

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PAULA GABRIELA LEAL HERNANDEZ

**ANÁLISE ESTRUTURAL E MODELAGEM GEOLÓGICA DA PORÇÃO OESTE DA
JANELA BOM JARDIM, BACIA DO CAMAQUÃ, CAÇAPAVA DO SUL - RS**

**Caçapava do Sul
2016**

PAULA GABRIELA LEAL HERNANDEZ

**ANÁLISE ESTRUTURAL E MODELAGEM GEOLÓGICA DA PORÇÃO OESTE DA
JANELA BOM JARDIM, BACIA DO CAMAQUÃ, CAÇAPAVA DO SUL - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Geologia da Universidade Federal
do Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Guadagnin
Co-orientadora: Me. Sissa Kumaira

**Caçapava do Sul
2016**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo (a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

H557a Hernandez, Paula Gabriela Leal.

Análise estrutural e modelagem geológica da porção oeste da Janela Bom Jardim, Bacia do Camaquã, Caçapava do Sul - RS / Paula Gabriela Leal Hernandez.

96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2016.

"Orientação: Felipe Guadagnin".

1. Bacia do Camaquã. 2. Modelagem Geológica. 3. Análise Estrutural. I. Título.

PAULA GABRIELA LEAL HERNANDEZ

**ANÁLISE ESTRUTURAL E MODELAGEM GEOLÓGICA DA PORÇÃO OESTE DA
JANELA BOM JARDIM, BACIA DO CAMAQUÃ, CAÇAPAVA DO SUL - RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Geologia da Universidade Federal
do Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de conclusão defendido e aprovado em: 13 de dezembro de 2016.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Felipe Guadagnin

Orientador

UNIPAMPA

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory

UNIPAMPA

Me. Marcelo Lusa

UNIPAMPA

Dedico este trabalho aos meus pais, em especial à minha mãe, Maria Cecília Leal Hernandez. Te amarei eternamente.

AGRADECIMENTO

Agradeço meu pai, o PHO, por ser o homem que mais admiro nesse mundo, por sua garra, inteligência e pelo amor que sempre deu à mim e ao meu irmão. Obrigada véio! Agradeço meu irmão, Pedro, por ser meu cúmplice e sempre me acompanhar nos momentos da vida. A minha tia, Lourdes e a Mana, Adelia, pela amizade e ajuda, seja para entrar na universidade e durante a mesma.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Guadagnin e à minha co-orientadora, Me. Sissa Kumaira pela atenção dada, conhecimento e ajuda durante as etapas desse trabalho. Agradeço também ao Prof. Dr. Felipe Caron e à amiga Tatiana Morais Alves pela ajuda, sugestões e diálogo durante os campos do TCC até a finalização do mesmo.

Agradeço a todos os meus colegas de curso e aos demais professores que só somaram minhas experiências e motivações na vida profissional e acadêmica.

Ao meu namorado, Alexandre, por seu companheirismo, amor e dedicação dada a mim nesses 5 anos de graduação e também por ser uma das melhores coisas que me aconteceram em Caçapava do Sul.

Agradeço a UNIPAMPA, por disponibilizar a licença acadêmica do software MoveTM para esse trabalho.

RESUMO

O Escudo Sul-rio-grandense ocupa a região central do estado do Rio Grande do Sul e é composto por associações de rochas geradas no intervalo de tempo entre o Paleoproterozoico e o Neoproterozoico. Durante os estágios finais do ciclo Brasileiro, no Neoproterozoico, a Bacia do Camaquã foi preenchida e deformada. A Bacia do Camaquã é dividida geograficamente em três sub-bacias (Camaquã Ocidental, Central e Oriental) que são separadas pelos altos do embasamento. Na sub-bacia Camaquã Central, na região das Minas do Camaquã, ocorre uma janela estrutural, onde rochas mais antigas estão circundadas por rochas mais jovens, chamada Janela Bom Jardim. As rochas que estão localizadas no interior da janela estrutural são pertencentes ao Grupo Santa Bárbara e as rochas que circundam essa janela são pertencentes ao Grupo Guaritas. O trabalho visou a construção de um modelo geológico 3D construído na porção oeste da Janela Bom Jardim a partir de dados de campo (acamamento, fraturas extensionais, fraturas cisalhantes e cisalhantes, e estrias nas fraturas de cisalhamento), de sensoriamento remoto, descrição litológica e de análise estrutural das estruturas obtidas em campo utilizando o *software* Move™. As estruturas foram analisadas através da análise estrutural quanto a sua geometria, cinemática e dinâmica (quando possível). Com os resultados da análise estrutural e o modelo geológico foi possível fazer correlações com os principais eventos deformadores da Bacia do Camaquã e também compreender melhor a relação estrutural entre o Grupo Santa Bárbara e o Grupo Guaritas. Os eventos deformadores da Bacia do Camaquã ocorrem no intervalo de tempo entre o final do Neoproterozoico e Cretáceo e correspondem a uma série de eventos compressivos e distensivos. As fraturas extensionais descritas no trabalho são classificadas como juntas, por possuírem pouco movimento perpendicular ao plano e possuem direção preferencial para NNE e NNW. Essas direções são semelhantes aos lineamentos digitalizados na área de estudo, que tem direções preferenciais para NE e NW. Para as fraturas de cisalhamento foram analisados os paleontensores e com isso foram identificados dois eventos de deformação, um transcorrente e outro extensional. O evento transcorrente, com estruturas de direção NNE e cinemática dextral e estrutura com direção NW e cinemática sinistral, coincide com dois eventos deformadores da Bacia do Camaquã. O evento transcorrente coincide com o que é apresentado na bibliografia à uma compressão NNE, que geraram falhas transcorrentes falhas transcorrentes dextrais NNE e sinistrais WNW. O evento extensional, com estrutura NW e cinemática sinistral e estrutura NE com cinemática normal oblíqua, coincide com o evento distensivo NE, que pode estar relacionado à dois eventos de magmatismo no Cretáceo

(vulcanismo Serra Geral e diques alcalinos da Suíte Piratini). Em conjunto com o modelo geológico, foi possível observar a deformação que está presente nas duas unidades geológicas superiores da Bacia do Camaquã, onde o Grupo Santa Bárbara se encontra mais deformado que o Grupo Guaritas.

Palavras-Chave: Bacia do Camaquã; Modelagem geológica 3D; Janela Bom Jardim;

ABSTRACT

The Sul-rio-grandense shield occupies the central region of the state of Rio Grande do Sul and is composed by associations of rocks generated in the time interval between the Paleoproterozoic and the Neoproterozoic. During the final stages of the Brasiliano cycle, in the Neoproterozoic, the Camaquã Basin was filled and deformed. The Camaquã Basin is divided geographically into three sub-basins (Camaquã Occidental, Central and Oriental) that are separated by the tops of the basement. In the Camaquã Central sub-basin, in the Camaquã Mine region, there is a structural window, where older rocks are surrounded by younger rocks called Bom Jardim Window. The rocks that are located inside the structural window belong to the Santa Bárbara Group and the rocks that surround this window belong to the Guaritas Group. The work aimed at the construction of a 3D geological model constructed in the western portion of the Bom Jardim Window from field data (lodging, extension and shear fractures, and lineations), remote sensing, structural analysis of the structures obtained in the field using the Move™ software. Structures were analyzed through structural analysis for their geometry, kinematics and dynamics (when possible). With the results of the structural analysis and the geological model it was possible to make correlations with the main deformer events in the Camaquã Basin and also to better understand the structural relationship between the Santa Bárbara Group and the Guaritas Group. The deforming events of the Camaquã Basin occur in the time interval between the end of the Neoproterozoic and Cretaceous and correspond to a series of compressive and distensive events. The extension fractures described in the work are classified as joints, because they have little movement perpendicular to the plane and have a preferred direction for NNE and NNW. These directions are similar to the digitized lineaments in the study area, which has preferred directions for NE and NW. For the shear fractures the paleotensores were analyzed and with that two deformation events, one transcurrent and another extensional, were identified. The transcurrent event, with NNE direction structures and hatchet kinematics and structure with NW direction and sinistral kinematics, coincide with two deformer events in the Camaquã Basin. The transcurrent event coincides with what is presented in the bibliography to an NNE compression, which generated transcurrent faults transcurrent faultless NNE and sinistral WNW. The extensional event, with NW structure and sinistral kinematics and NE structure with normal oblique kinematics, coincides with the distending NE event, which may be related to two events of Cretaceous magmatism (Serra Geral volcanism and alkaline dykes of the Piratini Suite). In conjunction with the geological model, it was possible to observe the deformation that is present in the

two upper geological units of the Camaquã Basin, where the Santa Bárbara Group is more deformed than the Guaritas Group.

Keywords: Camaquã Basin; 3D geological modeling; Bom Jardim window.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Mapa de localização da área de estudo. Em (a) é mostrada a localização de Caçapava do Sul em relação a Porto Alegre e Santa Maria e a BR-290. Em (b) é mostrado o mapa com os limites do município de Caçapava do Sul e as principais rodovias que dão acesso a área de estudo. Em (c) é mostrado o mapa com o limite da área de estudo e principais acessos sobrepostos à imagem de satélite obtida no <i>software</i> Google Earth Pro.....	21
Figura 2 - Mapa geológico do sul do Brasil e Uruguai, apresentando o Terreno Tijucas (embasamento da Bacia do Camaquã) e as demais unidades tectono-estratigráficas e estruturais do ESrg	23
Figura 3 - Mapa geológico-estrutural da região das Minas do Camaquã na Bacia do Camaquã. O Grupo Santa Bárbara ocorre em uma janela estrutural circundada pelas rochas do Grupo Guaritas.....	25
Figura 4 – Coluna estratigráfica generalizada da Formação Guarda Velha, onde F1 é um conglomerado estratificado, F2 arenito com estratificação planar-paralela, F3 arenito cascalhoso, F4 arenito plano estratificado, F5 enchimento de canal com arenitos cascalhosos cruzados, F6 lamito gretado, F7 Arenito fino com laminação cruzada com <i>ripples</i> , F8 lamito laminado , F9 arenito cascalhoso médio fluidizado, F10 arenito grosso cascalhoso com gradação, e SSD (deformação de sedimento inconsolidado).	28
Figura 5 - Arcabouço estratigráfico entre as unidades que compõem o Grupo Guaritas.....	29
Figura 6 - Mapa e seções geológicas esquemáticas da Bacia do Camaquã. O polígono vermelho representa a área de estudado.	32
Figura 7 – Ilustração da forma na qual os materiais geológicos podem se deformar. Deformação rúptil (a), rúptil-dúctil (b, c) e dúctil (d).	35
Figura 8 – Mudança da temperatura (T) e pressão (Pc) com a profundidade. Linha contínua é o gradiente geotérmico e a linha tracejada corresponde ao gradiente adiabático.....	35
Figura 9 – Blocos diagramas ilustrando os três modos de rompimento deslizante da superfície: (a) modo I, (b) modo II e (c) modo III.	36
Figura 10 – Orientação de vários tipos de fraturas em relação aos esforços principais.	37
Figura 11 - Falhas e redes de fraturas individuais, interação e populações.....	38
Figura 12 - Exemplo de lineação superficial em uma superfície de falha (a, b e c), onde são encontrados dois tipos: sulcos de lineação e lineação fibrosa (crescimento mineral).....	41
Figura 13 - Projeções estereográficas dos principais tipos de fraturas cisalhantes (falhas) com lineações. Onde P, são os esforços compressivos e T os esforços distensivos.	42

Figura 14 – Tipos de regimes de esforços (<i>stress</i>). As setas indicam o azimute do eixo de esforço horizontal, com o seu comprimento de acordo com a magnitude do esforço, em função do R. As setas divergentes (brancas) indicam eixos extensivos de esforços e as setas convergentes (pretas) indicam eixos compressivos de esforços. Eixos de esforços verticais são simbolizados por um círculo sólido para regimes extensivos, tracejados para regimes <i>strike-slip</i> e círculo vazio para regimes compressivos.	43
Figura 15 - Estratégia de modelagem geológica explícita aplicada na tese de dissertação de Kumaira (2016). Em A) é mostrado o MDE com as superfícies de extrusão, em B) um exemplo de modelo 2D de dobras de 3ª à 2ª ordens correspondente ao perfil Chapada Imperial; em C) a projeção em <i>down-plunge</i> de traços estruturais no perfil Chapada da Contagem; em D) exemplo de modelo 3D de dobras de 2ª ordem na Chapada da Contagem pelo método 3D <i>Ribbon</i> . Em E) modelo geológico 2,5D de dobras de 1ª ordem. O mapa geológico está drapeado ao DEM e a superfície 3D do topo da Formação Ribeirão do Torto é mostrada; e em F) o modelo tridimensional do Domo de Brasília.	46
Figura 16–Em (A) mapa do relevo sombreado com azimute de iluminação para 45°, em (B) mapa do relevo sombreado com azimute de iluminação para 315°, em (C) Mosaico das imagens de satélite do Google Earth Pro e em (D) mapa dos lineamentos.	49
Figura 17 – Ilustração das projeções <i>down-plunge</i> . A coordenada dos pontos (contatos geológicos, por exemplo) no sistema de coordenadas cartesianas é projetado no plano ortogonal ao eixo da dobra (plano de perfil), no sistema de coordenadas correspondente ao eixo da dobra regional.	53
Figura 18 - Localização das seções construídas no Move™.	54
Figura 19 - Exemplo de seção inclinada criada no Move™. Na imagem está a seção inclinada localizada no Arroio dos Negros com as medidas estruturais de acamamento do Grupo Santa Bárbara. As retas vermelhas são as bissetrizes geradas pelo método <i>Kink Band</i> , a linha preta é a topografia do SRTM projetada na seção, o X são as intersecções do contato do Grupo Santa Bárbara com o Grupo Guaritas na seção.	55
Figura 20 – (a) Lineamentos regionais traçados (linha vermelha) na área para construção de (b) superfícies verticais.	57
Figura 21 - Frequência da direção dos lineamentos com intervalo de 10°.	59
Figura 22 - Frequência dos comprimentos dos lineamentos.	60
Figura 23 - Gráfico de dispersão do Azimute pelo Comprimento dos lineamentos na direção NE-SW (0-90).	61

Figura 24 - Gráfico de dispersão do Azimute pelo Comprimento dos lineamentos na direção NW-SE (270-360).	61
Figura 25–Mapas das direções dos lineamentos para (a) NNE-SSW, (b) NE-SW , (c) ENE-WSW, (d) ESE-WNW, (e) SE-NW e (f) SSE-NNW. A frequência de lineamentos para cada mapa é mostrada na Tabela 1.	62
Figura 26 - Diagrama de roseta dos lineamentos na área de estudo.....	63
Figura 27 – Fotografias mostrando as principais feições observadas para o Grupo Santa Bárbara. Em (a) paisagem do Grupo Guaritas aflorante em topo do morro e o Grupo Santa Bárbara no vale, aflorando em uma drenagem, em (b) arenito muito fino de coloração avermelhada com poucos intraclastos de lama e com a presença de marcas de ondas, e em (c) afloramento em lajedo em uma estrada onde é possível observar o dobramento desta unidade ao longo da estrada.	64
Figura 28 – Fotografias das principais feições associadas ao Grupo Guaritas. Em (a) arenitos finos a médios com clastos intercalados com arenitos conglomeráticos, em (b) arenitos finos a médios com lentes de arenitos conglomeráticos, em (c) conglomerados polimíticos, em (d) sismito e em (e) a paisagem do Grupo Guaritas aflorante em <i>Cuestas</i>	65
Figura 29 - Estereogramas dos acamamentos dos Grupos Guaritas e Santa Bárbara.	66
Figura 30 - Tipos de fraturas observados em campo, como: em (a) <i>splay</i> (linha rosa) em (b) uma camada com adensamento de fraturas (linhas azuis) e acima a provável discordância das duas unidades (linha laranja) e em (c) corredor de fraturas.	68
Figura 31 - Fraturas em escala de afloramento (b) são prolongadas até os morros (a), onde em escala macroscópica podem ser observada como lineamentos.	69
Figura 32 – Fotografia de afloramento em planta mostrando a geometria e cinemática das fraturas que afetam o Grupo Santa Bárbara. A seta aponta o norte. (a) Fraturas com poucos centímetros de espaçamento do Grupo Santa Bárbara e (b) fratura com movimento aparente sinistral. Onde em (b) o número (1) é uma fratura que mergulha 68° para S59W e o número (2) é uma fratura que mergulha 82° para N03E.	70
Figura 33 - Fotografia de afloramento mostrando a geometria das fraturas que afetam o Grupo Guaritas. A seta aponta o norte. (a) Fraturas com espaçamento métrico do Grupo Guaritas e (b) no mesmo afloramento pares de fraturas que se intersectam. Onde em (b) o número (1) é uma fratura que mergulha 83° para N65W, o número (2) é uma fratura que mergulha 80° para S51E, o número (3) é uma fratura que mergulha 85° para S41E , e o número (4) é uma fratura que mergulha 84° para S63E.	71

Figura 34 - (a) Falhas cisalhantes no Grupo Santa Bárbara, onde a seta em rosa indica o plano que mergulha 75° para S80E, a seta amarela indica o plano que mergulha 85° para S31W e a seta azul indica o plano que mergulha 80° para S63W. E em (b) o plano de falha com 75° de mergulho para S80E com estria horizontal (02°) com caimento para S.....	72
Figura 35 - Enxame de fraturas iniciando com poucas fraturas (a) até o adensamento destas (b) e (c), onde é possível observar um aumento na vegetação (b).....	73
Figura 36 – Mapa mostrando as oito áreas individualizadas para a análise das fraturas extensionais.	74
Figura 37 – Estereogramas das oito áreas apresentadas na Figura 25. Áreas 1, 2 e 3 corresponde as fraturas obtidas no Grupo Santa Bárbara; áreas 4, 5, 6, 7 e 8 foram obtidas no Grupo Guaritas.	75
Figura 38 – Estereograma mostrando os paleotensores obtidos pelo método dos Diedros Retos resultando em um tensor <i>strike-slip</i> puro a extensional (transtração).	77
Figura 39 - Estereograma mostrando os paleotensores obtidos pelo método dos Diedros Retos resultando em um tensor extensional puro.	78
Figura 40 - Seções <i>down-plunge</i> . (a) Seção <i>down-plunge</i> AN do Grupo Santa Bárbara, (b) seção <i>down-plunge</i> Tabs do Grupo Santa Bárbara, (c) seção <i>down-plunge</i> CP do Grupo Guaritas e (d) seção <i>down-plunge</i> TabsCS do Grupo Guaritas.....	79
Figura 41 - Modelo geológico do Grupo Guaritas com visão para leste. Em (a) modelo geológico do Grupo Guaritas com a superfície de contato entre o Grupo Guaritas e o Grupo Santa Bárbara em amarelo, onde essa superfície foi utilizada para gerar as camadas para cada bloco estrutural. Em (b) modelo geológico do Grupo Guaritas. Em (c) modelo geológico do Grupo Guaritas com as superfícies dos lineamentos regionais.	80
Figura 42 - Modelo geológico do Grupo Guaritas com visão para norte. Em (a) modelo geológico do Grupo Guaritas e em (c) o mesmo modelo com as superfícies dos lineamentos regionais.	81
Figura 43 - Modelo geológico do Grupo Santa Bárbara com visão para leste. Em (a) modelo geológico do Grupo Santa Bárbara e em (c) o mesmo modelo com as superfícies dos lineamentos regionais.	82
Figura 44 - Modelo geológico do Grupo Santa Bárbara com visão para norte. Em (a) modelo geológico do Grupo Santa Bárbara e em (c) o mesmo modelo com as superfícies dos lineamentos regionais.	83
Figura 45 - Mapa da área com as seções geológicas.	84

Figura 46 - Seção com direção N-S (1) do modelo geológico. Em laranja, as camadas do Grupo Santa Bárbara, em bege, as unidades do Grupo Guaritas e em vermelho o contato litológico entre as duas unidades.....	85
Figura 47 - Seção com direção N-S (2) do modelo geológico. Em laranja, as camadas do Grupo Santa Bárbara, em bege, as unidades do Grupo Guaritas e em vermelho o contato litológico entre as duas unidades.....	85
Figura 48 - Seção com direção E-W (1) do modelo geológico. Em laranja, as camadas do Grupo Santa Bárbara, em bege, as unidades do Grupo Guaritas e em vermelho o contato litológico entre as duas unidades.....	86
Figura 49 - Seção com direção E-W (2) do modelo geológico. Em laranja, as camadas do Grupo Santa Bárbara, em bege, as unidades do Grupo Guaritas e em vermelho o contato litológico entre as duas unidades.....	86
Figura 50 - Estereograma de todas as fraturas extensionais analisadas nos Grupo Santa Bárbara e Guaritas.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela com as frequências dos lineamentos, onde a coluna Intervalos são os limites inferior e superior de cada Direção.....	60
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
3 CONTEXTO GEOLÓGICO	22
3.1 Bacia do Camaquã.....	24
3.1.1 Grupo Santa Bárbara.....	25
3.1.2 Grupo Guaritas	27
3.2 Tectônica deformadora da Bacia do Camaquã	30
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
4.1 Deformação e strain.....	33
4.2 Fundamentos da Análise de Estruturas Rúpteis	34
4.3 Determinação de Paleotensores	41
4.4 Revisão do Conceito de Modelagem Geológica	44
5 MATERIAIS E MÉTODOS	47
5.1 Levantamento bibliográfico.....	47
5.2 Levantamento de dados.....	47
5.2.1 Análise macroscópica.....	48
5.2.2 Análise mesoscópica.....	50
5.3 Análise dos dados.....	51
5.3.1 Análise estrutural	51
5.3.2 Análise petrográfica em amostras de mão	52
5.4 Modelagem geológica	52
5.4.1 Divisão em blocos estruturais	56
5.4.2 Modelagem 3D	57
6 RESULTADOS	58
6.1 Análise Macroscópica - Lineamentos	58
6.2 Análise Mesoscópica - Descrição litológica.....	63

6.3 <i>Análise Mesoscópica – Análise Estrutural</i>	66
6.3.1 <i>Análise estrutural – Acamamentos</i>	66
6.3.2 <i>Análise estrutural – Descrição das Fraturas</i>	67
6.3.3 <i>Análise estrutural – Orientação e Localização Espacial das Fraturas</i>	74
7 DISCUSSÕES	86
8 CONCLUSÕES	89
REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

A Bacia do Camaquã ocorre na porção centro-sul do estado do Rio Grande Sul, aflorando em três sub-bacias: Camaquã Oriental, Central e Ocidental, separadas por altos do embasamento (Alto de Caçapava do Sul, a oeste e Serra das Encantadas, a leste; *e.g.*, FAMBRINI *et al.*, 2005). A Bacia do Camaquã possui uma história geológica complexa e as exposições são descontínuas, dificultando as correlações entre diferentes unidades estratigráficas (*e.g.*, BICCA, 2013; PAIM *et al.*, 2014). Contudo, a Bacia do Camaquã pode ser subdividida em termos litoestratigráficos nos grupos Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas (*e.g.*, PAIM *et al.*, 1995).

Na sub-bacia Camaquã Central, na região das Minas do Camaquã, o Grupo Santa Bárbara aflora circundado pelas unidades do Grupo Guaritas. Essa feição é conhecida como Janela Bom Jardim (GONZALEZ & TEIXEIRA, 1980; BICCA, 2013). A região da Janela Bom Jardim é relativamente bem estudada devido à existência de mineralizações de Cobre, Ouro, Prata, Zinco, Chumbo, entre outros metais (*e.g.*, CAMOZZATO *et al.*, 2014). Contudo, a relação estrutural entre as unidades dos grupos Santa Bárbara e Guaritas nessa região é ainda pouco estudada. Nessa região ocorrem falhas que afetam somente as unidades do Grupo Santa Bárbara e outras estruturas que afetam ambos os grupos (ALMEIDA, 2005).

Segundo Almeida, R. *et al.* (2012), a Bacia do Camaquã foi afetada por cinco eventos de deformação rúpteis, alguns registrados nas unidades inferiores e outros registrados em toda a seção estratigráfica. Esses cinco eventos ocorreram em um intervalo entre o Neoproterozoico e o Cretáceo, onde os quatro primeiros eventos foram uma sucessão de eventos distensivos e compressivos relacionados a transcorrências que possuem intervalos de idades de 10 a 5 Ma entre eles (ALMEIDA, R. *et al.* 2012). O último evento e mais recente (Cretáceo), uma distensão, pode estar correlacionado a dois eventos de magmatismo: o vulcanismo Serra Geral e aos diques alcalinos (Suíte Piratini; *e.g.* ALMEIDA, D. *et al.* 2012; MACHADO *et al.*, 2015).

Embora no trabalho de Almeida, R. *et al.* (2012) sejam discutidas a evolução tectônica regional, algumas questões permanecem em aberto, como por exemplo a influência do soerguimento dos altos do embasamento na evolução dos grupos Santa Bárbara e Guaritas, a formação da Janela Bom Jardim em relação as unidades superiores do Grupo Guaritas, a relação dos eventos mais recentes (Mesozoicos e Cenozoicos), entre outras.

Para compreensão da relação estrutural entre unidades geológicas são utilizados modelos geológico-estruturais, que consistem em representações da geometria de estruturas

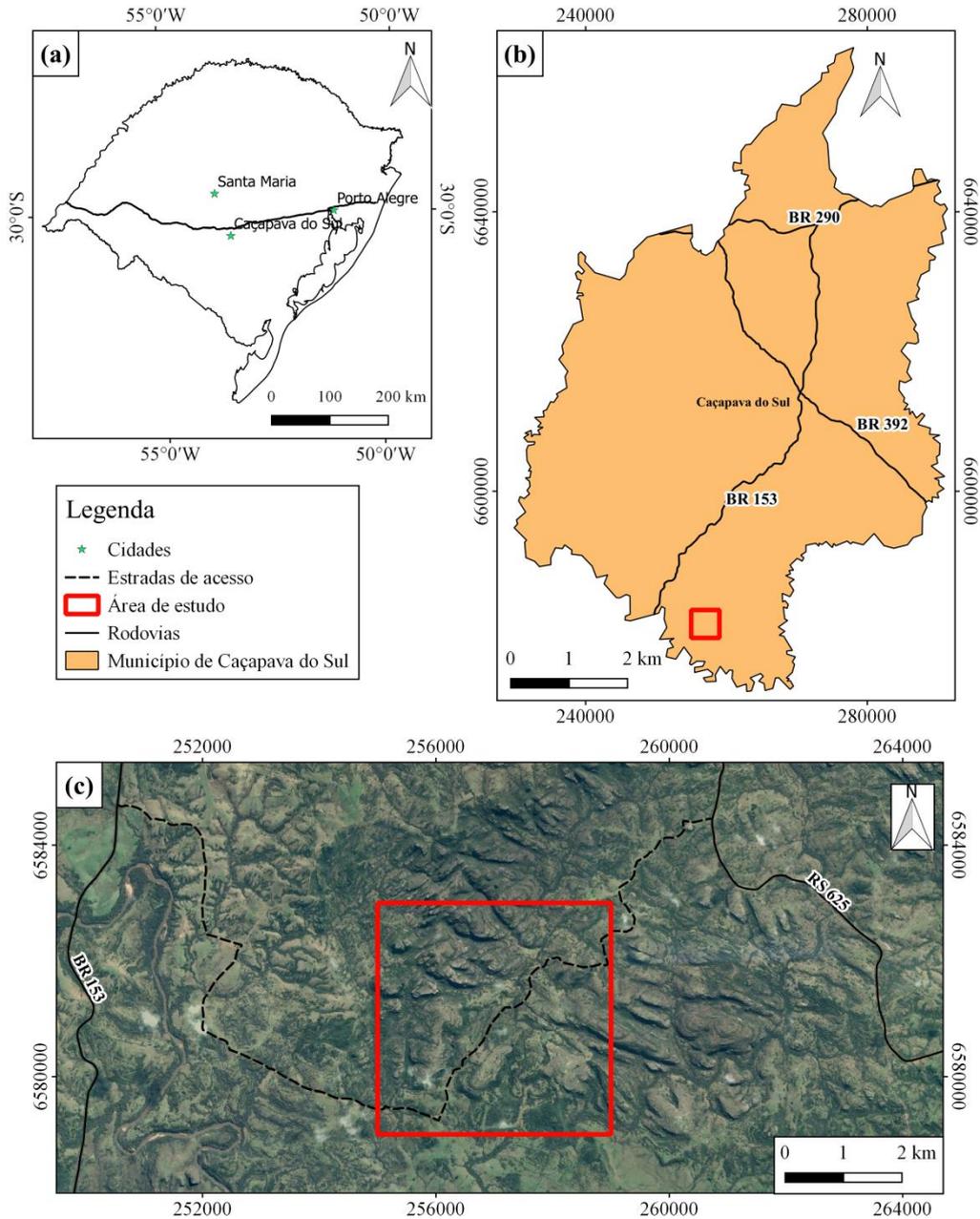
geológicas (*e.g.*, VOLLGER *et al.*, 2015). Para a construção de modelos estruturais são utilizadas ferramentas de análise estrutural de subsuperfície (escavações, sondagens e dados geofísicos) e de superfície (análise de dados de sensoriamento remoto e geofísicos, e análise estrutural em campo). Os modelos geológicos podem ser gerados em duas ou três dimensões (2D ou 3D) e podem ser construídos em representações analógicas e digitais, de forma manual, semi-automática ou automática (*e.g.*, GROSHONG, 2006; RAGAN, 2009; VOLLGER *et al.*, 2015).

O presente trabalho consiste na análise das estruturas dúcteis–rúpteis na porção oeste da Janela Bom Jardim e integração dos dados de campo e de sensoriamento remoto para a construção de um modelo geológico–estrutural em 3D. Esse modelo permite compreender a relação estrutural entre as unidades dos grupos Santa Bárbara e Guaritas, principalmente em relação a discordância angular que separa ambas unidades, a existência de blocos estruturais que controlam os afloramentos de ambas unidades e a maior quantidade de soerguimento das unidades na direção leste em função da formação da Janela Bom Jardim. Esse trabalho contribuirá para o conhecimento científico, auxiliando as interpretações dos estágios finais da história geológica da Bacia do Camaquã.

2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada entre as coordenadas (Universal Transversa de Mercator zona 22S, DATUM SIRGAS 2000) 255.000–259.000 mE e entre 6.579.000–6.583.000 mN, no município de Caçapava do Sul. O município de Caçapava do Sul se localiza na região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, a aproximadamente 260 km da capital do estado, Porto Alegre. A área de estudo está distante aproximadamente 65 km da sede municipal de Caçapava do Sul e à aproximadamente 300 km de Porto Alegre, próximo das localidades das Pedras das Guaritas, Minas do Camaquã, Passo dos Enforcados e Passo do Cação (Fig. 1). O acesso à área pode ser feito pelas rodovias BR-153 e RS-625, e em seguida pelo caminho que liga a RS-625 com a estrada vicinal que liga o Passo do Cação ao Passo dos Enforcados (Fig. 1).

Figura 1– Mapa de localização da área de estudo. Em (a) é mostrada a localização de Caçapava do Sul em relação a Porto Alegre e Santa Maria e a BR-290. Em (b) é mostrado o mapa com os limites do município de Caçapava do Sul e as principais rodovias que dão acesso a área de estudo. Em (c) é mostrado o mapa com o limite da área de estudo e principais acessos sobrepostos à imagem de satélite obtida no *software* Google Earth Pro.



Fonte: Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul (HASENACK & WEBER, 2010; Biblioteca Digital FEPAM, 2005) sobreposta à imagem de satélite obtida pelo *software* Google Earth Pro (CNES/ Astrium 2016).

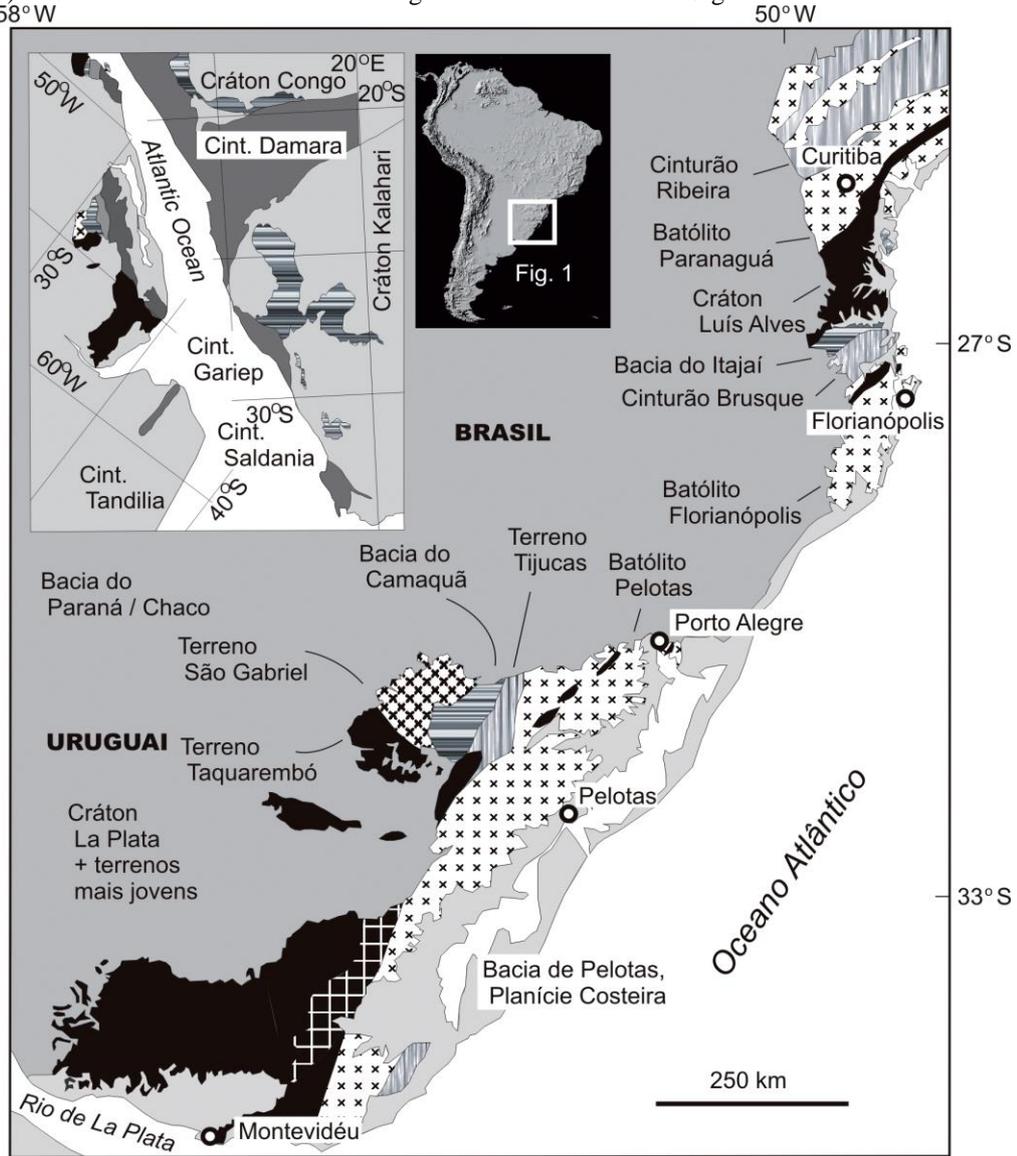
3 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está inserida no Escudo Sul-rio-grandense (ESrg), que engloba rochas ígneas, sedimentares e metamórficas geradas por processos tectônicos desenvolvidos nos ciclos orogênicos Transamazônico (Paleoproterozoico) e Brasileiro (Neoproterozoico; *e.g.*, BORBA, 2006; HARTMANN *et al.*, 2007).

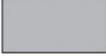
O ESrg é composto por quatro domínios principais: o Bloco Taquarembó, os terrenos São Gabriel e Tijucas e o Batólito Pelotas, os quais são compartimentados de acordo com suas associações de rochas e idades (*e.g.*, HARTMANN *et al.*, 2007). A área de estudo ocorre sobre o Terreno Tijucas, próximo ao limite deste com o Terreno São Gabriel.

O embasamento da Bacia do Camaquã é formada pelas rochas dos terrenos Tijucas e São Gabriel (BORBA, 2006; HARTMANN *et al.*, 2007; PAIM *et al.*, 2014). O Terreno Tijucas é composto por associações de rochas metassedimentares e metavulcânicas de fácies xisto verdes a anfíbolito (com idade entre o mesoproterozoico e neoproterozoico) e também há exposições do embasamento paleoproterozoico (HARTMANN *et al.*, 2007). O Terreno São Gabriel consiste de três arcos magmáticos de idade Neoproterozoica e complexos ofiolíticos (HARTMANN *et al.*, 2007; PHILLIP *et al.*, 2016). Todas essas associações, principalmente do Terreno Tijucas, correspondem ao embasamento da Bacia do Camaquã (Fig. 2; PAIM *et al.*, 2000).

Figura 2 - Mapa geológico do sul do Brasil e Uruguai, apresentando o Terreno Tijucas (embasamento da Bacia do Camaquã) e as demais unidades tectono-estratigráficas e estruturais do ESrg



CONVENÇÕES

-  Rift Mesozóico e sedimentos cenozóicos da planície costeira
-  Bacia do Paraná; rochas vulcânicas e sedimentares Paleozóicas/Mesozóicas
-  Bacias de antepaís neoproterozóicas; rochas sedimentares clásticas e vulcânicas sódicas e potássicas
-  Terreno São Gabriel; Neoproterozóico; gnaisses TTG e metassedimentares do Complexo Cambaí e rochas vulcânicas andesíticas do Complexo Vacacaí
-  Terreno Tijucas. Complexos Brusque e Porongos; 2.0-0.9 Ga; metapelito, quartzito e rochas vulcânicas félsicas; inclui rochas máficas e ultramáficas
-  Batólito Pelotas; Neoproterozóico; rochas graníticas potássicas; abundantes xenólitos paleoproterozóicos de rochas graníticas e metassedimentares
-  Terreno Taquarembó e outros. Fragmentos arqueanos/paleoproterozóicos do Cráton La Plata, principalmente granitos potássicos e granulitos. Malha branca representa o fragmento continental La China; xistos ultramáficos, tonalitos, plataforma deformada com quartzitos, mármore e conglomerados. Inclui o Complexo Granulítico S. Maria Chico.

Fonte: Hartmann *et al.* (2007).

3.1 Bacia do Camaquã

A Bacia do Camaquã corresponde ao Supergrupo Camaquã, unidade vulcano-sedimentar depositada entre aproximadamente 650 e 540 Ma (*e.g.*, BORBA, 2006; MARASCHIN *et al.*, 2010; BICCA *et al.*, 2013, entre outros).

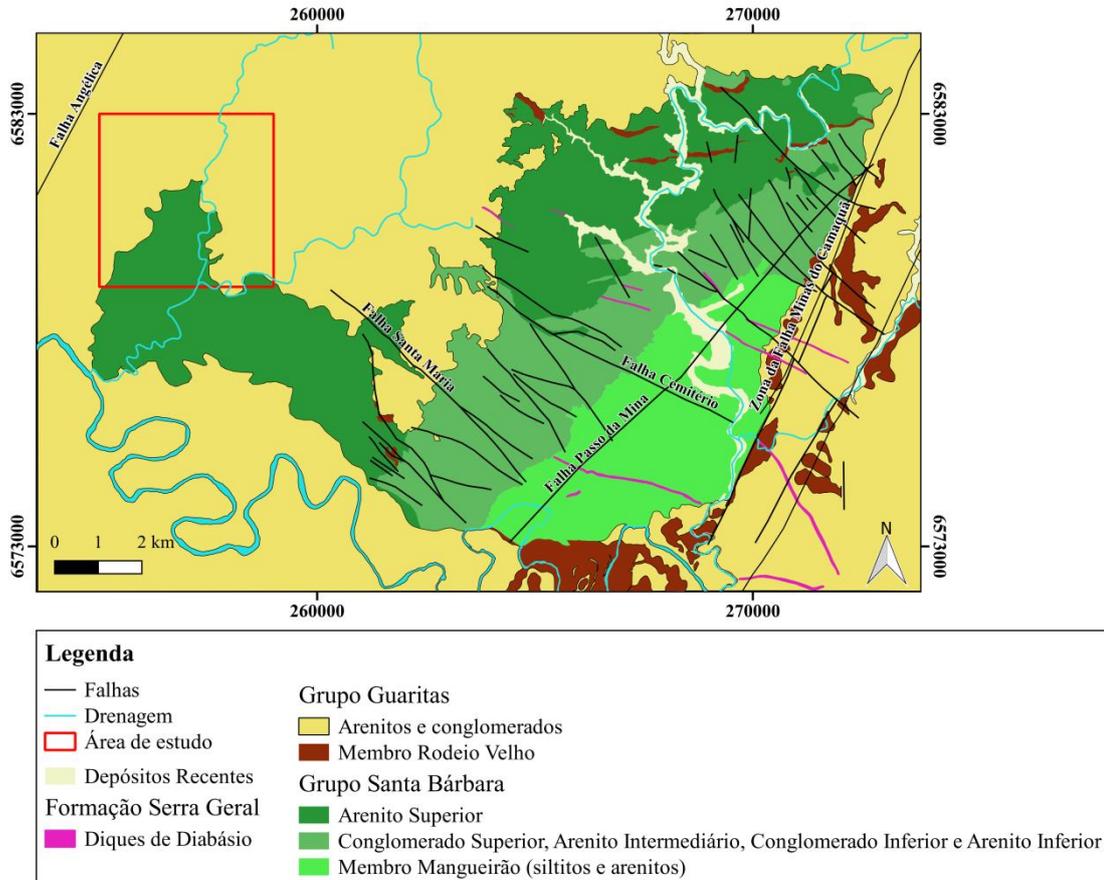
Em termos estruturais, o limite entre a sub-bacia Camaquã Oriental, Central e Ocidental ocorre por falhas de direção NNE, muitas vezes isolando essas sub-bacias por altos do embasamento. A sub-bacia Camaquã Central, onde a área de estudo está localizada, ocorre entre o alto de Caçapava do Sul e a Serra das Encantadas (*e.g.*, FAMBRINI *et al.*, 2005).

O Supergrupo Camaquã foi dividido em grupos, formações e membros ao longo da evolução do conhecimento geológico (*e.g.* ROBERTSON, 1966; RIBEIRO *et al.*, 1966; PAIM *et al.*, 2000). Atualmente existe certo consenso na subdivisão do Supergrupo Camaquã em Grupo Maricá, Grupo Bom Jardim, Formação Acampamento Velho, Grupo Santa Bárbara, Grupo Guaritas e intrusões máficas da Suíte Intrusiva Rodeio Velho (*e.g.*, ALMEIDA, R. *et al.*, 2012), embora outros autores subdividam a Bacia do Camaquã somente nos quatro grupos (Maricá, Bom Jardim, Santa Bárbara e Guaritas; *e.g.*, PAIM *et al.*, 1995).

O Grupo Maricá é a unidade inferior do Supergrupo Camaquã e ocorre em discordância angular com o Grupo Bom Jardim (PAIM *et al.*, 2014). A deposição do Grupo Maricá ocorreu entre ± 600 e 590 Ma (PAIM *et al.*, 2000; ALMEIDA, R. *et al.*, 2012), enquanto que a deposição do Grupo Bom Jardim ocorreu entre ± 590 e 580 Ma (JANIKIAN *et al.*, 2012), marcada pela idade do vulcanismo da Formação Hilário, intercalada com as sequências sedimentares. O Grupo Santa Bárbara é mais novo do que as rochas vulcânicas da Formação Acampamento Velho, cuja idade ocorre entre ± 570 e 550 Ma (*e.g.*, SOMMER *et al.*, 2005; JANIKIAN *et al.*, 2012; MATTÉ *et al.*, 2016), e mais antigo do que o Grupo Guaritas, cuja deposição ocorreu entre ± 550 e 470 Ma (MARASCHIN *et al.*, 2010; ALMEIDA, D. *et al.*, 2012).

Na área de estudo (porção oeste da Janela Bom Jardim) estão expostas as unidades superiores do Supergrupo Camaquã. Gonzalez & Teixeira (1980) descrevem as rochas sedimentares expostas nas porções internas da Janela Bom Jardim como pertencentes ao Grupo Bom Jardim, limitadas das unidades superiores (Grupo Camaquã; GONZALEZ & TEIXEIRA, 1980) por discordância ou por falhas. O Grupo Bom Jardim, segundo Gonzalez & Teixeira (1980) é composto pela Formação Arroio dos Nobres e a Formação Crespos, compreendendo conglomerados, arenitos feldspáticos, siltitos e lamitos (RIBEIRO *et al.* 1966; GONZALEZ & TEIXEIRA, 1980).

Figura 3 - Mapa geológico-estrutural da região das Minas do Camaquã na Bacia do Camaquã. O Grupo Santa Bárbara ocorre em uma janela estrutural circundada pelas rochas do Grupo Guaritas.



Fonte: modificado de Bicca *et al.* (2013).

Com base em datações geocronológicas de zircões detríticos pelo método U-Pb das unidades da Janela Bom Jardim, Bicca *et al.* (2013) definem a idade deposicional máxima em 566 ± 7 Ma para essas unidades. A partir dessa idade, os autores correlacionam as unidades internas da Janela Bom Jardim (Fig. 3; Grupo Bom Jardim segundo GONZALEZ & TEIXEIRA, 1980) com o Grupo Santa Bárbara (BICCA *et al.*, 2013). Assim, nesse trabalho assume-se que as unidades que ocorrem na Janela Bom Jardim são pertencentes ao Grupo Santa Bárbara.

3.1.1 Grupo Santa Bárbara

A seção tipo do Grupo Santa Bárbara ocorre entre a região da Serra de Santa Bárbara e a Serra do Segredo, a oeste do alto de Caçapava do Sul (Sub-bacia Camaquã Ocidental). O Grupo Santa Bárbara foi definido originalmente por Ribeiro *et al.* (1966) e Robertson (1966)

como representado por camadas vermelhas, geralmente inclinadas, constituídas predominantemente por arenitos arcoseanos e conglomerados, siltitos, argilitos e lavas de composição intermediária associadas (RIBEIRO & LICHTENBERG, 1978).

Para Paim *et al.* (1995), o Grupo Santa Bárbara é dividido em quatro unidades: Formação Acampamento Velho, Formação Santa Fé, Formação Lanceiros e Formação Segredo. Fambrini (2003) delimita este grupo em cinco unidades litoestratigráficas: Formação João Dias, Formação Rincão dos Mouras, Formação Seival, Formação Passo da Capela e Formação Estância de Santa Fé. Borba & Mizusaki (2003) dividem de acordo com os conceitos da estratigrafia de seqüências em seqüências I, II e III.

Neste trabalho será adotada a subdivisão proposta por Borba & Mizusaki (2003), que divide o Grupo Santa Bárbara em três seqüências, as quais representam associações de fácies de depósitos de leques aluviais, frente deltaica, lacustre e fluvial entrelaçado. Essas três seqüências são descritas abaixo segundo Borba & Mizusaki (2003):

- a) A seqüência I é a seqüência mais basal do Grupo Santa Bárbara e tem uma espessura que varia de 800 a 1000 m. A base desta seqüência está em desconformidade com rochas vulcânicas ácidas e intermediárias, a noroeste e sudoeste, e por rochas vulcânicas e metassedimentos, a nordeste. Devido à proximidade destas rochas adjacentes, os arenitos e conglomerados desta seqüência possuem fragmentos predominantemente de rochas vulcânicas;
- b) A seqüência II possui aproximadamente 1100 m de espessura. Esta seqüência inicia com arenitos de canais fluviais entrelaçados que representam um trato de sistema de nível baixo. Este trato de sistema de nível baixo compreende arenitos de granulação grossa e conglomerados, com clastos de rochas vulcânicas e metavulcânicas. O trato de sistema de nível alto desta seqüência é representado por arenitos grossos de depósitos de frente deltaica;
- c) Os estratos da seqüência III representam a fase final da evolução da borda da sub-bacia oriental, pois os cascalhos dos canais fluviais entrelaçados indicam transporte para sudoeste, indicando uma inversão da área fonte e do depocentro, que era em direção a leste nas seqüências inferiores.

Na Janela Bom Jardim, as unidades definidas por GONZALEZ & TEIXEIRA (1980) como pertencentes ao Grupo Bom Jardim são o Membro Mangueirão, o Arenito e o Conglomerado Inferior, o Arenito Intermediário e o Arenito e o Conglomerado Superior. Bicca *et al.* (2013) correlacionam as litologias encontradas na região da Janela Bom Jardim

com a proposta de divisão de Borba & Misuzaki (2003) em sequências. Além de correlacionar essas sequências com a descrições dos demais autores (RIBEIRO *et al.*, 1966; ROBERTSON, 1966; GONZALEZ & TEIXEIRA, 1980; OLIVEIRA, 2012). Segundo Bicca *et al.* (2013), o Membro Mangueirão, o Arenito Inferior e o Conglomerado Inferior (GONZALEZ & TEIXEIRA, 1980) correspondem a Sequência I de Borba & Misuzaki (2003), enquanto que o Arenito Intermediário, o Conglomerado Superior e o Arenito Superior são correlacionados a Sequência II (BORBA & MISUZAKI, 2003). Por Bicca *et al.* (2013) compilarem as definições dadas por esses dois trabalhos, será utilizada a proposta de Borba & Misuzaki (2003) para o Grupo Santa Bárbara.

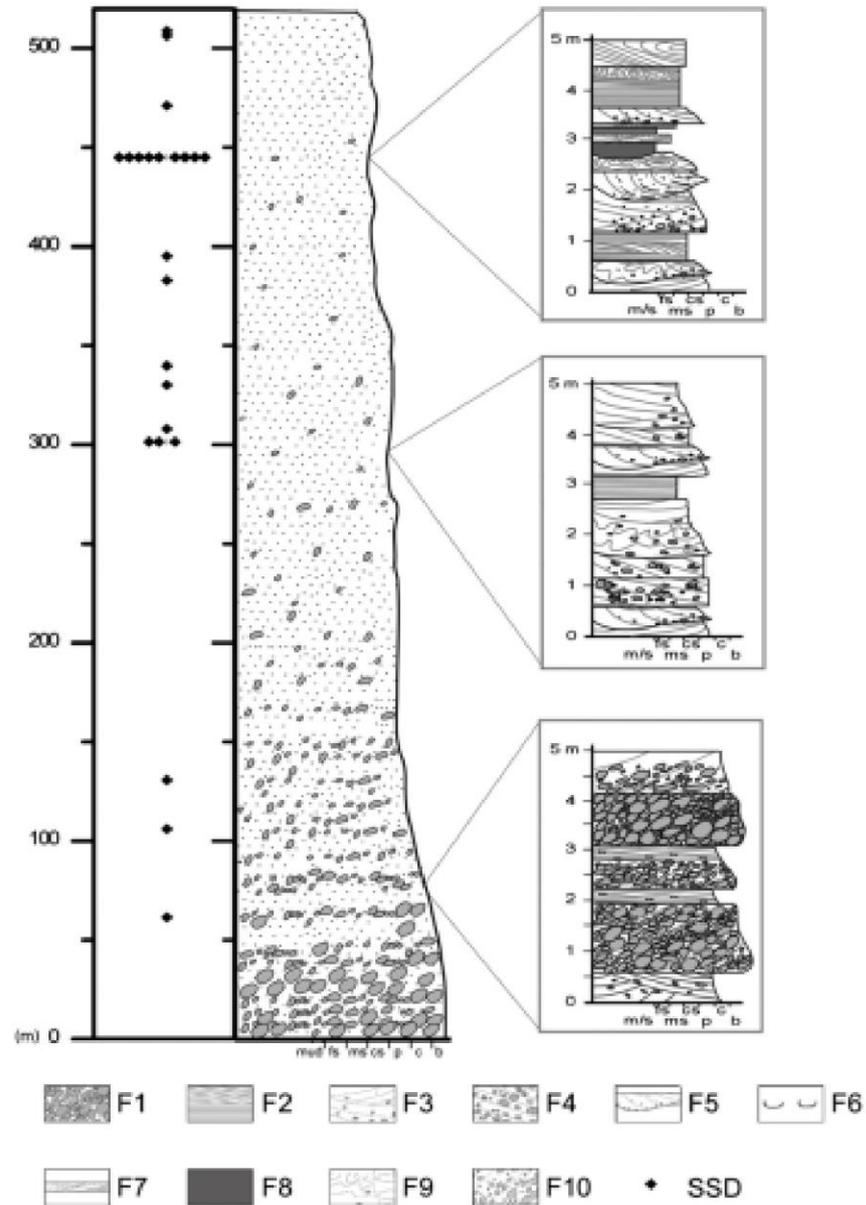
3.1.2 Grupo Guaritas

O Grupo Guaritas foi descrito por Robertson (1966) como Formação Guaritas e consiste em brechas de talus e depósitos fanconglomeráticos que repousam sob camadas dobradas e falhadas do Grupo Santa Bárbara.

Para Paim *et al.* (1995) este grupo compreende aproximadamente 800 m de espessura e é dividido em Aloformação Varzinha e Aloformação Pedra Pintada. A Aloformação Varzinha é composta por fácies de origem eólica (desértica) associadas com rochas vulcânicas intermediárias e a Aloformação Pedra Pintada é caracterizada por fácies aluviais, fácies eólicas e fácies deltaicas. Para Almeida *et al.* (2009), o Grupo Guaritas compreende uma sucessão com mais de 1.500 m de espessura de arenitos conglomeráticos, conglomerados, ritmitos silto-arenosos e arenitos finos a médios com estratificação cruzada. Os arenitos são mineralogicamente imaturos, variando de feldspáticos a feldspático-líticos.

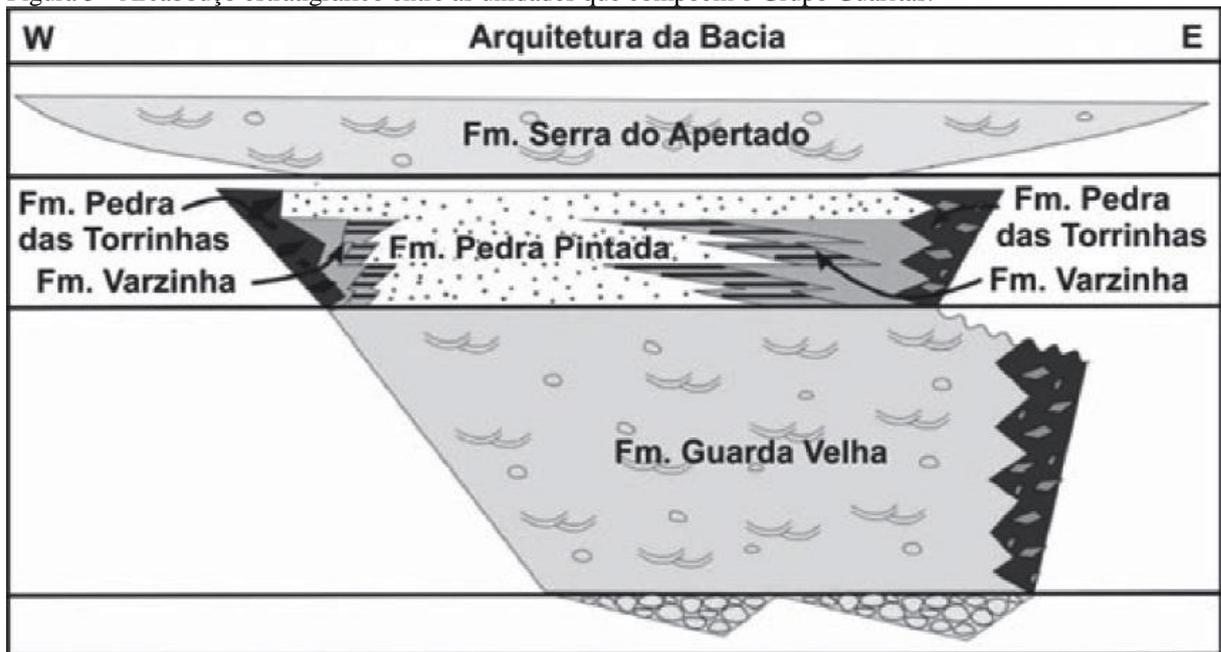
Neste trabalho será adotada a proposta de Almeida (2005) para a divisão do Grupo Guaritas em seis unidades: Formação Guarda Velha, Formação Varzinha, Formação Pedra Pintada, Formação Pedra da Arara, Formação Pedra das Torrinhas e Formação Serra do Apertado (Fig. 4). Foi adotada essa bibliografia pois reflete as rochas que foram observadas em campo.

Figura 4 – Coluna estratigráfica generalizada da Formação Guarda Velha, onde F1 é um conglomerado estratificado, F2 arenito com estratificação planar-paralela, F3 arenito cascalhoso, F4 arenito plano estratificado, F5 enchimento de canal com arenitos cascalhosos cruzados, F6 lamito gretado, F7 Arenito fino com laminação cruzada com *ripples*, F8 lamito laminado, F9 arenito cascalhoso médio fluidizado, F10 arenito grosso cascalhoso com gradação, e SSD (deformação de sedimento inconsolidado).



Fonte: Santos *et al.* (2012).

Figura 5 - Arcabouço estratigráfico entre as unidades que compõem o Grupo Guaritas.



Fonte: modificado Almeida *et al.* (2009).

A Formação Guarda Velha reúne os arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada ou plano-paralela, além de lentes de conglomerados, das porções inferiores do Grupo Guaritas. Esta unidade assenta em discordância angular sobre o Grupo Santa Bárbara e em discordância litológica sobre rochas metamórficas e plutônicas do embasamento da Bacia do Camaquã. As rochas da Formação Guarda Velha são predominantemente arenitos e conglomerados com superfícies de erosão interna abundantes, lamitos pouco preservados e raros clastos de lama intraformacionais (Fig. 5; ALMEIDA, 2005; SANTOS *et al.*, 2012). Essa formação está associada ainda com estruturas de fluidização em diversas litofácies - finas, médias e grossas (SANTOS *et al.*, 2012).

A Formação Varzinha é composta por sucessões intercaladas de arenitos e pelitos, geralmente gretados, em camadas tabulares de poucos centímetros a alguns metros de espessura, intercalados a camadas métricas a decamétricas, lenticulares, de arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada acanalada e estratificação plano paralela. A espessura mínima da unidade é de 200 m (Fig. 5; ALMEIDA, 2005).

A Formação Pedra da Arara é composta de arenitos finos a médios com estratificação cruzada de grande porte. Possui variação lateral e vertical para fácies de arenitos conglomeráticos, distinguindo-se da Pedra Pintada pelo rumo dos mergulhos das estratificações cruzadas (SSW e NNE, respectivamente.; Fig. 5; ALMEIDA, 2005).

A Formação Pedra Pintada é caracterizada por arenitos finos a médios com estratificação cruzada de grande porte com rumo de mergulho para NE. Arenitos com estratificação plano paralela e intercalações esparsas de pelitos com gretas enroladas são frequentes (Fig. 5; ALMEIDA, 2005).

A Formação Pedra das Torrinhas é composta por fácies conglomeráticas de leques aluviais, onde são caracterizadas por brechas de seixos a matações nas fácies mais proximais e por intercalações de conglomerados estratificados com arenitos seixosos e pelitos, geralmente gretados e compondo ciclos granodecrescentes métricos (Fig. 5; ALMEIDA, 2005).

A última unidade, a Formação Serra do Apertado, é composta arenitos conglomeráticos com seixos arredondados e lentes de conglomerados, semelhantes a Formação Guarda Velha, porém estão localizados acima da Formação Pedra Pintada (Fig. 5; ALMEIDA, 2005).

3.2 Tectônica deformadora da Bacia do Camaquã

Com exceção do Grupo Guaritas, as unidades que compõem a Bacia do Camaquã ocorrem em blocos estruturais limitados por falhas de baixo a alto ângulo de mergulho (entre 16° e 60°) e direção principal NE-SW (ALMEIDA, R. *et al.*, 2012). A deformação predominante é similar em todas as unidades da Bacia do Camaquã, ocasionada por falhas de alto ângulo e definidas por planos geralmente estriados e com rejeitos expressivos (escala local), sendo que algumas vezes estão associados a dobras de arraste, verticalização de camadas e raramente brechas tectônicas (ALMEIDA, 2005). As falhas são mais frequentes nas unidades inferiores (Grupo Maricá, Bom Jardim e Formação Acampamento Velho) do que nas unidades superiores da bacia (Grupos Santa Bárbara e Guaritas), refletindo a complexa evolução tectônica (ALMEIDA, 2005).

Segundo Ribeiro *et al.* (1966), a Bacia do Camaquã é controlada por dois sistemas de falhas principais: o Sistema de Falhas Irapuá, de direção NE-NNE e o Sistema de Falhas Cerro da Vigia, de direção WNW. O Sistema de Falhas Irapuá é composto pelas falhas (principais) Serra de Santa Bárbara, Volta Grande, Serra dos Andradas, Passo dos Enforcados, Angélica, Minas do Camaquã, Serra das Encantadas e Açotéia-Piquiri (Fig. 6; RIBEIRO *et al.*, 1966; ALMEIDA, R. *et al.*, 2012). Essas falhas e suas falhas subsidiárias foram reativadas ao longo do tempo durante a evolução regional (ALMEIDA, 2005).

Almeida, R. *et al.* (2012) reconheceram cinco campos de tensão que ocorreram na Bacia do Camaquã, dois deles relacionados aos eventos tectônicos de formação da bacia e

outros três posteriores. Essa cronologia de eventos foi estabelecida através do controle estratigráfico de falhas e quando possível ao reconhecimento de estrias em cortes transversais em: distensão ENE, compressão NNE, distensão NW, compressão NW e distensão NE (ALMEIDA, R. *et al.*, 2012).

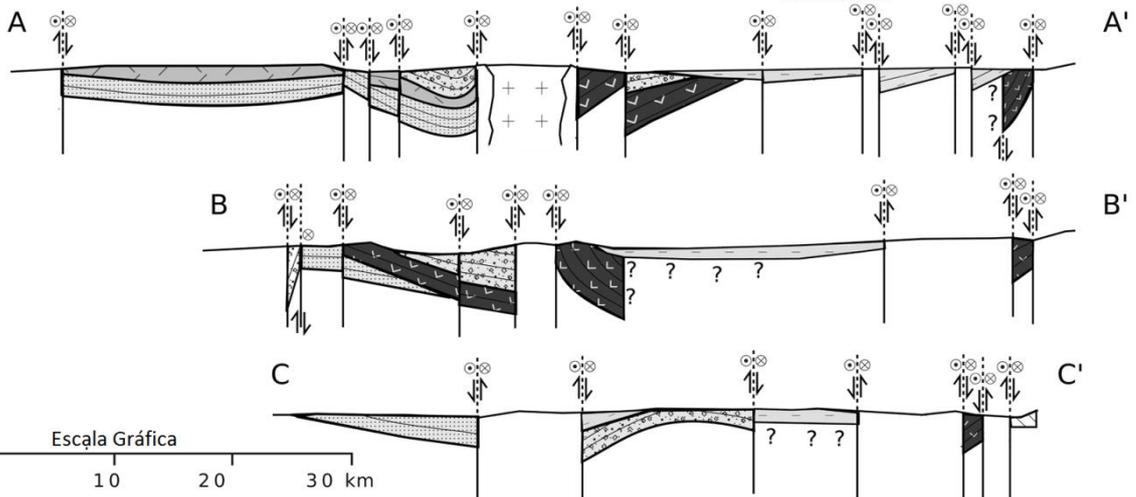
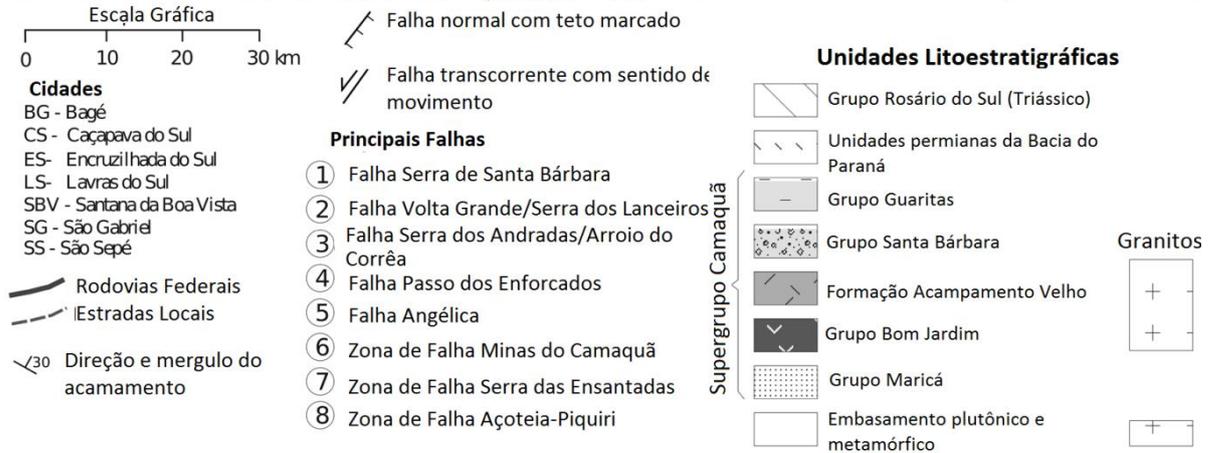
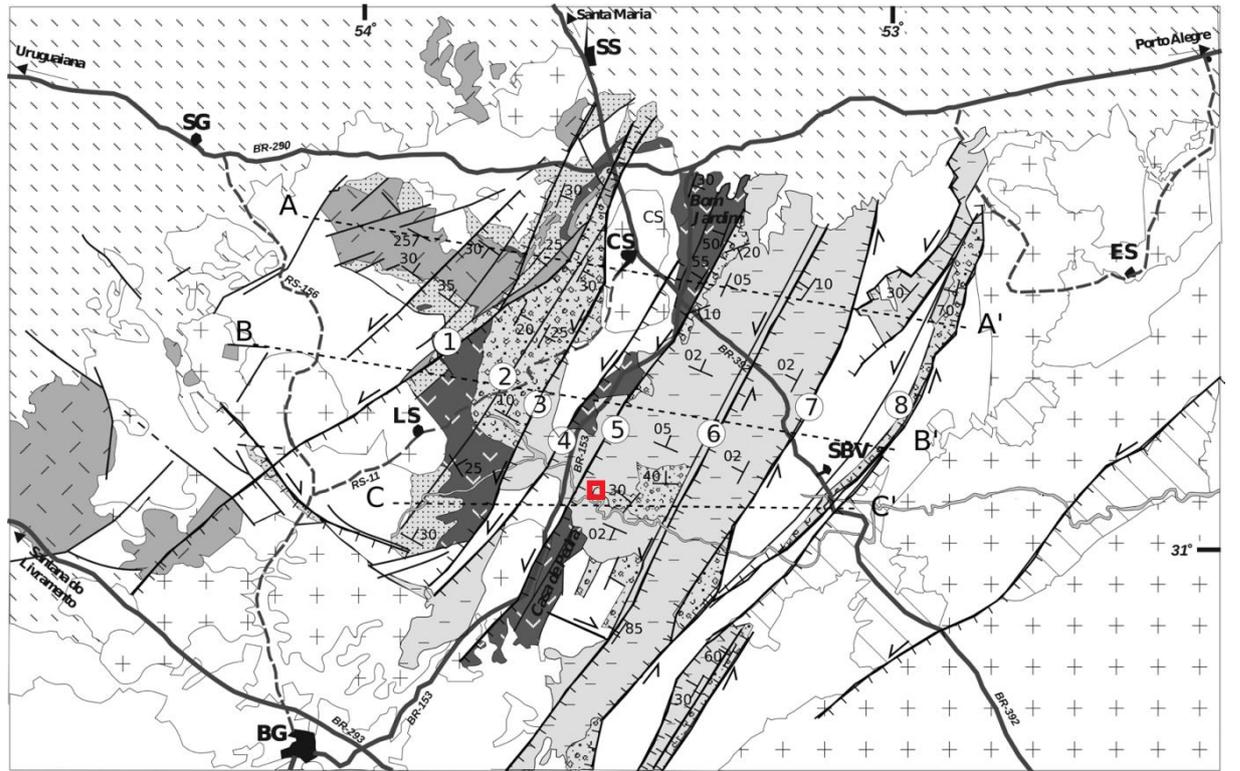
No Grupo Santa Bárbara há indícios de distensão ENE ocorrida entre 600 a 545 Ma devido a um conjunto de falhas em escala mesoscópica que afetam tanto essa unidade quanto as unidades mais antigas (ALMEIDA, R. *et al.*, 2012); e também devido a reconstruções paleogeográficas, enquanto que para os eventos seguintes há evidências estratigráficas comprovadas. Para o Grupo Guaritas há supostas evidências de distensão NW, compressão NW e distensão NE (ALMEIDA, R. *et al.*, 2012).

Como já mencionado, as unidades do Grupo Guaritas repousam em desconformidade angular sob as unidades do Grupo Santa Bárbara (*e.g.* ROBERTSON, 1966; ALMEIDA, R. *et al.* 2012). Segundo Almeida, R. *et al.* (2012), essa desconformidade está relacionada a eventos *strike-slip* que geraram falhas transcorrentes sinistrais ENE a WNW e falhas transcorrentes destrais NNE a NNW que afetaram todas as unidades do Supergrupo Camaquã, com exceção do Grupo Guaritas. O Grupo Guaritas está depositado em uma bacia do tipo rifte (*e.g.*, BICCA *et al.*, 2013). A formação desse rifte foi relacionada a falhas normais de direção NE a NNW geradas sob campo de tensão extensional (ALMEIDA, R. *et al.*, 2012).

Um evento deformacional associada a intenso falhamento ocorreu após a deposição do Supergrupo Camaquã, gerando principalmente falhas transcorrentes sinistrais NE a NNW e falhas transcorrentes destrais ENE a WNW (ALMEIDA, R. *et al.*, 2012). Essas falhas cortam o Grupo Guaritas, mas não estão registradas nas rochas sedimentares mais novas (rochas da Bacia do Paraná de idade paleozoica; ALMEIDA, R. *et al.*, 2012).

Durante o Cretáceo dois eventos magmáticos, o magmatismo Serra Geral e a intrusão de diques alcalinos (Suíte Piratini; RIBEIRO, 1970 *apud* MACHADO, 2014), podem estar relacionados a extensão NE, caracterizada por falhas normais de direção próxima a NW e falhas oblíquas relacionadas (ALMEIDA, 2005; ALMEIDA, R. *et al.*, 2012).

Figura 6 - Mapa e seções geológicas esquemáticas da Bacia do Camaquã. O polígono vermelho representa a área de estudo.



Fonte: modificado de Almeida, R. *et al.* (2012).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os fundamentos da análise estrutural e da modelagem geológica são apresentados nesse capítulo com o objetivo de produzir e apresentar os referenciais teóricos que sustentam as discussões e conclusões finais do trabalho.

4.1 Deformação e *strain*

A Geologia Estrutural se preocupa em definir a geometria, distribuição e a formação de estruturas nas rochas (FOSSEN, 2012). A análise dessas estruturas, chamada de análise estrutural, envolve uma série de atividades que são dependentes da escala de observação, que comumente são classificadas em micro (escala microscópica), meso (escala de afloramento) e macro (escalas regionais; FOSSEN, 2012). As atividades que envolvem a análise estrutural são a análise geométrica, análise dinâmica, análise cinemática e análise tectônica (DAVIS & REYNOLDS, 1996; FOSSEN, 2012), embora alguns outros autores acrescentem ainda a análise mecânica e de deformação/*strain* (VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004).

A deformação em uma rocha envolve as mudanças na configuração das rochas por meio da translação, rotação, *strain* (distorção) e/ou mudança de área ou volume (quando em três dimensões; VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004).

O termo *strain* é aplicado quando há uma distorção no corpo em resposta a uma força (VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004). Há dois tipos de *strain*, o homogêneo e o heterogêneo. O *strain* homogêneo ocorre quando dois componentes do corpo são similares em forma e orientação depois da deformação, ou seja, quando os elementos são paralelos eles permanecem paralelos até o final da deformação. O *strain* heterogêneo é mais complexo que o *strain* homogêneo e ocorre quando o volume/área não permanece constante após a deformação, que varia pontualmente (VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012).

A medida de *strain* compara a configuração inicial à final, sem levar em conta os processos intermediários durante a deformação (análise de *strain* finito). Quando os processos intermediários são analisados, a medida é denominada análise de *strain* infinitesimal (ou progressivo; VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012). Os dois tipos de deformação (*strain* homogêneo e heterogêneo) podem passar por processos diferenciados de deformação: acumulação de *strain* não-coaxial e acumulação de *strain* coaxial (VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012). A acumulação de *strain* não-coaxial reflete

a história em que a distância perpendicular ao plano de cisalhamento permanece constante, o eixo do *strain* infinitesimal gira em relação ao *strain* finito – cisalhamento simples – e a acumulação de *strain* coaxial é quando o eixo de *strain* infinitesimal permanece paralelo ao eixo de deformação finito – cisalhamento puro (VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012).

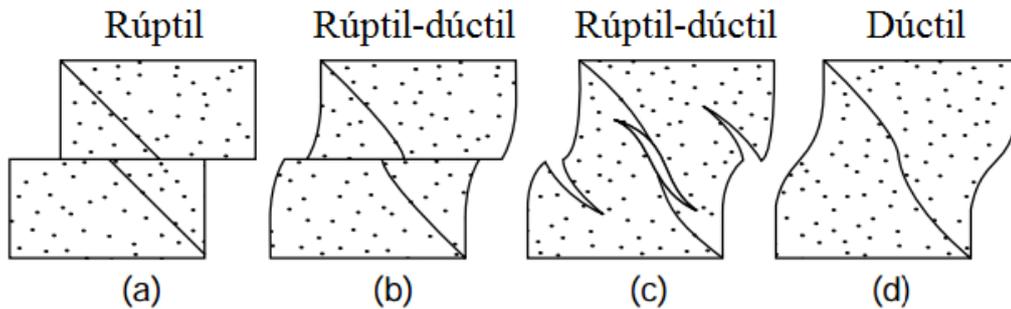
4.2 Fundamentos da Análise de Estruturas Rúpteis

Para realizar análise estrutural é necessário ter o conhecimento das estruturas presentes nas rochas em estudo. Há três tipos de estruturas: contatos, estruturas primárias e estruturas secundárias (DAVIS & REYNOLDS, 1996). Os contatos são limites que separam um corpo de rocha de outro; estruturas primárias são as estruturas que se desenvolvem durante a formação da rocha; e estruturas secundárias são estruturas geradas após a formação da rocha (DAVIS & REYNOLDS, 1996).

As estruturas primárias em rochas sedimentares correspondem em estratificações, superfície deposicional (acumulação sedimentar), estruturas de topo e base de camadas, entre outras (VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004). O acumulação sedimentar pode ser definido pela variação de cores, contraste na resistência a erosão, contraste no tamanho de grão, composição e/ou seleção da rocha (VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004).

As estruturas secundárias são geradas basicamente por dois tipos de deformação: a deformação rúptil e dúctil. A deformação rúptil ocorre quando a rocha perde as propriedades elásticas, atingindo o limite de ruptura e passa a se comportar de forma frágil (FOSSEN, 2012). Já a deformação dúctil reflete o comportamento plástico da rocha, quando o material ultrapassa o limite da elasticidade e adquire distorção permanente (Fig. 7; VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004).

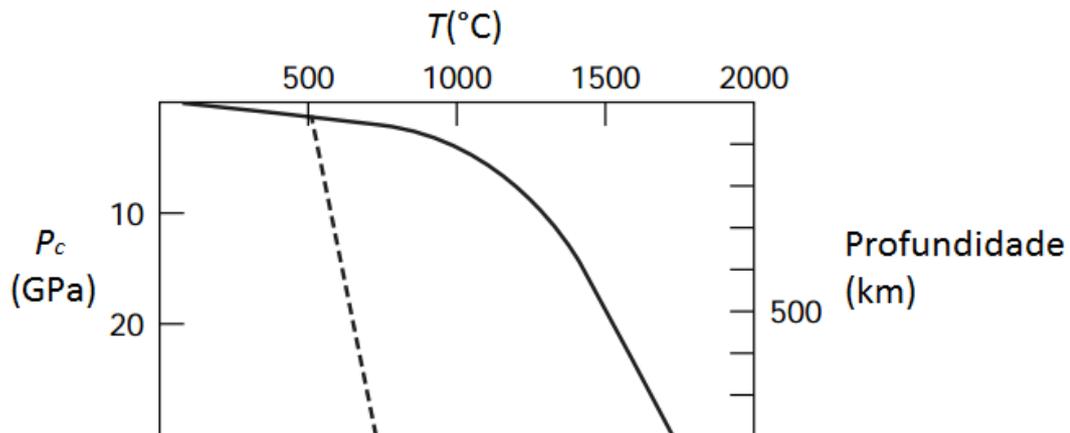
Figura 7 – Ilustração da forma na qual os materiais geológicos podem se deformar. Deformação rúptil (a), rúptil-dúctil (b, c) e dúctil (d).



Fonte: adaptado de Van der Pluijm & Marshak (2004).

Os fatores que controlam a deformação dúctil e rúptil são a pressão confinada e a temperatura. Ambos fatores aumentam com a profundidade em subsuperfície, mas a temperatura depende do gradiente geotérmico regional (Fig. 8; VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004). A deformação rúptil ocorre principalmente na crosta superior e é causada pelo rompimento das estruturas cristalinas em escala atômica, sendo que esse tipo de deformação é comumente gerada de forma mais rápida e localizada que na deformação dúctil (FOSSÉN, 2012). A deformação rúptil está relacionada ao crescimento de fraturas na rocha, onde estas são definidas como descontinuidades planas ou subplanas.

Figura 8 – Mudança da temperatura (T) e pressão (P_c) com a profundidade. Linha contínua é o gradiente geotérmico e a linha tracejada corresponde ao gradiente adiabático.



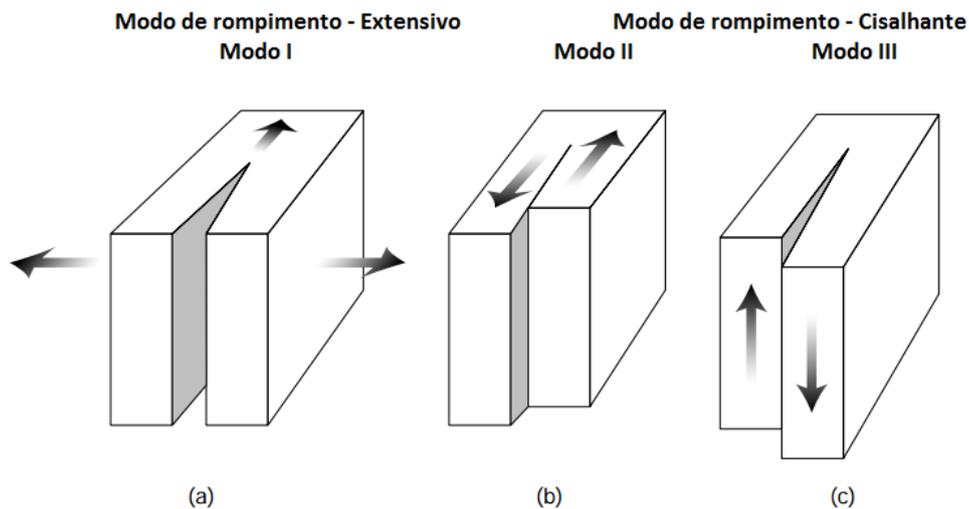
Fonte: adaptado de Van der Pluijm & Marshak (2004).

As fraturas podem se formar de três modos, conforme ilustrado na Figura 9. O modo de formação de fraturas do tipo I consiste em um movimento ortogonal as paredes da fratura, formando as fraturas extensionais (Fig. 9). O modo de formação de fraturas do tipo II desenvolve estruturas que se movimentam na mesma direção na qual a terminação da fratura

se desloca, enquanto que nas fraturas formadas pelo modo III o movimento das estruturas ocorre ortogonalmente ao movimento da terminação da fratura, ao longo do mesmo plano (Fig. 9; VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004). As fraturas formadas pelo modo II e III são classificadas como fraturas de cisalhamento (VAN DER PLUIJM & MARSHAK, 2004; FOSSEN, 2012).

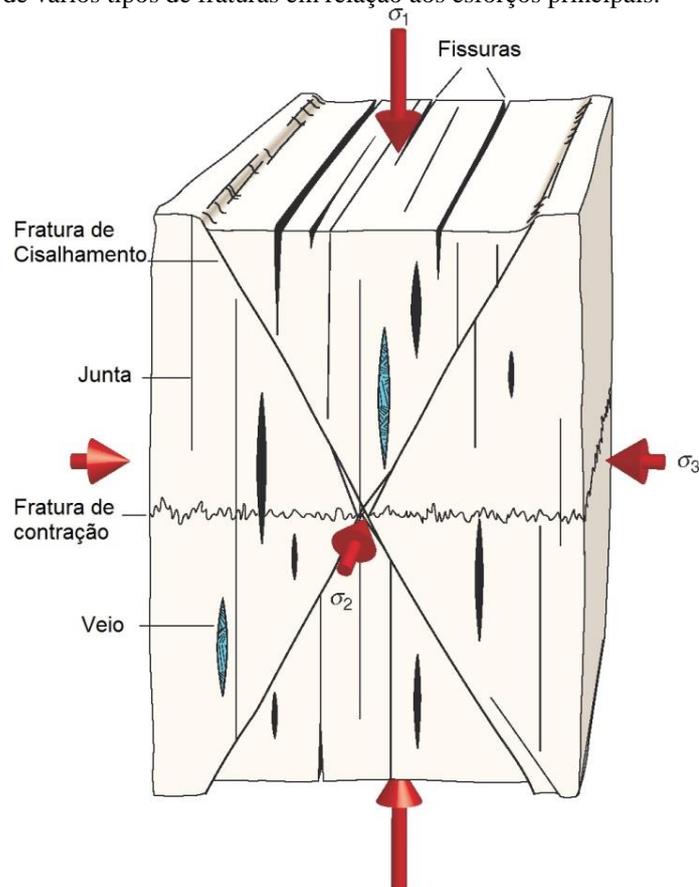
As fraturas de cisalhamento são descontinuidades onde há um significativo movimento (na escala milimétrica a decimétrica) paralelo ao plano, enquanto que o termo falha é aplicado a descontinuidades com rejeitos maiores do que 1 metro (RAMSAY & HUBER, 1987; FOSSEN, 2012). As fraturas extensionais são aquelas que apresentam prolongamento perpendicular à superfície e podem ser classificadas de duas formas: juntas, quando possuem pouco ou nenhum deslocamento em relação à superfície, e fissuras, quando preenchidas por fluido, sendo que as fissuras podem ser classificadas ainda como veios, quando forem preenchidas com minerais, e classificadas como diques, quando injetadas por magmas (Fig. 10; FOSSEN, 2012). Há ainda as fraturas contracionais ou fraturas de fechamento, que são descontinuidades geradas por contração, geralmente preenchidas por materiais residuais da rocha encaixante, como exemplo os estilólitos (Fig. 10; FOSSEN, 2012).

Figura 9 – Blocos diagramas ilustrando os três modos de rompimento deslizante da superfície: (a) modo I, (b) modo II e (c) modo III.



Fonte: adaptado de Van der Pluijm & Marshak (2004).

Figura 10 – Orientação de vários tipos de fraturas em relação aos esforços principais.



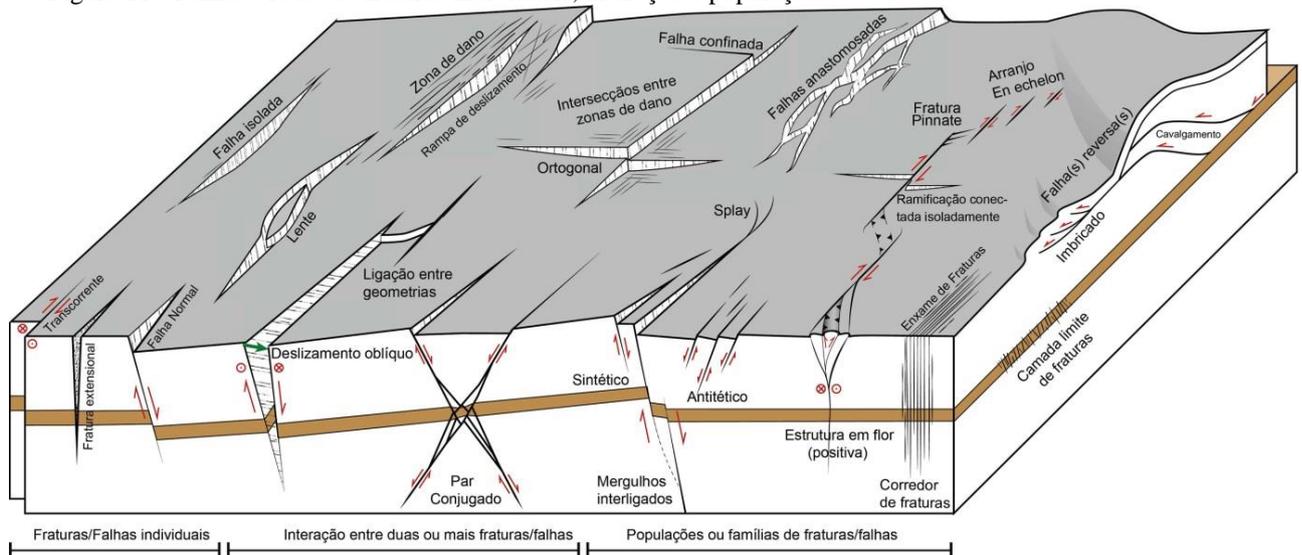
Fonte: Fossen (2012).

Peacock *et al.* (2016) publicaram um glossário de fraturas com o intuito de relacionar as diferentes falhas e redes de fraturas e como elas interagem umas com as outras. Nesse trabalho os autores classificam falhas e redes de fraturas em três principais categorias: as fraturas individuais e suas estruturas associadas; as associações e interações entre duas (ou mais) fraturas e redes de fraturas; e populações de fraturas (Figura 11; Peacock *et al.* 2016). Esses termos são ainda divididos em aspectos geológicos, geométricos, topológicos, cinemáticos e/ou mecânicos, cada um utilizado particularmente em uma etapa da análise (PEACOCK *et al.*, 2016). De acordo com Peacock *et al.* (2016), o aspecto geológico se refere as características descritivas das rochas que não necessariamente possuem relação com a geometria, cinemática e dinâmica das estruturas rúpteis. O aspecto geométrico se refere à geometria das estruturas, considerando o tamanho, a forma e/ou os padrões geológicos associados. Embora não muito usual na geologia estrutural, no glossário de Peacock *et al.* (2016) o aspecto topológico representa uma maneira de descrever a disposição e as relações geométricas entre as falhas e redes de fraturas. O aspecto cinemático se refere ao deslizamento e as deformações associadas com o desenvolvimento de feições geológicas. O

aspecto mecânico descreve as propriedades mecânicas das rochas e os processos responsáveis pela deformação rúptil.

Abaixo são descritas as principais falhas e redes de fraturas que tem relação com o presente trabalho, de acordo com Peacock *et al.* (2016; Fig. 11).

Figura 11 - Falhas e redes de fraturas individuais, interação e populações.



Fonte: modificado de Peacock *et al.* (2016).

1) Como fraturas e falhas individuais (Fig. 11), Peacock *et al.* (2016) descreveram as falhas isoladas, lentes, fraturas dos modos I, II e III, e zona de dano:

- a) As falhas isoladas são falhas ou outro tipos de fraturas que não foram afetadas pela interação com outras falhas ou outros tipos de fraturas ao longo de sua propagação, onde estas geralmente se caracterizam por um deslocamento máximo próximo ao centro;
- b) Lente, também denominada de lente de cisalhamento, está localizada dentro de uma zona de falha;
- c) Fraturas do modo I (extensão), II (*strike slip*, direcionais) e III (falha normal);
- d) Zona de dano ou rampa de deslizamento é uma zona em que ocorre uma grande mudança na estrutura ou o volume de paredes de rochas deformadas ao redor de uma superfície de falha.

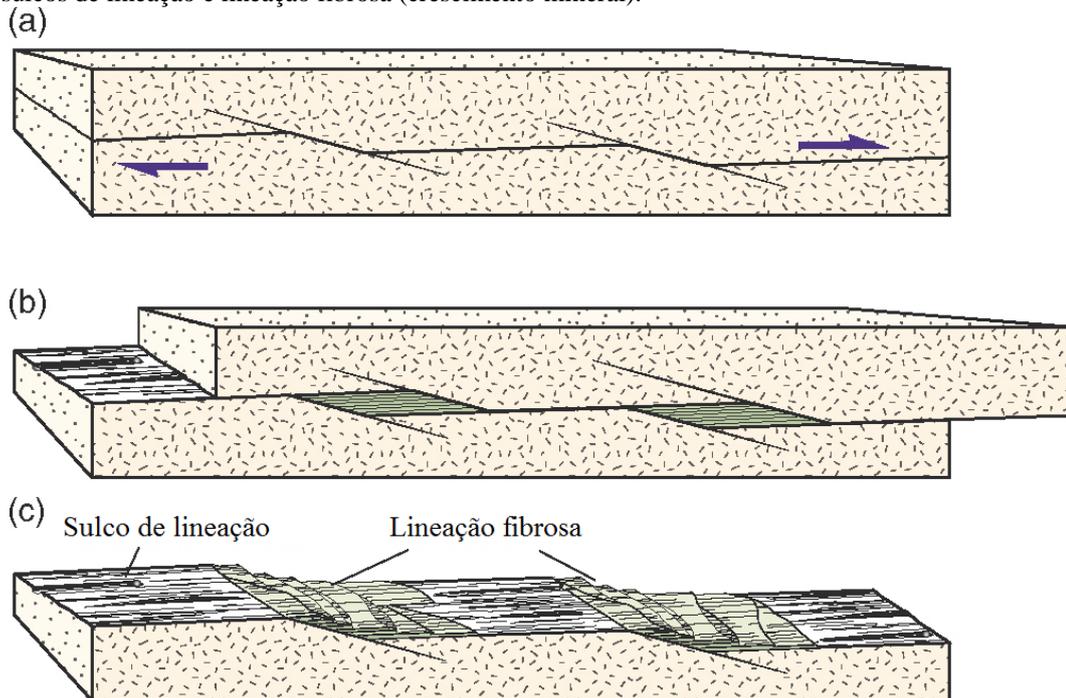
2) Como interações de duas ou mais fraturas/falhas (Fig. 11) Peacock *et al.* (2016) descreveram as de deslizamento oblíquo, falha confinada, intersecções em zonas de dano, ligação entre geometrias, ortogonal e par conjugado:

- a) A falha com deslizamento oblíquo é uma falha com deslizamento envolvendo componentes do deslizamento do mergulho e do *strike*;
 - b) Falha confinada é um termo geométrico e não significa desenvolvimento de movimento entre falhas e outras fraturas, e corresponde ao encontro de uma falha ou outro tipo de fratura a uma linha ou ponto de intersecção;
 - c) Intersecção entre zonas de dano é uma área de deformação em torno da intersecção de duas ou mais falhas;
 - d) Ligação entre geometrias é um local onde duas falhas ou outras fraturas estão conectadas em uma linha de intersecção, não precisando ter ligação cinemática (por exemplo, se uma falha ou outra fratura posterior a corta sem efeito sobre a geometria ou o padrão de deslocamento);
 - e) Ortogonal é uma feição geométrica em que linhas ou planos estão a 90° uma da outra;
 - f) Par conjugado se refere a relação entre dois conjuntos de falhas (ou juntas) que se cruzam sob o mesmo campo de tensão.
- 3) Com populações ou famílias de fraturas/falhas (Fig. 11) Peacock *et al.* (2016) descreveram os arranjos *en echelon*, cavalgamentos, fraturas limitadas a camadas, corredor de fraturas, enxame de fraturas, estruturas em flor, fraturas pinadas (*pinnates*), mergulhos interligados, imbricação, ramificação isolada, e falhas anastomosadas e reversas:
- a) O arranjo *en echelon* são elementos estruturais relativamente curtos sobrepostos ou subjacentes de falhas ou dobras que são aproximadamente paralelas entre si, mas oblíquas a zona limite que elas ocorrem;
 - b) Camadas limitadas são falhas ou outros tipos de fraturas que são restritas à um único acamamento ou camada;
 - c) Corredor de fraturas e enxames de fraturas são estruturas semelhantes, porém, o primeiro se refere à zonas tabulares com aumento intenso de faturamento visto em perfil, enquanto que o segundo se refere ao agrupamento de fraturas com pouco espaçamento com visão em mapa;
 - d) Estruturas em flor podem ser observadas de duas maneiras, estruturas em flor positiva e estrutura em flor negativa. As estruturas em flor positiva são relacionadas a falhas transpressivas e as estruturas em flor negativa são relacionadas a falhas transtrativas;

- e) Falhas anastomosadas são falhas que formam canais que se encontram e recombinaem em diversos pontos;
- f) Falhas reversas possuem inclinação maior que 30° e se caracterizam pela capa estar deslocada para cima em relação à lapa;
- g) Fraturas pinadas se desenvolvem próximas às terminações de fraturas de cisalhamento;
- h) Mergulhos interligados em profundidade são a união de duas ou mais falhas ou fraturas que estão inicialmente acopladas geometricamente;
- i) Ramificação conectada isoladamente são fraturas com um nó de conexão isolado à uma linha;
- j) Imbricação é um arranjo de falhas que se deslocam em uma falha comum, mas que não se encontram novamente para formar um duplex;
- k) Cavalgamento é uma característica geométrica em que a falha individualiza o corpo rochoso em blocos que são limitados por falhas, esses blocos acompanham a continuidade da falha pela deformação;
- l) *Splay* são características geométricas que ocorrem em terminações de falhas que estão relacionadas à uma falha maior.

As fraturas de cisalhamento (modo II e III) podem conter feições lineares assimétricas no plano da falha que são utilizadas como indicadores cinemáticos (FOSSSEN, 2012). As lineações formadas pelos processos de deformação rúptil podem indicar a cinemática relacionada ao desenvolvimento de determinada estrutura e são importantes para compreender a orientação dos esforços que produziram falhas e redes de fraturas (FOSSSEN, 2012). Há três classes de lineações: lineações penetrativas, geométricas e superficiais (FOSSSEN, 2012). As lineações superficiais são as de interesse no presente trabalho, pois são restritas a superfícies, tais como são encontradas nas falhas. Essas lineações, conhecidas como estrias de falhas, refletem o movimento do deslizamento da superfície (Fig. 12; FOSSSEN, 2012).

Figura 12 - Exemplo de lineação superficial em uma superfície de falha (a, b e c), onde são encontrados dois tipos: sulcos de lineação e lineação fibrosa (crescimento mineral).



Fonte: modificado de Fossen (2012).

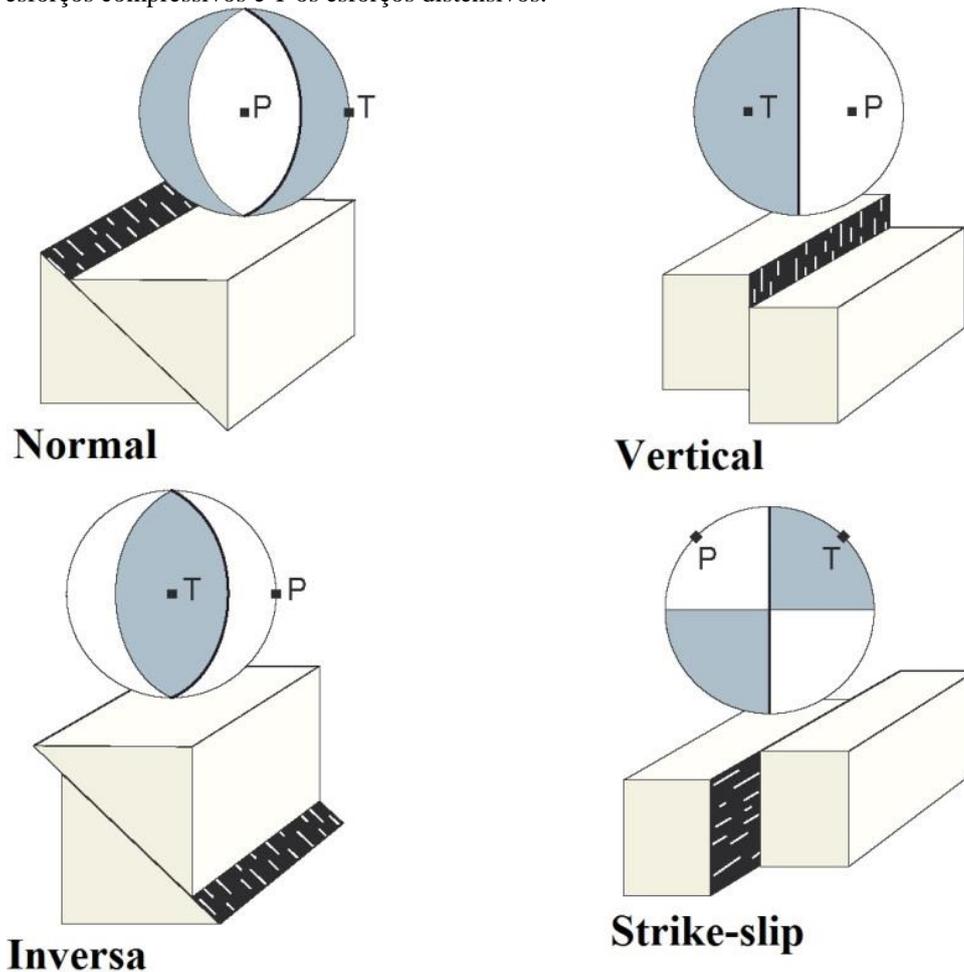
As fraturas podem ser mensuradas através de seu comprimento e orientação no espaço (RAGAN, 2009). A aquisição da orientação espacial (atitude) das estruturas planares e lineares é realizada com o objetivo de entender a relação espacial entre as estruturas, a cinemática envolvida nos processos de deformação e a relação com os esforços (RAGAN, 2009). O grau de precisão do instrumento utilizado para a aquisição da orientação espacial das estruturas, a experiência e dificuldade do analista em utilizar o instrumento (acurácia) e as irregularidades naturais das estruturas são os principais fatores que ocasionam erros de aquisição. Para correção destes erros podem ser utilizados métodos de análise, como realizar a aquisição da mesma estrutura diversas vezes e calcular a acurácia do analista, ou utilizar tratamento estatístico para tomar a decisão de descartar a medida ou considerá-la como anômala nos dados (RAGAN, 2009).

4.3 Determinação de Paleotensores

A determinação de paleotensores relacionados a dados de falhas e fraturas é realizada utilizando a geometria e cinemática das estruturas (DELVAUX *et al.*, 1995). Existem algumas abordagens que podem ser utilizadas, dentre elas o Método dos Diedros Retos. A análise de paleotensores utilizando o Método dos Diedros Retos consiste em particionar a deformação ao

redor de uma falha em quatro campos de esforços, dois compressivos (P) e dois distensivos (T). Cada um desses campos de esforços é limitado por um diedro reto, que é um plano orthogonal ao plano de falha onde estão contidas as estrias e que são classificadas como planos auxiliares (Fig. 13; ANGELIER, 1989; TROTTA, 2004).

Figura 13 - Projeções estereográficas dos principais tipos de fraturas cisalhantes (falhas) com lineações. Onde P, são os esforços compressivos e T os esforços distensivos.

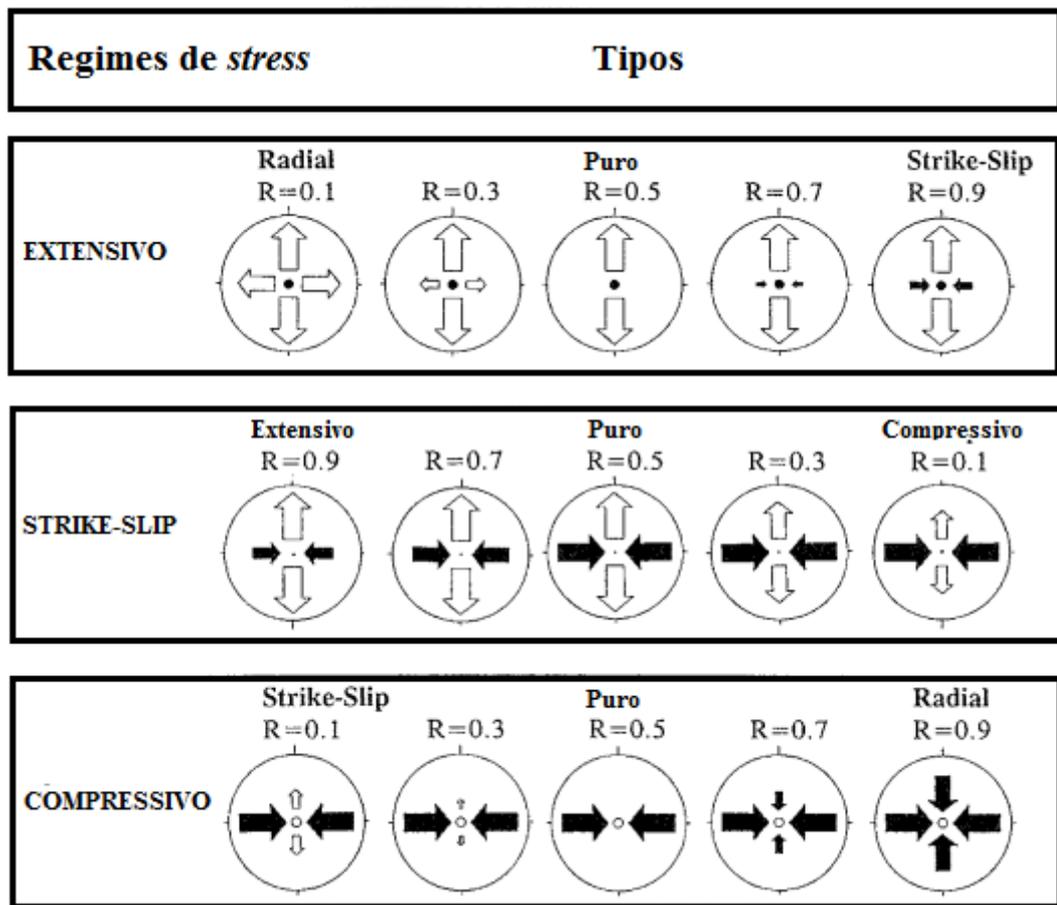


Fonte: modificado de Fossen (2012).

O campo de esforços é um conjunto de três esforços principais, que por definição são denominados σ_1 , que representa o esforço principal máximo; σ_2 , que representa o esforço principal intermediário; e σ_3 , que representa o esforço principal mínimo (FOSSSEN, 2012). Assim, por convenção: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ para o esforço triaxial (FOSSSEN, 2012). As diferentes magnitudes desses três esforços é dada pela relação da diferença dos esforços principais. Essa relação varia de 0 a 1 e é definida como: $R = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$ (ANGELIER, 1989).

A partir da razão R , os regimes de esforços podem ser classificados como: extensionais, *strike-slip* (direcionais) e compressivos. Os regimes extensionais podem ser radiais, puros ou direcionais; os regimes *strike-slip* podem ser extensivos (transtrativos), puros ou compressivos (transpressivos); e os regimes compressivos podem ser direcionais, puros e radiais de acordo com os tensores de esforços (Fig. 14; DELVAUX *et al.*, 1995).

Figura 14 – Tipos de regimes de esforços (*stress*). As setas indicam o azimute do eixo de esforço horizontal, com o seu comprimento de acordo com a magnitude do esforço, em função do R . As setas divergentes (brancas) indicam eixos extensivos de esforços e as setas convergentes (pretas) indicam eixos compressivos de esforços. Eixos de esforços verticais são simbolizados por um círculo sólido para regimes extensivos, tracejados para regimes *strike-slip* e círculo vazio para regimes compressivos.



Fonte: modificado de Delvaux *et al.* (1995).

No método dos Diedros Retos os quadrantes extensionais e compressionais são determinados de acordo com a orientação do plano e a linha de deslizamento (DELVAUX & SPERNER, 2003). Esses quadrantes são plotados e definidos valores de contagem (CV – *counting values*) de 100% para as orientações da malha que coincidem com quadrantes extensionais e CV de 0% para as orientações que coincidem com o quadrante compressional. Esse procedimento é repetido para todos os dados e a orientação possível do σ_1 e σ_3 são

definidos como a contagem das orientações médias do conjunto que tem valores de 0% e 100% (DELVAUX & SPERNER, 2003).

O Método dos Diedros Retos pode ser implementado utilizando o *software* Win-Tensor (DELVAUX, 2011), que além das projeções estereográficas, regimes de *stress* e valor de R, também apresenta o valor de Desvio da Contagem (*counting deviation* – CD) e QW. O CD é um parâmetro importante que estima o grau de compatibilidade individual dos conjuntos contados com a contagem das orientações médias do conjunto. O CD é a média de todos os dados nas diferentes contagens do conjunto e é expresso em porcentagem, onde baixos valores de CD contribuem de forma positiva e altos valores contribuem de forma negativa para a contagem (DELVAUX & SPERNER, 2003). O valor de QW é o *ranking* de qualidade definido pelo Projeto do Mapa de *Stress* Global (*World Stress Map Project*; SPERNER *et al.*, 2003). Esse *ranking* tem sido definido a partir de quatro critérios de qualidade, entretanto a qualidade dos dados é dependente de outros fatores que são definidos em outras cinco subclasses: número de dados, porcentagem dos dados no local, confiabilidade dos dados, oscilação dos valores dos dados e tipos de dados (SPERNER *et al.*, 2003). O valor dos dados é então classificado em uma das cinco categorias: A, B, C, D e E (SPERNER *et al.*, 2003).

4.4 Revisão do Conceito de Modelagem Geológica

A modelagem geológica consiste em representar a geometria das estruturas geológicas em um modelo gráfico ou matemático (GROSHONG, 2006). A representação pode ser realizada em duas (perfil ou mapa geológicos) ou em três dimensões (bloco diagrama e/ou volumes). A modelagem geológica é a reconstrução mais simplificada do que a geometria natural das unidades geológicas (GROSHONG, 2006). As incertezas do modelo geológico construído com base em dados estruturais estão relacionadas a diversos fatores, como a exposição limitada das estruturas na superfície da Terra, a dificuldade em obter informações de subsuperfície, a completitude do registro geológico, entre outros.

A modelagem geológica é uma ferramenta importante para diversas áreas que utilizam recursos naturais, como na mineração, na exploração petrolífera e de recursos hídricos, no estudo de contaminantes de solos e aquíferos, na geologia de engenharia. Tendo também importância no âmbito acadêmico para a compreensão das relações estruturais entre unidades geológicas e da deformação (BERRA *et al.*, 2014).

Basicamente, a modelagem geológica tridimensional (3D) pode ser dividida em modelagem explícita e modelagem implícita (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1990; COWAN *et al.*, 2003; VOLLGER *et al.*, 2015).

A modelagem explícita é o método mais tradicional da geologia estrutural, utilizado para a construção de modelos tridimensionais onde limites e estruturas geológicas (contatos) são digitalizados em mapas e seções e posteriormente conectados para gerar corpos e superfícies em 3D (*e.g.*, VOLLGER *et al.*, 2015). A digitalização dos limites e das estruturas geológicas é realizada de forma manual ou semimanual. A modelagem implícita, por sua vez, consiste na aplicação de algoritmos matemáticos que descrevem o conjunto de dados e interpolam os dados para a geração de um volume (campo escalar e vetorial; Cowan *et al.*, 2003; VOLLGER *et al.*, 2015).

Esse método é mais simples que a modelagem implícita, porém o tempo gasto para a construção do modelo geológico por meio deste método é maior. A construção do modelo na modelagem implícita é feita através da interpolação de pontos na superfície através de algoritmos, proporcionando um ajuste mais regular ao modelo. Alguns *softwares*, como o *Mine Sight Implicit Modeler*, utilizam o algoritmo Função de Base Radial (RBF) para construção destes modelos (COWAN *et al.*, 2003; VOLLGER *et al.*, 2015).

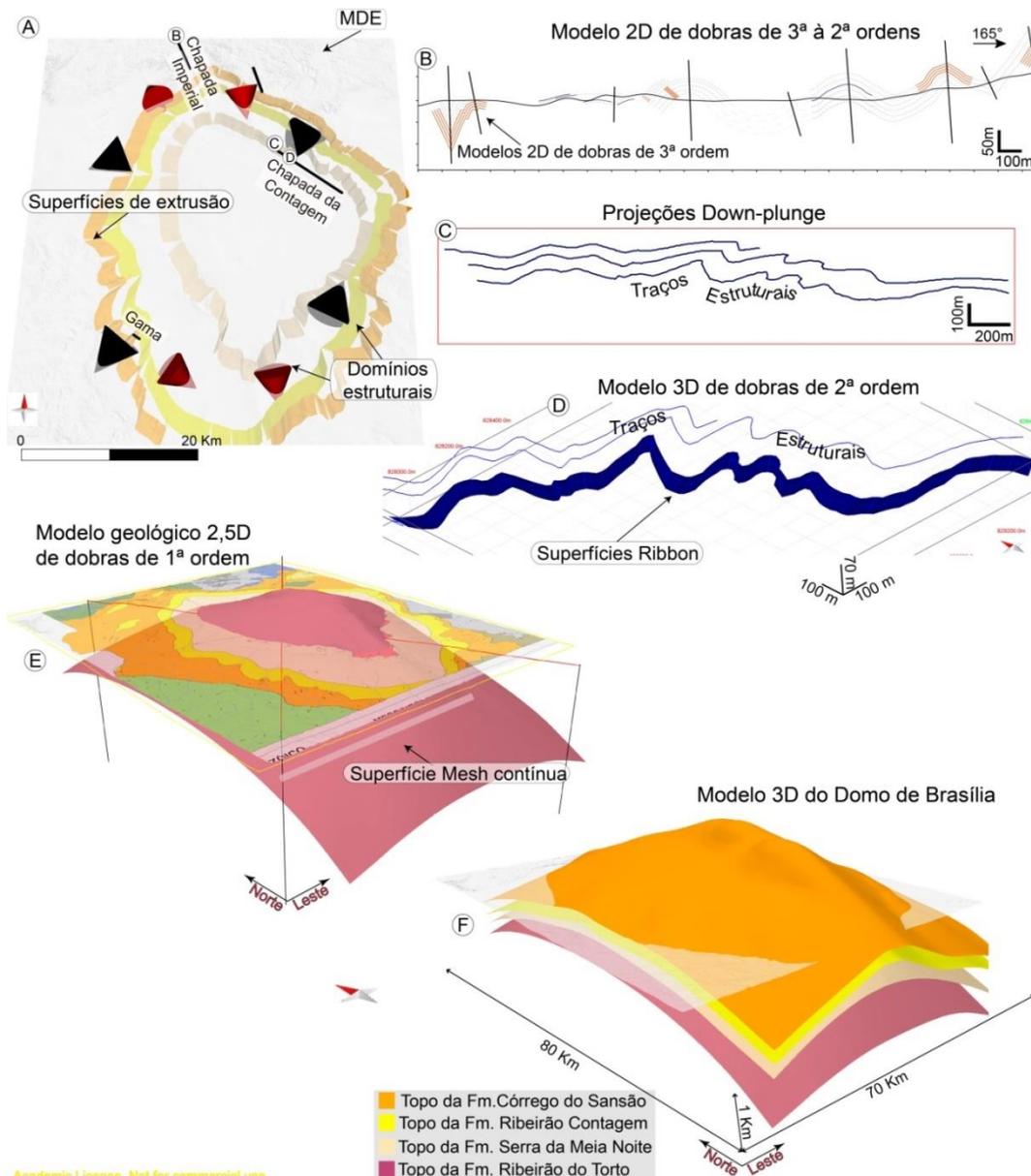
A modelagem geoestatística une o aspecto espacial e o aspecto aleatório da variável de interesse e é mais utilizada na área da mineração para detectar regiões com maior concentração de minério (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1990). As etapas desse modelamento envolvem a construção do variograma, o qual demonstra as direções de maior continuidade da variável em estudo, e as técnicas de krigagem, que estimarão valores não amostrados na área (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1990).

Nesse trabalho será utilizada a modelagem explícita, utilizando o *software* Move™. Nesse programa é possível integrar dados de diferentes fontes, construir de seções, superfícies e modelos tridimensionais, utilizando ferramentas manuais ou automáticas para essa finalidade. Há ainda a opção para um estudo mais detalhado do modelamento cinemático, geoquímico e estrutural, como também análises de *stress* e de falhamento (Midland Valley-Move™, 2016).

No Brasil esse *software* ainda é pouco utilizado, contudo existem alguns trabalhos publicados, tais como Guedes (2012), Silva (2014) e Kumaira (2016). A dissertação de mestrado de Kumaira (2016) foca na análise e modelagem estrutural explícita no Domo de Brasília. Em sua dissertação, Kumaira (2016) integrou dados topográficos e de sensoriamento,

dados de campo de estruturas planares e lineares nas unidades litológicas, e dados bibliográficos (Fig. 15).

Figura 15 - Estratégia de modelagem geológica explícita aplicada na tese de dissertação de Kumaira (2016). Em A) é mostrado o MDE com as superfícies de extrusão, em B) um exemplo de modelo 2D de dobras de 3ª à 2ª ordens correspondente ao perfil Chapada Imperial; em C) a projeção em *down-plunge* de traços estruturais no perfil Chapada da Contagem; em D) exemplo de modelo 3D de dobras de 2ª ordem na Chapada da Contagem pelo método 3D *Ribbon*. Em E) modelo geológico 2,5D de dobras de 1ª ordem. O mapa geológico está drapeado ao DEM e a superfície 3D do topo da Formação Ribeirão do Torto é mostrada; e em F) o modelo tridimensional do Domo de Brasília.



A dissertação de mestrado de Guedes (2012) propôs investigar a influência da geometria de falhas na formação de dobras nos sedimentos da Formação Pendência, pertencente à fase rifte da Bacia Potiguar, na região de Falha de Baixa Grande. O trabalho de

conclusão de curso de Silva (2014) fez uma modelagem geológica-geotécnica em um túnel de adução em uma hidrelétrica em Guanhães – MG, com enfoque na estabilidade geotécnica e de taludes no interior da região de desemboque do túnel.

Alguns artigos como de Vollger *et al.* (2015) estudam através da modelagem implícita a evolução no domo regional e o seu controle na distribuição de minério no depósito de ouro de Navachab, na Namíbia.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho envolveu as etapas de revisão bibliográfica, aquisição, análise, interpretação e integração dos dados e construção do modelo geológico-estrutural tridimensional para a área de estudo. A seguir são descritas as etapas e os materiais utilizados no presente trabalho.

5.1 Levantamento bibliográfico

Com o objetivo de construir a base para o estudo foram reunidos trabalhos anteriores enfocando a evolução geológica regional e local e os trabalhos relacionados as ferramentas utilizadas. Foi realizada pesquisa sobre os principais trabalhos desenvolvidos na área de estudo, que vão desde trabalhos pioneiros, realizados em meados da década de 1960, até trabalhos mais recentes.

Para a revisão bibliográfica da área de estudo e revisão dos conceitos da geologia estrutural, análise estrutural, rochas sedimentares e suas estruturas, e a modelagem geológica tridimensional, foram utilizados livros e artigos que auxiliaram no conhecimento e estrutura para a realização deste trabalho.

5.2 Levantamento de dados

Foram utilizadas duas escalas para levantamento dos dados: macroscópica e mesoscópica. A escala macroscópica consiste na análise por sensoriamento remoto, envolvendo a identificação de lineamentos e contatos geológicos. Essa análise foi realizada no intervalo de escalas entre 1:25.000 e 1:5.000. A escala mesoscópica consiste na análise estrutural e litológica realizada em campo.

Para ambas as escalas foram desenvolvidos bancos de dados em Sistema de Informação Geográfica (SIG).

5.2.1 Análise macroscópica

Na análise macroscópica foram utilizadas imagens de satélite obtidas no *software* Google Earth Pro para busca de pontos interessantes para visitação em campo para análise mesoscópica e também para a constru o do mosaico de imagens de satélite.

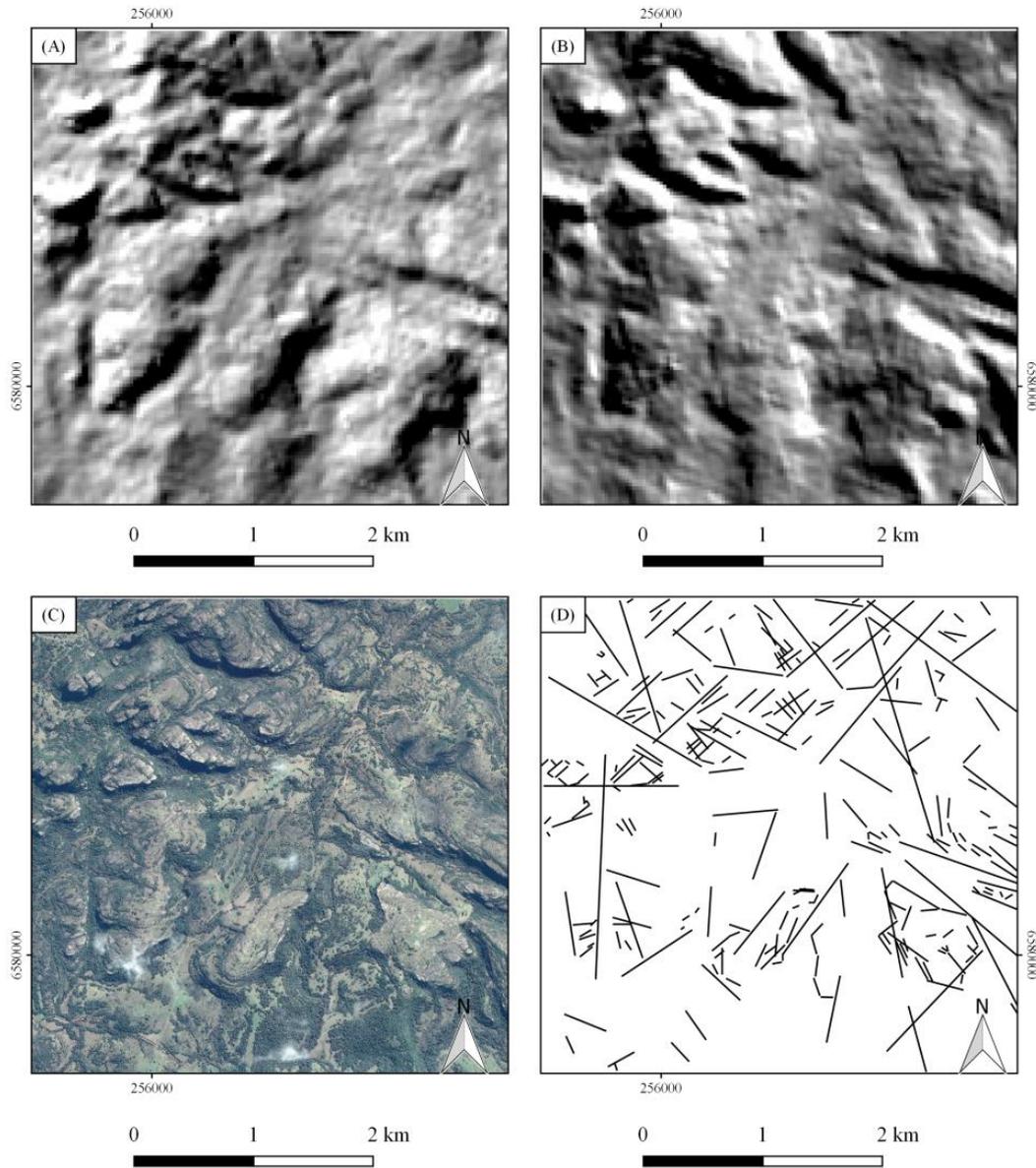
O mosaico foi construído com 16 imagens de satélite do Google Earth Pro (CNES/Astrium 2016) e cada uma na escala 1:5.000. O mosaico foi construído no Adobe Illustrator CC 2015 *Tryout* e exportado em formato PNG para que fosse georreferenciado. O georreferenciamento foi feito no *software* Qgis 2.14 utilizando a transforma o polinomial 2, a qual permite certa curvatura no georreferenciamento (QGIS, 2016), e adotou-se o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercador e o datum SIRGAS 2000 zona 22S.

Foi desenvolvido um banco de dados em ambiente SIG com arquivos vetoriais (gerados pela autora) e arquivos *rasters* (imagens). As imagens que compõem o banco de dados SIG são o mosaico de imagens de satélite e o Modelo Digital de Eleva o (MDE), gerado a partir da imagem SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) com resolu o espacial de 1 arco de segundo (30 metros) adquirida no Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) utilizando a ferramenta *Earth Explorer*.

Através do MDE foram obtidos dois Mapas de Relevo Sombreado (MRS), construídos com azimutes de ilumina o diferentes: 045  (NE) e 315  (NW). Esses dois azimutes foram escolhidos para evidenciar os lineamentos principais, de dire o NE utilizando azimute de ilumina o NW, e de dire o NW utilizando azimute de ilumina o NE.

A partir do mosaico de imagens de satélite e dos MRS, foram extraídos os lineamentos na área de estudo (Fig. 16), de acordo com os critérios propostos por Chiang (1984). A identifica o de fei oes lineares   feita com base na combina o de elementos retilíneos do relevo observáveis nas imagens, tais como: linhas ou segmentos em escarpas; alinhamentos de cristas, vales e trechos de rios; depressões alongadas; ou diferenças texturais e de tonalidade (alinhamento da vegeta o ou linhas com diferenças na umidade do solo; CHIANG, 1984). Os segmentos de lineamentos devem ser tratados individualmente para evitar inferências errôneas nos dados (CHIANG, 1984).

Figura 16—Em (A) mapa do relevo sombreado com azimute de iluminação para 45°, em (B) mapa do relevo sombreado com azimute de iluminação para 315°, em (C) Mosaico das imagens de satélite do Google Earth Pro e em (D) mapa dos lineamentos.



Fonte: autora.

Com os lineamentos digitalizados, foram calculados os comprimentos e azimutes de cada lineamento através da Calculadora de Campo na Tabela de Atributos do Qgis 2.14, com o intuito de classificar e analisar a relação entre os conjuntos de lineamentos e construir mapas e diagramas. A partir desses dados foram gerados seis mapas com direções de intervalos de 30° em azimute: 1) NNE–SSW (0° a 30° de azimute), 2) NE–SW (30° a 60° de azimute), 3) ENE–WSW (60° a 90° de azimute), 4) NNW–SSE (330° a 360° de azimute), 5) NW–SE (300° a 330° de azimute), e 6) WNW–ESE (270° a 300° de azimute).

Para análise dos lineamentos foram gerados histogramas de frequência dos comprimentos e dos azimutes, gráfico de dispersão do azimute pelo comprimento dos lineamentos e um diagrama de roseta. A análise dos histogramas permite identificar quais são as direções e os comprimentos mais frequentes na área de estudo, e a análise do gráfico de dispersão permite estabelecer a relação entre as direções e os comprimentos. O diagrama de roseta é a ferramenta mais usual para análise direcional de lineamentos, na qual os lineamentos são representados por suas direções e a porcentagem de lineamentos em uma determinada área. Para a construção dos gráficos foi utilizada a ferramenta de criação de gráficos do Excel e para a construção do diagrama de roseta foi utilizado o *software* OpenStereo (GROHMANN *et al.*, 2011).

5.2.2 Análise mesoscópica

As etapas de campo foram realizadas a partir de parte da análise macroscópica e da observação de pontos interessantes para visita em campo com as imagens do Google Earth Pro.

Em campo foi realizada a aquisição de dados para a análise estrutural, com a coleta de medidas estruturais (acamamento, lineações, fraturas extensionais e de cisalhamento), construção de croquis das estruturas, documentação através de fotografias e descrição da geometria e cinemática (quando possível) das estruturas na caderneta de campo. As medidas foram anotadas na notação *Dip direction*. Em campo também foi realizada a análise das formas de relevo por meio de croquis e fotografias.

Os equipamentos utilizados no trabalho de campo para aquisição dos dados foram:

- GPS Garmim Map 60 CSx;
- Bússola Brunton GeoPocket (Acurácia azimutal $\pm 1/2^\circ$ com 1° de graduação e acurácia do mergulho $\pm 1/2^\circ$ com 1° de graduação);
- Clinômetro Suunto PM-5/360 PC (precisão $1/4^\circ$);

Foram coletadas 11 amostras de rocha para análise em laboratório, adquiridas 68 medidas de acamamento sedimentar, 345 medidas de fraturas extensionais, 10 medidas de fraturas de cisalhamento e 8 medidas de lineações das fraturas de cisalhamento.

5.3 Análise dos dados

A etapa de análise dos dados envolve a integração das duas etapas anteriores (levantamento bibliográfico e levantamento dos dados) para posterior interpretação. A análise dos dados foi realizada em duas etapas: análise estrutural e análise petrográfica em amostras de mão.

Foram criadas quatro planilhas no programa Excel para o processamento das atitudes estruturais e construção de diagramas: planilha dos pontos (com a descrição do ponto, medidas estruturais e coordenadas), planilha das medidas de fraturas extensionais, planilha das medidas das fraturas de cisalhamento e lineações, e planilha das medidas de acamamento sedimentar. As planilhas de dados foram utilizadas para a construção dos estereogramas utilizando o *software* OpenStereo e para a determinação dos paleotensores utilizando o *software* Win-Tensor. As planilhas também foram utilizadas para o carregamento dos dados no *software* Move™ para a construção do modelo 3D.

5.3.1 Análise estrutural

A análise estrutural foi realizada com o intuito de determinar a geometria e cinemática das estruturas individuais e a relação entre as estruturas. Esses dados foram utilizados para a construção do modelo geológico 3D.

Para a análise da orientação espacial das estruturas observadas em campo foram utilizadas as ferramentas do Excel para a análise estatística e os programas OpenStereo e Win-Tensor para construção dos estereogramas. As estruturas analisadas nessa etapa foram: acamamento, fraturas extensionais e de cisalhamento e as estrias de falha. Para a análise da localização espacial foram gerados mapas estruturais utilizando o SIG.

Para os dados estruturais de acamamento e fraturas extensionais foram criadas planilhas compostas de cinco colunas com os seguintes dados: ponto, coordenada X, coordenada Y, direção de mergulho, mergulho e tipo de estrutura/unidade. Para os dados das fraturas cisalhantes foram criadas planilhas com os seguintes dados: ponto, coordenada X, coordenada Y, direção de mergulho, mergulho e tipo de estrutura/unidade, além também dos dados das lineações (direção do *plunge* e *plunge*) para as respectivas fraturas de cisalhamento.

Os dados de acamamento foram divididos em duas tabelas, de acordo com a unidade a qual pertencem com base na descrição litológica do Grupo Guaritas e do Grupo Santa

Bárbara, e foi gerado um estereograma para cada unidade. Os dados das fraturas extensionais foram agrupados de acordo com sua localização espacial e assim foram divididos em oito áreas. Para cada agrupamento foram gerados estereogramas. Os dados das fraturas de cisalhamento foram analisados no Win-Tensor juntamente com as lineações (estrias) observadas em 8 das 10 fraturas de cisalhamento. Essa análise permitiu o estudo da cinemática e dos paleotensores compatíveis com as estruturas observadas.

5.3.2 Análise petrográfica em amostras de mão

Nesta etapa as amostras de mão foram descritas levando-se em consideração a sua forma de ocorrência em campo, sua mineralogia e aspectos texturais e estruturais. As rochas foram posteriormente classificadas e relacionadas com as unidades que ocorrem na área de estudo.

5.4 Modelagem geológica

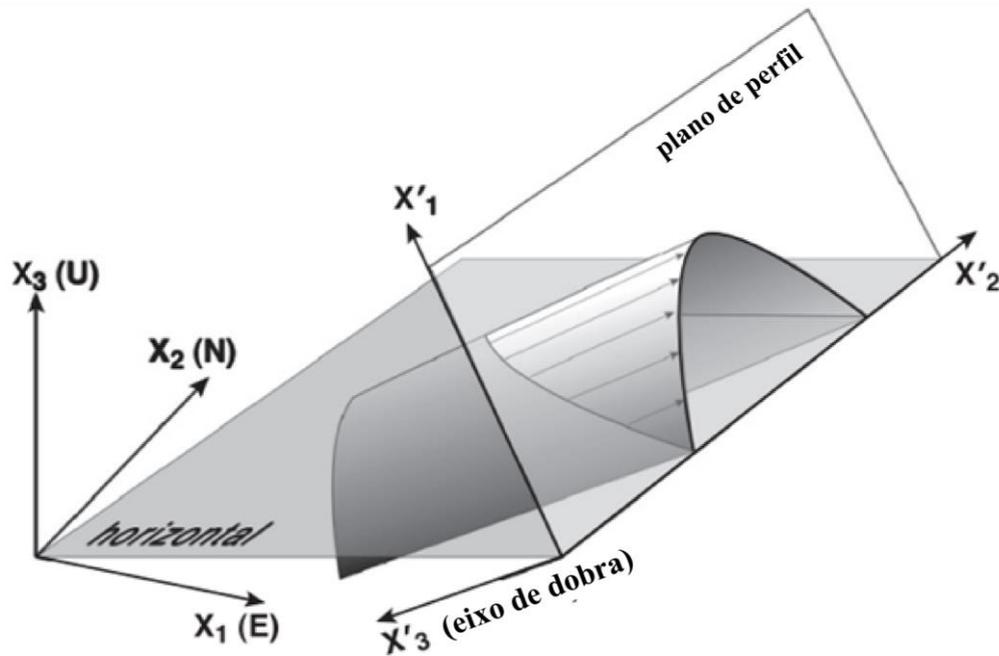
O modelo geológico-estrutural foi construído no Move™ com a integração dos dados de campo, mosaico de imagens de satélite do Google Earth Pro, MDE e os lineamentos digitalizados.

O MDE foi importado no Move™ na forma de uma malha regular de pontos (*grid*) representado em 3D e sobreposto à imagem de satélite para a geração do Modelo Digital do Terreno (MDT). Os dados de campo e os lineamentos foram carregados na forma de pontos e linhas e projetados sobre o MDT para a obtenção das coordenadas Z (elevação). Os contatos geológicos traçados em mapa foram também projetados sobre o MDT para a obtenção do Mapa Geológico 3D.

Os dados de acamamento inseridos no Move™ foram utilizados para a construção de quatro seções geológicas, sendo duas referentes às unidades do Grupo Guaritas e duas referentes às unidades do Grupo Santa Bárbara.

Foram construídas seções inclinadas para a representação da geometria verdadeira das dobras. Essas seções correspondem aos perfis das dobras e são chamadas de projeções *down-plunge*, conforme mostrado na Figura 17 (RAGAN, 2009; ALLMENDINGER *et al.* 2012).

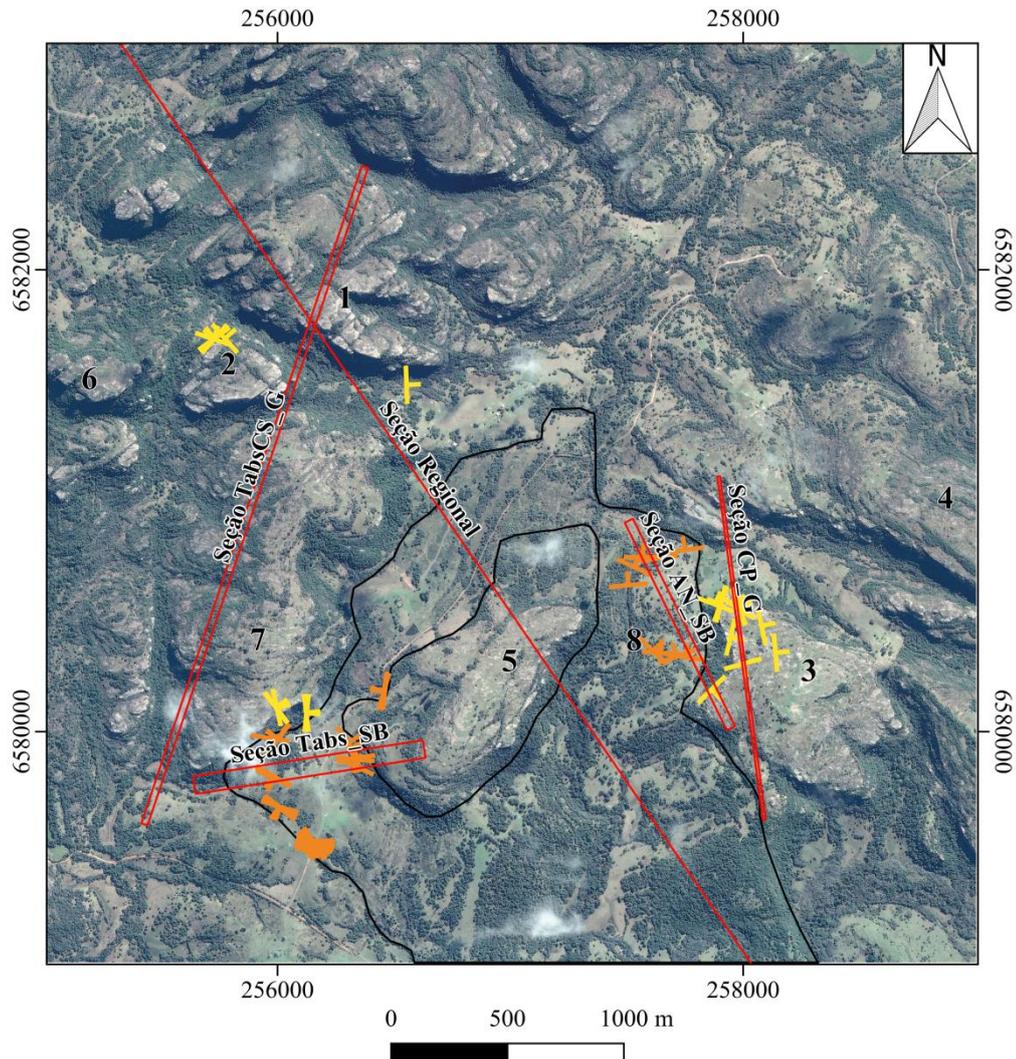
Figura 17 – Ilustração das projeções *down-plunge*. A coordenada dos pontos (contatos geológicos, por exemplo) no sistema de coordenadas cartesianas é projetado no plano ortogonal ao eixo da dobra (plano de perfil), no sistema de coordenadas correspondente ao eixo da dobra regional.



Fonte: modificado de Allmendinger *et al.* (2012).

As áreas escolhidas para a construção das seções foram: Arroio dos Negros (Seção AN_SB) e Tabuleiro – Tabuleirinho (Seção Tabs_SB) para o Grupo Santa Bárbara e Tabuleiro – Cerrinho – Toca do Sibirino (Seção TabsCS_G) e Cerro de Pedra (Seção CP_G) para o Grupo Guaritas (Fig. 18).

Figura 18 - Localização das seções construídas no Move™.



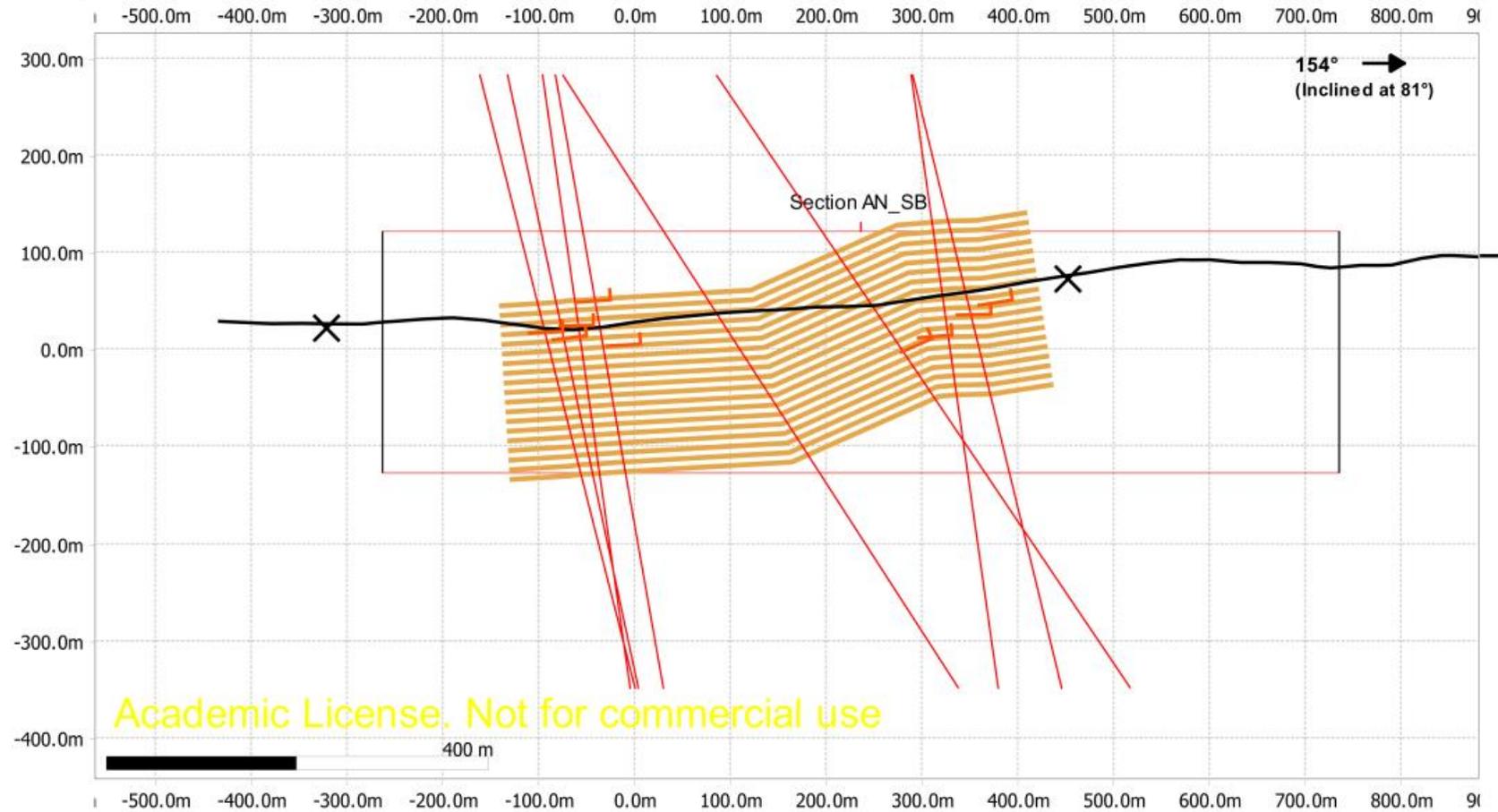
Valor	Localidade
1	Toca do Sibirino
2	Cerrinho
3	Cerro de Pedra
4	Cerro Comprido
5	Tabuleirinho
6	Pedra da Tartaruga
7	Tabuleiro
8	Arroio dos Nobres

Legenda	
	Seções construídas no Move
	Acampamento do Grupo Guaritas
	Acampamento do Grupo Santa Bárbara
	Contato litológico

Fonte: autora.

A etapa para a construção das seções inicia com a definição do eixo das dobras regionais (*plunge*), realizada em estereogramas. Para esse processo foi utilizada a ferramenta Stereonet no Move™ através da opção do plano que melhor se ajusta aos dados (*Suggested Best Fit Orientation*), que mostra o plano que melhor se ajusta aos dados estruturais. Para cada perfil construído, a direção da seção foi dada pelo *strike* do plano que melhor se ajusta às medidas estruturais nas áreas escolhidas para as seções.

Figura 19 - Exemplo de seção inclinada criada no Move™. Na imagem está a seção inclinada localizada no Arroio dos Negros com as medidas estruturais de acamamento do Grupo Santa Bárbara. As retas vermelhas são as bissetrizes geradas pelo método *Kink Band*, a linha preta é a topografia do SRTM projetada na seção, o X são as intersecções do contato do Grupo Santa Bárbara com o Grupo Guaritas na seção.



Fonte: autora

Após criadas as seções, as medidas estruturais de acamamento foram projetadas nas seções na direção do mergulho do eixo das dobras regionais (*down-plunge*). Com as atitudes projetadas, foi utilizada técnica semi-automática para a construção das camadas (dobradas ou não) a partir da ferramenta de construção de camadas (*Horizons From Template*). O método *Kink Band* foi utilizado na construção das superfícies deposicionais. O método *Kink Band* é utilizado para representar dobras e é baseado na definição da bissetriz do ângulo formado por dois domínios de mergulhos distintos (Fig. 19; DUTCH, 2012; KUMAIRA, 2016).

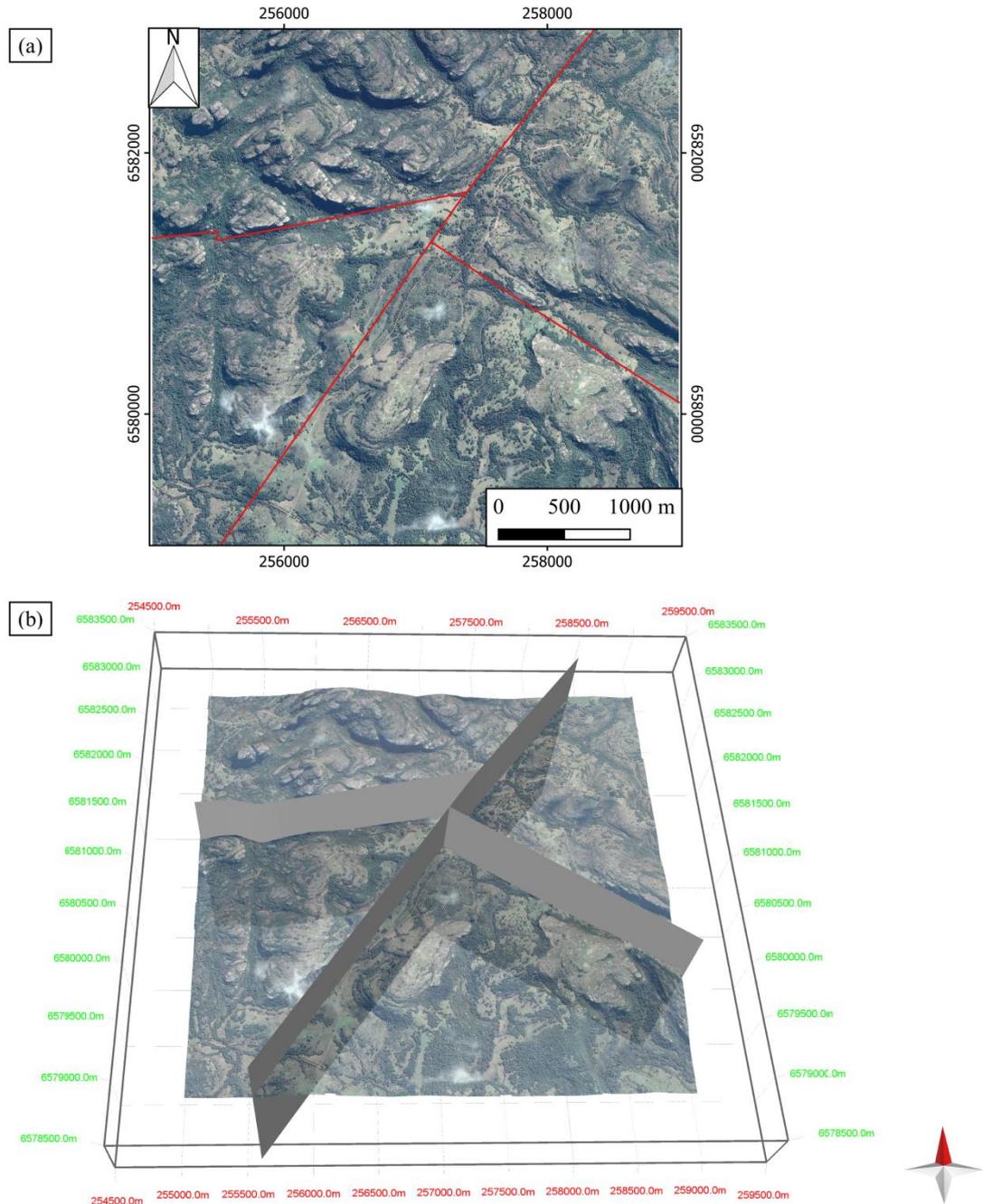
Os contatos litológicos foram projetados nas seções. Com o contato projetado foram traçadas linhas retas em cada seção unindo os pontos de contato, buscando delimitar o contato da base do Grupo Guaritas (topo do Grupo Santa Bárbara; Fig. 19). Foram geradas assim quatro linhas, uma para cada perfil. Essas linhas foram projetadas em 3D para a criação da superfície estrutural (discordância), utilizando o mesmo mergulho do eixo das dobras regionais determinado para a construção dos perfis *down-plunge*.

5.4.1 Divisão em blocos estruturais

Os procedimentos descritos acima produziram os modelos geológicos em 2D. A integração dos quatro modelos 2D (seções estruturais) com os dados de lineamentos permitiu a delimitação de quatro blocos estruturais e a construção do modelo 3D para a área de estudo.

Foram observados três lineamentos regionais que ocorrem na área (Fig. 20.a); com esses três lineamentos foram geradas superfícies verticais representando limites entre domínios estruturais (Fig. 20.b). Essas superfícies verticais dividiram a área em quatro blocos estruturais para que posteriormente fossem construídas as camadas de cada unidade geológica para cada bloco.

Figura 20 – (a) Lineamentos regionais traçados (linha vermelha) na área para construção de (b) superfícies verticais.



Fonte: autora.

5.4.2 Modelagem 3D

As superfícies que representam a base do Grupo Guaritas foram recortadas com base nas quatro superfícies verticais, de modo que se enquadrassem dentro dos quatro blocos. Para cada bloco, uma ou mais superfícies correspondendo a base do Grupo Guaritas foram

integradas através da ferramenta de construção de superfícies (*Surface - Top/Mid/Base*), gerando uma única superfície para cada bloco, quatro no total.

Para o Grupo Santa Bárbara, a linha mais inferior na seção gerada pelo método *Kink band* foi projetada ao longo do *plunge* para a criação da superfície estrutural em 3D. Esse processo foi realizado para as duas seções que correspondem ao Grupo Santa Bárbara. Dessa forma, foram geradas duas superfícies distintas. Essas superfícies foram consideradas como geometricamente correlatas, e a partir delas foi gerada uma única superfície com a ferramenta *Surface (Top/Mid/Base)*. Essa superfície foi recortada nos quatro blocos.

As quatro superfícies de cada unidade foram nomeadas como Bloco 1 (NW), Bloco 2 (NE), Bloco 3 (SE) e Bloco 4 (SW).

A partir das quatro superfícies criadas (blocos 1, 2, 3 e 4), para o Grupo Guaritas e para o Grupo Santa Bárbara, utilizou-se a ferramenta *Horizons From Template* para construir 24 superfícies acima e/ou abaixo da superfície utilizada como modelo.

As camadas geradas para o Grupo Guaritas foram cortadas pela intersecção com o MDT e as do Grupo Santa Bárbara foram cortadas pela base do Grupo Guaritas. Dessa forma, as partes das camadas do Grupo Guaritas que se encontravam acima do MDT foram excluídas da mesma forma que as partes das camadas do Grupo Santa Bárbara que se encontravam acima da superfície da base do Grupo Guaritas.

6 RESULTADOS

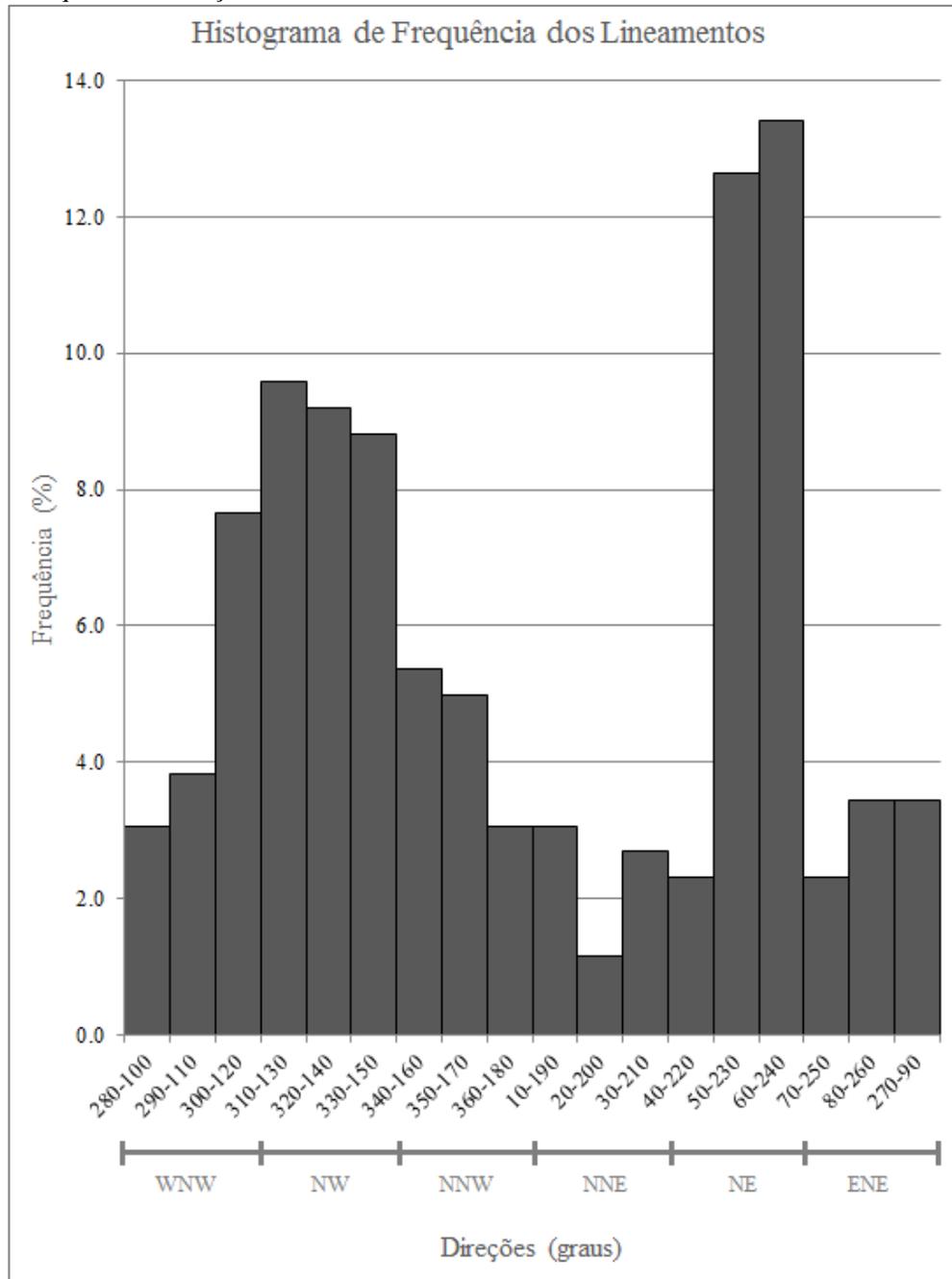
Os resultados adquiridos por meio da análise macroscópica e mesoscópica estão descritos abaixo.

6.1 Análise Macroscópica - Lineamentos

Foram identificados 261 lineamentos a partir do método descrito. Os lineamentos ocorrem em todos os quadrantes, mas possuem frequências e comprimentos distintos.

Os lineamentos na área de estudo ocorrem preferencialmente entre os azimutes 30 e 60 (NE-SW) e 300 e 330 (NW-SE; Fig. 21) e apresentam 28,4% e 27,6% de frequência, respectivamente (Tabela 1). Há duas direções secundárias de lineamentos, WNW-ESE e NNW-SSE, com 14,6% e 13,4% de frequência, respectivamente. As demais direções (ENE-WSW e NNE-SSW) somam 16,1% dos lineamentos na área.

Figura 21 - Frequência da direção dos lineamentos com intervalo de 10°.



Fonte: autora.

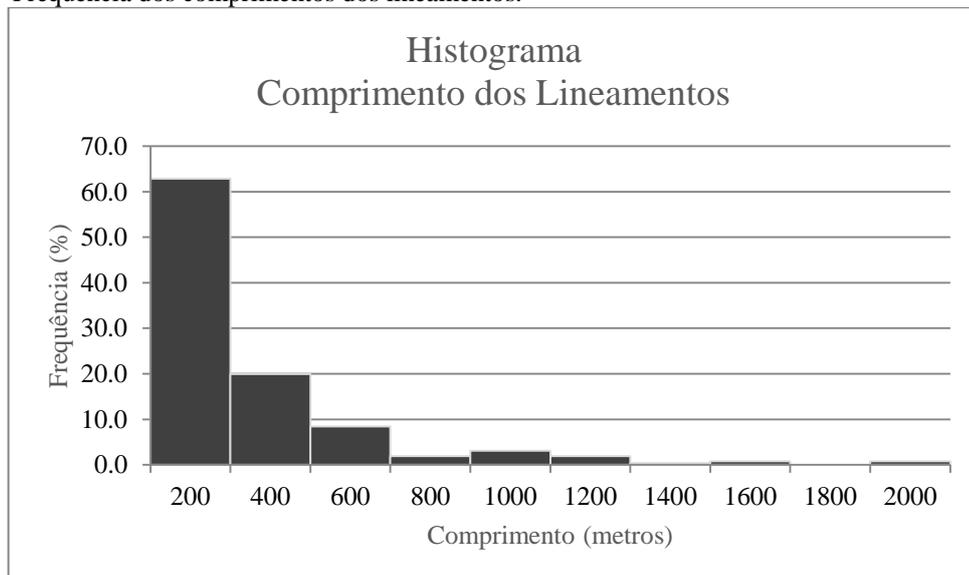
Tabela 1 - Tabela com as frequências dos lineamentos, onde a coluna Intervalos são os limites inferior e superior de cada Direção.

Intervalos (graus)	Direção	Frequência (%)
30 a 60	NE - SW	28.4
300 a 330	NW - SE	27.6
270 a 300	WNW - ESE	14.6
330 a 360	NNW - SSE	13.4
60 a 90	ENE - WSW	9.2
0 a 30	NNE - SSW	6.9

Fonte: autora.

O maior lineamento identificado possui 1963 m e o menor 22 m. O gráfico da Figura 22 corresponde ao histograma dos comprimentos dos lineamentos na área de estudo. Os lineamentos de até 200 metros são os mais frequentes, equivalendo a 62,8% dos lineamentos da área, os lineamentos com comprimento entre 200 e 400 metros equivalem a 20%. Os demais lineamentos, com comprimento superior a 400 metros, equivalem a 17,2% dos lineamentos da área.

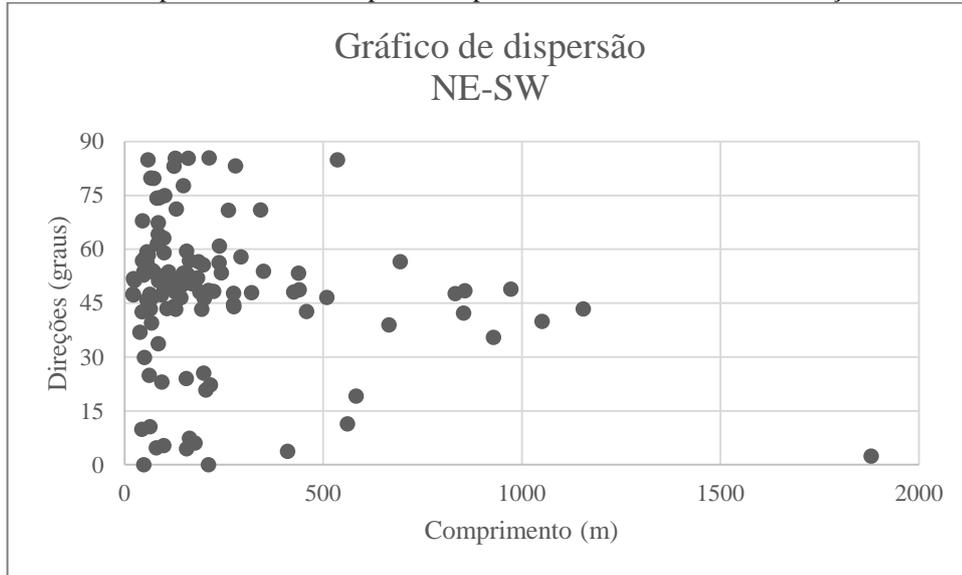
Figura 22 - Frequência dos comprimentos dos lineamentos.



Fonte: autora.

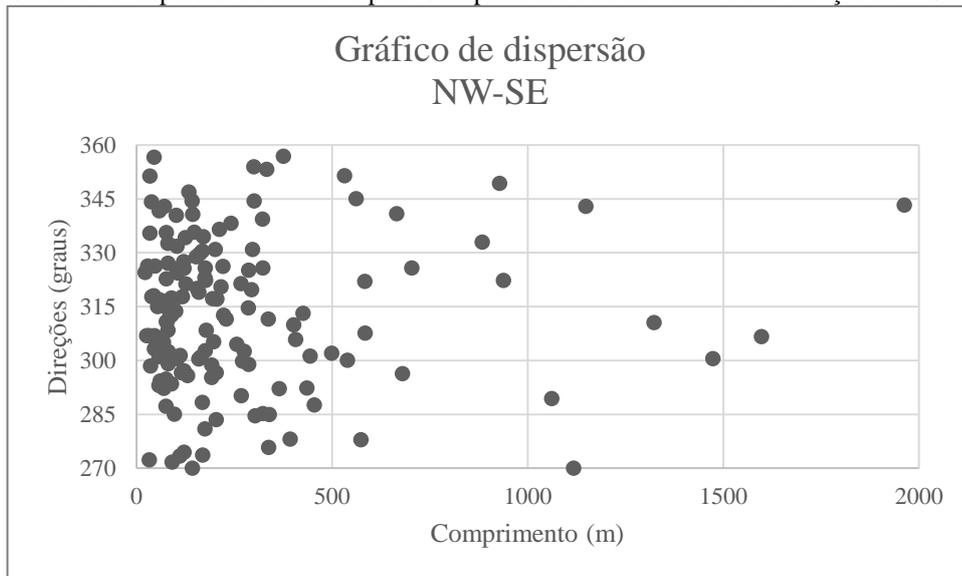
Dos lineamentos de direção NE-SW (mais frequentes), 64 % possuem comprimento de até 200m; enquanto que dos lineamentos de direção NW-SE (segundo mais frequentes), 66% possuem comprimento inferior à 200m (Figs. 23 e 24). Dos lineamentos menos frequentes, 56% possuem comprimento inferior à 200m e 28% entre 200 e 400m para os de direção WNW-ESSE; 51% possuem comprimento inferior a 200 m e 27% entre 200 e 400m para os lineamentos de direção NNW-SSE .

Figura 23 - Gráfico de dispersão do Azimute pelo Comprimento dos lineamentos na direção NE-SW (0-90).



Fonte: autora.

Figura 24 - Gráfico de dispersão do Azimute pelo Comprimento dos lineamentos na direção NW-SE (270-360).

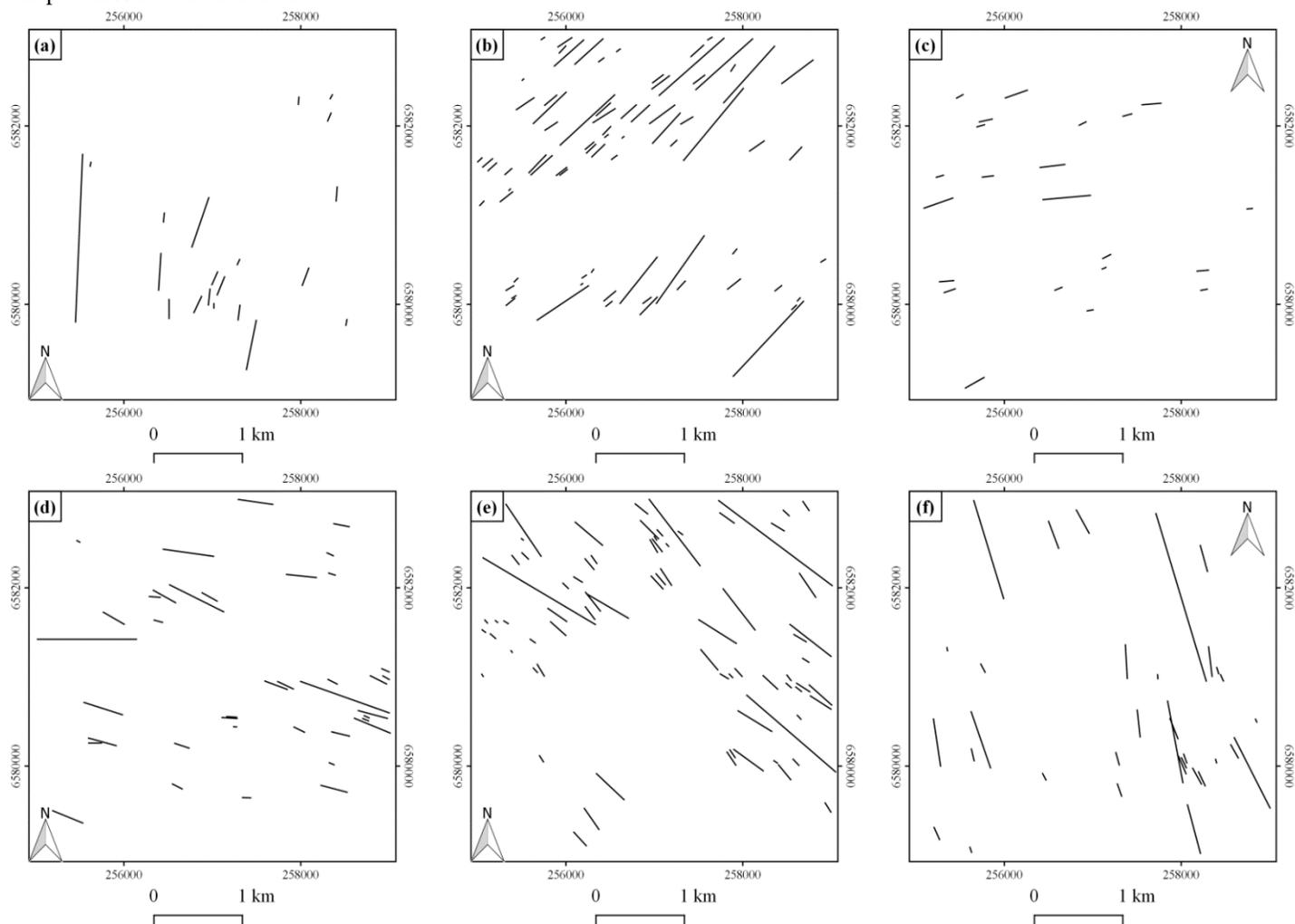


Fonte: autora.

A Figura 25 apresenta o mapa dos lineamentos para cada direção analisada e a Figura 15 mostra o diagrama de rosetas para o hemisfério norte.

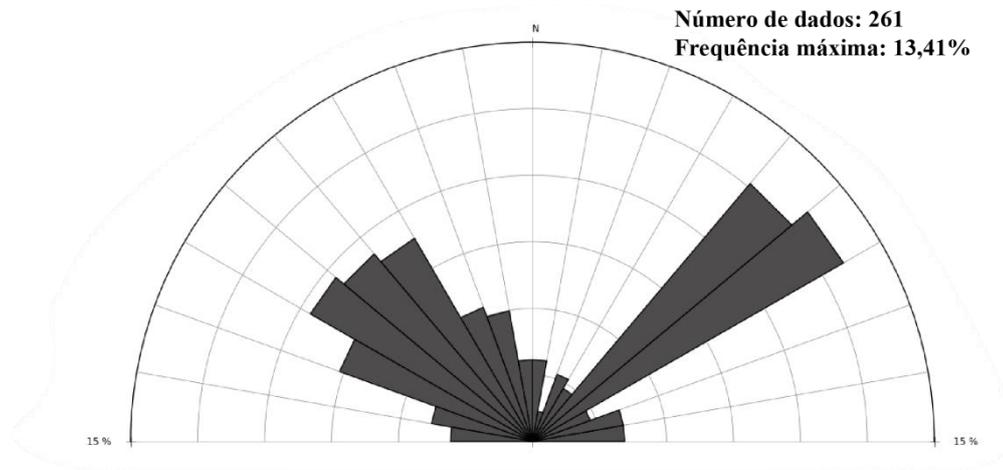
A frequência máxima dos lineamentos quando analisados no diagrama de rosetas da Figura 26 ocorre nas direções 40-50 e 50-60 (NE), enquanto que as direções secundárias são 290-330.

Figura 25–Mapas das direções dos lineamentos para (a) NNE-SSW, (b) NE-SW , (c) ENE-WSW, (d) ESE-WNW, (e) SE-NW e (f) SSE-NNW. A frequência de lineamentos para cada mapa é mostrada na Tabela 1.



Fonte: autora.

Figura 26 - Diagrama de roseta dos lineamentos na área de estudo.



Fonte: autora.

6.2 Análise Mesoscópica - Descrição litológica

O Grupo Santa Bárbara se encontra nas porções mais baixas do relevo, aflorando principalmente nas drenagens e estradas (Fig. 27). As litologias identificadas possuem em geral coloração avermelhada e são arenitos finos a médios e lamitos com estratificação plano-paralela, estratificação cruzada, ambos micáceos. Há ainda a presença de intraclastos de lama de coloração bege e a presença de marcas de onda. Esta unidade possui diferentes ângulos de mergulho, ocorrendo em discordância angular com o Grupo Guaritas quando aflorante.

As unidades do Grupo Guaritas são encontradas nas porções mais altas do relevo, sob a forma de *Cuestas* (Fig. 28.e) e em algumas porções mais baixas. A sucessão litológica observada em campo é da base para o topo:

a) conglomerados polimíticos, compostos de clastos de rochas ígneas, metamórficas e quartzo; com clastos arredondados a subangulosos não orientados e que são suportados por areia média a grossa (Fig. 28.a);

b) arenitos finos a médios de coloração rosada com grãos arredondados e subesféricos e a rocha bem selecionada, intercalada com arenitos conglomeráticos, com clastos subesféricos/arredondados de rochas ígneas e metamórficas e quartzo. A rocha também possui clastos de areia média de coloração bege e micas em sua composição. Nos arenitos finos a médios são observadas estruturas de cruzadas acanaladas (Fig. 28.c);

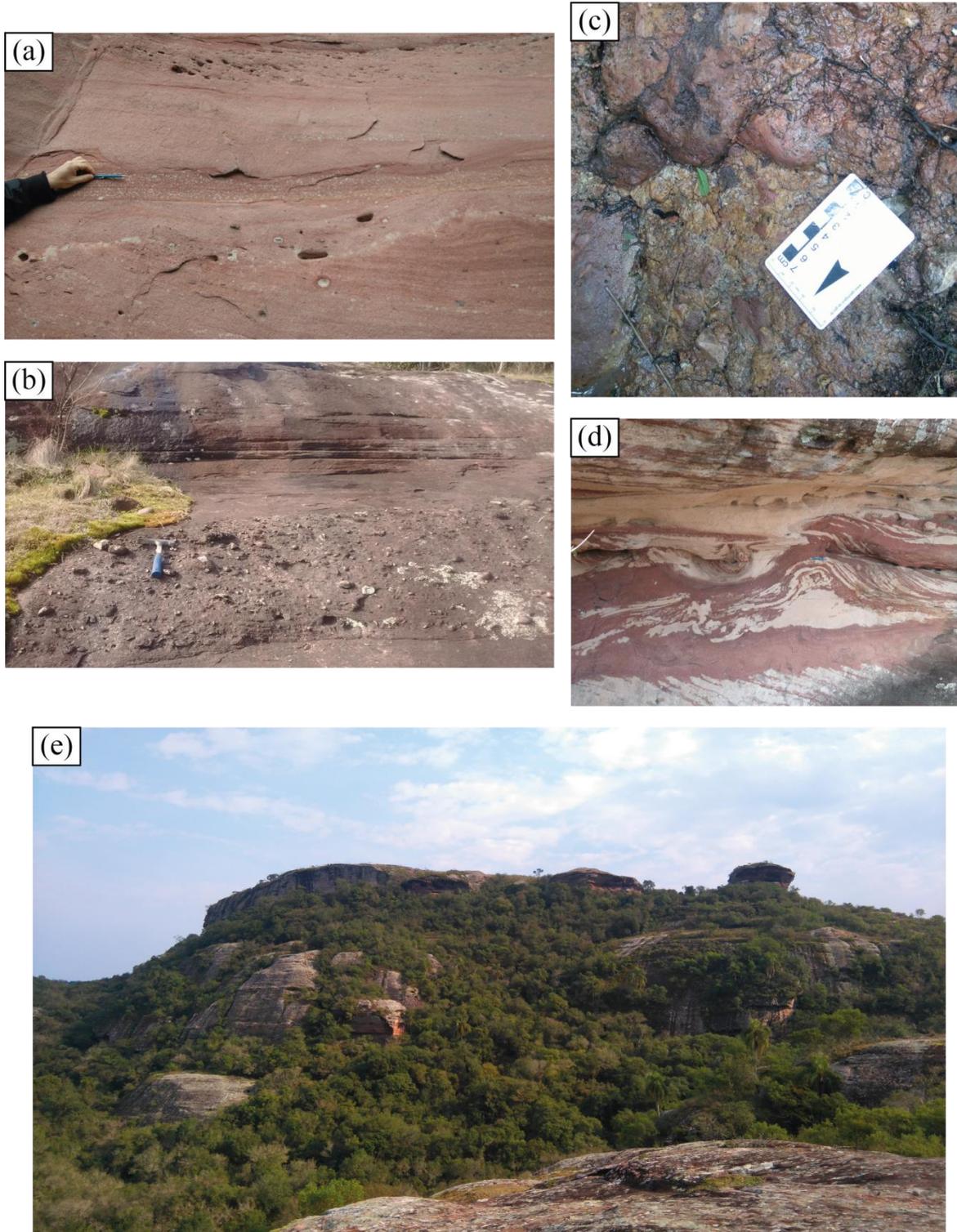
c) arenitos finos a médios com estruturas de fluidização/sismitos em uma camada de aproximadamente 1,5m (Fig. 28.d);

d) arenitos finos a médios bem selecionados de coloração rosada com grãos arredondados e subesféricos, com estruturas de cruzadas acanaladas e lentes de arenitos conglomeráticos (Figura 28.b).

Figura 27 – Fotografias mostrando as principais feições observadas para o Grupo Santa Bárbara. Em (a) paisagem do Grupo Guaritas afluente em topo do morro e o Grupo Santa Bárbara no vale, afluente em uma drenagem, em (b) arenito muito fino de coloração avermelhada com poucos intraclastos de lama e com a presença de marcas de ondas, e em (c) afloramento em lajedo em uma estrada onde é possível observar o dobramento desta unidade ao longo da estrada.



Figura 28 – Fotografias das principais feições associadas ao Grupo Guaritas. Em (a) arenitos finos a médios com clastos intercalados com arenitos conglomeráticos, em (b) arenitos finos a médios com lentes de arenitos conglomeráticos, em (c) conglomerados polimíticos, em (d) sismito e em (e) a paisagem do Grupo Guaritas aflorante em *Cuestas*.



Fonte: autora

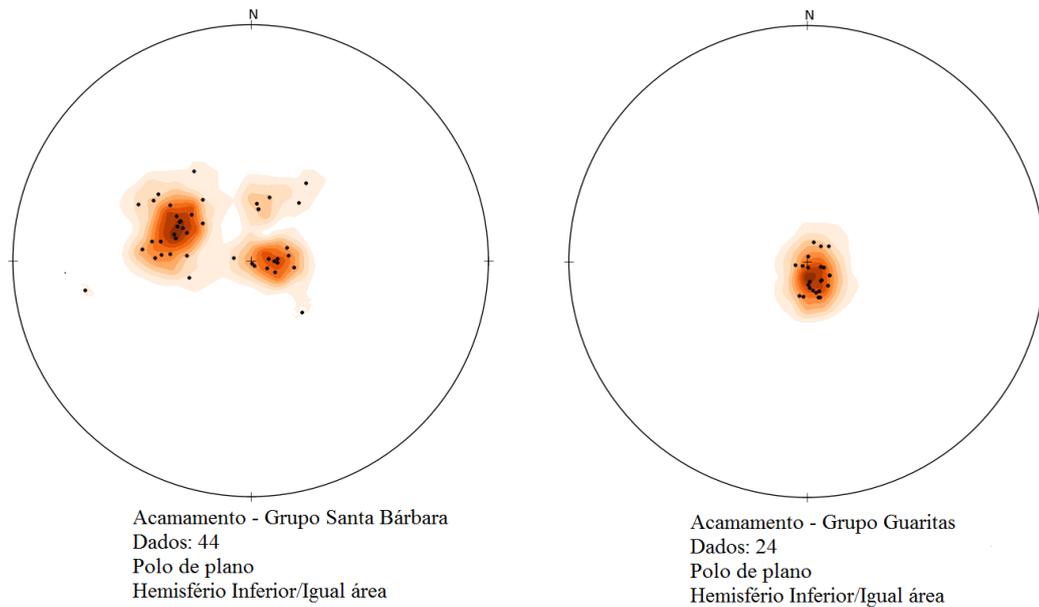
6.3 Análise Mesoscópica – Análise Estrutural

A análise estrutural mesoscópica realizada nesse trabalho consiste na descrição da geometria, cinemática, orientação e localização espacial das estruturas observadas em campo. Abaixo são apresentadas a análise do acamamento sedimentar e das fraturas extensionais e de cisalhamento.

6.3.1 Análise estrutural – Acamamentos

Foram adquiridas 44 atitudes estruturais do acamamento sedimentar para as unidades do Grupo Santa Bárbara e 24 atitudes para as unidades do Grupo Guaritas, ilustradas nos estereogramas da Figura 29.

Figura 29 - Estereogramas dos acamamentos dos Grupos Guaritas e Santa Bárbara.



Fonte: autora.

O acamamento sedimentar do Grupo Santa Bárbara possui mergulho variável, entre 1° a 60° de inclinação, mas predominantemente baixo ângulo, para três direções distintas. A direção principal de mergulho é para leste, entre ESE e ENE, e as direções de mergulho subordinadas para sul e oeste, variando de S até WNW (Fig. 29).

O acamamento sedimentar do Grupo Guaritas é consistente (distribuição unimodal), de baixo ângulo de mergulho, variando de 2° a 13°. O sentido de mergulho ocorre predominantemente para NW (Fig. 29).

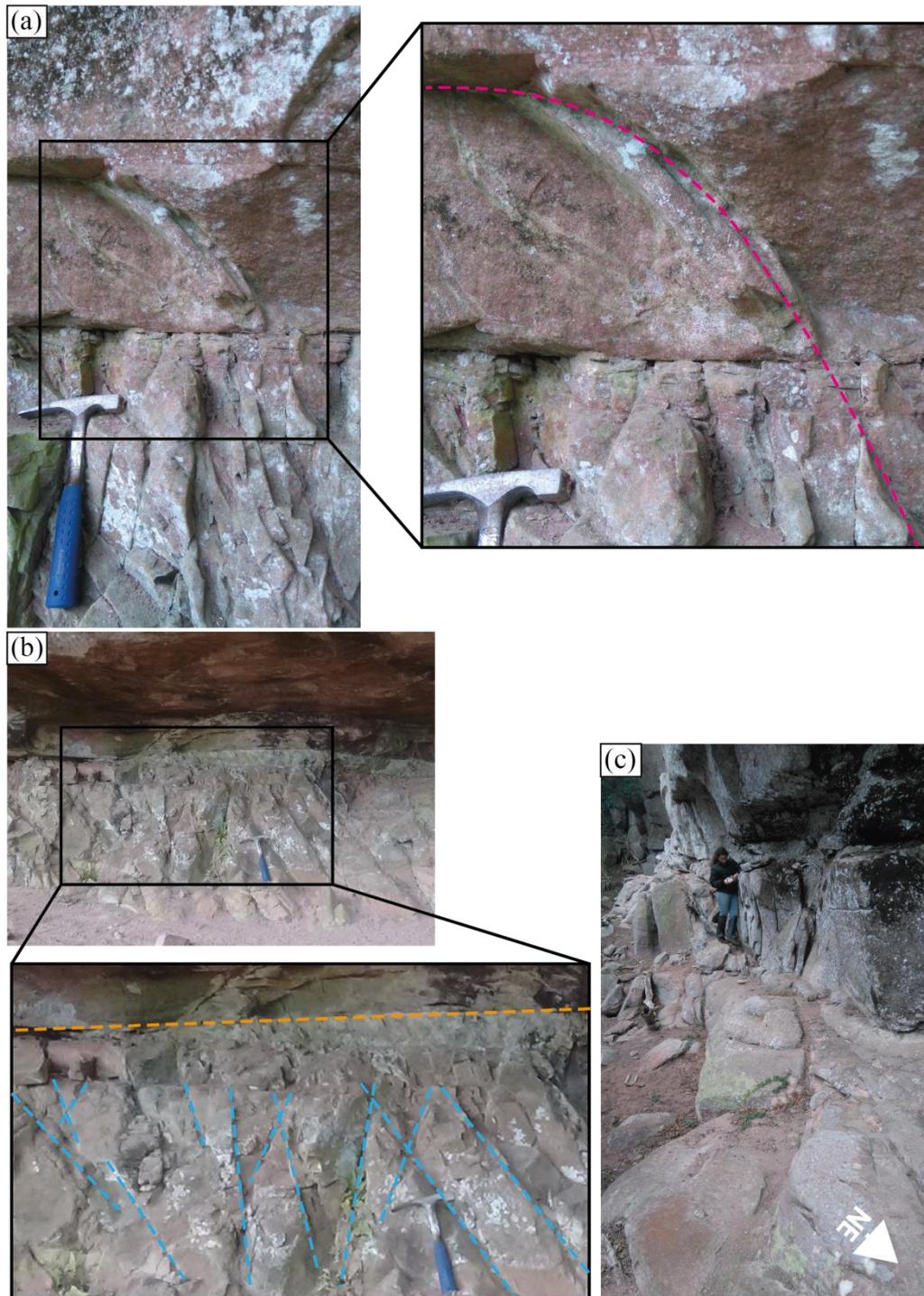
6.3.2 Análise estrutural – Descrição das Fraturas

As rochas encontradas em campo possuem fraturas que vão de escala de centímetro à escala de quilômetros, e o espaçamento das mesmas varia conforme a unidade geológica a que pertencem. As fraturas presentes nas unidades do Grupo Santa Bárbara são mais frequentes, mais adensadas e contínuas. As fraturas nas unidades do Grupo Guaritas são frequentes, embora sejam mais espaçadas que as da unidade inferior e a continuidade delas é maior, visto que essa continuidade é bem marcada em escala macroscópica nos lineamentos.

Em campo foram observadas fraturas individuais, interações e populações de fraturas. As fraturas individuais observadas caracterizam fraturas extensionais (modo I) e de cisalhamento (modos II e III), em algumas porções ocorrem zonas de maior adensamento caracterizando zonas de dano pouco desenvolvidas. As interações de duas ou mais fraturas ou falhas observadas em campo foram ligação geométrica, pares conjugados e fraturas ortogonais e confinadas. As populações e rede de fraturas e falhas observadas foram *splay*, corredores e enxames de fraturas e fraturas isoladas em camadas (Figs. 30 a 35).

A Figura 30.a mostra uma fratura curva, que lembra uma fratura do tipo *splay*. Na Figura 30.b é observado um padrão de faturamento intenso e logo acima uma camada menos fraturada, que caracteriza um enxame de fraturas. Na Figura 30.c é observado o corredor de fraturas. As imagens da Figura 30 são do mesmo afloramento, e com essa caracterização pode-se dizer que essa área possui uma zona de deformação mais intensa que nas unidades acima, sendo assim uma possível descontinuidade (o acamamento da zona fratura e a da zona acima pouca fraturada são as mesmas).

Figura 30 - Tipos de fraturas observados em campo, como: em (a) *splay* (linha rosa) em (b) uma camada com adensamento de fraturas (linhas azuis) e acima a provável discordância das duas unidades (linha laranja) e em (c) corredor de fraturas.

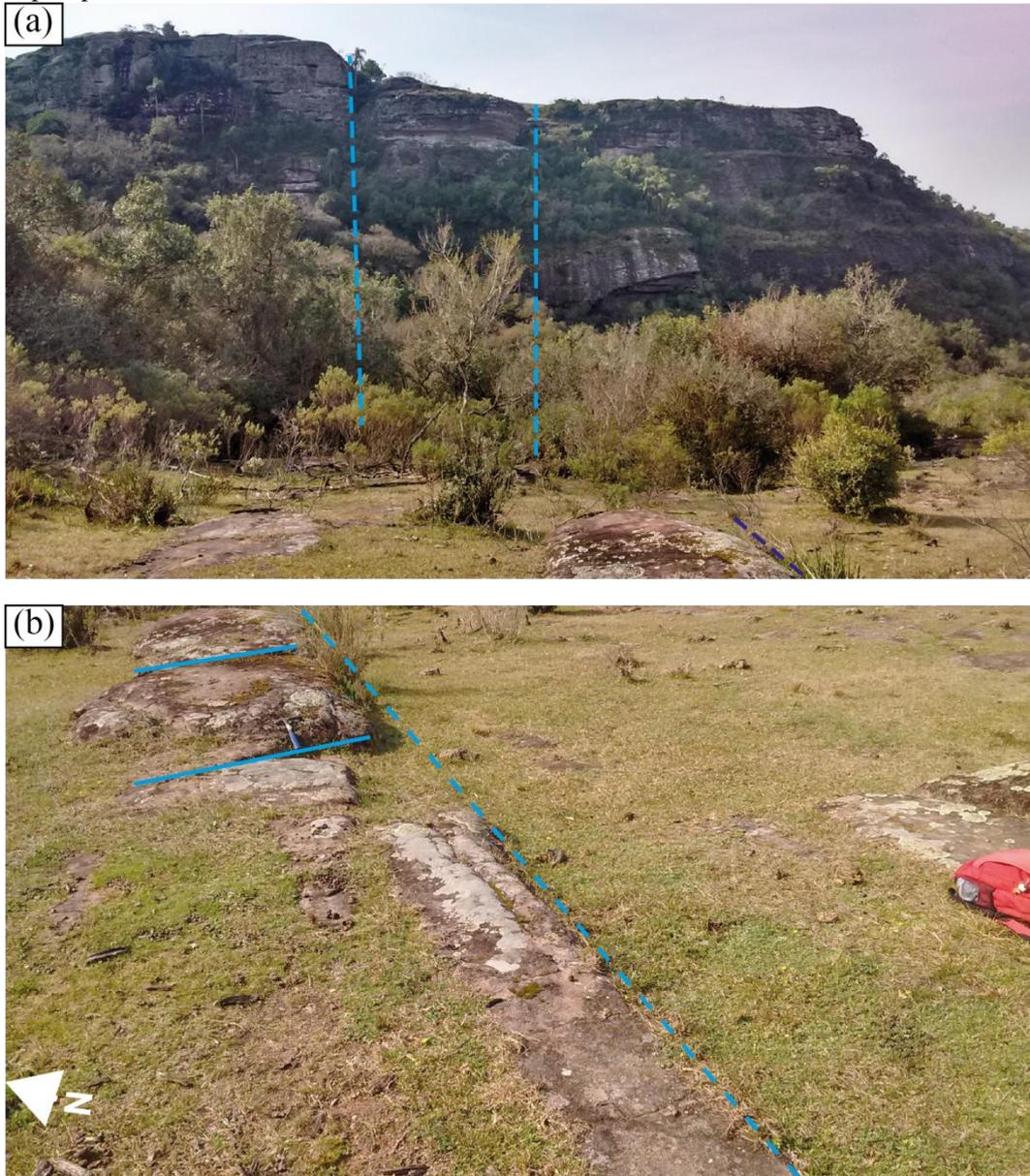


Fonte: autora.

As fraturas mostradas na Figura 31.b estão representadas de dois modos na imagem, com linhas contínuas e linhas tracejadas. As linhas contínuas indicam fraturas com *strike* NNW e as linha tracejadas indicam fraturas com direção NNE. As fraturas com *strike* para

NNE são observadas cortando os morros (Fig. 31.a). O ângulo entre o *strike* dessas duas direções de fraturas é quase ortogonal, e esse tipo de fraturas se enquadra na classificação intersecção de duas ou mais fraturas do tipo Ortogonal.

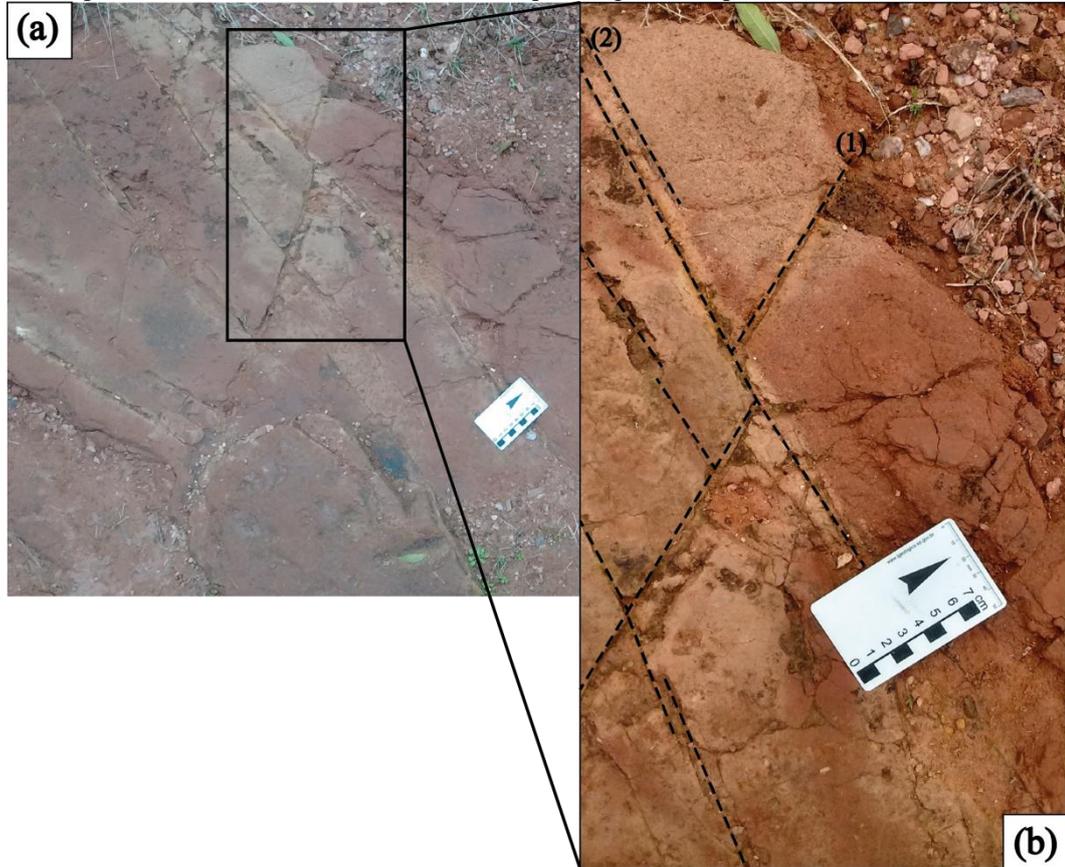
Figura 31 - Fraturas em escala de afloramento (b) são prolongadas até os morros (a), onde em escala macroscópica podem ser observada como lineamentos.



Fonte: autora.

As fraturas mostradas na Figura 32, são pertencentes às unidades do Grupo Santa Bárbara e estão aflorantes ao longo de leito de estrada. As fraturas estão mais adensadas, com espaçamento de escala centimétrica.

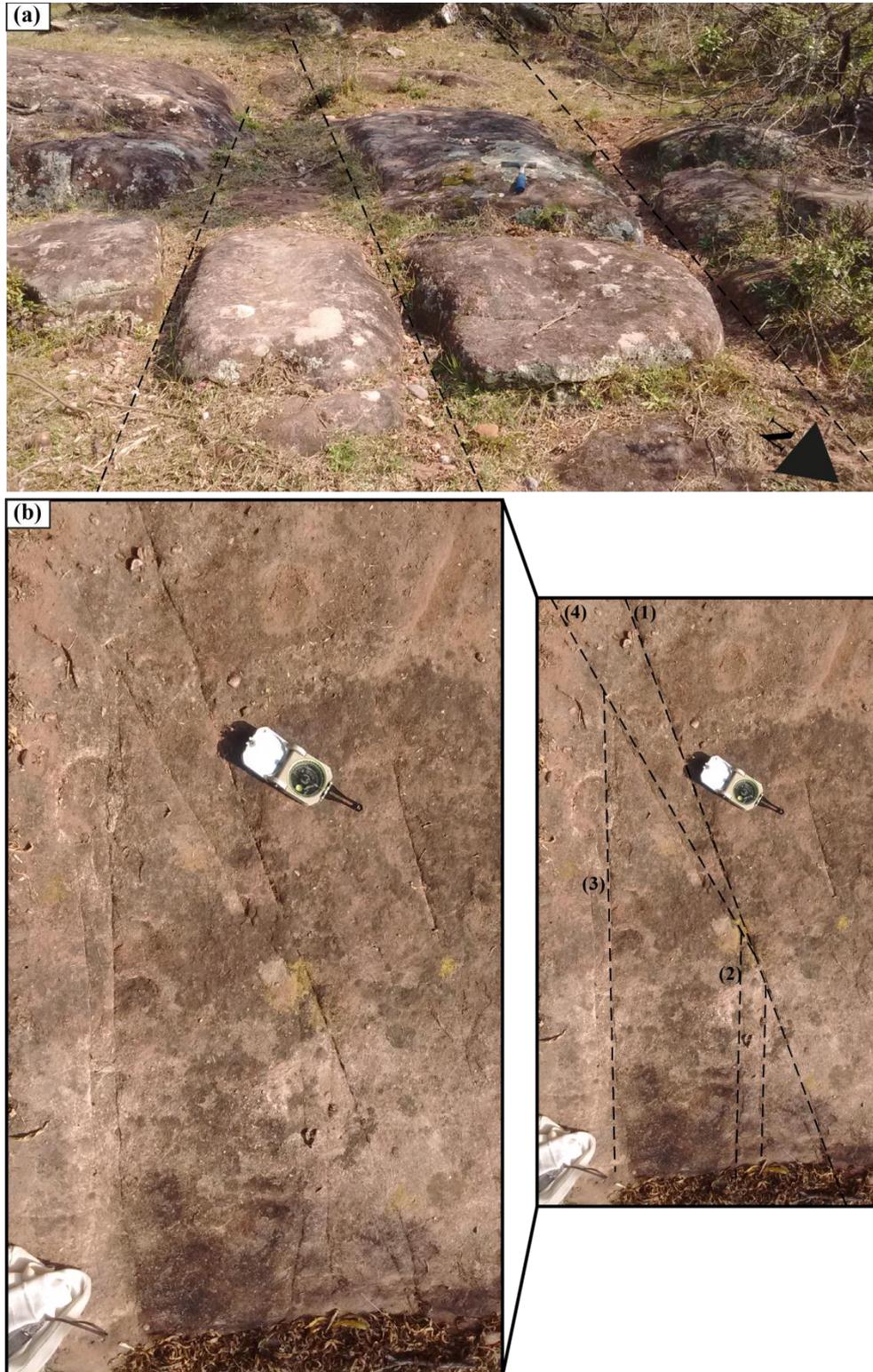
Figura 32 – Fotografia de afloramento em planta mostrando a geometria e cinemática das fraturas que afetam o Grupo Santa Bárbara. A seta aponta o norte. (a) Fraturas com poucos centímetros de espaçamento do Grupo Santa Bárbara e (b) fratura com movimento aparente sinistral. Onde em (b) o número (1) é uma fratura que mergulha 68° para S59W e o número (2) é uma fratura que mergulha 82° para N03E.



Fonte: autora.

As fraturas mostradas na Figura 33, são pertencentes às unidades do Grupo Guaritas e estão aflorantes na lateral do morro. As fraturas estão menos adensadas que as do Grupo Santa Bárbara e possuem espaçamento de escala métrica.

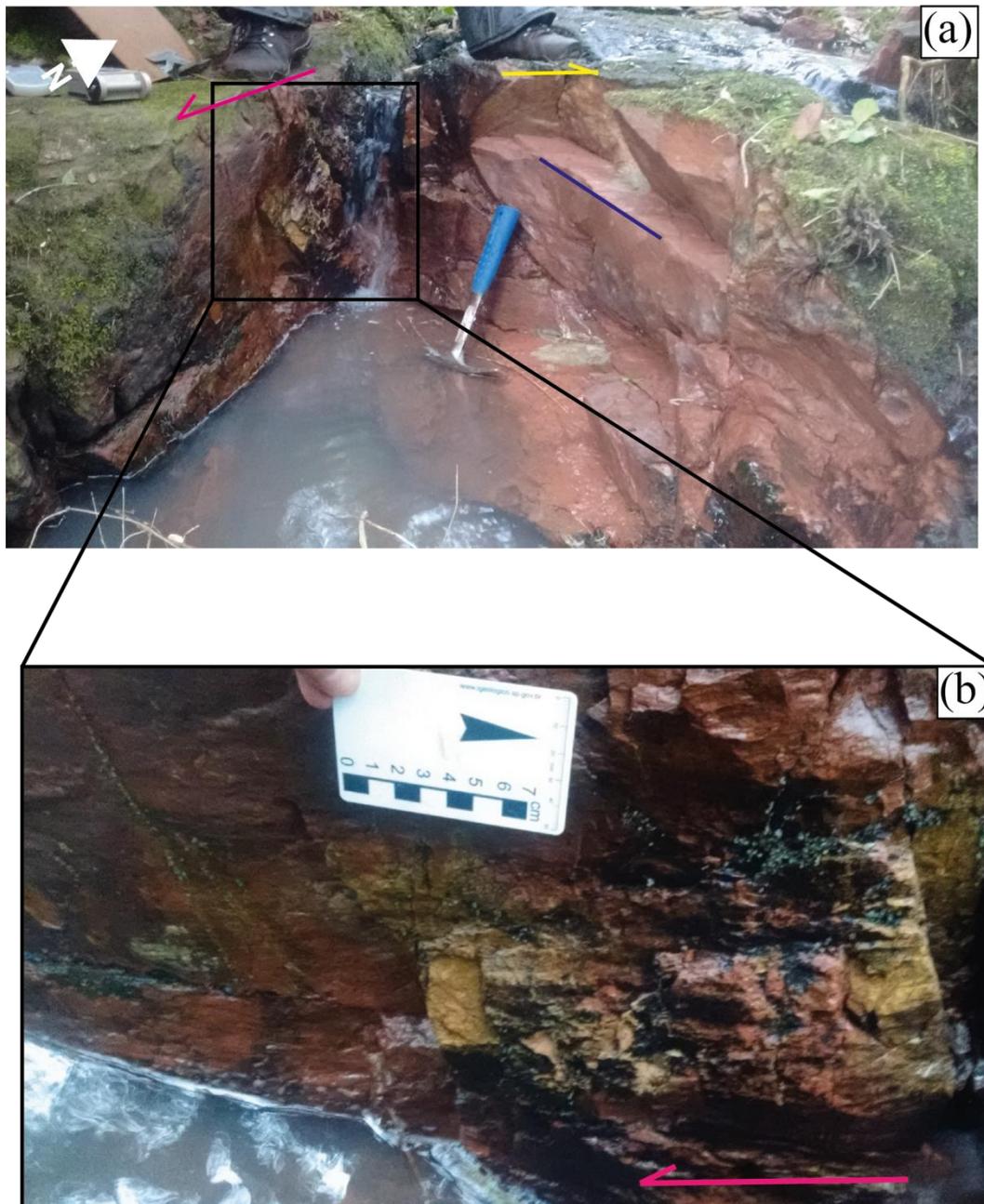
Figura 33 - Fotografia de afloramento mostrando a geometria das fraturas que afetam o Grupo Guaritas. A seta aponta o norte. (a) Fraturas com espaçamento métrico do Grupo Guaritas e (b) no mesmo afloramento pares de fraturas que se intersectam. Onde em (b) o número (1) é uma fratura que mergulha 83° para N65W, o número (2) é uma fratura que mergulha 80° para S51E, o número (3) é uma fratura que mergulha 85° para S41E, e o número (4) é uma fratura que mergulha 84° para S63E.



Fonte: autora.

No local da Figura 34.a foram encontrados três planos de falhas, sendo que em dois estavam com estrias contidas. Os planos de falha com *strike* para N-S e WNW-ESE possuem estrias contidas indicando movimento dextral e sinistral, respectivamente.

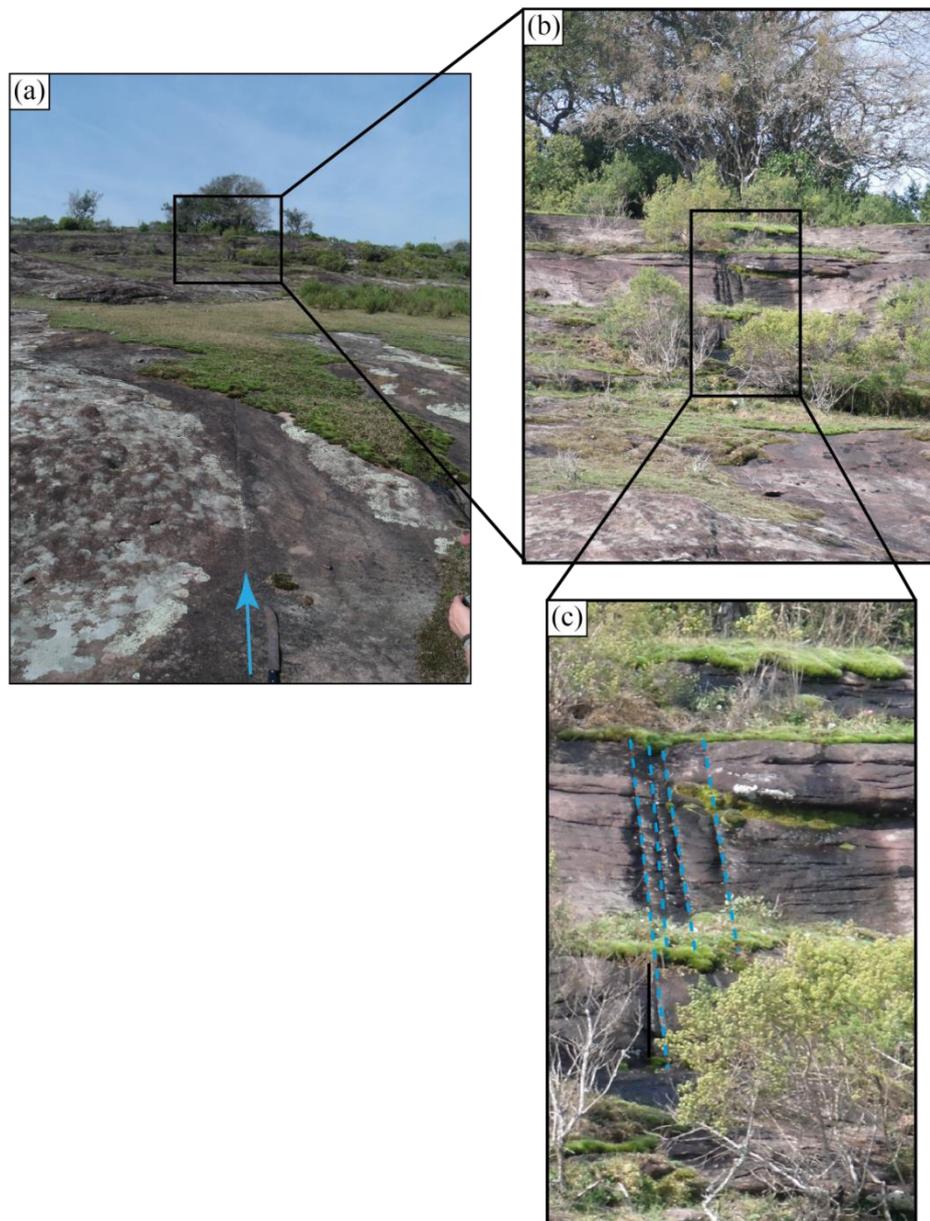
Figura 34 - (a) Falhas cisalhantes no Grupo Santa Bárbara, onde a seta em rosa indica o plano que mergulha 75° para S80E, a seta amarela indica o plano que mergulha 85° para S31W e a seta azul indica o plano que mergulha 80° para S63W. E em (b) o plano de falha com 75° de mergulho para S80E com estria horizontal (02°) com caimento para S.



Fonte: autora.

As fraturas presentes no Grupo Guaritas podem ser observadas em afloramento em escala que varia de métrica a raramente quilométrica, se alongando muitas vezes quase a extensão total dos morros. Como pode ser visto na Figura 35.a na parte inferior da imagem é mostrada uma seta indicando o início da fratura e sua extensão até o topo da imagem. Na porção superior da imagem (Fig. 35.b; Fig. 35.c) se observa um adensamento das fraturas, caracterizando um enxame de fraturas. Esse adensamento é observado de forma localizada em outras regiões da área de estudo.

Figura 35 - Enxame de fraturas iniciando com poucas fraturas (a) até o adensamento destas (b) e (c), onde é possível observar um aumento na vegetação (b).

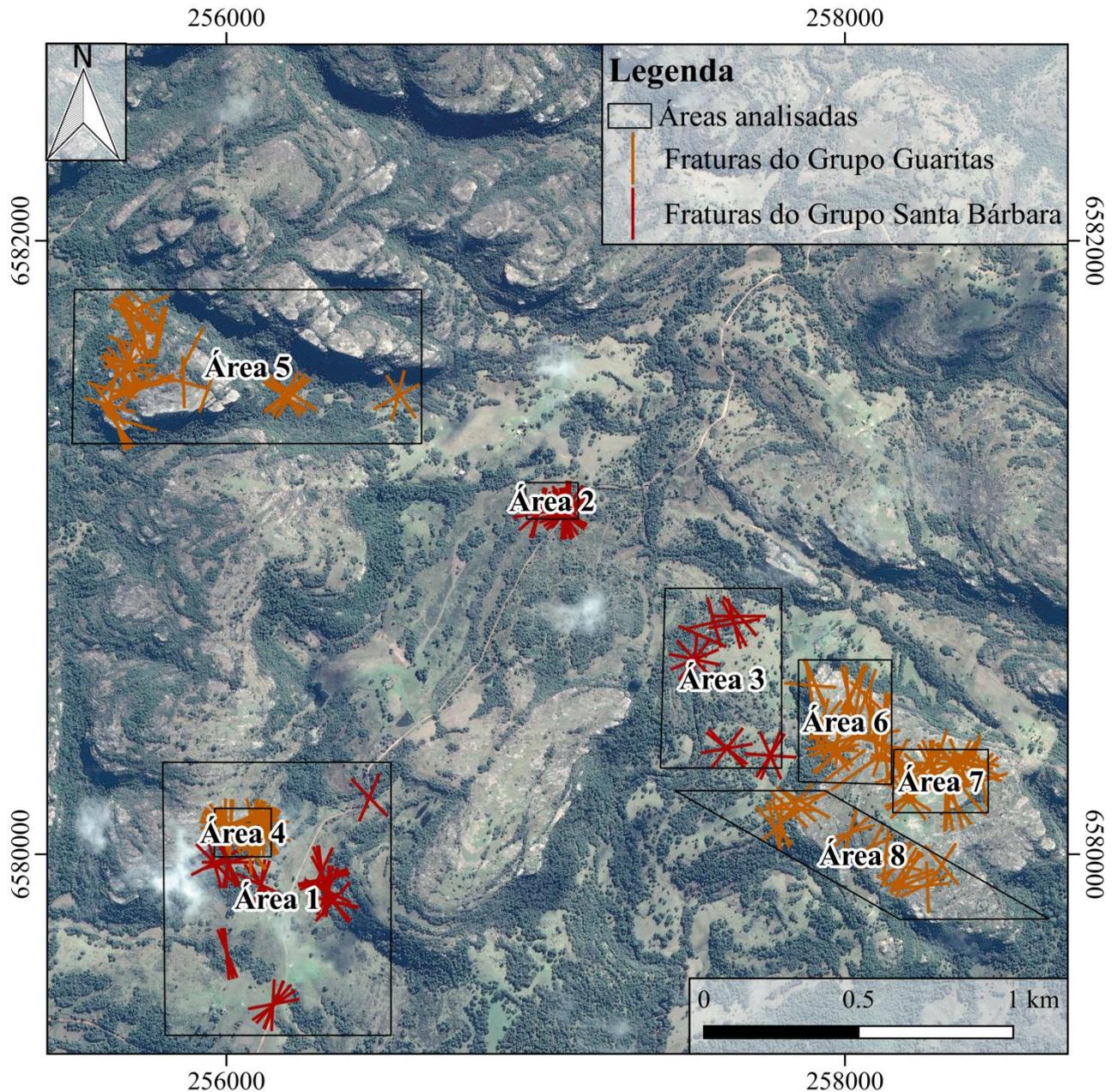


Fonte: autora.

6.3.3 Análise estrutural – Orientação e Localização Espacial das Fraturas

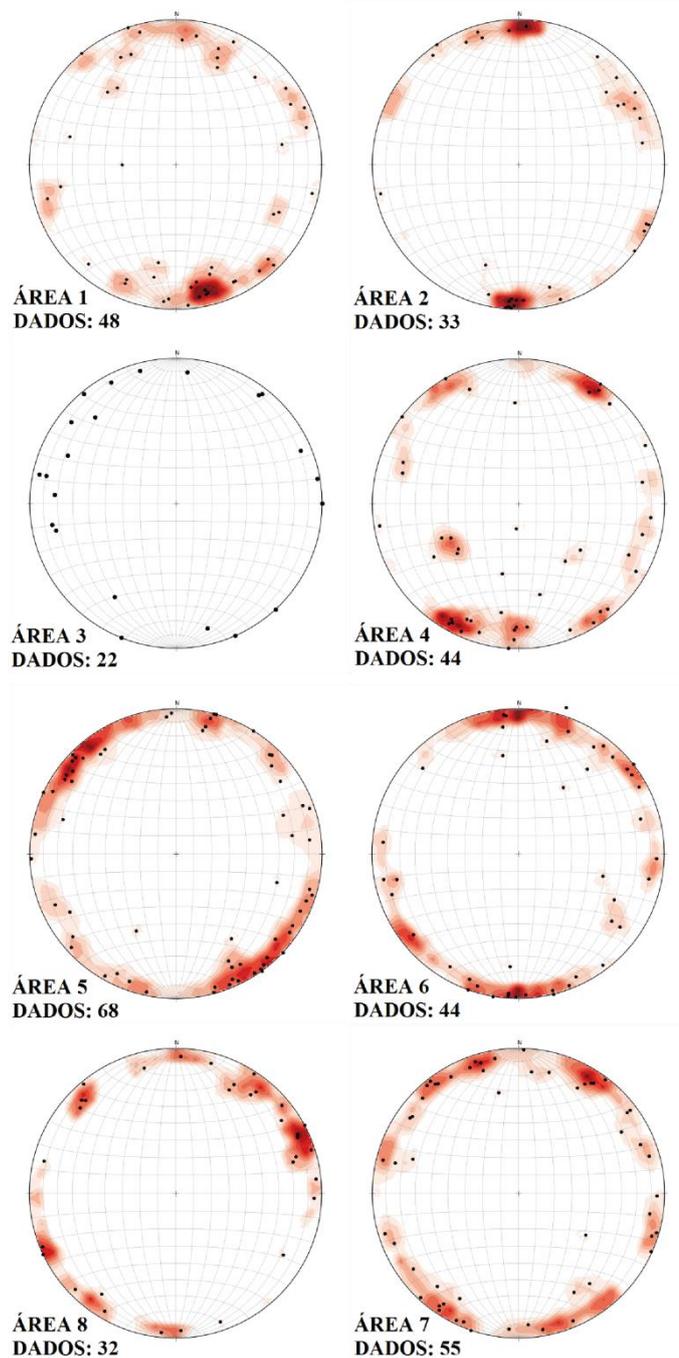
As fraturas extensionais foram divididas de acordo com o grupo (Santa Bárbara ou Guaritas) nas quais as fraturas foram observadas (Fig. 36).

Figura 36 – Mapa mostrando as oito áreas individualizadas para a análise das fraturas extensionais.



Fonte: autora.

Figura 37 – Estereogramas das oito áreas apresentadas na Figura 25. Áreas 1, 2 e 3 corresponde as fraturas obtidas no Grupo Santa Bárbara; áreas 4, 5, 6, 7 e 8 foram obtidas no Grupo Guaritas.



Fonte: autora.

Nas áreas 1, 2 e 3 são observadas as fraturas do Grupo Santa Bárbara (Fig. 36). As fraturas extensionais encontradas no Grupo Santa Bárbara são pouco espaçadas, com espaçamentos de até 1 centímetro e as superfícies são geralmente lisas. No geral, as fraturas extensionais do Grupo Santa Bárbara possuem mergulho preferencialmente para duas

direções, SSE-NNW e NNE-SSW, com frequências de 26,9% e 24,7% respectivamente (Fig. 37).

Na região da área 1, as fraturas estão mergulhando preferencialmente para NNW e secundariamente para NNE e SSW (Fig. 37 – Área 1), com alto ângulo de mergulho, sendo em média de 74.5°. O *strike* preferencial das fraturas é para a direção ENE-WSW e secundariamente para ESE-WNW. Na região da área 2 as fraturas estão preferencialmente mergulhando para NE e secundariamente para SW e SSE, havendo ainda fraturas mergulhando para WNW (Fig. 37 – Área 2). O *strike* preferencial das fraturas é para ESE-WNW e secundariamente NE-SW e NNW-SSE. Na região da área 3 as fraturas estão preferencialmente mergulhando para ESE e secundariamente para WSW, SE e NE (Fig. 37 – Área 3). O *strike* preferencial das fraturas é para ESE-WNW e secundariamente NE-WSW e NNW-SSE.

Nas áreas 4, 5, 6, 7 e 8 são encontradas fraturas do Grupo Guaritas. As fraturas extensionais encontradas no Grupo Guaritas são espaçadas (em média pelo menos 50 cm de espaçamento) e possuem superfícies mais rugosas. No geral, as fraturas extensionais do Grupo Guaritas possuem fraturas mergulhando para todas as direções, embora haja três direções de mergulho em predominantes, que são: NNE-SSW, SE-NW e NE-SW com frequências 19,8%, 19,4% e 18,7%, respectivamente.

Na região da área 4 (Fig. 37 – Área 4) as fraturas extensionais estão preferencialmente mergulhando para NNE e SW e secundariamente para WNW-NW. O *strike* preferencial das fraturas é para ESE-WNW e secundariamente para SSW-NNE. Na região da área 5 (Fig. 37 – Área 5) as fraturas extensionais estão preferencialmente mergulhando para NNW e SE e secundariamente para S-W. O *strike* preferencial das fraturas é para ESE-WNW e secundariamente para NE-WSW e NNW-SSE.

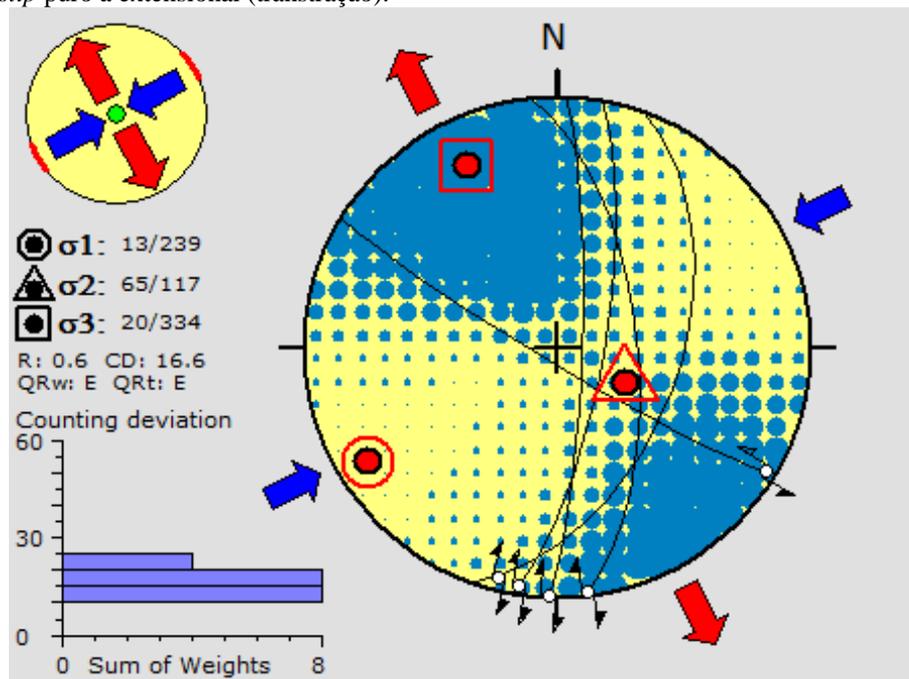
As estruturas obtidas no Cerro de Pedra (Fig. 18) foram divididas em três áreas para análise (áreas 6, 7 e 8). Na área 6 (Fig. 37) as fraturas extensionais estão preferencialmente mergulhando para N-NE e SE-S-SW e secundariamente para NNW. O *strike* preferencial das fraturas é para ESE-WNW e secundariamente para NW-SE. Na área 7 (Fig. 37 – Área 7) as fraturas extensionais estão preferencialmente mergulhando para N-NE e SE-SW e secundariamente para NNW. O *strike* das fraturas é preferencialmente para ESE-WNW e secundariamente para NW-SE. Na área 8 (Fig. 37 – Área 8) as fraturas extensionais estão preferencialmente mergulhando para SE e WSW-SSW. O *strike* das fraturas é preferencialmente para SW-NE e secundariamente para NW-SE (Fig. 37).

6.3.4 Análise dos paleotensores

As oito fraturas de cisalhamento observadas em campo foram tratadas no Win-Tensor, onde foram separadas em dois paleotensores distintos, o primeiro *strike-slip* (transcorrência; Fig. 38) e o segundo extensional (Fig. 39).

O paleotensor *strike-slip* foi obtido com base nas fraturas de cisalhamento mergulhando alto ângulo para E, lineação sub-horizontal e cinemática dextral e uma fratura de alto ângulo mergulhando para SW com lineação sub-horizontal e cinemática sinistral. Esse tensor possui σ_1 sub-horizontal (13°) orientado para 239, σ_2 inclinado (65°) orientado para 117 e σ_3 sub-horizontal (20°) para 334 (Fig. 38). O valor da razão de *stress* (R) resultante foi 0,6 caracterizando um esforço no regime *strike-slip* extensional intermediário a *strike-slip* puro (Fig. 38).

Figura 38 – Estereograma mostrando os paleotensores obtidos pelo método dos Diedros Retos resultando em um tensor *strike-slip* puro a extensional (transtração).

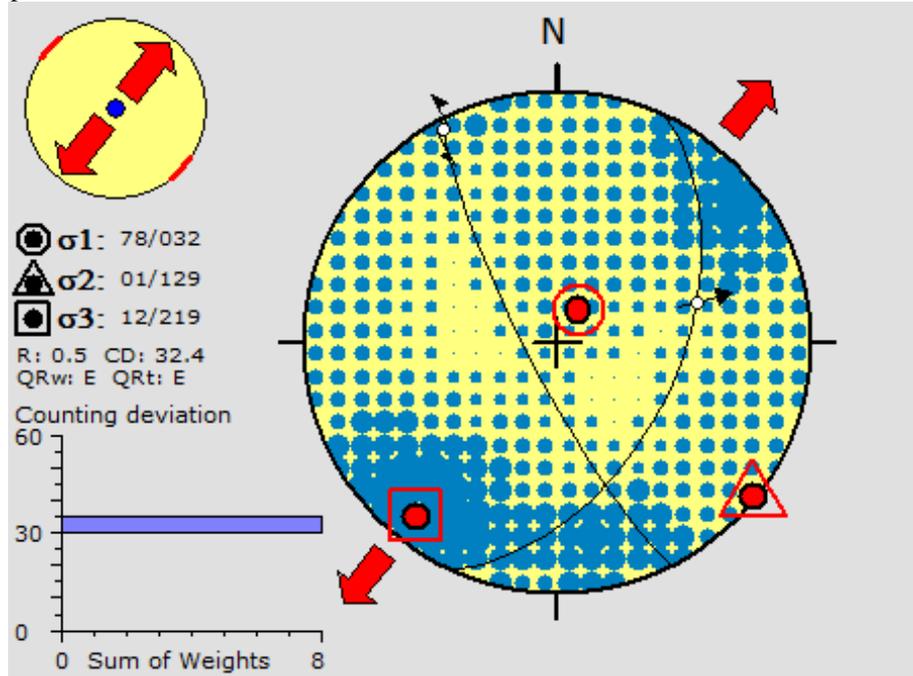


Fonte: autora.

O paleotensor extensional foi obtido com base em uma fratura de cisalhamento sub-vertical mergulhando para SW e lineação de baixo ângulo com cinemática sinistral e uma fratura de baixo a médio ângulo de mergulho para SE com cinemática normal oblíqua. Esse tensor possui σ_1 sub-vertical (78°) orientado para 032, σ_2 horizontal (01°) orientado para 129 e

σ_3 sub-horizontal (12°) para 219 (Fig. 39). O valor da razão de *stress* (R) resultante foi 0,5 caracterizando um esforço no regime extensional puro (Fig. 39).

Figura 39 - Estereograma mostrando os paleotensores obtidos pelo método dos Diedros Retos resultando em um tensor extensional puro.



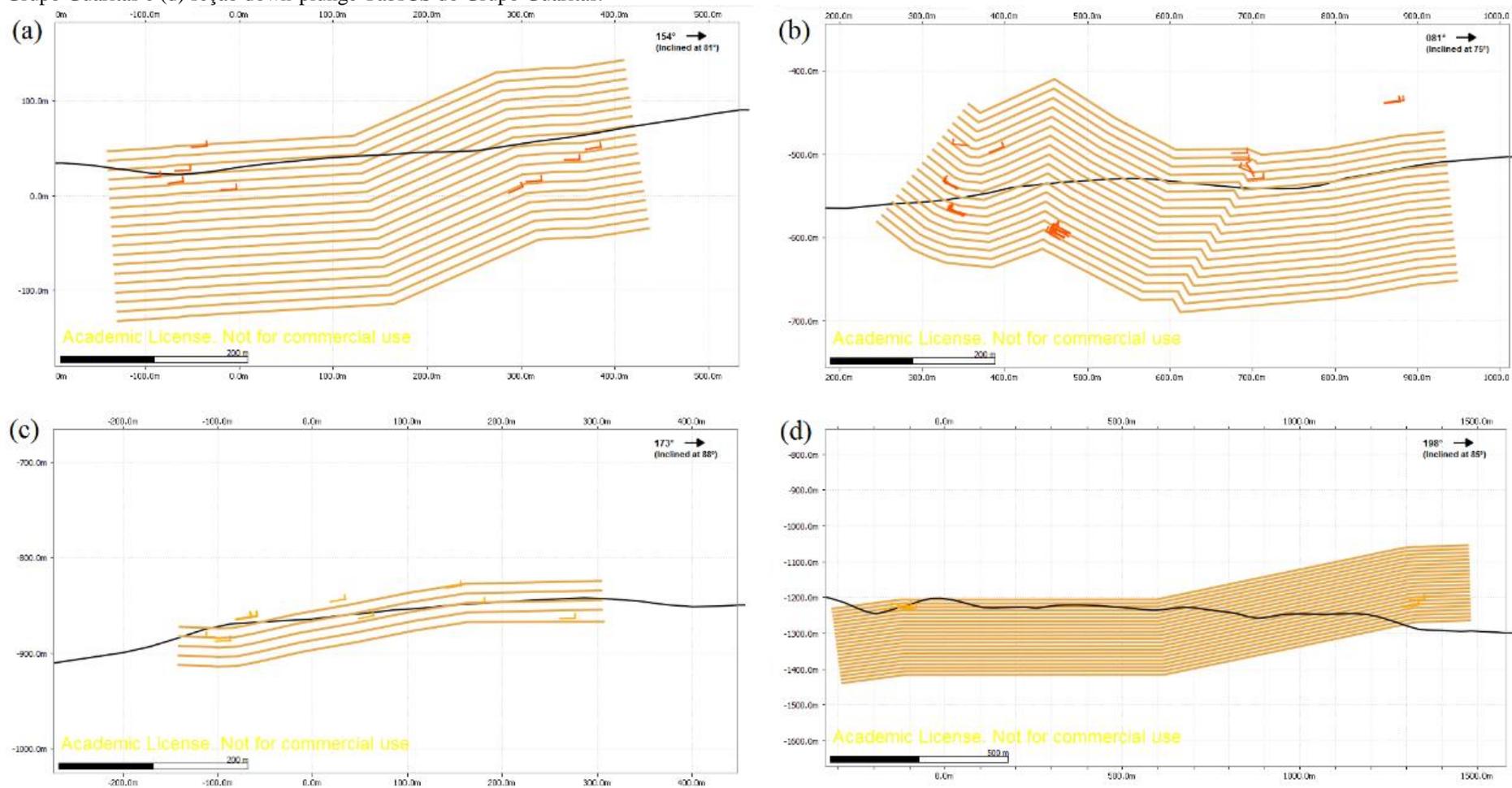
Fonte: autora.

6.3.5 Modelo Geológico 3D

A integração dos dados obtidos na análise macroscópica e mesoscópica conforme descrito nos Materiais e Métodos permitiu a construção do modelo geológico 3D. As quatro seções *down-plunge* (modelos 2D) construídas pelo método *Kink-band* são mostradas na Figura 40. Nessas seções é possível observar a geometria do Grupo Santa Bárbara, que apresenta dobras assimétricas, com vergência para E (Fig. 40.b) e ângulo interflancos definindo dobras suaves a abertas; e o Grupo Guaritas com as camadas mergulhando para SW e S (Fig. 40.c e d).

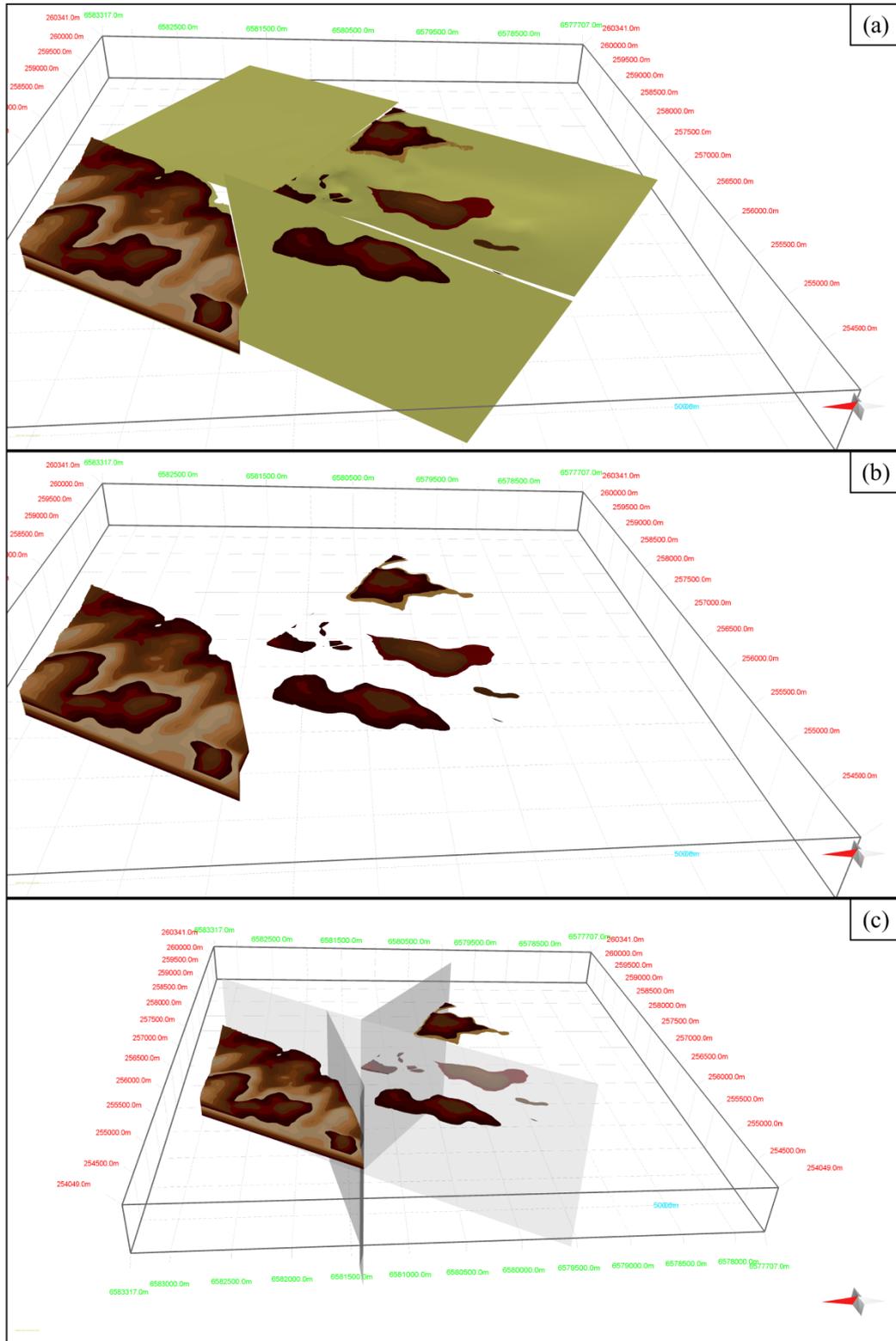
Os modelos geológicos 3D do Grupo Guaritas e Santa Bárbara, ambos com visada para leste e para norte são apresentados das Figuras 41 a 44. Nessas figuras pode se observar o acamamento dobrado no Grupo Santa Bárbara abaixo da discordância que limita com o Grupo Guaritas, sub-horizontalizado.

Figura 40 - Seções *down-plunge*. (a) Seção *down-plunge* AN do Grupo Santa Bárbara, (b) seção *down-plunge* Tabs do Grupo Santa Bárbara, (b) seção *down-plunge* CP do Grupo Guaritas e (d) seção *down-plunge* TabsCS do Grupo Guaritas.



Fonte: autora.

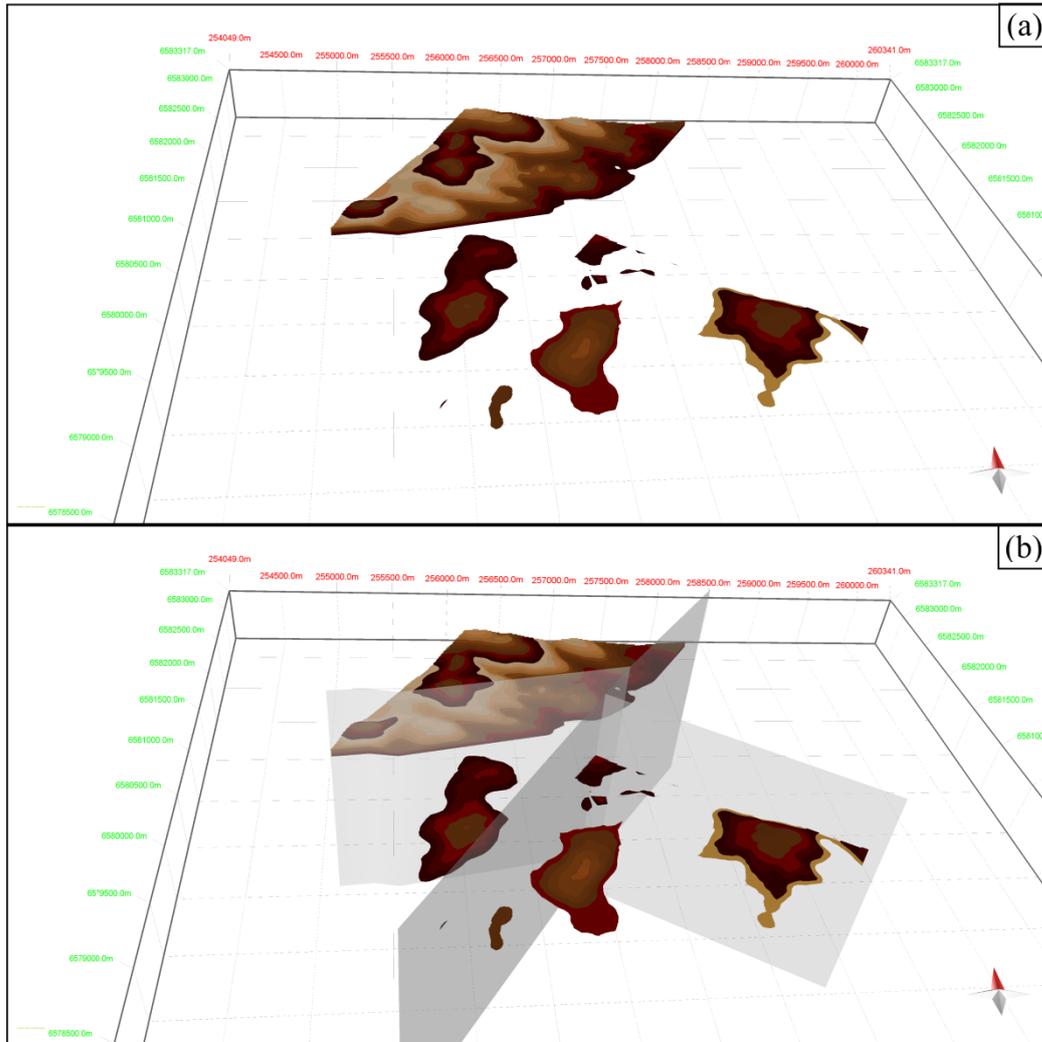
Figura 41 - Modelo geológico do Grupo Guaritas com visão para leste. Em (a) modelo geológico do Grupo Guaritas com a superfície de contato entre o Grupo Guaritas e o Grupo Santa Bárbara em amarelo, onde essa superfície foi utilizada para gerar as camadas para cada bloco estrutural. Em (b) modelo geológico do Grupo Guaritas. Em (c) modelo geológico do Grupo Guaritas com as superfícies dos lineamentos regionais.



Fonte: autora.

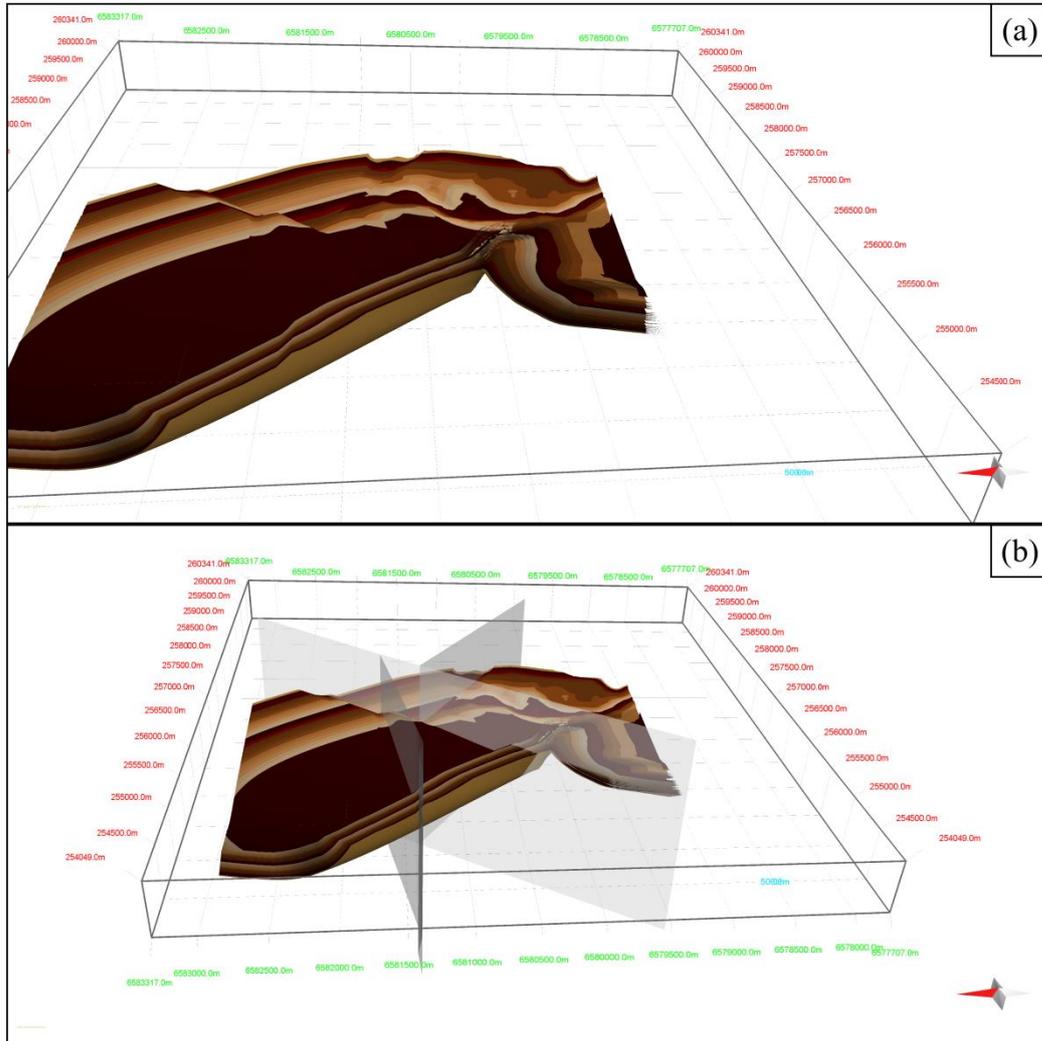
Nas Figuras 41 e 42 pode-se observar a diferença na inclinação nas camadas do Grupo Guaritas entre os blocos separados pelas falhas verticais.

Figura 42 - Modelo geológico do Grupo Guaritas com visão para norte. Em (a) modelo geológico do Grupo Guaritas e em (c) o mesmo modelo com as superfícies dos lineamentos regionais.



Fonte: autora.

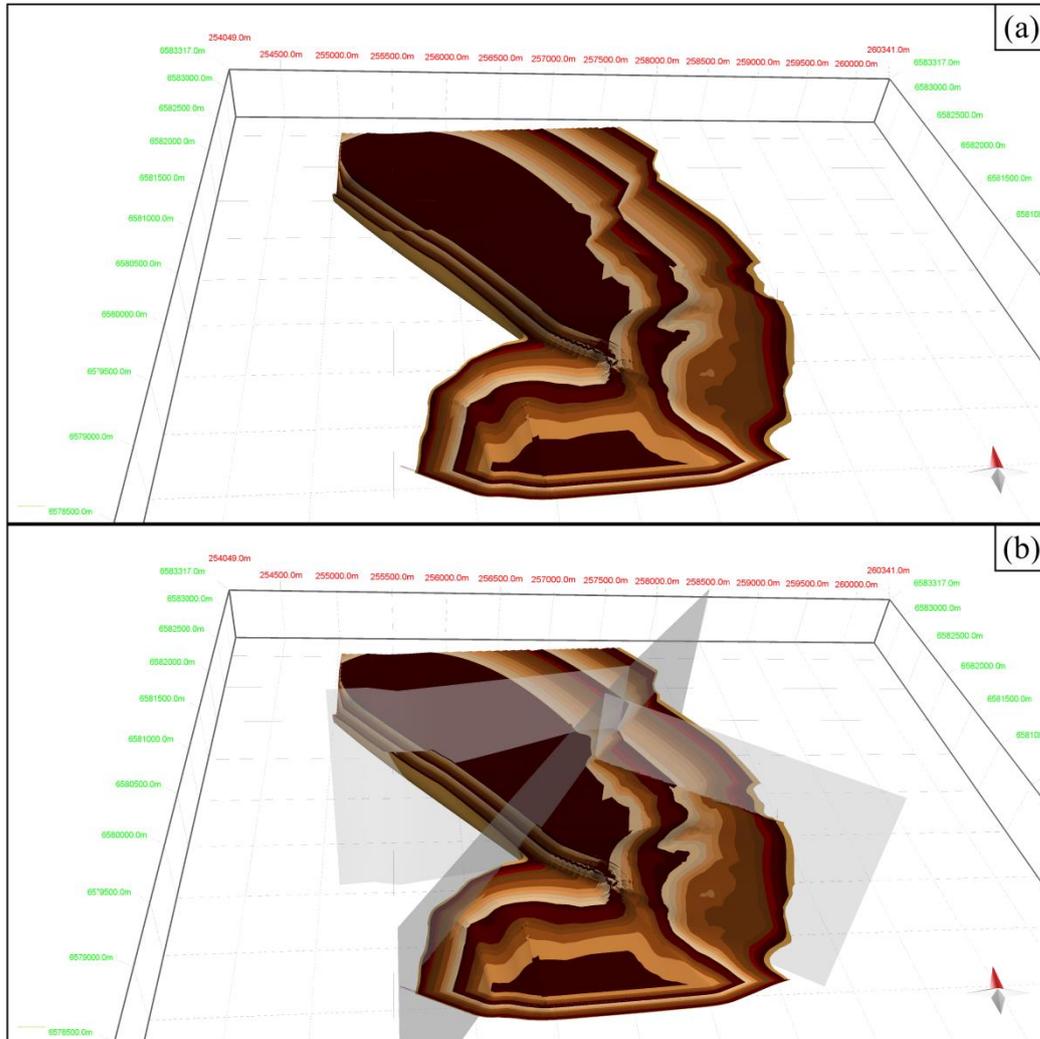
Figura 43 - Modelo geológico do Grupo Santa Bárbara com visão para leste. Em (a) modelo geológico do Grupo Santa Bárbara e em (c) o mesmo modelo com as superfícies dos lineamentos regionais.



Fonte: autora.

Nas Figuras 43 e 44 pode-se observar a estrutura dobrada do Grupo Santa Bárbara, tanto no bloco a norte quanto a sul da falha de direção NE.

Figura 44 - Modelo geológico do Grupo Santa Bárbara com visão para norte. Em (a) modelo geológico do Grupo Santa Bárbara e em (c) o mesmo modelo com as superfícies dos lineamentos regionais.



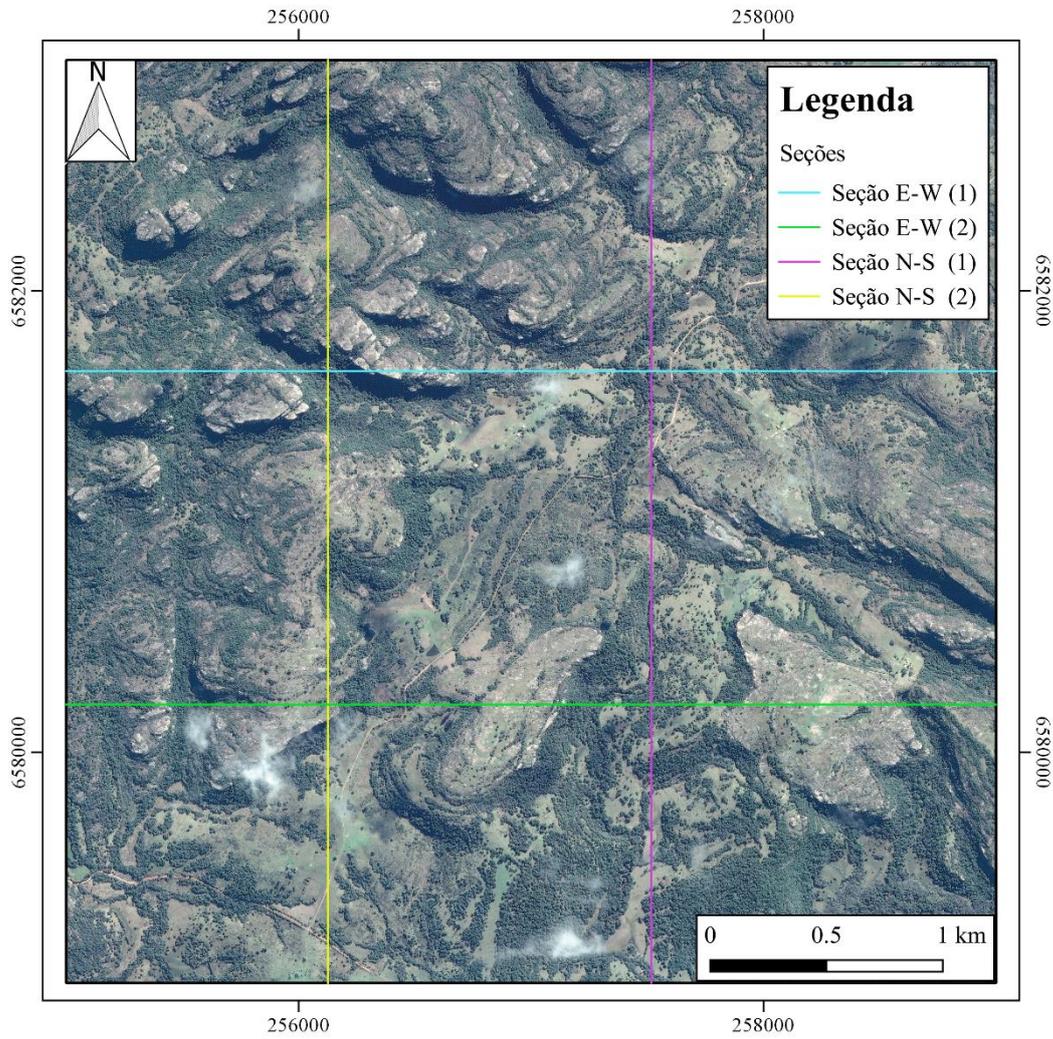
Fonte: autora.

A partir do modelo construído pela integração dos dados, foram geradas quatro seções geológicas, duas na direção N-S e duas na direção E-W (Fig. 45).

As seções foram construídas com o intuito de apresentar o contato entre as duas unidades geológicas, Grupo Santa Bárbara e Grupo Guaritas, e também a arquitetura estrutural da área. As Figuras 46 e 47 apresentam as seções N-S. Nessas seções é possível observar a geometria dobrada das unidades do Grupo Santa Bárbara (linha laranja), enquanto que as unidades do Grupo Guaritas estão em discordância sobre esta unidade. Nota-se

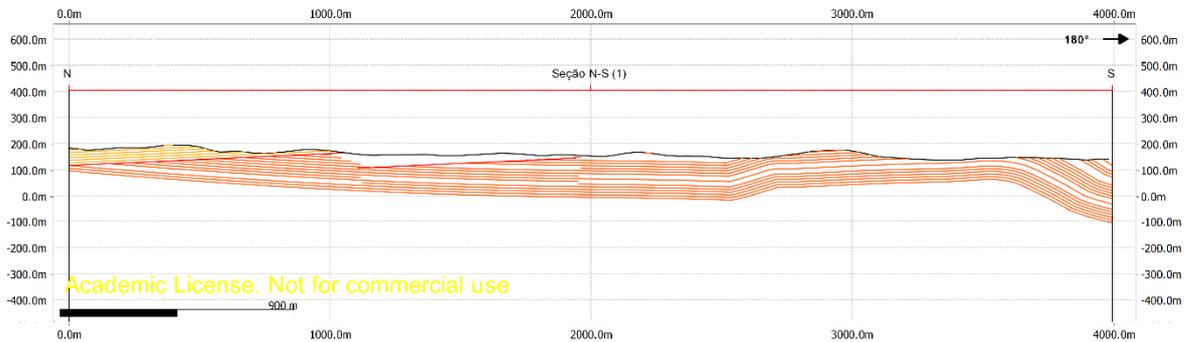
também que houve basculamento das camadas em blocos, observado na linha vermelha que representa o contato entre as duas unidades.

Figura 45 - Mapa da área com as seções geológicas.



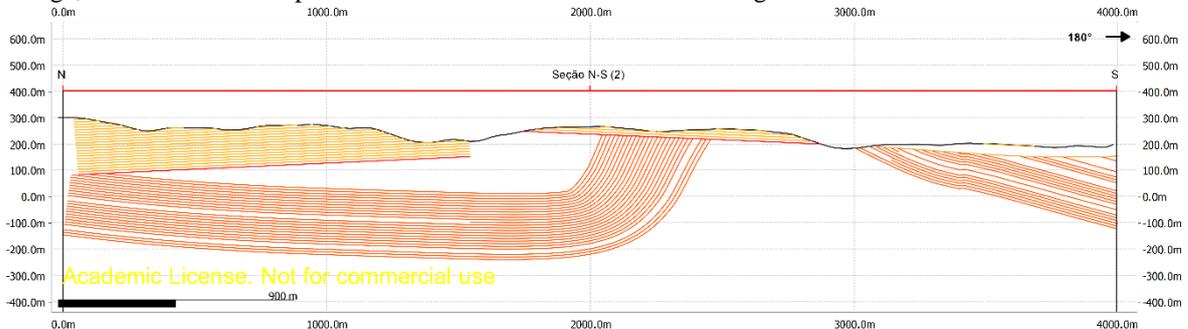
Fonte: autora.

Figura 46 - Seção com direção N-S (1) do modelo geológico. Em laranja, as camadas do Grupo Santa Bárbara, em bege, as unidades do Grupo Guaritas e em vermelho o contato litológico entre as duas unidades.



Fonte: autora.

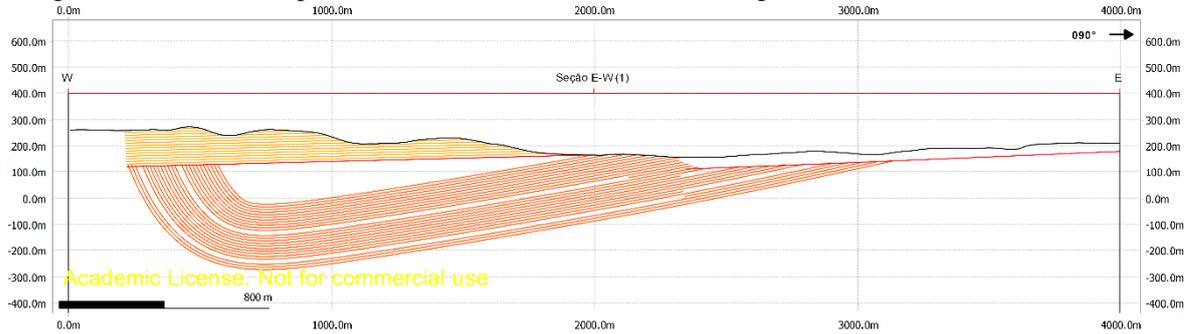
Figura 47 - Seção com direção N-S (2) do modelo geológico. Em laranja, as camadas do Grupo Santa Bárbara, em bege, as unidades do Grupo Guaritas e em vermelho o contato litológico entre as duas unidades.



Fonte: autora.

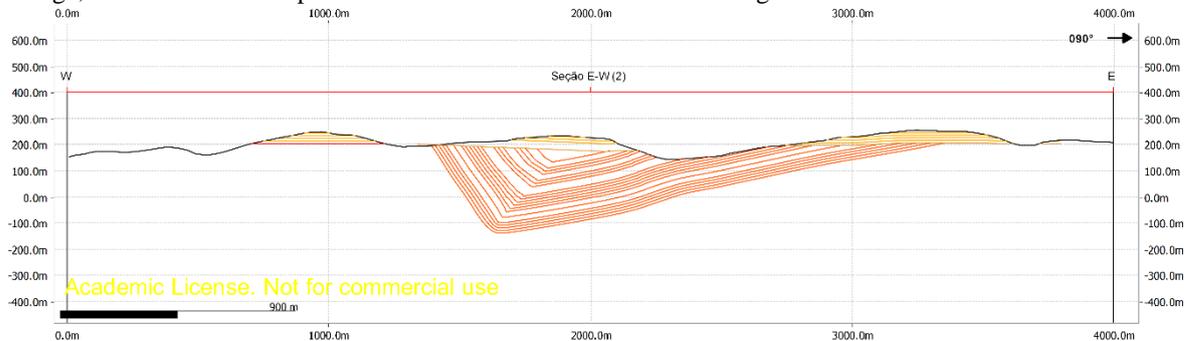
As Figuras 48 e 49 apresentam as seções E-W (Fig. 45). Assim como para as seções N-S, é possível observar a discordância entre as duas unidades litológicas. Porém, o basculamento antes observado no Grupo Guaritas não é aparentemente tão nítido como nas seções N-S. Na seção E-W é mostrado um brusco dobramento nas camadas do Grupo Santa Bárbara. A bisetriz desse dobramento coincide com a direção do lineamento que limita os blocos 2 e 3, anteriormente apresentados.

Figura 48 - Seção com direção E-W (1) do modelo geológico. Em laranja, as camadas do Grupo Santa Bárbara, em bege, as unidades do Grupo Guaritas e em vermelho o contato litológico entre as duas unidades.



Fonte: autora.

Figura 49 - Seção com direção E-W (2) do modelo geológico. Em laranja, as camadas do Grupo Santa Bárbara, em bege, as unidades do Grupo Guaritas e em vermelho o contato litológico entre as duas unidades.



Fonte: autora.

7 DISCUSSÕES

Os resultados obtidos através da coleta, processamento e modelagem dos dados estruturais, permitiu a correlação dos eventos deformadores da Bacia do Camaquã com as estruturas estudadas.

As fraturas do Grupo Santa Bárbara nessa região são mais frequentes que nas unidades do Grupo Guaritas, o que pode ser explicado pela recorrência de eventos que afetaram o Grupo Santa Bárbara antes da deposição das unidades do Grupo Guaritas, conforme discutido por Almeida, R. *et al.* (2012).

A inversão dos dados de falhas a partir dos resultados obtidos neste trabalho permitiu a identificação de dois paleotensores: *strike-slip*, com estruturas de direção NE e cinemática dextral e estruturas de direção NW e cinemática sinistral; e extensional, com estruturas de direção NW e cinemática sinistral e estrutura de direção NNE com cinemática normal oblíqua (Figs. 38 e 39). Essas estruturas foram identificadas no Grupo Santa Bárbara. Apesar de não terem sido identificadas estruturas com indicadores cinemáticos no Grupo Guaritas, a maioria

das fraturas identificadas são verticais a sub-verticais, o que pode indicar deformação por transcorrência. As fraturas identificadas possuem direção predominantemente NE e NW condizendo com as direções dos lineamentos (Fig. 50) e E-W, menos frequentes como lineamentos. Essa geometria está relacionada a fraturas ortogonais (PEACOCK *et al.*, 2016). A principal falha da região foi interpretada como tendo direção NE (Figs. 41 a 44); considerando as falhas de direção NE identificadas nos afloramentos, sugere-se que essas estruturas regionais (lineamentos) tenham cinemática dextral. Da mesma forma, as estruturas de direção NW foram interpretadas como de cinemática sinistral, de acordo com os indicadores cinemáticos observados em campo. Sendo assim, de acordo com o modelo de Riedel (NADALIN, 2016), as estruturas NE são supostamente pares R', as estruturas E-W pares R, as estruturas WNW seriam estruturas Y (ou M) e as estruturas de direção NW seriam os sistemas P. Nessa situação, as estruturas podem ter sido geradas por uma transcorrência com vetor de máxima compressão orientado na direção NE, conforme a figura abaixo.

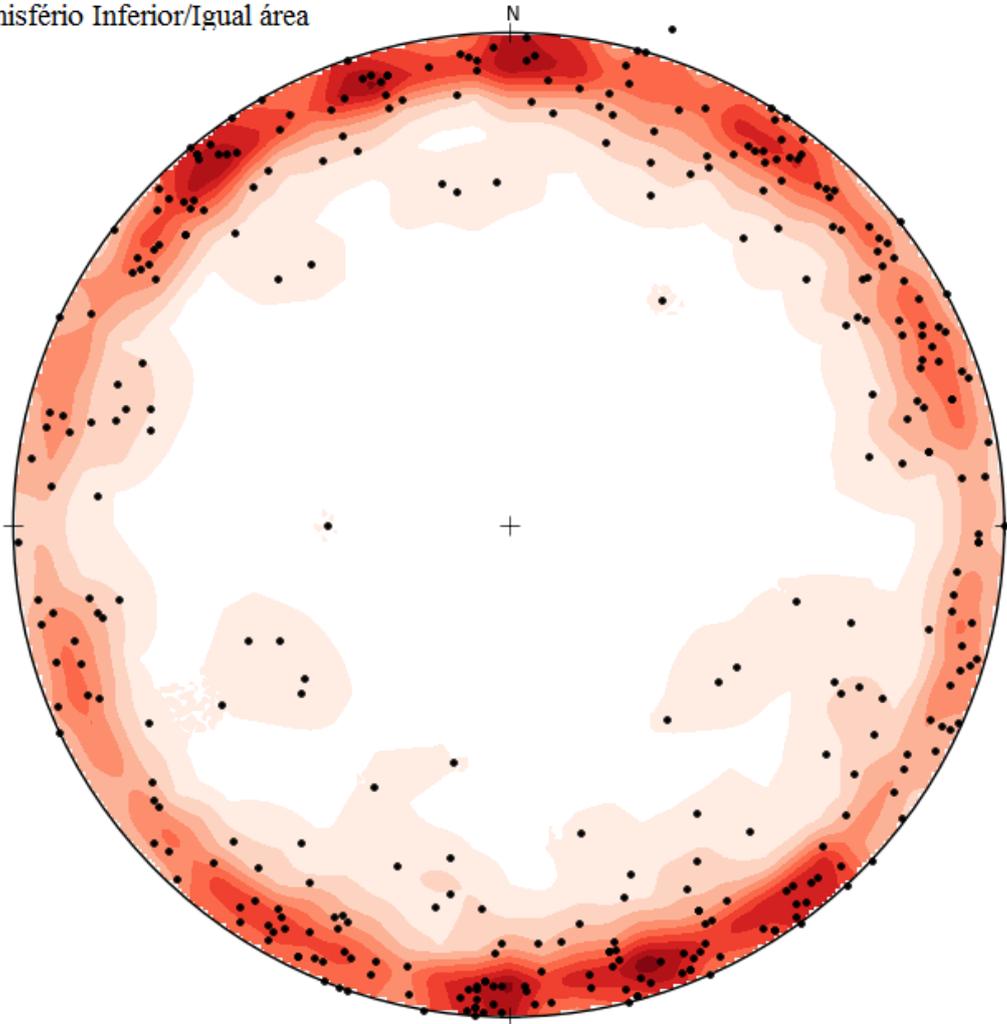
Figura 50 - Estereograma de todas as fraturas extensionais analisadas nos Grupo Santa Bárbara e Guaritas.

Fraturas extensionais (grupos Santa Bárbara e Guaritas)

Dados: 345

Polo de plano

Hemisfério Inferior/Igual área



Fonte: autora.

Os principais eventos deformacionais descritos para a região por Almeida, R. *et al.* (2012) são: distensão ENE (entre 600 e 545 Ma); compressão NNE (545 Ma); distensão NW (535 Ma); compressão NW (idade não estabelecida, mas supõe-se que seja de 530 Ma); e distensão NE (Cretáceo). Segundo Almeida, R. *et al.* (2012), houve um evento distensivo (ENE) e um evento compressivo (NNE) anteriores a deposição do Grupo Guaritas; e duas distensões (NW e NE) e uma compressão NW após a deposição deste grupo.

O evento compressivo de direção NNE identificado por Almeida, R. *et al.* (2012) é correlacionado neste trabalho com o paleotensor transcorrente, pois este contém vetor de máxima compressão na mesma direção NE (Fig. 38); e o tensor extensional de direção NE identificado nesse trabalho correlacionado (Fig. 39) com a distensão NE proposta por

Almeida, R. *et al.* (2012). Para comprovar esses eventos, sugere-se que seja realizado análise estruturas geométrica e cinemática complementar.

Na modelagem geológica foi possível observar como os eventos afetaram essas duas unidades superiores da Bacia do Camaquã. Além da desconformidade já conhecida entre as duas unidades (discordância angular), o Grupo Guaritas possui diferentes inclinações quando são comparados os quatro blocos estruturais individualizados na área (Figs. 41 a 44). Algumas notas devem ser tomadas quanto à modelagem geológica, que por ser explícita, é propícia a erros durante o uso de ferramentas manuais e semi-manuais, embora o uso de ferramentas semi-manuais permitam a repetição da geometria pois independem da interpretação do analisa e diminuem o erro gerado por esse fator. O grau de incerteza do modelo inicia com a aquisição dos dados estruturais em campo, visto que não foi feita a análise da acurácia das medidas; o fato de que boa parte do Grupo Santa Bárbara está encoberto, aflorando principalmente em drenagens e em estradas; o contato litológico foi digitalizado usando dados de campo e avaliação por sensoriamento remoto da área e essas informações podem ser errôneas devido à falta de exposição das unidades e isso pode levar ao erro da construção do modelo em sub-superfície. O modelo gerado permitiu evidenciar o rejeito diferencial entre os quatro blocos, e pode ser testada em campo com maior adensamento das análises.

8 CONCLUSÕES

Com base nas análises estruturais realizadas pode se concluir que há uma diferença no grau de deformação dos Grupos Santa Bárbara e Guaritas. O primeiro está mais deformado, dobrado e fraturado de forma mais intensa do que a unidade superior. Os lineamentos preferencias são para NE e NW, onde os de maiores comprimentos estão relacionados a direção NW. As fraturas possuem direções preferenciais para ENE e WNW. O evento extensional obtido como resultado coincide o evento extensional NE do Cretáceo, que ocorreu após formação do Grupo Guaritas. O evento *strike-slip* coincide com o resultado obtido para os dois eventos compressivos NNE e NW. A modelagem geológica foi importante para visualizar o contato entre as duas unidades e entender o comportamento estrutural na porção oeste da Janela Bom Jardim. Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se a utilização de levantamentos geofísicos com o objetivo de melhor conhecer a geologia em sub-superfície e realizar o adensamento das informações de campo.

REFERÊNCIAS

ADOBE™. **Adobe Illustrator CC Tryout**. 2015. Disponível em: <<http://www.adobe.com/br/>>.

ALLMENDINGER, Richard W.; CARDOZO, Nestor; FISHER, Donald M. **Structural geology algorithms: vectors and tensors**. 1ª ed. New York: Cambridge University Press, 2012.

ALMEIDA, Renato Paes de. **Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai Oriental)**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. DOI:10.11606/T.44.2005.tde-29072013-132609. Acesso em: 2016-05-15.

ALMEIDA, Renato P. de; JANIKIAN, Liliane; FRAGOSO-CÉSAR, Antonio Romalino; MARCONATO, André. Evolution of a rift basin dominated by subaerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil. **Sedimentary Geology**, Vol. 217, p. 30–51 2009.

ALMEIDA, Delia del Pilar Montecinos de; CHEMALE JR, Farid; MACHADO, Adriane. Late to post-orogenic Brasiliano-Pan-African volcano-sedimentary basins in the Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil. In: **INTECH Open Access Publisher**, 2012.

ALMEIDA, Renato Paes de; SANTOS, Maurício G.M.; FRAGOSO-CÉSAR, Antonio Romalino; JANIKIAN, Liliane; FAMBRINI, Gelson Luís. Recurring extensional and strike-slip tectonics after the Neoproterozoic collisional events in the southern Mantiqueira province. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. Vol. 84, n. 2, p. 347-376, 2012.

ANGELIER, Jacques. From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. **Journal of Structural Geology**, Paris, Vol. 11, n. 1, p. 37-50, 1989.

BERRA, Fabrizio; FELLETTI, Fabrizio; ZUCALI, Michele. 3D geological modelling and education: teaching geological cross sections with a 3D modelling software to improve spatial thinking skills in geoscience students. **Società Geologica Italiana**, Roma, Vol. 30, p. 5-11, 2014.

BIBLIOTECA DIGITAL – FEPAM. **Arquivos Digitais para uso em SIG** - base cartográfica digital do RS 1:250.000. FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler, RS. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/biblioteca/geo/bases_geo.asp>. Acesso em: 08-06-2016.

BICCA, Marcos Müller. **Tectônica e Proveniência do Grupo Santa Bárbara, Região de Minas do Camaquã – RS**. Dissertação de Mestrado em Ciências - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BICCA, Marcos Müller Bicca; CHEMALE, Farid Chemale Jr.; JELINEK, Andrea Ritter; OLIVEIRA, Christie Helouise Engelmann de Oliveira; GUADAGNIN, Felipe; ARMSTRONG, Richard. Tectonic evolution and provenance of the Santa Bárbara Group, Camaquã Mines region, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. Vol. 48, p. 173 e 192, 2013.

BORBA, A.W., MIZUSAKI, A.M.P. Santa Bárbara formation (Caçapava do Sul, southern Brazil): depositional sequences and evolution of an Early Paleozoic post-collisional basin. **Journal of South American Earth Sciences**. Vol. 16, p. 365–380, 2003.

BORBA, André Weissheimer. **Evolução geológica da “Bacia do Camaquã” (Neoproterozoico e Paleozoico inferior do Escudo Sul-rio-grandense, RS, Brasil): uma visão com base na integração de ferramentas de estratigrafia, petrografia e geologia isotópica**. Tese (Doutorado em Estratigrafia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CAMOZZATO, Eduardo; TONIOLO, João Angelo; LAUX, Jorge Henrique. Metalogênese do Cinturão Dom Feliciano e fragmentos paleocontinentais associados (RS/SC). In: SILVA, Maria da Glória da; NETO, Manoel Barretto da Rocha; JOST, Hardy; KUYUMJIAN, Raul Minas. **Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras**. Belo Horizonte: CPRM, 2014. p. 517-556.

CHIANG, Liu Chan Chiang. **Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao Estado do Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984. DOI:10.11606/T.44.1984.tde-25082015-143959. Acesso em: 2016-11-24.

COWAN, E.J.; BEATSON, R.K.; ROSS, H.J.; FRIGHT, W.R.; MCLENNAN, T.J.; EVANS, T.R.; CARR, J.C.; LANE, R.G.; BRIGHT, D.V.; GILLMAN, A.J.; OSHUST, P.A.; TITLEY, M. **Practical Implicit Geological Modelling**. 5th International Mining Geology Conference. n. 8, 2003. Bendigo, Victoria.

DAVIS, George H.; REYNOLDS, Stephen J. **Structural geology of rocks and regions**. John Wiley & Sons, 2^a ed. 1996.

DELVAUX, D.; MOEYS, R.; STAPEL, G.; MELNIKOV, A. ERMIKOV, V. Palaeostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part I. Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution. **Tectonophysics**. Vol. 252 (I 995), p. 61-101, 1995.

DELVAUX, D. & SPERNER, B. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. In: Geological Society of America. **New Insights into Structural Interpretation and Modelling**. London: Geological Society of London, 2003. p. 75-100.

DELVAUX, D. Win-Tensor, an interactive computer program for fracture analysis and crustal stress reconstruction. EGU General Assembly, Vienna, 2011. **Geophysical Research Abstracts**, Vol. 13, EGU2011-4018.

DUTCH, Steve. **Construct a Fold Cross-Section Using the Kink Method**. In: Structural Geology Methods Manual. Natural and Applied Sciences, University of Wisconsin-Green Bay, 2015. Disponível em: < <http://www.uwgb.edu/dutchs> >. Acesso em: 2016-11-02.

FAMBRINI, Gelson Luís. **O Grupo Santa Bárbara (Neoproterozoico III) da Bacia do Camaquã, Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44134/tde-26092014-160734/>>. Acesso em: 2016-05-08.

FAMBRINI, Gelson Luís; JANIKIAN, Liliane; ALMEIDA, Renato Paes de; FRAGOSO-CÉSAR, Antonio Romalino. **O Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã Central, RS: Estratigrafia e Sistemas Depositionais**. Revista Brasileira de Geociências. Vol. 35, n. 2, p. 227-238, junho de 2005.

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

GONZALEZ & TEIXEIRA. Considerações sobre estratigrafia e ambientes de sedimentação da região das Minas de Camaquã e Jazida Santa Maria – RS. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31, 1980, Balneário de Comburú (SC). **Anais**. Balneário Camboriú: Sociedade Brasileira de Geologia, 1980, Vol. 3, p. 1513-1524.

Google Earth Pro. 2016. Disponível em: < <https://www.google.com.br/earth/> >

GROHMANN, Carlos H.; CAMPANHA, Ginaldo A.C.; SOARES JUNIOR, Adilson V. OpenStereo: um programa livre e multiplataforma para análise de dados estruturais. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 13. 2011, Campinas (SP). **Anais**. Campinas: Sociedade Brasileira de Geologia - SP, 2011. p. 24-26.

GROSHONG, Richard H. Jr. **3-D Structural Geology** - A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation. Netherlands: Springer, 2006.

GUEDES, Ingrid Maria Guimarães. **Aplicação da modelagem estrutural computacional direta na análise da geometria das falhas**: Exemplo da Falha de Baixa Grande (Bacia Potiguar – NE do Brasil). Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em geodinâmica e geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

HARTMANN, L. A; CHEMALE JR., F.; PHILIPP, R. P. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. In: **50 ANOS de Geologia**: Instituto de Geociências. Contribuições /Editores Roberto Iannuzzi; José Carlos Frantz. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, 2007. p. 97-124.

HASENACK, H.; WEBER, E.(org.) **Base cartográfica vetorial contínua do Rio Grande do Sul** - escala 1:50.000. Porto Alegre: UFRGS Centro de Ecologia. 2010. 1 DVD-ROM. (Série Geoprocessamento n.3). ISBN 978-85-63483-00-5 (livreto) e ISBN 978-85-63843-01-2 (DVD).

ISAAKS, Edward H. & SRIVASTAVA, R. Mohan Srivastava. **An Introduction to Applied Geostatistics**. 1ª ed. Oxford University Press, 1990

JANIKIAN, Liliane; ALMEIDA, Renato Paes de Almeida; FRAGOSO-CÉSAR, Antonio Romalino Santos; MARTINS, Veridiana Teixeira de Souza; DANTAS, Elton Luiz; TOHVER, Eric; MCREATH, Ian; D'AGRELLA-FILHO, Manoel Souza. Ages (U-Pb SHRIMP and LA ICPMS) and stratigraphic evolution of the Neoproterozoic volcano-sedimentary successions from the extensional Camaquã Basin, Southern Brazil. **Gondwana Research**. Vol. 21, p. 466-482, 2012.

KUMAIRA, Sissa. **Análise e modelagem estrutural do Domo de Brasília**. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MACHADO, João Pacífico Silveira Luiz. **Estruturação do Graben Arroio Moirão, Santana da Boa Vista, RS**: Tectônica e Geocronologia. Monografia de TCC, Instituto de Geociências - UFRGS, Porto Alegre, 2014.

MACHADO, João P.S.L.; PHILIPP, Ruy Paulo; FACCINI, Ubiratan F.; JELINEK, Andrea R.; ZVIRTES, Gustavo. Tectônica rúptil meso e cenozóica e a formação do Gráben Arroio Moirão, Santana da Boa Vista – Piratini, RS. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia e Workshop De Recursos Minerais Da Região Sul, 9 e 2. 2015. Florianópolis (SC). **Anais**. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Geologia. DOI: 10.13140/RG.2.1.3256.0803

MARASCHIN, Anderson José; MIZUSAKI, Ana Maria; ZWINGMANN, Horst; BORBA, André Weissheimer; SBRISSA, Gesiane Fraga. Illite authigenesis in sandstones of the Guaritas Allgroup (Early Paleozoic): Implications for the depositional age, stratigraphy and evolution of the Camaquã Basin (Southern Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**. Vol. 29, p. 400–411, 2010.

MATTÉ, Vinícius; SOMMER, Carlos Augusto; LIMA, Evando Fernandes; PHILIPP, Ruy Paulo; BASEI, Miguel Angelo Stipp. Post-collisional Ediacaran volcanism in oriental Ramada Plateau, southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. Vol. 71, p 201-222, 2016

MOVE™. **Midland Valley Exploration**, 2015.

OLIVEIRA, Christie Helouise Engelmann de. **Evolução Tectono-Estratigráfica das Bacias Santa Bárbara e Guaritas, Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências (IG), Universidade de Brasília – UnB, Brasília, 2012.

PAIM, P. S. G., LOPES, R. C. & CHEMALE JR., F. Aloestratigrafia, sistemas deposicionais e evolução paleogeográfico Bacia do Camaquã – V22zzendiano Superior/Ordoviciano Inferior no RS. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia e Encontro de Geologia do Cone Sul, 6 e 1, 1995. **Anais**. Porto Alegre, 1995, p. 39-50.

PAIM, P. S. G., Chemale, F. & Lopes, R. C. (2000) A Bacia do Camaquã. In: M. Holz & L. F. De Ros. **Geologia do Rio Grande do Sul**, Centro de Investigação do Gondwana - CIGO, Porto Alegre, p. 231-274.

PAIM, Paulo Sérgio Gomes; CHEMALE JR., Farid; WILDER, Wilson. Estágios evolutivos da Bacia do Camaquã (RS). **Ciência e Natura**, Santa Maria, Vol. 36, Ed. Especial, p. 183–193, 2014.

PEACOCK, D.C.P.; NIXON, C.W.; ROTEVATN, A.; SANDERSON, D.J.; ZULUAGA, L.F. Glossary of fault and other fracture networks. **Journal of Structural Geology**. Vol. 92, p.12 e 29, 2016.

PHILIPP, Ruy Paulo; PIMENTEL, Marcio Martins; CHEMALE JR., Farid. **Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology**. Brazilian Journal of Geology, Vol. 46(Suppl 1), p. 83-104, 2016.

QGIS Development Team, 2016. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <http://www.qgis.org/>

RAGAN, Donald M. **Structural Geology**: An introduction to geometrical techniques. 4^a ed. New York: Cambridge University Press, 2009.

RAMSAY, John G. & HUBER, Martin I. **The techniques of modern structural geology**. Volume 2: Fractures and Folds. 1^a ed. London: Elsevier, 1987.

RIBEIRO, Maurício. Geologia da Folha Bom Jardim, Rio Grande do Sul, Brasil. **Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia**. Vol. 247, p. 1-142, 1970.

RIBEIRO, M.J.; BOCCHI, P.R.; FIGUEIREDO FILHO, P.M.; TESSARI, R. 1966. Geologia da quadricula de Caçapava do Sul, RS, Brasil. In: Divisão de Fomento da Produção Mineral. **Boletim**. DNPM. n. 127.

RIBEIRO, M. & LICHTENBERG, E. Síntese da Geologia do Escudo do Rio Grande do Sul. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, 1978. **Anais**. Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978, Vol. 6, p. 2451-2463.

ROBERTSON, J. F. (1966) **Revision of the stratigraphy and nomenclature of rock units in the Caçapava-Lavras region, State of Rio Grande do Sul, Brazil**. Notas e estudos – IG/UFRGS.

SANTOS, Maurício G.M.; ALMEIDA, Renato P.; MOUNTNEY, Nigel P.; FRAGOSO-CESAR, Antonio R.S. Seismites as a tool in the palaeoenvironmental reconstruction of fluvial deposits: The Cambrian Guarda Velha Formation, southern Brazil. **Sedimentary Geology**. Vol. 277-278, p. 52–60, 2012.

SPERNER, B.; MULLER, B.; HEIDBACH, O.; DELVAUX, D.; REINECKER, J.; FUCHS, K. Tectonic stress in the Earth's crust: advances in the World Stress Map project. In: Geological Society of America. **New Insights into Structural Interpretation and Modelling**. London: Geological Society of London, 2003. p. 101-116.

SILVA, Ana Paula Cezario da. **Modelagem geológica-geotécnica do túnel de adução da pequena central hidrelétrica Dores de Guanhões – MG**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SOMMER, C. A.; LIMA, E. F. de; NARDI, L. V. S.; FIGUEIREDO, A. M. G; PIEROSAN, R. Potassic and low- and high- Ti ,midly alkaline volcanism in the Neoproterozoic Ramada Plateau, southernmost Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**. Vol. 18, p. 237-254, 2005

TROTTA, Mario Cesar. **Análise estrutural dos diques e brechas tectônicas da região leste do Gráben da Guanabara, estado do Rio de Janeiro**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em geologia e geofísica marinha, Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004.

U.S. Geological Survey. 2014. **Earth Explorer**. Disponível em: <
<http://earthexplorer.usgs.gov/>>

VAN DER PLUIJM, Ben A.&MARSHAK, Stephen.**Earth Structure: an introduction to structural geology and tectonics**. 2ª ed. New York: W. W. Norton & Company, 2004.

VOLLGGER, S. A.; CRUDEN, A.R.; AILLERES, L.; COWAN, E.J. Regional dome evolution and its control on ore-grade distribution: Insights from 3D implicit modelling of the Navachab gold deposit, Namibia. **Ore Geology Reviews**, Vol. 69, p. 268–284, 2015.