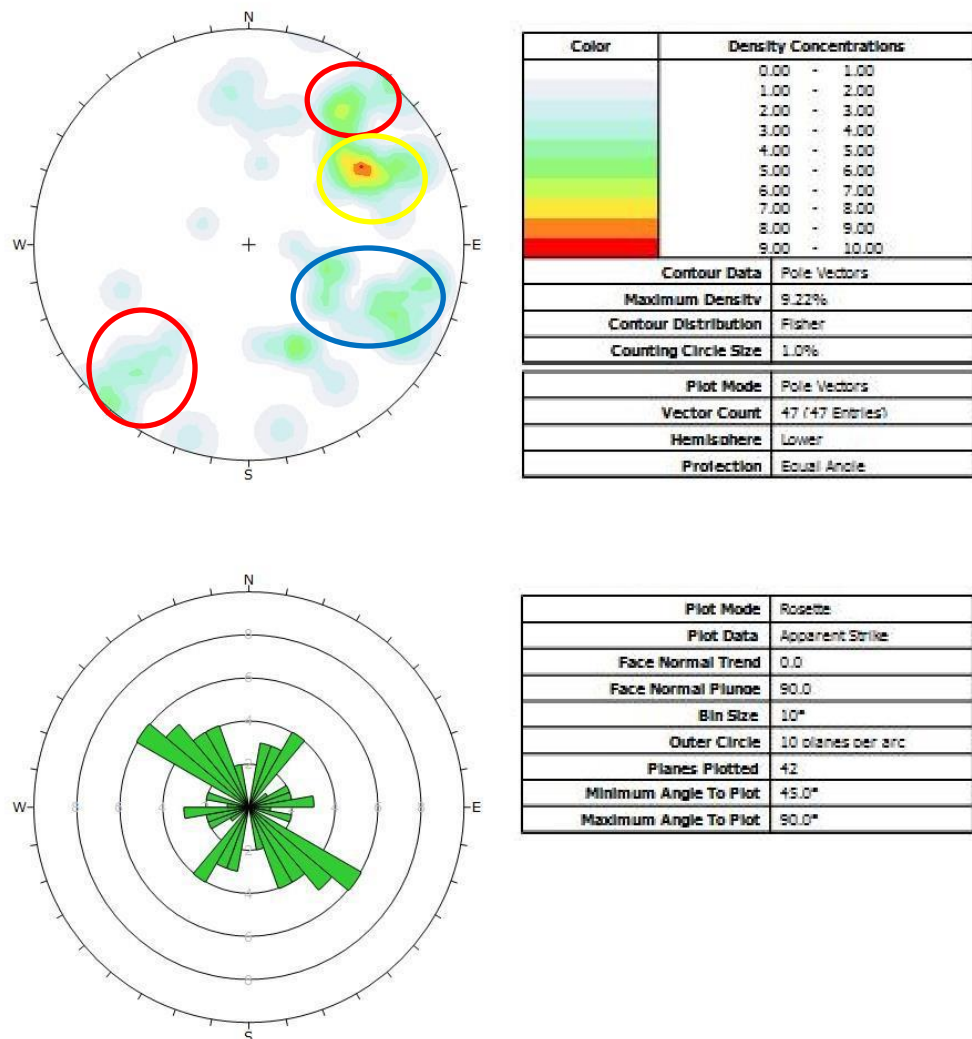


Figura 4. 15 – Estereograma e diagrama de roseta do ponto MS 06.

4.2.7. MS 07

Os principais sistemas de fraturas desse quartzito têm direção quase N-S, que difere dos padrões principais notados até aqui e se apresentou menos fraturado que os anteriores. Uma possível interpretação para este fenômeno é o maior distanciamento do complexo quando comparado aos outros quartzitos, sendo assim a presença de famílias de fraturas NW e NE é mais discreta, porém ainda observada como nos demais afloramentos. O diagrama de roseta e o estereograma utilizados nesta análise podem ser vistos a seguir.

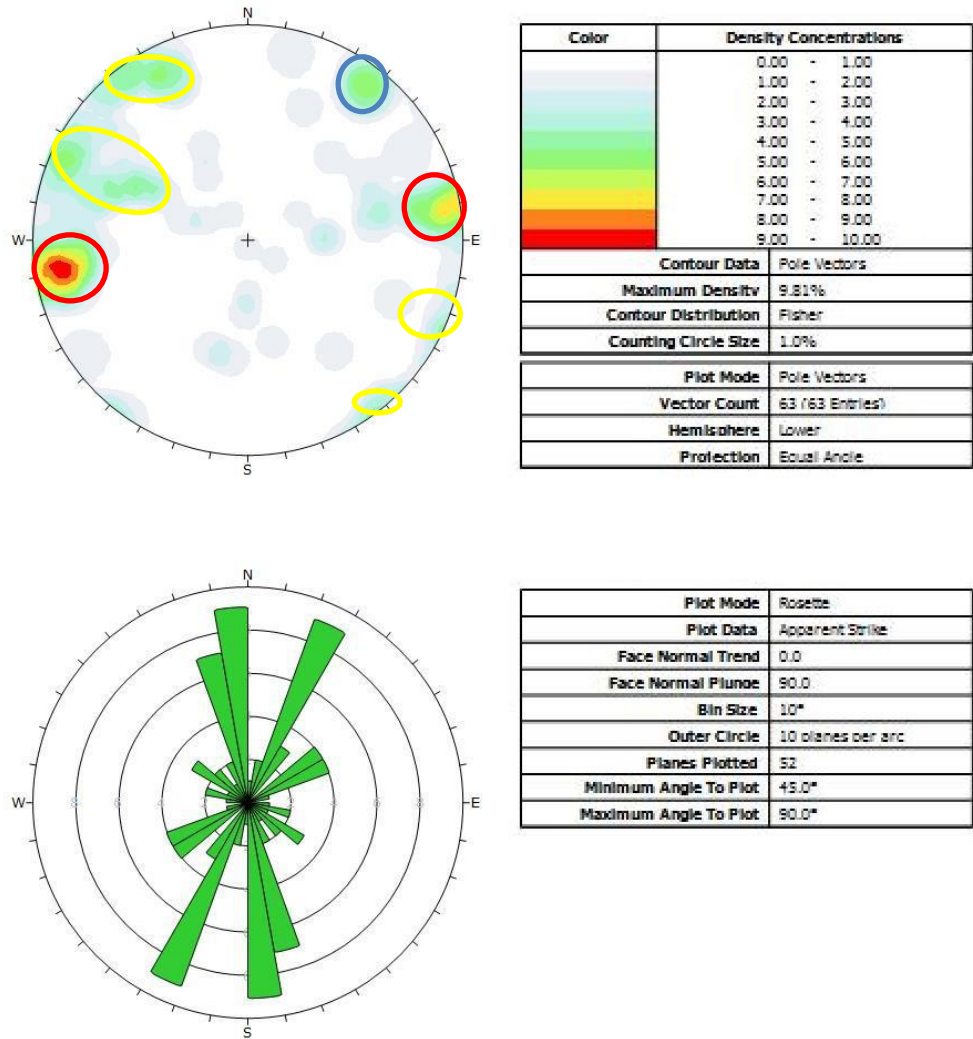


Figura 4. 16 – Estereograma e diagrama de roseta referentes à MS 07.

4.2.8. MS 08

Em MS 08 não há um afloramento rochoso propriamente dito, pois a rocha matriz foi muito alterada pelo intemperismo e se apresenta como uma rocha muito intemperizada e solo de cor vermelho escuro. Porém ainda apresenta histórico deformacional identificável de sua rocha mãe e depois de colhidos os dados, estes foram tratados e construiu-se o estereograma e diagrama de roseta (Fig. 4.17).

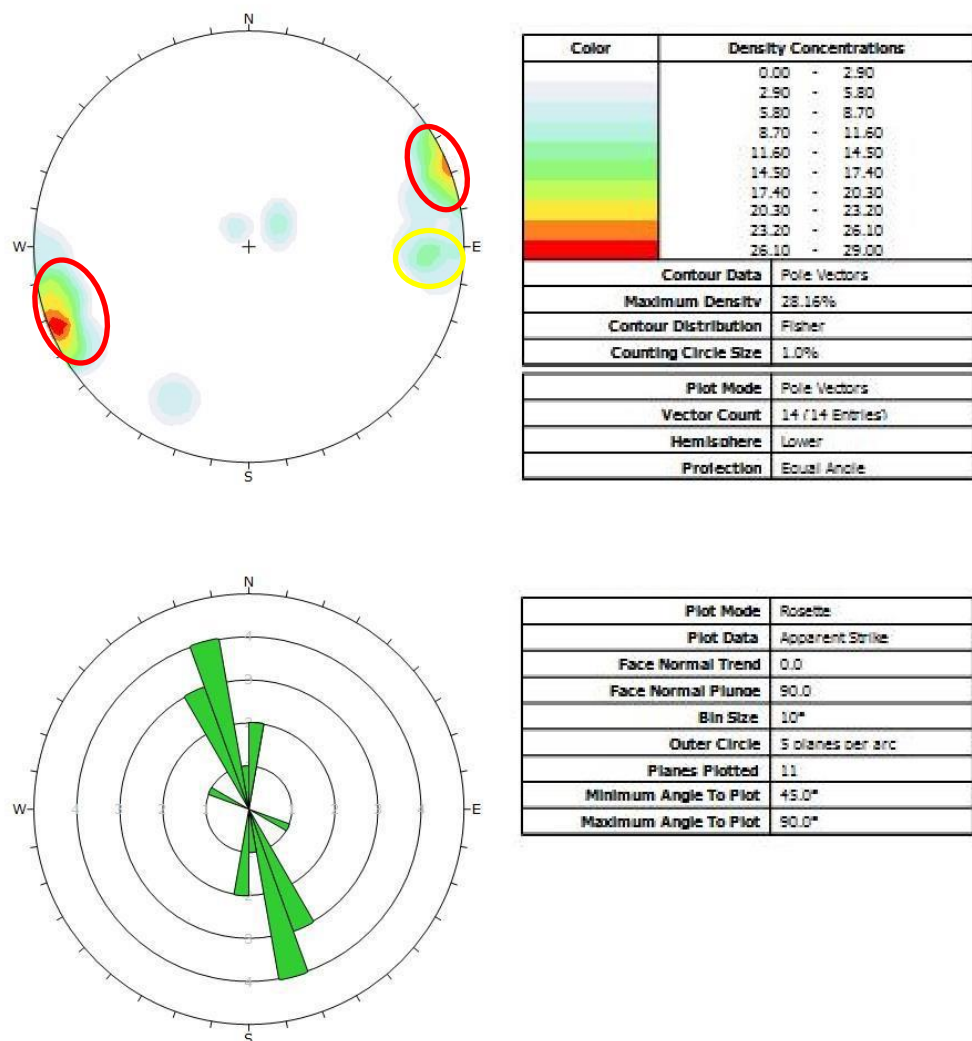


Figura 4. 17 – Estereograma e diagrama de roseta referentes à MS 08.

Como se trata de rocha altamente alterada é comum que somente os principais sistemas de fraturas estejam visíveis. Desta forma, pode-se notar que essa região apresenta novamente fraturamento com direção preferencial NW com mergulhos quase verticais a NE e SW, este é mais um indicador que o fraturamento com direção NW se mostra o mais importante neste lado do complexo.

4.2.9. MS 09

O ponto MS 9 é um metargilito do Grupo Bambuí com clivagem $141^{\circ}/31^{\circ}$, localizado a sudeste de Salitre I, a análise de suas fraturas resultou nos seguintes diagramas (Fig. 4.18).

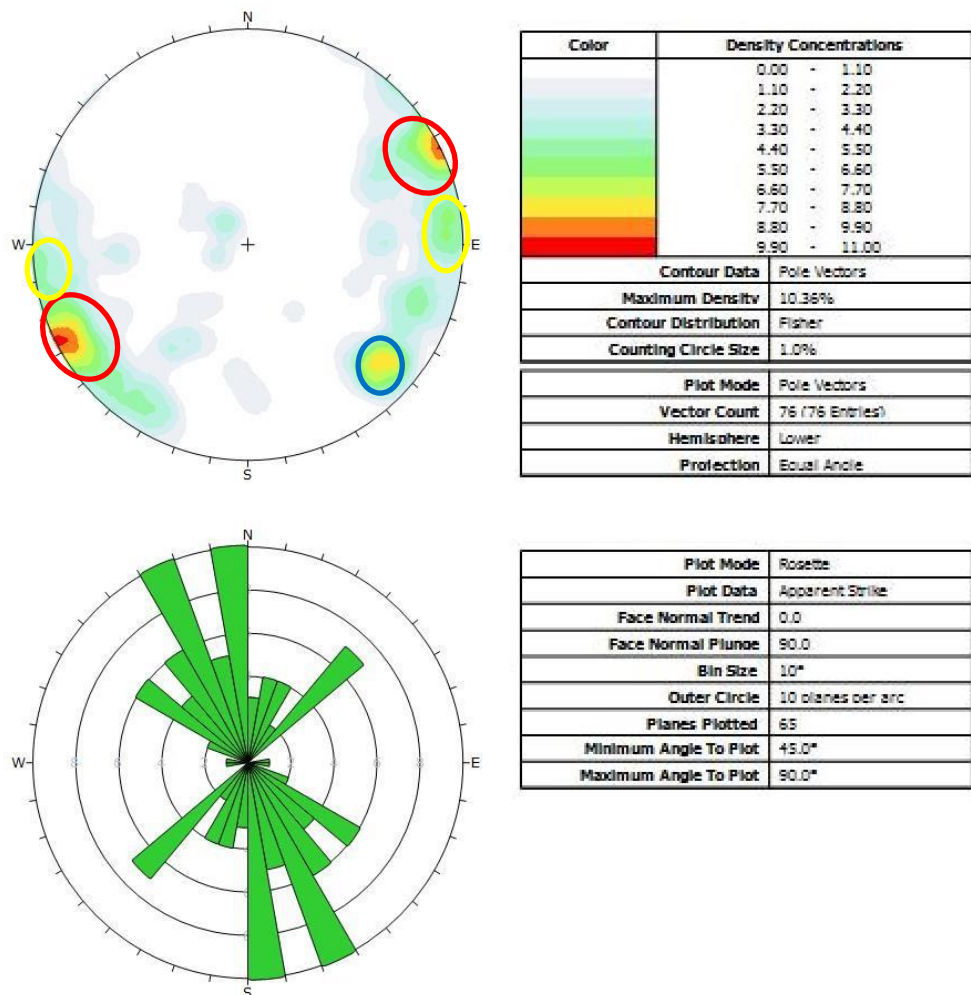


Figura 4. 18 – Estereograma e Diagrama de roseta de MS 09.

Pode-se notar novamente a grande influência das duas principais famílias de fraturas presentes no complexo, sendo a de direção NW predominante neste ponto, mas com presença relevante da família de direção NE (terceiro fraturamento em ordem de importância).

4.2.10. MS 10

O afloramento MS 10 possui menor quantidade de fraturas em relação aos demais e representa um metargilito localizado a sudeste do complexo com clivagem $222^{\circ}/52^{\circ}$. Possui fraturas com direções 20° e 350° e mergulhos subverticais. Os diagramas de roseta e estereograma da área podem ser vistos a seguir:

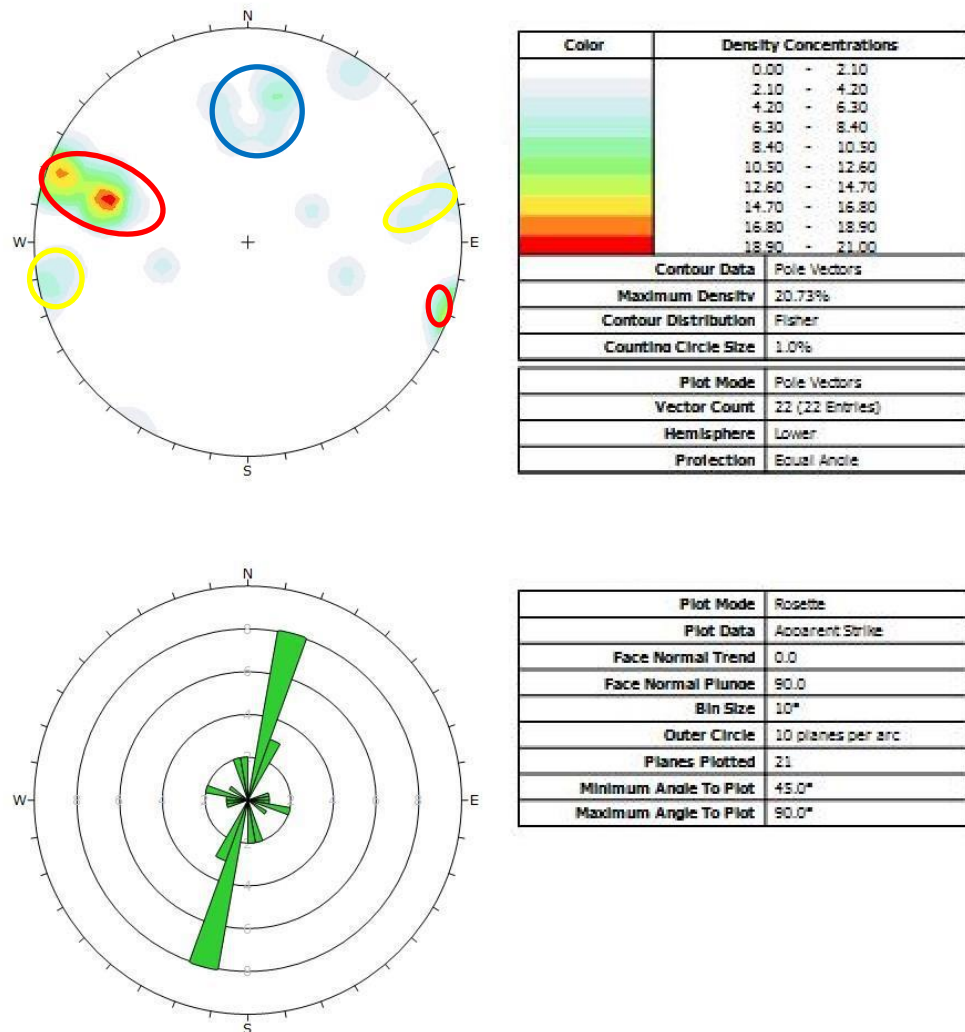


Figura 4. 19 – Estereograma e diagrama de roseta referente à MS 10.

4.2.11. Resultados gerais do campo

Todos os dados de fraturamento coletados no campo também foram analisados de forma conjunta. Desta modo, pode-se ter uma noção regional sobre o fraturamento, o que permite a comparação entre os dados obtidos pelo sensoriamento remoto e os dados de campo. O diagrama de roseta e o estereograma dos dados gerais podem ser observados na figura 4.20. Como era de se esperar as duas famílias de fraturas com maior presença são as de direção NE-SW e NW-SE apresentando em geral ângulos de mergulho elevados. Percebe-se, no entanto, que os valores NE são mais frequentes que os demais. Este fato coincide com o mapeamento de fraturas no anel de quartzito ilustrado na figura 2.4.

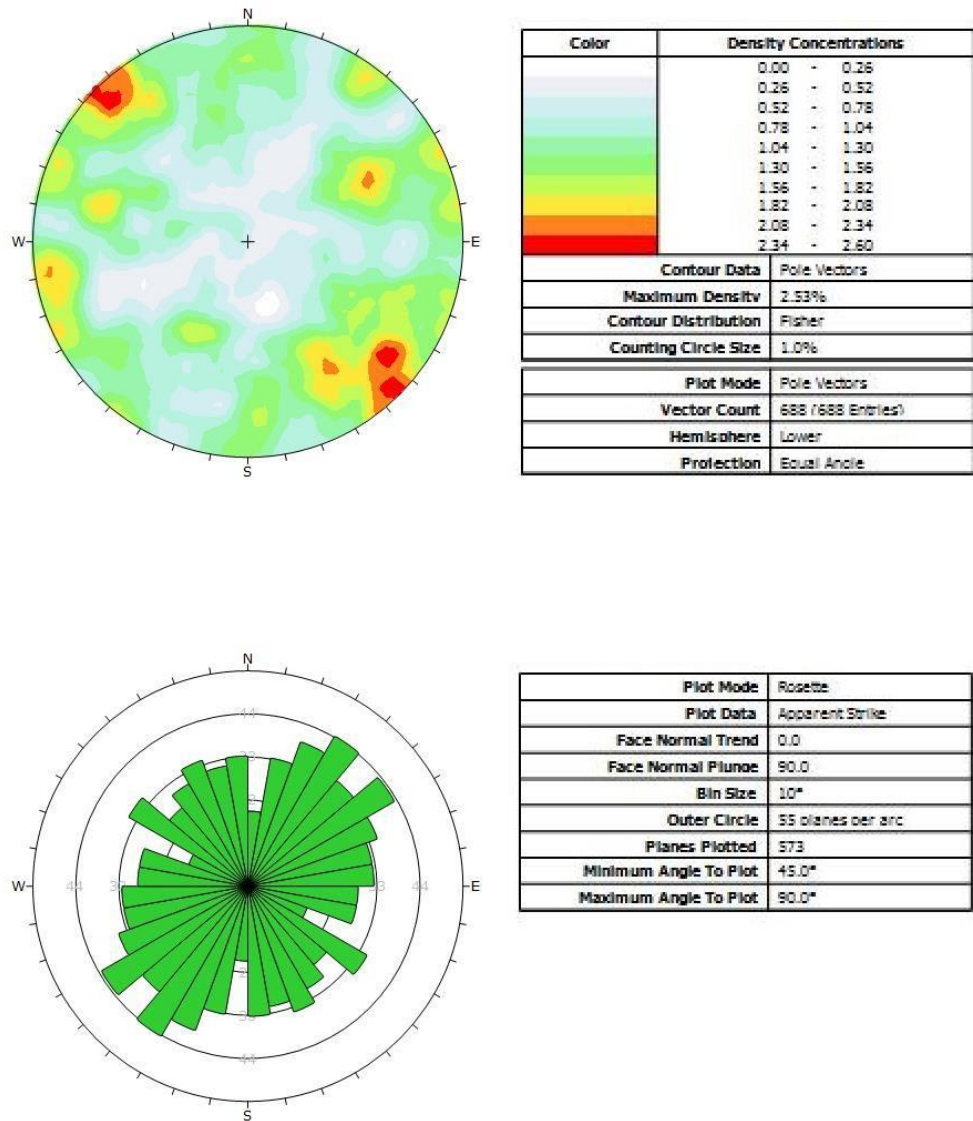


Figura 4. 20 – Estereograma e Diagrama de roseta compostos por todos os dados levantados em campo.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No apanhado geral dos fraturamentos próximos ao complexo salitre, pode-se notar facilmente duas famílias principais de fraturas, sendo estas direções NW e NE. Para melhorar a visualização das direções das fraturas em cada ponto coletado e facilitar a correlação, os diagramas de roseta foram inseridos sobre as fotografias aéreas (Fig. 5.1) em suas respectivas localizações.

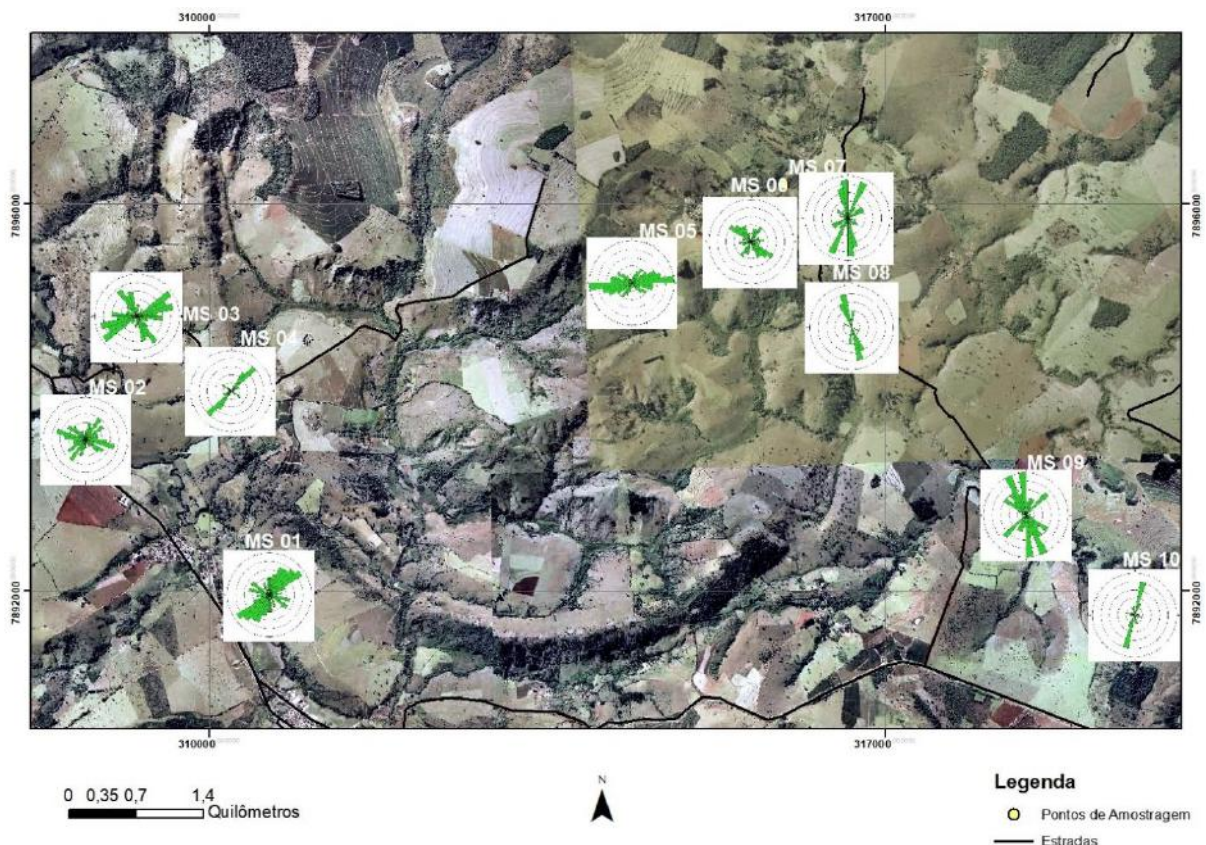


Figura 5. 1 - Mapa com diagramas de roseta em sua posição geográfica.

O mapa acima torna fácil a visualização de que o evento magmático responsável pela intrusão de Salitre I gerou um padrão de fraturas radiais (aproximadamente perpendiculares ao anel de quartzito) e fraturas anelares (aproximadamente paralelas ao anel de quartzito). Este padrão é localizado e é um pouco diferente do padrão observado regionalmente a partir de sensoriamento remoto. Notável é que os padrões de fraturas NW e NE ficam bem destacados em mapas magnéticos regionais como observado por Borges e Drews (2001) (Fig. 5.2).

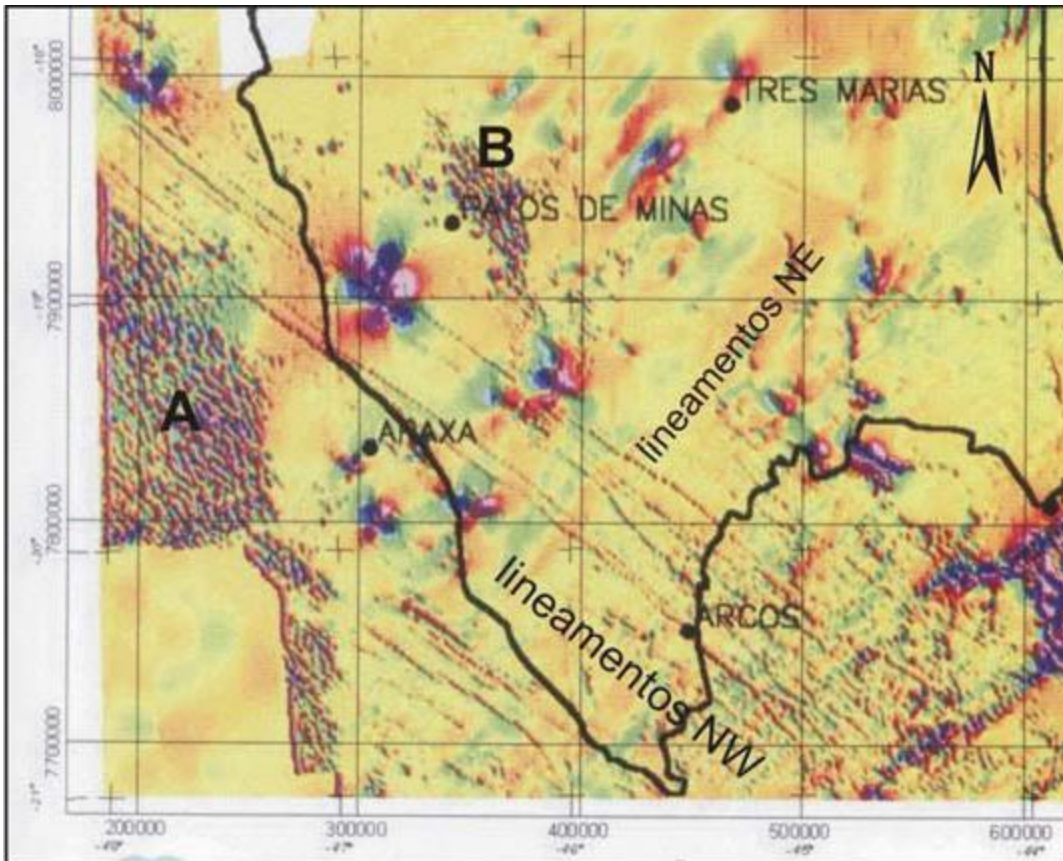


Figura 5. 2 – Contexto regional da província Salitre. Fonte: Borges e Drews (2001).

Sawasato (1995) notou os mesmos padrões de fraturamento na região de Galena, próximo a falha de João Pinheiro, assim como Moraes et. al. (2008) em Araxá-MG. Tendo isso em vista, pode-se notar que se trata de um padrão regional anterior ao complexo e que com a entrada do corpo intrusivo, os fraturamentos foram reativados.

O sensoriamento remoto regional indicou como fraturamento mais presente as famílias de fraturas dos lineamentos NW, entretanto com o alojamento do corpo intrusivo, o fraturamento NE (radial ao complexo) foi reativado de forma a aliviar a pressão na crosta se tornando localmente mais importante, como visto nos dados gerais. Os sistemas NE e NW se mostram muito menos relevantes no interior do complexo, como pode ser visto em MS 05.

Estes dados indicam que ao entrar, o corpo intrusivo se aproveitou das zonas de fraqueza dos lineamentos NW e NE preexistentes e exerceu uma grande força ascendente o que basculou as camadas de quartzito e metargilito superiores criando uma elevação com forma de domo. Este processo ocorreu de formas dúctil e rúptil e os fraturamentos pré-existentes NE e NW foram reativados de forma a aliviar a tensão da ascensão do magma. Sobretudo o lineamento NE,

que sofreu uma intensificação no número de fraturas, o que o tornou mais relevante localmente do que é regionalmente.

Por último, a cúpula do domo é afetada por intemperismo e erosão, o que enriquece supergênicamente a mineralização e destrói a elevação criada pela intrusão, o que explica o relevo e a distribuição geológica do complexo hoje. Um modelo simplificado de evolução do complexo (Figura 5.3) foi elaborado para explicar os processos envolvidos na sua evolução geológica.

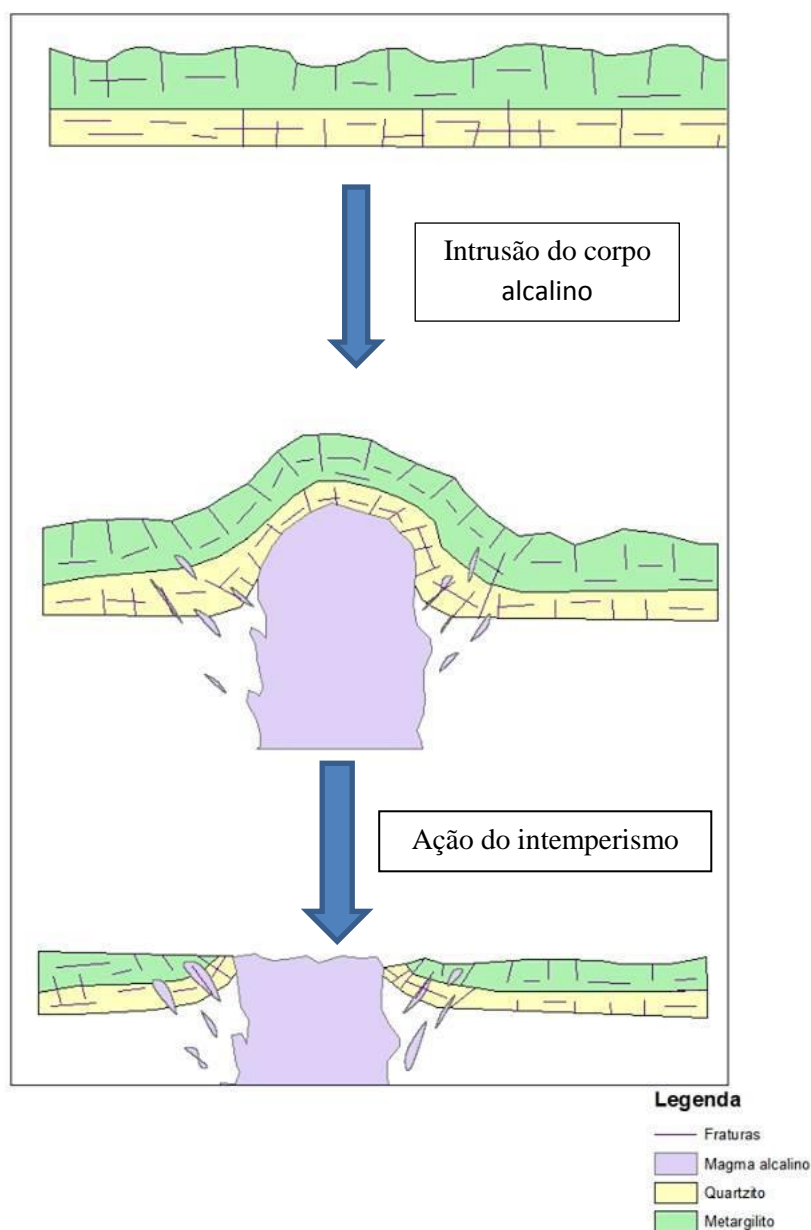


Figura 5. 3 – Modelo simplificado da evolução do complexo Salitre I. Na porção superior é ilustrada a disposição das rochas dos Grupos Canastra (creme) e Bambuí (verde) antes da intrusão. Na figura central é representada a intrusão alcalina, a intrusão dos diques e a formação da estrutura dômica. Na inferior pode-se visualizar a situação atual.

6. CONCLUSÕES

As principais famílias de fraturas presentes no entorno de Salitre I reproduzem os lineamentos regionais NW e NE. No contexto regional as fraturas NW se mostram mais relevantes, porém o soerguimento do corpo intrusivo intensificou o fraturamento NE, tornando-o de igual importância localmente.

A intrusão também causou um basculamento das camadas de quartzito e metargilito presentes, aumentando seu mergulho conforme a proximidade do complexo e reativou os padrões de fraturamentos presentes, por fim a ação do intemperismo lixiviou e enriqueceu o depósito até se tornar o que temos hoje.

O interior do complexo se mostra altamente intemperizado, por este motivo, torna-se difícil encontrar afloramentos em sua parte interna. A melhor maneira de descobrir a condição estrutural do interior do complexo seria com a autorização da empresa Mosaic, detentora da lavra no complexo e, infelizmente isto não pode ser alcançado durante o TCC. Entretanto pode-se amostrar o ponto MS 05 que demonstrou uma direção preferencial de fraturamento E-W, com ângulos de mergulho elevados a norte e sul como a família de fraturas mais importante. Fraturamento NE mergulhando a NW e NW mergulhando a NE e SW também podem ser observados.

Uma conclusão geral é a de que o padrão local no complexo Salitre I pode refletir o processo de intrusão e arqueamento das rochas encaixantes num regime rúptil-dúctil que se superimpôs às estruturas regionais, reativando-as também. A atitude da clivagem ardosiana e das camadas de metargilitos e quartzitos, formadas bem antes da intrusão, mostra que elas foram arqueadas gerando um padrão dômico, portanto uma estrutura dúctil, que foi fraturada radialmente e anelarmente de modo rúptil e por onde ascenderam magmas que geraram diques.

Este estudo apresenta uma boa indicação do que será encontrado no interior do complexo, no entanto um estudo nas dependências da mina se faz necessário a fim de confirmar a hipótese apresentada e também para servir como base para estudos de geotecnia e para o planejamento de lavra.

7. BIBLIOGRAFIA

- ARAÚJO, I. M. C. de P. **Gênese e Controles da Mineralização Secundária de P, Ti e ETR no Complexo Alcalino Carbonatítico de Salitre, MG.** 2015. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília. 142 p.
- BARBOSA, E. S. R. **Mineralogia e petrografia do complexo carbonatítico-foscorítico de Salitre, MG.** 2009. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.unb.br/handle/10482/10379?mode=full>>. Acesso em: 12/03/2018.
- BARBOSA, E. S. R. et al. **Bebedourite from its type area (Salitre I complex): A key petrogenetic series in the Late-Cretaceous Alto Paranaíba kamafugite-carbonatite-phoscorite association, Central Brazil.** 2012.144 p.
- BEZERRA, M. A.; BROD, J. A. **Mineralogia do complexo alcalino-carbonatítico de Tapira.** Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/pibic-balcao/trabalhos/MATEUS_ARAUJO_BEZERRA.pdf>. Acesso em: 01/06/2018.
- BORGES, A.J. & DREWS, M.G.P. **Características magnetométricas da Bacia do São Francisco em Minas Gerais.** In: PINTO, C.P. & MARTINS-NETO, M.A. (eds), Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo Minas Gerais, p 55-66, 2001.
- BROD, J. A. et al. 2000. **Kamafugite affinity of the Tapira alkaline-carbonatite complex (Minas Gerais, Brazil).** Revista Brasileira de Geociências 30: 404-408.
- BROD, J. A., Ribeiro, C. C., Gaspar, J. C., Junqueira-Brod, T. C., Barbosa, E. S. R., Riffel, B. F., Silva, J. F., Chaban N., Ferrari A. J. D., 2004. **Excursion guide: Geologia e Mineralizações dos Complexos Alcalinos-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba.** Sociedade Brasileira de Geologia.
- CPRM. 2018. WINGE, M. **Atitude.** Glossário Geológico Ilustrado. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/verbete/atitude.htm>>. Acesso em: 14/10/2018.
- CRUZ, S. C. P.; LEITE, C. M. M.; CONCEIÇÃO, M. A. G. **Arcabouço estrutural da Mina Bananeira, Miguel Calmon, Bahia:** uma contribuição ao estudo da evolução tectônica do

Orógeno Itabuna-Salvador-Curaçá. 2012. Instituto de Geociências (IGEO), Universidade de Brasília, Brasília. 863-873.

FERNANDES, A. J.; FIUME, B.; BERTOLO, R.; HIRATA, R. C. A. **Modelo geométrico de fraturas e análise da tectônica rúptil aplicados ao estudo do fluxo do aquífero cristalino, São Paulo (SP)**. Revista do Instituto de Geociências, v. 16, n. 3, p. 71-88, Setembro 2016.

FOSSEN, Haakon. **Geologia Estrutural**. Tradução Fábio R. D. de Andrade. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2012.

FOSSEN, Haakon. **Structural Geology**. Editora Cambridge University Press, 2015.

GIBSON, S. A. et al. **The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume: evidence from large-volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil**. 1995. Journal of Petrology, 36(1): 189-229.

JACOBI, Pedro. **O excremento que mudou o mundo**. 2015. Portal do geólogo. Disponível em: <<http://www.geologo.com.br/MAINLINK.ASP?VAIPARA=O%20excremento%20que%20mudou%20a%20geografia%20do%20mundo>>. Acesso em: 27/05/2018.

MELO, M.T.V. **Depósitos de Fosfato, Titânio e Nióbio de Tapira, Minas Gerais**. In: C. Schobbenhaus, E.T. Queiroz, C.E.S. Coelho (Eds). 1997. Principais depósitos minerais do Brasil. DNPM/CPRM, Brasília, 41-56.

MENEZES, D. A. **Caracterização geotécnica e análise dos modos de ruptura de taludes operacionais em itabirito compacto**. 2014. Dissertação de mestrado. Departamento de engenharia civil, Núcleo de geotecnia, Universidade federal de Ouro Preto – UFOP, Ouro Preto, M.G., 110 p.

MORAES, L. C.; SEER, H. J.; BENTO, J. H. B.; LEAL, C. F.; MADEIRA, M. R. **Análise geométrica do alojamento de magmas no entorno do complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro, Araxá, Minas Gerais, por meio da atitude espacial de fraturas e diques**. 2008. Simpósio de Vulcanismo e Ambientes Associados, IV, Foz do Iguaçu. 6 p., 2008.

ROCHA, Loyane Gomes de Moraes. **Caracterização magnética da porção central do lineamento azimuth 125°**. 2013. 181 p. Tese de doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SEER, H.J., MORAES, L.C. de, SILVA, C.H. **Folha Araxá, SE-23-Y-C-VI, Escala 1:100.000 (mapas, relatório SIG)**. In: Pedrosa-Soares, A., Voll, E., Profeta, A. (Coordenadores), Projeto Fronteiras de Minas (ISBN: 978-85-89923-04-0) CODEMIG FUNDEP-UFMG, Editora CODEMIG (www.portaldageologia.com.br), Belo Horizonte, Brasil, 2015.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D. S. **Fosfato**. DNPM. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>>. Acesso em: 26/05/2018.

ULIANA, Daniel. **Caracterização tecnológica do minério de fosfato do complexo alcalino de Salitre, MG – Área Fosfertil**. 2010. 210 p. Tese de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SAWASATO, E.Y. **Estruturação da porção meridional da Bacia Alto Sanfranciscana – Cretácio do Oeste de Minas Gerais**. 1995. 124 p. Tese de mestrado. Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.