

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

HIAGO VITOR PORTILHO DA SILVA

**ANÁLISE DA TRAJETÓRIA DE PRESSÃO, TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO
DOS GNAISSES DO ARROIO LARANJEIRA, COMPLEXO CAMBAÍ, VILA NOVA
DO SUL/RS**

**Caçapava do Sul
2024**

HIAGO VITOR PORTILHO DA SILVA

**ANÁLISE DA TRAJETÓRIA DE PRESSÃO, TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO
DOS GNAISSES DO ARROIO LARANJEIRA, COMPLEXO CAMBAÍ, VILA NOVA
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: Giuseppe Betino De Toni

**Caçapava do sul
2024**

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

S586a Silva, Hiago Vitor

ANÁLISE DA TRAJETÓRIA DE PRESSÃO, TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO
DOS GNAISSES DO ARROIO LARANJEIRA, COMPLEXO CAMBAÍ, VILA NOVA
DO SUL/RS / Hiago Vitor Silva.

112 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, GEOLOGIA, 2024.

"Orientação: Giuseppe De Toni".

1. Petrologia Metamórfica. 2. Pseudoseção. 3. Trajetória P-
T-D. 4. Microtectônica. 5. Gondwana Ocidental. I. Título.

Hiago Vitor Portilho da Silva

ANÁLISE DA TRAJETÓRIA DE PRESSÃO, TEMPERATURA E DEFORMAÇÃO DOS GNAISSES DO ARROIO LARANJEIRA,
COMPLEXO CAMBAÍ, VILA NOVA 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 de Curso defendido e aprovado em 12 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Giuseppe Betino De Toni

Orientador

Universidade Federal do Pampa

Prof. Dr. Tiago Rafael Gregory

Universidade Federal do Pampa

Geól. Marcelo Lusa

Universidade Federal do Pampa



Assinado eletronicamente por **GIUSEPPE BETINO DE TONI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2024, às 11:25, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TIAGO RAFAEL GREGORY, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 13/12/2024, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCELO LUSA, GEOLOGO**, em 17/12/2024, às 19:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1617500** e o código CRC **DA369F96**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Dedico este trabalho ao meu pai, Arnaldo Raimundo da Silva; à minha mãe, Vilian Marlen Valente Portilho; à minha querida avó, Maria Vanilde dos Santos Valente; e aos meus irmãos, Cauã Gabriel Portilho da Silva e Amanda Aressa Portilho da Silva. A todos vocês, minha eterna gratidão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Pai Eterno por todas as bênçãos, amor, cuidado e, principalmente, pelos obstáculos e desafios que colocou em minha vida, pois, sem eles, eu não conseguiria me tornar nem um terço do que sou hoje. Gratidão pela família que o Senhor me deu, que sempre me apoiou e incentivou a estudar.

Gratidão por um pai trabalhador e honesto, que me mostrou os caminhos certos da vida sem precisar passar por cima de ninguém.

Gratidão por uma mãe amorosa, altruísta, carinhosa e zelosa pelos seus filhos, que me ensinou a amar, perdoar e aceitar as coisas como elas são, sem reclamar.

Gratidão à minha avó, por todo amor e cuidado em minha vida desde que nasci. Sou grato por ser minha parceira número um nos carnavais que pulamos — e que ainda vamos continuar pulando juntos —, por todos os litros de açaí, maniçoba, farinha e tantas outras iguarias que a senhora sempre fez questão de manter presentes em minha vida.

Gratidão por ter um irmão e uma irmã maravilhosos, com quem posso contar por toda a vida como verdadeiros melhores amigos.

Sou grato também ao meu camarada e orientador, Giuseppe Betino De Toni, que foi meu principal mentor durante a graduação e me abriu várias portas. Gratidão por todos os ensinamentos, as discussões geológicas, as partidas de sinuca, a paciência e, principalmente, pelas inúmeras saideiras durante essa parceria, que não termina aqui. Gratidão por ser o irmão mais velho que eu não tive.

Sou imensamente grato à Unipampa e à FAPERGS por todo o ensino de qualidade e pelas oportunidades de desenvolvimento pessoal e acadêmico durante minha graduação. Em especial, gostaria de agradecer à minha banca, Tiago Rafael Gregory e Marcelo Lusa, por contribuírem de maneira exemplar neste trabalho. Gratidão a todos os professores, técnicos, motoristas e servidores que também contribuíram de maneira inestimável para a minha formação e conclusão deste trabalho.

Por fim, mas não menos importante, gratidão à minha segunda família, que construí durante esses seis anos de graduação. Desde a fundação da UKEL, a passagem pela república Panta Rhei com meus camaradas Fernando, Rafinha e Vinícius, ao grupo B&B e sua subdivisão Noronha, ao Marlboro FC, ao basquete dos Pampas e a todos os integrantes. À minha pata Nanã, pelas incontáveis vezes que me salvou e me afundou na sinuca. Às minhas camaradas Pamela, Ingrid e Ana, muito obrigado!

Ao meu amigo e faixa Gustavo Knak, muito obrigado pela parceria desde o início, quando entramos juntos nessa jornada geológica. Obrigado, Flavia, pela pessoa maravilhosa que você é na minha vida; obrigada pela parceria, cuidado, amor e carinho. Você foi um presente divino e brilha intensamente.

Sem todos vocês, nada disso seria possível. Desde já, minha eterna gratidão a todos.

“Enquanto houver bambu, vai flecha”

Autor desconhecido

RESUMO

A análise da trajetória de pressão, temperatura e deformação (P-T-D) dos gnaisses do Arroio Laranjeira permite uma melhor compreensão a respeito do metamorfismo das rochas do Complexo Cambaí, localizado em Vila Nova do Sul, Rio Grande do Sul. Este trabalho pretende contribuir para as discussões sobre os modelos evolutivos do embasamento do Bloco São Gabriel. A caracterização geológica e estrutural por meio de trabalho de campo e descrição petrográfica possibilitou a discriminação entre orto- e paragneisses, assim como o reconhecimento em escala de afloramento de uma intercalação litológica entre os dois tipos de gnaisse. A foliação metamórfica (Sx) mergulhando predominantemente para NW, variando de baixo a alto ângulo devido à dobras com eixos de baixo caimento e planos axiais (PA) NE-SW com alto ângulo de mergulho, variam de abertas a isoclinais e são indicativos da heterogeneidade da deformação. Tal foliação, tanto em baixo quanto em alto ângulo, apresenta lineação de baixo caimento para SW, subparalela ao eixo de dobra, e indica o caráter progressivo da deformação que gerou a trama principal e seu dobramento. Injeções trondhjemíticas transitando na Sx dobrada e nos PA simultaneamente são sugestivas de seu caráter sintectônico. Indicadores cinemático, tanto em escala macroscópica quanto em escala microscópica, na Sx de baixo ângulo de mergulho apresentam componentes de empurrão para NE, e de transcorrência dextral na alto ângulo, interpretados como resultante de deformação transpressiva. A partir da determinação da composição geoquímica dos paragneisses por meio de análises de Fluorescência de Raios-X foi possível classificar os protólitos dos paragneisses pelíticos como grauvacas com distintas proporções de argila e/ou folhelhos com diferentes proporções de ferro, bem como a plotagem da pseudoseção por meio do *software* Perple_X, gerando a grade petrogenética. A determinação da química mineral dos paragneisses por meio de análises via microsonda eletrônica possibilitou o cálculo das curvas composicionais e das isopletras. Evidências petrográficas, como cordierita na foliação principal dos paragneisses pelíticos, parcialmente substituída por muscovita em orientação discordante, sugerem uma trajetória no diagrama P-T com paragênese de pico térmico (Pl+Grt+Bt+Crd+Qtz, 685 - 695°C / 3.5 - 3.7kbar) seguida pelo reequilíbrio do pico de pressão (Pl+Grt+Mus+Bt+Ilm+Qtz, 588 - 592°C / 6,6 - 6,8 kbar). Mapas composicionais e análises pontuais de química mineral sugerem que as cordieritas

tiveram substituição parcial avançada por muscovita, sendo interpretadas como pseudomorfos. A integração dessas informações em um modelo evolutivo indica uma trajetória rápida de aumento da pressão e/ou diminuição da temperatura, visto que a assembleia mineral se encontra em desequilíbrio. A mudança no gradiente geotérmico de $\sim 58^{\circ}\text{C}/\text{km}$ no pico térmico para $26,68^{\circ}\text{C}/\text{km}$ no pico de pressão, associada a paragênese do pico térmico parcialmente preservada sugere que não houve tempo do reequilíbrio total no pico de pressão, evidenciando uma rápida exumação dos gnaisses. Por fim, se sugere uma transição rápida entre estágios orogênicos distintos, de ambiente de arco magmático continental para um ambiente colisional durante a formação do Gondwana Ocidental.

Palavras-Chave: Petrologia Metamórfica; Pseudoseção; Perple_X; Trajetória P-T-D; Microtectônica; Gondwana Ocidental.

ABSTRACT

The analysis of the pressure, temperature, and deformation (P-T-D) trajectory of the Arroio Laranjeira gneisses allows for a better understanding of the metamorphism of the rocks of the Cambaí Complex, located in Vila Nova do Sul, Rio Grande do Sul. This study aims to contribute to discussions regarding the evolutionary models of the São Gabriel Block basement. Geological and structural characterization through fieldwork and petrographic description enabled the discrimination between ortho- and paragneisses, as well as the recognition of a lithological intercalation between the two types of gneisses on an outcrop scale. The metamorphic foliation (Sx), dipping predominantly to the NW with low to high angles due to folds with low-plunge axes and NE-SW axial planes (AP) with high dip angles, ranges from open to isoclinal folds, indicating deformation heterogeneity. This foliation, at both low and high angles, exhibits a low-plunge lineation to the SW, subparallel to the fold axis, indicating the progressive nature of the deformation that generated the main fabric and its folding. Trondhjemitic injections traversing both the folded Sx and the AP simultaneously suggest their syntectonic character. Kinematic indicators, both at macroscopic and microscopic scales, within the low-angle Sx exhibit components of thrusting towards the NE and dextral strike-slip in the high-angle Sx, interpreted as resulting from transpressive deformation. Through X-ray fluorescence analysis, the geochemical composition of the paragneisses was determined, allowing the classification of the protoliths of the pelitic paragneisses as graywackes with varying proportions of clay and/or shales with different iron contents. The pseudosection plot using *Perple_X* software generated the petrogenetic grid. The determination of the mineral chemistry of the paragneisses through electron microprobe analysis enabled the calculation of compositional curves and isopleths. Petrographic evidence, such as cordierite in the main foliation of the pelitic paragneisses, partially replaced by muscovite in a discordant orientation, suggests a trajectory in the P-T diagram with a peak thermal paragenesis (Pl+Grt+Bt+Crd+Qtz, 685–695°C / 3.5–3.7 kbar) followed by re-equilibration at the pressure peak (Pl+Grt+Mus+Bt+Ilm+Qtz, 588–592°C / 6.6–6.8 kbar). Compositional maps and point analyses of mineral chemistry suggest that the cordierites underwent advanced partial replacement by muscovite, interpreted as pseudomorphs. The integration of these data into an evolutionary model indicates a rapid trajectory of pressure increase and/or temperature decrease, as the mineral

assemblage is out of equilibrium. The change in the geothermal gradient from $\sim 58^{\circ}\text{C}/\text{km}$ at the thermal peak to $26.68^{\circ}\text{C}/\text{km}$ at the pressure peak, associated with the partially preserved peak thermal paragenesis, suggests that there was insufficient time for complete re-equilibration at the pressure peak, evidencing rapid exhumation of the gneisses. Finally, a rapid transition between distinct orogenic stages is suggested, from a continental magmatic arc environment to a collisional setting during the formation of Western Gondwana.

Keywords: Metamorphic Petrology; Pseudosection; *Perple_X*; P-T-D path; Microtectonics; West Gondwana.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. A) Mapa do estado do Rio Grande do Sul e os municípios de Porto Alegre e Vila Nova do Sul conectados pela BR-290; B) Mapa do município de Vila Nova do Sul com a localização da área de estudo.....	23
Figura 2 – Mapa de localização do afloramento do Arroio Laranjeira. A) Imagem de satélite com o caminho até a entrada da estrada Nossa Senhora de Guadalupe; B) Caminho até a propriedade do Senhor Nei e caminho até o afloramento.	24
Figura 3 – Mapa da reconstrução global em 825 Ma, apresentando uma Rodínia de meia-idade e as antigas posições dos principais crátons relacionados ao sistema orogênico Kaoko-Dom Feliciano-Gariép.....	25
Figura 4 – Principais blocos crustais na América do Sul e África, com ênfase para (1) Cinturão Dom Feliciano em vermelho e (2) os ofiolitos e/ou complexos de arcos de ilhas do Bloco São Gabriel na estrela amarela.....	26
Figura 5 – Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano com os principais lineamentos regionais: ZCMG – Zona de Cisalhamento Major Gercino; ZCIP – Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó; FPM - Falha do Passo do Marinheiro; ZCDC – Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu; ZCSB – Zona de Cisalhamento de Sierra Ballena; ZCSY – Zona de Cisalhamento de Sarandi del Yi; LI – Lineamento de Ibaré; ZCCS –Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul.	27
Figura 6 – Mapa geológico do Bloco São Gabriel.	28
Figura 7 – Gráficos de P-T relacionados à estabilidade mineral e sua relação com diferentes fácies metamórficas. A) Relações de estabilidade da andaluzita, cianita e sillimanita, bem como do conjunto jadeíta-quartzo e albita. (1), (2) e (3) indicam trajetórias típicas de temperatura e pressão de rocha no metamorfismo regional dos tipos cianita-sillimanita, andaluzita-sillimanita e jadeíta-glaucofanito, respectivamente; B) Temperaturas e pressões das rochas estimadas para diferentes fácies metamórficas.	32
Figura 8 – Gradientes térmicos aparentes de cinturões metamórficos por tipo, plotados em função da idade: metamorfismo granulítico e de ultratemperatura (G-UHT – círculos laranja); metamorfismo de fácies eclogito e granulito de alta pressão (E-HPG – losangos lilás claro); metamorfismo de alta pressão e ultra-alta pressão (HP-UHP), incluindo fácies xisto-azul com lawsonita e eclogitos (quadrados azul claro); e eclogitos e rochas metamórficas de ultra-alta pressão (quadrados azul escuro).....	33
Figura 9 – Esquema da evolução geodinâmica da Terra.	34
Figura 10 – Ordem sequencial da metodologia de abordagem integrada.	40
Figura 11 – Registros fotográficos de campo. A) Limpeza em uma porção do afloramento; B) Coleta orientada de amostra em alto ângulo; C) Limpeza de amostra coletada; D) Coleta de amostras chips para análise química.	41
Figura 12 – Utilização do Stereo32 para produção dos estereogramas.	42
Figura 13 – Amostragem orientada em rochas deformadas ductilmente. A) posição normal devido medida no topo; B) posição inversa devido medida na base.	43
Figura 14 – Amostra GC-04F, coletada e orientada no próprio local de amostragem, zoom de onde foi realizada a orientação da amostra.....	44
Figura 15 – Croquis produzidos em campo. A) Margem SW do croqui GC-01-4; B) Croqui GC01-5 contemplando as 2 margens do arroio; C) Margem NE do croqui GC01-4. Todas as numerações indicam medidas estruturais obtidas e marcadas em campo.....	46
Figura 16 – Preparação de lâminas delgadas. A) Serra para corte orientado das amostras e lixamento das esqúirulas; B) Amostras GC-01H e 01I cortadas no plano XZ.....	47
Figura 17 – Laboratório de microscopia do campus Caçapava onde foram realizadas as descrições petrográficas.	48
Figura 18 – Método de descrição de amostra macroscópica. A) Registro fotográfico e descrição da amostra GC-01G; B) Croqui da mesma amostra com as principais observações macro e esboço da lâmina orientada.	49

Figura 19 – Método de descrição de amostra microscópica. A) Microscópio Nikon com câmera USB ligada ao notebook para descrição petrográfica e registro de fotomicrografias; B) Software ToupView utilizado para captura e adição de escala nas fotomicrografias.....	50
Figura 20 – Exemplo de análise cinemática. A) Ponto chave observado em afloramento indicando componente de estiramento com topo para NE (injeção tonalítica com boudins assimétricos) e encurtamento para NW (injeção tonalítica com dobramento assimétrico); B) Sítio microestrutural na amostra GC01-I com cristais de clinopiroxênio deformados e estirados assimetricamente, também indicando topo para NE.....	51
Figura 21 – Mapeamento dos microssítios de interesse para microsonda eletrônica.	52
Figura 22 – Preparação de lâminas delgadas para metalização. A) Abrasivos utilizados no polimento; B) Lixadeira politriz.	53
Figura 23 – Equipamentos utilizados para o processo de metalização das lâminas. A) Metalizadora Jeol JEE 4B; B) Armário dessecador com sistema de vácuo.....	54
Figura 24 – Processo de preparação de amostra para análise química de rocha. A) Britador de mandíbula onde as amostras foram inicialmente trituradas; B) Moinho de bolas utilizado para moagem inicial; C) Separação em peneira do que foi moído no moinho de bolas; D) – Moagem final no gral; E) Embalagem e etiquetagem das amostras para envio ao (CPGq) da UFRGS.....	55
Figura 25 – A) Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X RIX 2000 da Rigaku; B) Prensa Herzog.....	56
Figura 26 – Técnica analítica utilizada para determinar elementos químicos (Z>10). A) Arranjo instrumental de um espectrômetro de fluorescência de raios-X; B) Ilustração dos principais componentes de um tubo de raios X; C) Difração de raios X, a partir do espalhamento de um feixe de raios X, com os planos de átomos de um cristal e a condição de Bragg para que ocorra a difração; D) Ilustração dos principais componentes do filamento no tubo de raios X.....	58
Figura 27 – Utilização da microsonda eletrônica Cameca SXFive no LabME-CPGq-IGEO-UFRGS.....	59
Figura 28 – Técnica analítica utilizada para realização da química mineral. A) Análise quantitativa WDS (Wavelength-Dispersive X-Ray Spectroscopy); B) Aparato instrumental da microsonda eletrônica Cameca SXFive; C) Análise qualitativa/semiquantitativa por EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy).	60
Figura 29 – Representação reduzida do croqui geral vetorizado interligando os croquis (GC-01-1, GC-01-2, GC-01-4, GC-01-5 e GC-04). Para observações em escala original de 1:50, consultar anexo.	64
Figura 30 – Aspectos macroscópicos dos orto- e paragnaisse do Arroio Laranjeira. A) Paragnaisse com bandamento milimétrico de bandas quartzo-feldspáticas e bandas biotíticas em baixo ângulo dobrado; B) Injeção trondhjemítica discordante em ortognaisse com foliação de alto ângulo e anfibólios milimétricos observáveis em lupa de mão; C) Paragnaisse poiquiloblástico com granadas centimétricas em matriz quartzo-feldspática e biotítica; D) Amostra de ortognaisse intercalando bandas ricas em anfibólio com bandas quartzo-feldspáticas de textura equigranular média.	65
Figura 31 – Aspectos macroscópicos do tectonito L. A) Detalhamento em campo de Tectonito L com lineação de baixo caimento para SW; B) Amostra (GC01-I) serrada para laminação do tectonito L.....	66
Figura 32 – Aspectos macroscópicos da interação estrutural das injeções trondhjemíticas e de dique de diabásio com os gnaisses. A) Injeções trondhjemíticas transitando tanto na foliação dobrada quanto nos planos axiais das dobras, ao longo do qual ocorre boudinagem e <i>pinch-and-swell</i> ; B) Dique de diabásio cortando os gnaisses e trondhjemitos.....	66
Figura 33 – Estereogramas dos polos de foliação e planos axiais apresentando dobramento na foliação com mergulho predominante para NW e planos axiais de direção NE-SW. Registro fotográfico da porção mais a jusante do croqui (GC-01-3 / Lajeado V / Sítio 24 a 26).	68
Figura 34 – Registros fotográficos de campo e estereogramas de lineações e eixos de dobras subparalelos. A) Caneta amarela indicando baixo caimento do eixo de dobra paralelo	

- a lineação de estiramento. (GC-01-5 / Lajeado II / Sítios 13 e 18); B) Foliação dobrada com lineação de estiramento paralela à eixo de baixo caimento para SW. (GC-01-3 / Lajeado V / Sítio 29); C) Lineação de estiramento paralela à eixo de dobra com baixo caimento para SW. (GC-01-2 a jusante do Lajeado I); D) Foliação em alto ângulo de mergulho contendo lineação de estiramento com baixo caimento para SW. Local de amostragem da amostra GC-04D no croqui (GC-04 / Lajeado II)..... 69
- Figura 35 – Estereograma de polos representando as injeções trondhjemíticas transitando nos planos de foliação dobrado e nos planos axiais das dobras simultaneamente. Ocorre boudinagem e *pinch-and-swell* da injeção trondhjemítica ao longo da foliação plano-axial. Hexágonos azuis = Injeções trondhjemíticas formando guirlanda semelhante as dos estereogramas de foliação. Registro fotográfico da porção mais a montante do croqui (GC-01-2 / Lajeado I / Seção B-B')..... 70
- Figura 36 – Registro fotográfico dos indicadores cinemáticos observados em escala de afloramento ao longo dos planos XZ, tanto na foliação de baixo ângulo (plano XZ em perfil), quanto em alto ângulo (plano XZ em planta). A) Injeção trondhjemítica boudinada em baixo ângulo, indicando cinemática de empurrão para NE (GC-01-3 / Lajeado IV / Sítio 23); B) Veio de quartzo boudinado em alto ângulo, indicando transcorrência destal (GC-04 / Lajeado II / Sítio 2)..... 71
- Figura 37 – Fotografia de Bt paragnaisse pelítico (amostra GC-04D), com foliação marcada por biotita e intercalação de bandas quartzo-feldspáticas e bandas biotíticas. Marcas diagonais curvas são marcas da serra..... 73
- Figura 38 - Fotomicrografias representativas dos Bt paragnaises (amostra GC-04B). A) Porção rica em biotita marcando foliação. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC apresentando composição rica em quartzo e feldspatos; C) Feição expondo uma segunda foliação de maneira sutil, marcada pelas biotitas de orientação oblíqua. ND em objetiva de 5x; D) Mesma feição de C) sobre NC com muscovita acompanhando a orientação da segunda foliação. 74
- Figura 39 – Fotografia de Grt-Bt paragnaisse porfiroblástico, com corte frontal da amostra próximo do plano XY (plano de foliação da amostra GC-01B). A) Amostra de mão com foliação rica em biotita; B) Zoom em granada milimétrica, onde também se notam agregados de biotita alinhados e a matriz rica em quartzo de textura granoblástica; C) Zoom em outra granada milimétrica, semelhante à fotografia (B). 75
- Figura 40 - Fotomicrografias representativas dos Grt-Bt paragnaises (amostra GC-04F). A) Banda biotítica com granadas de 0,6 mm contornadas pela foliação. ND em objetiva de 5x; B) Intercalação de banda quartzo-feldspática com banda biotítica. ND em objetiva de 5x; C) Assembleia mineral de quartzo, biotita, plagioclásio, granada e muscovita. NC em objetiva de 5x; D) Mesma feição de C) sobre ND..... 77
- Figura 41 - Fotomicrografias representativas do microssítio 2 (amostra PVR-6060E). A) Feição geral do sítio expondo principais minerais e foliação marcada por biotita. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC, com destaque para zoom na muscovita e cordierita com agregado de silimanita; C) Muscovita sobrecrecendo cordierita com orientação de clivagem discordante. ND em objetiva de 20x; D) Mesma feição de C) sobre NC; E) Feição interna da cordierita com silimanita acicular sub-mm e sobrecrecimento pontual de muscovita discordante. ND em objetiva de 40x; F) Mesma feição de E) sobre NC. 78
- Figura 42 - Fotomicrografias representativas dos microssítios 4 e 7 (amostra PVR-6060E). A) Feição geral da assembleia mineral do sítio 4 com destaque para zoom na granada da parte superior da imagem. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC evidenciando cordierita no centro da imagem; C) Exemplo de granada em desequilíbrio com muscovita separada por opaco e em contato com cordierita. ND em objetiva de 20x; D) Mesma feição de C) sobre NC; E) Outro exemplo de granada em desequilíbrio com muscovita no sítio 7. ND em objetiva de 10x; F) Mesma feição de F) sobre NC. 79
- Figura 43 - Fotomicrografias representativas do microssítio 3 (amostra PVR-6060E). A) Feição geral da assembleia mineral do sítio 3 com destaque para zoom em agregado de silimanita incluso em cordierita. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC

- exibindo uma interdigitalização entre cordierita e muscovita; C) Porção interna da cordierita com agregado sub-mm de silimanita e opacos arredondados. ND em objetiva de 40x; D) Mesma feição de C) sobre NC. 80
- Figura 44 – Fotografia de Grt-Bt paragnaisse poiquiloblástico (amostra GC-01H) exibido uma estrutura maciça com agregados centimétricos de granadas visíveis ao centro. 81
- Figura 45 - Fotomicrografias representativas dos Grt-Bt paragnaises poiquiloblástico (amostra GC-01H). A) Feição da lâmina exibindo a foliação marcada pela biotita, contornando agregado de granadas anédricas. ND em objetiva de 5x; B) Feição exibindo quartzo com subgrãos e grãos recristalizados. NC em objetiva de 5x; C) Porção da lâmina rica em plagioclásio sericitizado. NC em objetiva de 5x. 82
- Figura 46 – Fotografia de paragnaisse arcoseano (amostra GC-01N), amostra de mão orientada, rica em plagioclásio, exibindo porção serrada. 83
- Figura 47 – Fotomicrografias representativas de paragnaises arcoseanos. A) Cpx paragnaisse (amostras GC-01N) apresentando granada com inclusões de quartzo. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC; C) Tectonito L de composição arcoseana (amostra GC-01I) rico em clinopiroxênio e ocorrência de porfiroblasto de anfibólio assimétrico, sugestivo de transporte tectônico com cinemática horária (topo para NE). ND em objetiva de 5x; D) Mesma feição de C) sob NC. 84
- Figura 48 – Amostra macro de paragnaisse cálcio-silicático exibindo contato com ortognaisse a baixo. 85
- Figura 49 – Fotomicrografias representativas do paragnaisse cálcio-silicático. A) Porção da rocha rica em clorita e com presença de titanita. ND em objetiva de 10x; B) Mesma feição de A) sobre NC; C) Contato da porção cálcio-silicática com banda ortognaissica, evidenciada pela diminuição da clorita e aumento do anfibólio. ND em objetiva de 5x; D) Mesma feição de C) sobre NC; E) Porção ortognaissica rica em anfibólio e presença de titanita. ND em objetiva de 10x; F) Mesma feição de E) sobre NC. 86
- Figura 50 – Fotografias representativas dos ortognaisses. A) Amostra macro GC-01M orientada, exhibe porção alterada com coloração marrom e face fresca em porção serrada, onde se observa o bandamento composicional milimétrico à centimétrico, realçado por injeções leucocráticas; B) Foco em agregados de anfibólio presente na amostra GC-01J; C) Face fresca da amostra GC-01Q exibindo bandas quartzo-feldspáticas e bandas ricas em anfibólio. 87
- Figura 51 – Fotomicrografias representativas dos ortognaisses. A) Ortognaisse tonalítico (amostra GC-01J) rico em anfibólio. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) apresentando plagioclásio subédrico com inclusões de quartzo (ao centro) e com textura granoblástica associado a quartzo (porção inferior). ND em objetiva de 5x; C) Plagioclásio subédrico zonado com inclusões de quartzo, interpretado como relicto ígneo (amostra GC-01J). NC em objetiva de 20x; D) Outro plagioclásio subédrico semelhante ao da fotomicrografia C), onde também se destaca os contatos poligonais com quartzo e plagioclásio granoblástico ao seu redor (amostra GC-01J). NC em objetiva de 20x; E) Ortognaisse (amostra GC-01M) com bandas ricas em anfibólio e bandas quartzo-feldspáticas. ND em objetiva de 5x; F) Mesma feição de E) sobre NC, apresenta textura granoblástica poligonal entre os cristais prismáticos de quartzo e k-feldspato. 89
- Figura 52 – Indicadores cinemáticos dos gnaisses do Arroio Laranjeiras observados em escala micro. Amostras GC-01I e GC-01F. A) Feição com cristais assimétricos de Clinopiroxênio oblíquos em relação à foliação da rocha, indicando movimento horário com topo para NE. NC em objetiva de 5x; B) Vênula de quartzo sub-milimétrica boudinada em meio a agregado de biotita, com caudas de recristalização estiradas assimetricamente destal. ND em objetiva de 10x; C) Mesma feição de B) com objetiva de 20x. 91
- Figura 53 – Resultado da química de rocha obtido pela Fluorescência de Raios X. 92
- Figura 54 – Classificação geoquímica dos protólitos dos paragnaises pelíticos. A) Gráfico para classificação de rochas areníticas segundo Pettijohn et al. (1987); B) Gráfico para classificação das rochas lamacentas de acordo com o esquema de Herron (1988). 93
- Figura 55 – Mapas composicionais ternários (R, G, B) obtidos na microsonda eletrônica para o sítio 3 da amostra PVR-6060E, exibido na (Fig. 44A e 44B). A) Mapa composicional

do sítio 3 com base na proporção de Mg (verde), Al (azul) e K (vermelho); B) Mapa composicional do sítio 3 com base na proporção de Mg (verde), Al (azul) e K (vermelho); B) Mapa composicional com base na proporção de Mg (verde), Ca (azul) e K (vermelho); C) Mapa composicional com base na proporção de Mg (verde), Ca (azul) e Al (vermelho). Em todos os mapas gerados não é possível identificar o limite entre cordierita e muscovita, que foi descrito durante a petrografia.....	100
Figura 56 - Modelagem geotermobarométrica da amostra PVR-6060E (paragnaisse pelítico), exibindo os campos de estabilidade de diferentes assembleias minerais dentro da grade petrogenética modelada (pseudoseção). Também exhibe a plotagem das curvas composicionais (isopletras) de granada (almandina - Grt Alm; piropo - Grt Py; espessartita - Grt Spe; e grossulária - Grt Gro) e muscovita (Mus XMg).....	102
Figura 57 – Modelo ilustrativo para o ambiente formador dos protólitos.....	105
Figura 58 - Modelo ilustrativo para o ambiente metamórfico de pico térmico.	105
Figura 59 - Modelo ilustrativo para o ambiente metamórfico do pico de pressão.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de condições P-T em diferentes orógenos.....	39
Tabela 2 – Resultado das análises de geoquímica total e dados tratados com a conversão do Fe ₂ O ₃ para FeO e desconto estequiométrico do equivalente em CaO da fórmula da apatita.....	62
Tabela 3 – Principais características petrográficas das amostras descritas organizada em Excel.....	72
Tabela 4 – Dados da química mineral realizada nas granadas referente a amostra PVR-6060E e os valores de membros finais utilizados para plotagem das curvas composicionais.....	95
Tabela 5 – Dados da química mineral realizada nas muscovitas referente a amostra PVR-6060E e os valores de XMg utilizados para plotagem das curvas composicionais.....	96
Tabela 6 – Dados da química mineral realizada nas cordieritas referente a amostra PVR-6060E.....	97
Tabela 7 – Dados da química mineral realizada nas biotitas referente a amostra PVR-6060E.....	98
Tabela 8 – Dados da química mineral realizada nos plagioclásios referente a amostra PVR-6060E.....	99

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVO	20
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	20
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.2 JUSTIFICATIVA	21
1.3 PROBLEMÁTICA.....	22
1.4 HIPÓTESE.....	22
2. ÁREA DE ESTUDO	23
3. CONTEXTO GEOLOGICO	25
3.1 CONTEXTO GLOBAL	25
3.2 CONTEXTO REGIONAL.....	26
3.3 CONTEXTO LOCAL.....	29
4. METAMORFISMO E OROGÊNESE - ESTADO DA ARTE.....	31
4.1 A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM EM PETROLOGIA METAMÓRFICA PARA A COMPREENSÃO DA EVOLUÇÃO GEODINÂMICA.....	31
4.2 TRAJETÓRIAS DE PT EM DIFERENTES CINTURÕES OROGÊNICOS.....	35
5. METODOLOGIA DE ABORDAGEM INTEGRADA	40
5.1 TRABALHOS DE CAMPO	41
5.1.1 DETALHAMENTO ESTRUTURAL.....	42
5.1.2 AMOSTRAGEM	43
5.1.3 CONFECÇÃO DE CROQUIS.....	45
5.2 PETROGRAFIA	47
5.2.1 DESCRIÇÃO DE AMOSTRAS	49
5.2.1.1 Macroscópica.....	49
5.2.1.2 Microscópica.....	50
5.2.2 ANÁLISE CINEMÁTICA	51
5.2.3 PREPARAÇÃO DE LÂMINA PARA MICROSSONDA ELETRÔNICA.....	52
5.3 PREPARAÇÃO DE AMOSTRA PARA GEOQUÍMICA DE ROCHA	55
5.4 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	57
5.5 MICROSSONDA ELETRÔNICA	59
5.6 PROCESSAMENTO DE DADOS GEOQUÍMICOS.....	61
5.6.1 LITOQUÍMICA.....	61
5.6.2 QUÍMICA MINERAL	61
5.7 MODELAGEM GEOTERMOBAROMÉTRICA	62
6. GEOLOGIA DE CAMPO	63
6.1 MAPEAMENTO DE DETALHE	63
6.2 GEOLOGIA ESTRUTURAL	67
7. PETROGRAFIA	72
7.1 PARAGNAISSES PELÍTICOS.....	73
7.2 PARAGNAISSE ARCOSEANO	83
7.3 PARAGNAISSE CÁLCIO-SILICÁTICO	85
7.4 ORTOGNAISSES	87
7.5 MICROTTECTÔNICA	90
8. LITOQUÍMICA	92
9. QUÍMICA MINERAL	93
10. MODELAGEM GEOTERMOBAROMÉTRICA.....	101
11. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

1. INTRODUÇÃO

O estudo da petrologia metamórfica baseado em resultados petrográficos, geoquímicos e estruturais possibilita uma melhor compreensão das condições de pressão, temperatura e deformação (P-T-D) às quais as rochas foram submetidas. Assim, podem ser caracterizadas as condições geotérmicas da crosta continental no passado, para uma melhor compreensão da formação e evolução de antigos orógenos, sejam eles acrescionários ou colisionais (Brown., 2014; De Toni *et al.*, 2021; Goscombe & Gray 2009).

Dentre os sistemas orogênicos presentes no Brasil destaca-se a Província Mantiqueira, que se encontra paralela à costa atlântica do sudeste e sul do Brasil, marcando uma faixa de direção NE-SW, que se estende do paralelo 15° S até o Uruguai, com mais de 3.000 km de comprimento (Almeida *et al.*, 1981). Trata-se de uma faixa móvel decorrente da colagem neoproterozoica do Ciclo Brasileiro-Pan Africana, resultando na aglutinação do paleocontinente Gondwana Ocidental. Tal província compreende os cinturões Dom Feliciano (sul do Brasil e Uruguai), Ribeira (estados do Paraná, São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro) e Araçuaí (estados do Espírito Santo, leste de Minas Gerais e sul da Bahia).

O Cinturão Dom Feliciano, no que diz respeito à sua porção brasileira, compreende unidades localizadas nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. No Escudo Sul-rio-grandense este cinturão é subdividido, de leste para oeste, nos seguintes domínios: Batólito Pelotas, Bloco Encruzilhada, Faixa Tijucas, Bloco Taquarembó e Bloco São Gabriel (Philipp *et al.*, 2018). Dentro desse contexto, a importância do Bloco São Gabriel se dá pelo fato de registrar a acreção juvenil durante a orogênese (Hartmann *et al.*, 2011; Philipp *et al.*, 2018).

O estudo em maior detalhe sobre o bloco pode contribuir com discussões acerca dos modelos evolutivos deste orógeno. O presente trabalho consiste em identificar as condições P-T-D presentes durante o metamorfismo de gnaisses estudados no Arroio Laranjeira, parte do Complexo Cambaí, infraestrutura do Bloco São Gabriel (Philipp *et al.*, 2018), localizados no município de Vila Nova do Sul/RS.

Para tanto, serão conduzidas descrições de afloramentos, amostras de mão e lâminas petrográficas, levantamentos estruturais, estudos laboratoriais de geoquímica de rocha total, geoquímica mineral via microsonda eletrônica e modelagem termodinâmica por pseudoseção via Perple_X.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é identificar as condições de pressão, temperatura e deformação (P-T-D) durante o metamorfismo dos gnaisses localizados no arroio Laranjeira, pertencentes ao Complexo Cambaí, assim contribuindo para as discussões sobre os modelos evolutivos do Bloco São Gabriel e do Cinturão Dom Feliciano.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Caracterização geológica e estrutural com base em trabalho de campo e descrição petrográfica;
- ❖ Discriminação entre ortognaisses e paragnaisses por meio de descrição petrográfica;
- ❖ Determinação da composição geoquímica de 4 paragnaisses através de análises laboratoriais por fluorescência de raios X;
- ❖ Determinação da química mineral de um paragnaisse por meio de análises laboratoriais em microsonda eletrônica;
- ❖ Modelagem das condições de pressão e temperatura (P-T) de um paragnaisse via pseudoseção utilizando o software Perple_X;
- ❖ Integração dessas informações em um modelo evolutivo para a área de estudo;

1.2 JUSTIFICATIVA

Apesar de muitos trabalhos já terem sido realizados no Bloco São Gabriel, como os de Silva Filho (1984, 1991), Saalman *et al.* (2005a, 2005b, 2006), Hartmann *et al.* (2011), Lena *et al.* (2014), Philipp *et al.* (2018), entre outros, a maior parte destes trabalhos é de cunho regional, sendo a área de estudo complexa e difícil de se interpretar sem o auxílio de estudos de detalhe. Desta forma, a área de estudos carece de levantamentos em escala de detalhe em afloramentos complexos.

Outro ponto é a existência de discussões acerca da origem do Bloco São Gabriel, como parte integrante ou não da orogênese do Cinturão Dom Feliciano. Os estudos que serão realizados a respeito das condições de P-T-D nestas rochas permitirão ou não correlacionar elas com o restante do cinturão, assim contribuindo com essa discussão e aprimorando os modelos evolutivos propostos (Saalman *et al.*, 2006; Philipp *et al.*, 2018; De toni *et al.*, 2020; entre outros).

Levando-se em consideração que os antigos trabalhos já realizados dão um enfoque maior em resultados de geocronologia e análises laboratoriais de geoquímica, ocorre uma certa carência de outras frentes de estudos como a petrografia, a geologia estrutural e a petrologia metamórfica. Estas técnicas, quando associadas aos dados de geoquímica e geocronologia, reforçam os argumentos e tornam os modelos propostos mais robustos.

A abordagem integrada desse trabalho irá, a partir de trabalhos de campo e descrições petrográficas de lâminas orientadas, descrever a cinemática não só na escala de afloramento, mas também na escala microscópica, de forma associada às estimativas de geotermobarometria. Com isso, pretende-se tentar trazer um entendimento mais completo do ambiente em que se formaram os gnaisses estudados, contribuindo com as discussões sobre os modelos evolutivos do Bloco São Gabriel em específico e do Cinturão Dom Feliciano e Gondwana Ocidental em uma escala mais ampla.

1.3 PROBLEMÁTICA

Uma problemática relevante neste trabalho é entender as condições exatas de pressão, temperatura e deformação (P-T-D) às quais os gnaisses do Complexo Cambaí foram submetidos e como essas condições se relacionam com a evolução tectônica do Bloco São Gabriel. A quantificação precisa dessas condições é complexa devido à natureza e sobreposição heterogênea dos processos metamórficos e deformacionais. À dificuldade em distinguir de maneira clara os eventos de acreção e colisão durante o fechamento de um antigo oceano na evolução de um orógeno durante o Neoproterozoico.

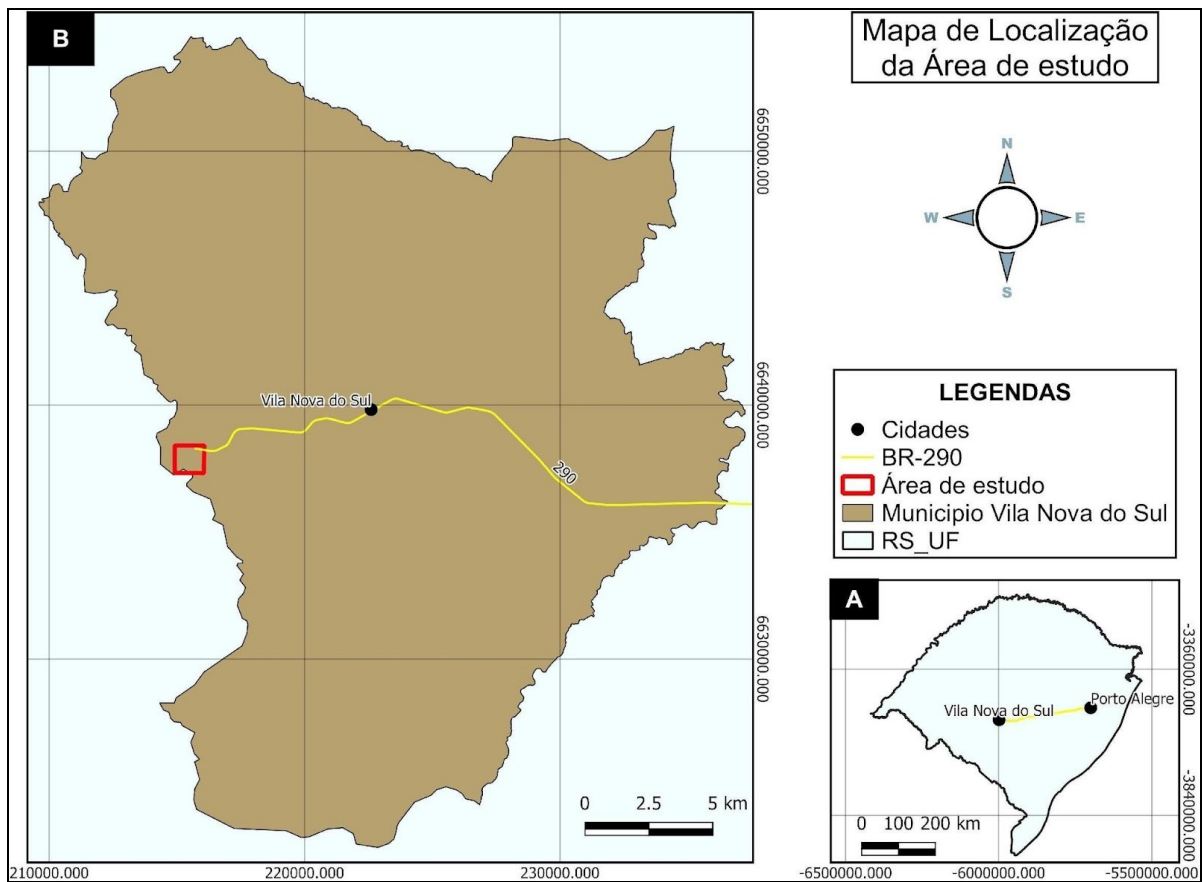
1.4 HIPÓTESE

Os gnaisses do Arroio Laranjeira por se tratarem da infraestrutura do Bloco São Gabriel, preservam características estruturais, mineralógicas e geoquímicas que permitem identificar estágios distintos do metamorfismo e orogênese ali preservados. Estando associado inicialmente à fase juvenil de acreção, seguida do fechamento oceânico e conseqüentemente colisão continental, esses gnaisses são chave para se encontrar a trajetória das condições de P-T que essas rochas sofreram durante a colagem neoproterozoica, assim possibilitando a elaboração de um modelo evolutivo a partir da petrologia metamórfica e geologia estrutural.

2. ÁREA DE ESTUDO

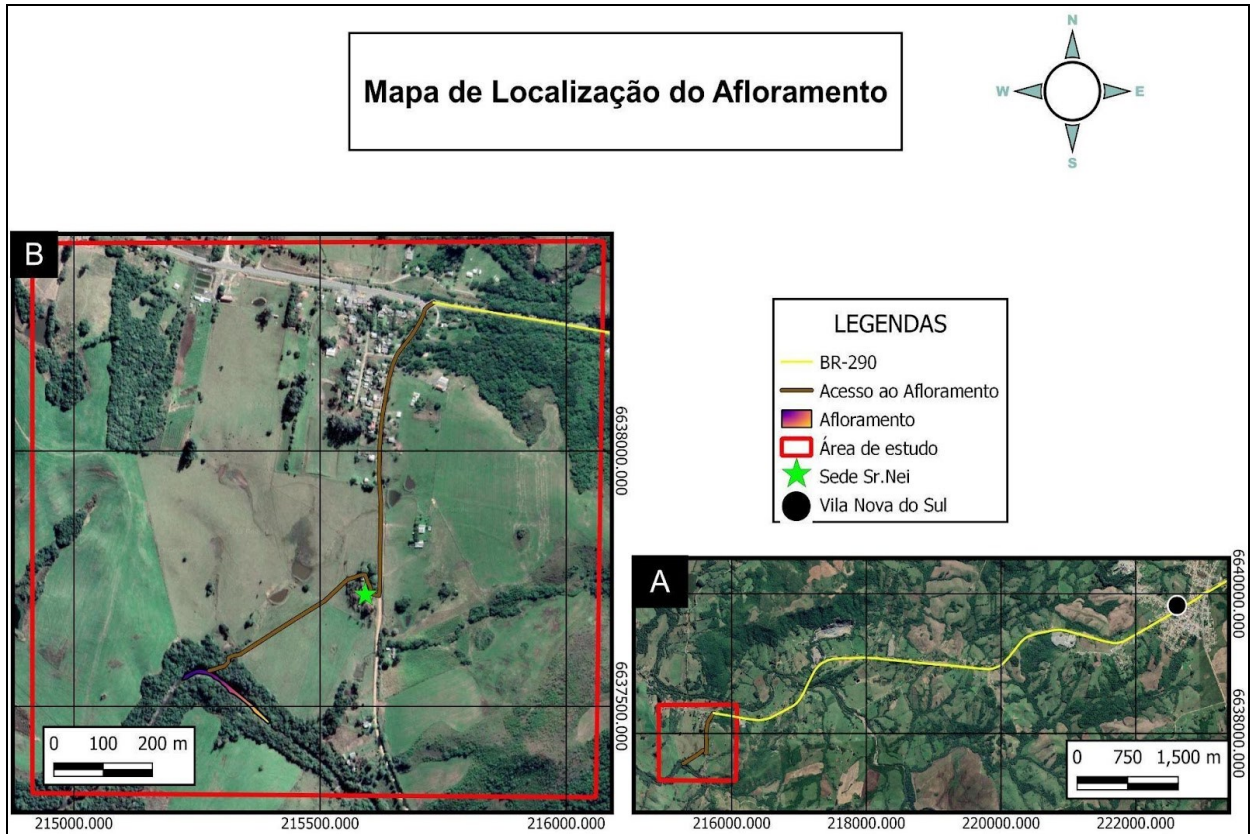
A área de estudo situa-se no município de Vila Nova do Sul, Rio Grande do Sul (RS) à aproximadamente 280km da capital do estado. Partindo de Porto Alegre, sentido oeste pela BR-290, após chegar no centro urbano de Vila Nova do Sul (Fig. 1), seguir por mais 8km pela mesma rodovia até chegar à estrada sentido sul de acesso ao Santuário Nossa Senhora de Guadalupe. Após isso percorrer mais 800m até chegar à propriedade do Senhor Nei, na margem oeste, e de sua sede percorrer mais 200m sentido oeste até chegar ao Arroio Laranjeira, que divide os municípios de Vila Nova do Sul e Santa Margarida do Sul (Fig. 2).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. A) Mapa do estado do Rio Grande do Sul e os municípios de Porto Alegre e Vila Nova do Sul conectados pela BR-290; B) Mapa do município de Vila Nova do Sul com a localização da área de estudo.



Fonte: autor. Base vetorial contínua disponível no site da Fepam (2023).

Figura 2 – Mapa de localização do afloramento do Arroio Laranjeira. A) Imagem de satélite com o caminho até a entrada da estrada Nossa Senhora de Guadalupe; B) Caminho até a propriedade do Senhor Nei e caminho até o afloramento.



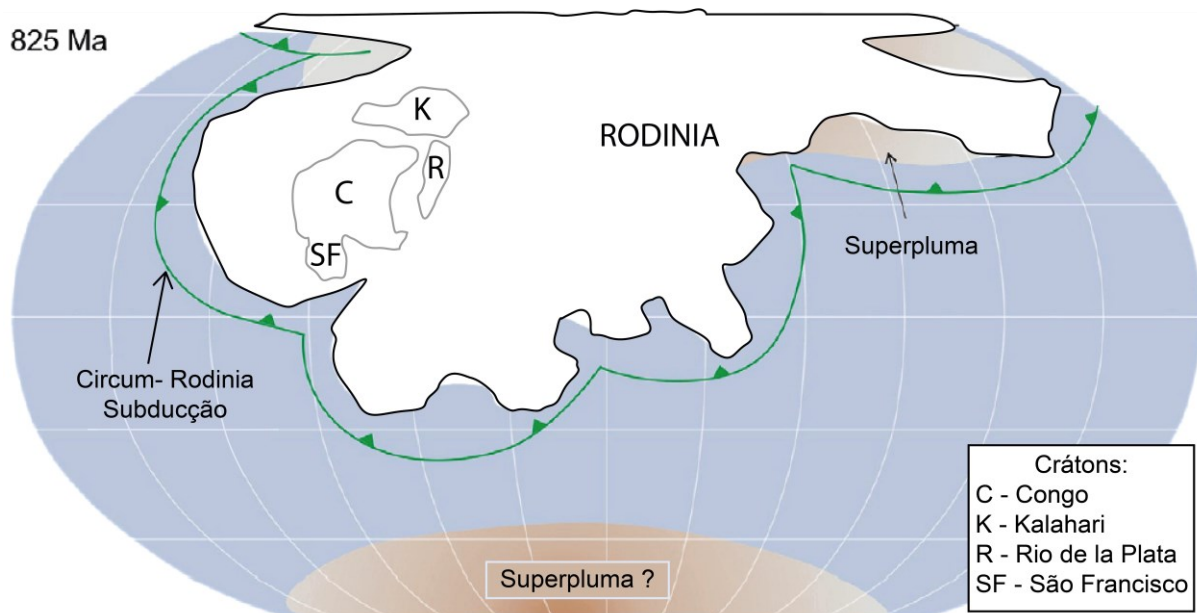
Fonte: autor. Extraído e adaptado do IBGE, 2023.

3. CONTEXTO GEOLOGICO

3.1 CONTEXTO GLOBAL

A fragmentação de um antigo supercontinente, assim como a aglutinação, é diácrona a aglutinação do Rodínia ocorreu entre 1.1 e 0.9Ga e a desagregação teria iniciado por 850 a 825 Ma indo até 600-580 Ma. Desencadeada em parte pela subducção Circum-Rodínia que foi o principal evento tectônico para a formação e abertura de antigos oceanos que antecederam a formação do supercontinente Gondwana (Fig. 3), no início do Neoproterozoico (Li *et al.*, 2013; Konopásek *et al.*, 2018). Este evento tectônico de divergência foi sucedido pela aglutinação do Gondwana Ocidental há aproximadamente 760 Ma, assim formando o sistema orogênico Kaoko-Dom Feliciano-Gariep, compreendendo a colagem dos Crátons Rio de La Plata, Congo e Kalahari e o fechamento de antigos oceanos (Konopásek *et al.*, 2018).

Figura 3 – Mapa da reconstrução global em 825 Ma, apresentando uma Rodínia de meia-idade e as antigas posições dos principais crátons relacionados ao sistema orogênico Kaoko-Dom Feliciano-Gariep.

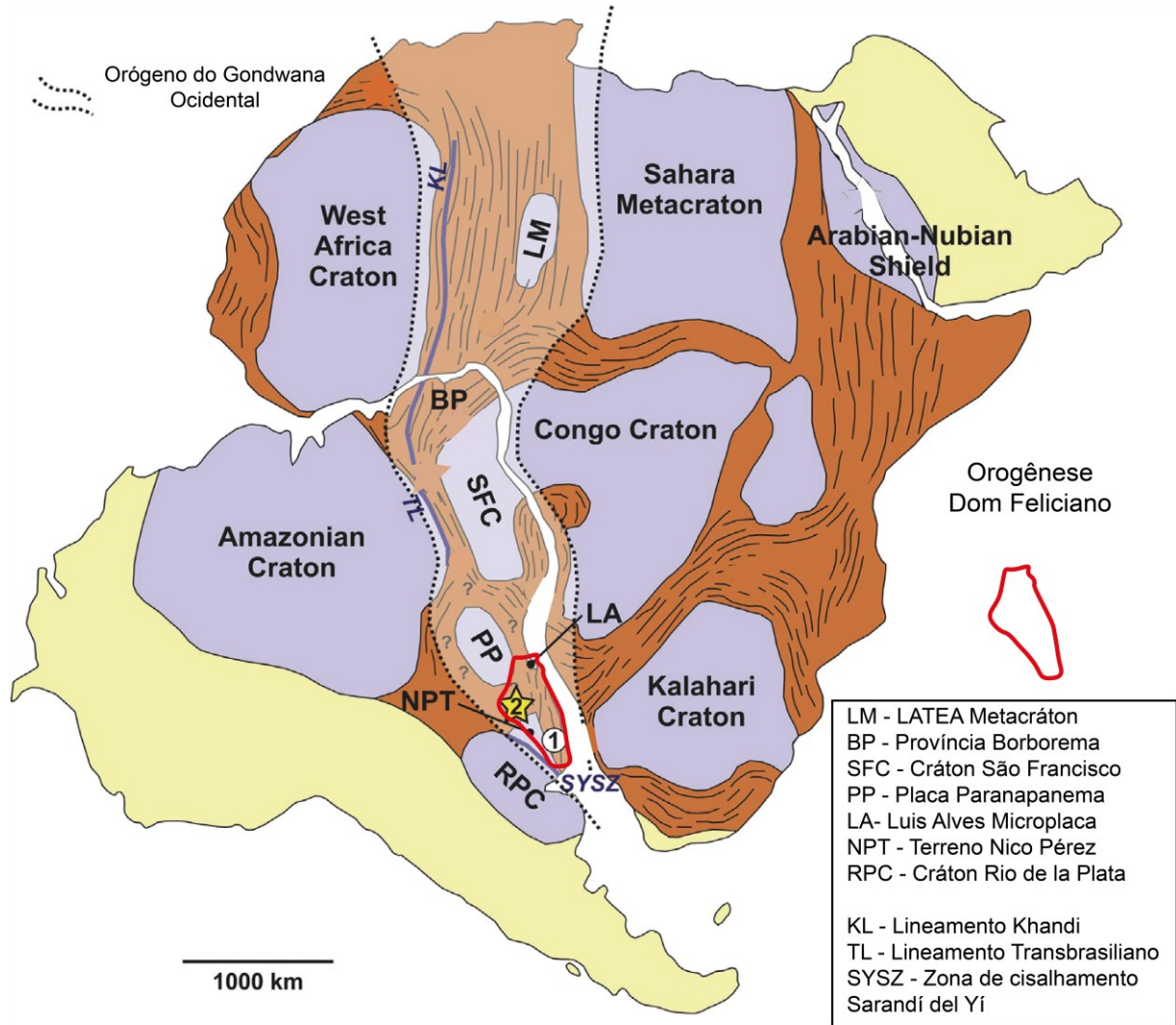


Fonte: modificado de Li *et al.* (2013).

O Cinturão Dom Feliciano compreende a porção sul-americana do sistema orogênico Kaoko-Dom Feliciano-Gariep. Estende-se do leste do Uruguai até o estado de Santa Catarina, no sul do Brasil (Fig. 4). Encontra-se próximo ao Crátón

Luís Alves no norte e ao Terreno Nico Perez e Cráton Rio de La Plata no sudoeste (Oyhantçabal *et al.*, 2011; Costa *et al.*, 2021).

Figura 4 – Principais blocos crustais na América do Sul e África, com ênfase para (1) Cinturão Dom Feliciano em vermelho e (2) os ofiolitos e/ou complexos de arcos de ilhas do Bloco São Gabriel na estrela amarela.

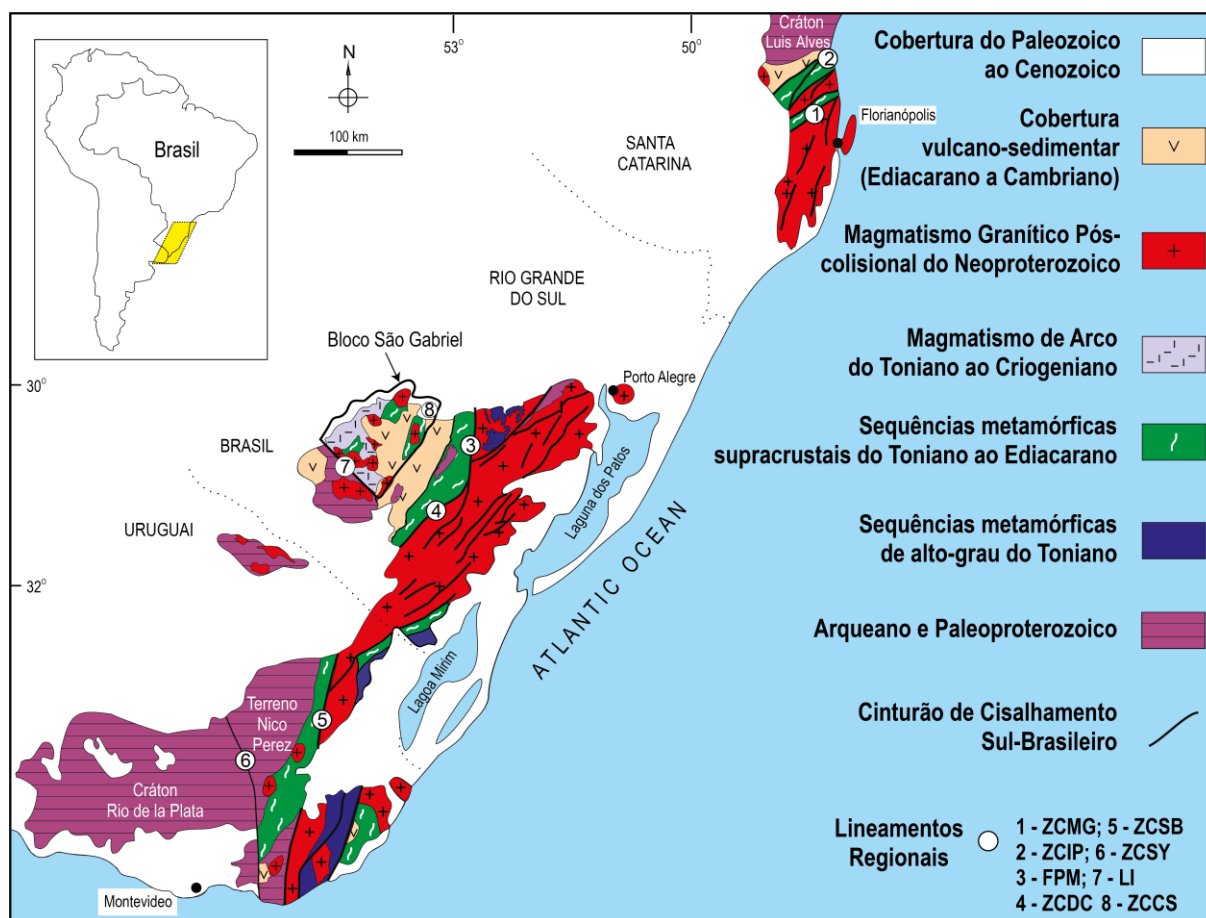


Fonte: modificado de Oriolo *et al.* (2017).

3.2 CONTEXTO REGIONAL

O Cinturão Dom Feliciano se subdivide em pelo menos 5 unidades dentro do Escudo Sul-Rio-Grandense: Batólito Pelotas, Bloco Encruzilhada, Faixa Tijucas, Bloco Taquarembó e Bloco São Gabriel (De toni *et al.*, 2020 e referências lá contidas). O Bloco São Gabriel se trata do domínio tectônico mais ocidental (Fig. 5), que é limitado pelos lineamentos regionais Ibaré, de orientação NW, e o Lineamento Caçapava, de orientação NNE (Philipp *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2021).

Figura 5 – Mapa geológico do Cinturão Dom Feliciano com os principais lineamentos regionais: ZCMG – Zona de Cisalhamento Major Gercino; ZCIP – Zona de Cisalhamento Itajaí-Perimbó; FPM - Falha do Passo do Marinheiro; ZCDC – Zona de Cisalhamento Dorsal de Canguçu; ZCSB – Zona de Cisalhamento de Sierra Ballena; ZCSY – Zona de Cisalhamento de Sarandi del Yi; LI – Lineamento de Ibaré; ZCCS – Zona de Cisalhamento Caçapava do Sul.



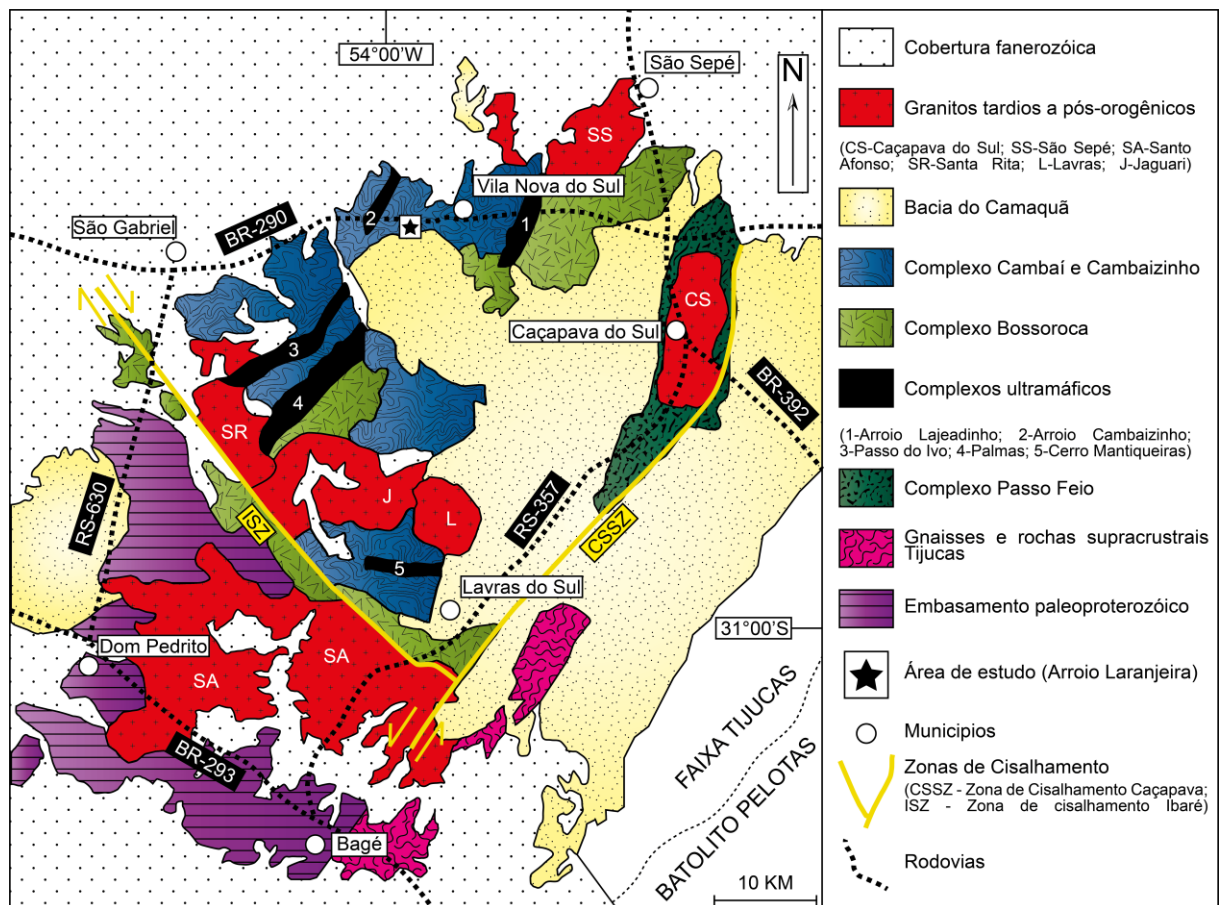
Fonte: modificado de De Toni *et al.* (2020).

Segundo Philipp *et al.* (2018), o Bloco São Gabriel (Fig. 6) compreende estratigraficamente rochas da associação de margem passiva, como os complexos metamórficos Passo Feio, Marmeleiro e Coxilha do Batovi (3600-1570 Ma), em seguida ocorrendo os complexos máficos-ultramáficos Cerro Mantiqueira, Ibaré, Palma, Passo do Ivo, Cambaizinho e Arroio Lajeado (930-900 Ma), interpretados como ofiolitos. Posterior a isso, estão registrados os eventos do arco intra-oceânico do Passinho, com o Complexo Imbicuí, compreendendo rochas metadioríticas a gnaisses tonalíticos de 890-860 Ma (Philipp *et al.*, 2018).

Os eventos do arco São Gabriel compreendem os complexos Bossoroca e Cambaí durante a formação do arco em margem continental, apresentando respectivamente rochas metavulcânicas e metassedimentares, além de gnaisses dioríticos a tonalíticos (770-720 Ma). Durante o período tardio do arco até o pós-colisional ocorre a formação dos granitoides da Suíte Lagoa da Meia Lua (700-680 Ma) e a formação do que hoje, é o Complexo Pontas do Salso, proveniente de uma bacia orogênica tardia (680 Ma) com proveniência de zircões entre 0,86 e 0,68 Ga apresentando rochas metapelíticas e metaconglomerados (Philipp *et al.*, 2018 e referências lá contida).

A cobertura vulcanossedimentar da Bacia do Camaquã, juntamente com os granitos associados, foi formada entre 610 e 540 Ma e é representada por uma bacia de *foreland* e granitos relacionados aos estágios tardios pós-orogênicos da orogenia Dom Feliciano (Chemale *et al.*, 1995). Por fim, toda esta região é coberta a oeste e norte pelas unidades fanerozoicas da Bacia do Paraná (Philipp *et al.*, 2018).

Figura 6 – Mapa geológico do Bloco São Gabriel.



Fonte: modificado de Lena *et al.* (2014).

3.3 CONTEXTO LOCAL

Trabalhos como os de Silva Filho (1984, 1991) sobre os gnaisses de fácies anfibolito trazem uma compreensão inicial a respeito da petrogênese e geologia estrutural da região de Vila Nova do Sul. O Complexo Cambaí (CC) compreende gnaisses, metadioritos juvenis, metatonalitos e metatronghemitos que intrudem as unidades do Grupo Palma inferior (Chemale *et al.*, 1995; Babinski *et al.*, 1996). Segundo Saalman *et al.* (2006), os plútons graníticos são truncados por diferentes gerações de diques e veios de composição trondhjemítica, granítica e pegmatítica. Rochas plutônicas, como tonalitos e dioritos têm assinaturas químicas cálcio-alcalinas e, portanto, são interpretadas como tendo se formado em um ambiente de arco magmático (Silva Filho, 1984; Chemale *et al.*, 1995; Babinski *et al.*, 1996).

Idades do CC indicam cristalização em 750-700 Ma, incluindo metatonalitos na porção sul do Bloco São Gabriel com 750 ± 16 Ma (Leite *et al.*, 1998) e metadioritos da área de Vila Nova com 704 ± 13 Ma (Babinski *et al.*, 1996). Já o metadiorito Passinho, ao sul do Complexo Granítico Lavras do Sul, mostra uma idade contrastante, de 879 ± 14 Ma (Leite *et al.*, 1998). Idades mais recentes de três amostras metadioríticas datadas por Siviero *et al.* (2021) apresentam idades coerentes de cristalização de 750 Ma (com incertezas: 745 ± 4 Ma, 748 ± 5 Ma e 752 ± 4 Ma). Uma idade de 878 ± 18 Ma foi obtida a partir de núcleo de zircão herdado, sendo interpretado como remanescente de crosta mais antiga. Essa idade do núcleo de zircão herdado é semelhante à idade do Metadiorito Passinho, o que significa que essa unidade pode representar a crosta assimilada na qual as rochas magmáticas do Complexo Cambaí foram alojadas durante os estágios iniciais de evolução (Toniano) do paleocontinente Gondwana Ocidental (Siviero *et al.*, 2021).

Vale ressaltar a ocorrência de paragneisses associados ao CC (Hartmann *et al.*, 2011; Lena *et al.*, 2014), normalmente chamados de Complexo Cambaizinho. No entanto, a intercalação entre esses paragneisses e o restante da litologia do CC ocorre em uma escala de detalhe, de acordo com mapeamentos geológicos da UFRGS (1996, 1997, 2001). Tal situação de detalhe dos paragneisses levou aqueles autores a manterem ambas as litologias dentro de um mesmo complexo, no caso o CC.

Os paragneisses do CC apresentam uma foliação desenvolvida sob condições de fácies anfibolito, ocorrendo em muitos afloramentos como xenólitos nos ortogneisses, indicando que são a unidade mais antiga com base nas relações

de campo. Tais paragnaisses apresentam composição predominantemente quartzo-feldspática, interpretada como meta-arcóseos, e apresentam um volume significativo de lentes intercaladas de gnaisses pelíticos, quartzitos, mármore calcíctico-dolomíticos e gnaisses cálcio-silicatos. Essas lentes de paragnaisses do CC são segmentadas e formam “*roof pendants*” de dezenas a centenas de metros de comprimento nos ortognaisses dominantes (Hartmann *et al.*, 2011).

Lena *et al.* (2014) também descrevem os paragnaisses do CC como provenientes de protólitos arcóseos. Aqueles autores descrevem um Granada-Biotita-Gnaiss composto por 45% de quartzo, 35% de plagioclásio, 15% de biotita, 3% de granada, 1% de moscovita e 1% de epidoto. A rocha também apresenta um bandamento em escala centimétrica, formado por camadas de quartzo-plagioclásio e biotita.

4. METAMORFISMO E OROGÊNESE - ESTADO DA ARTE

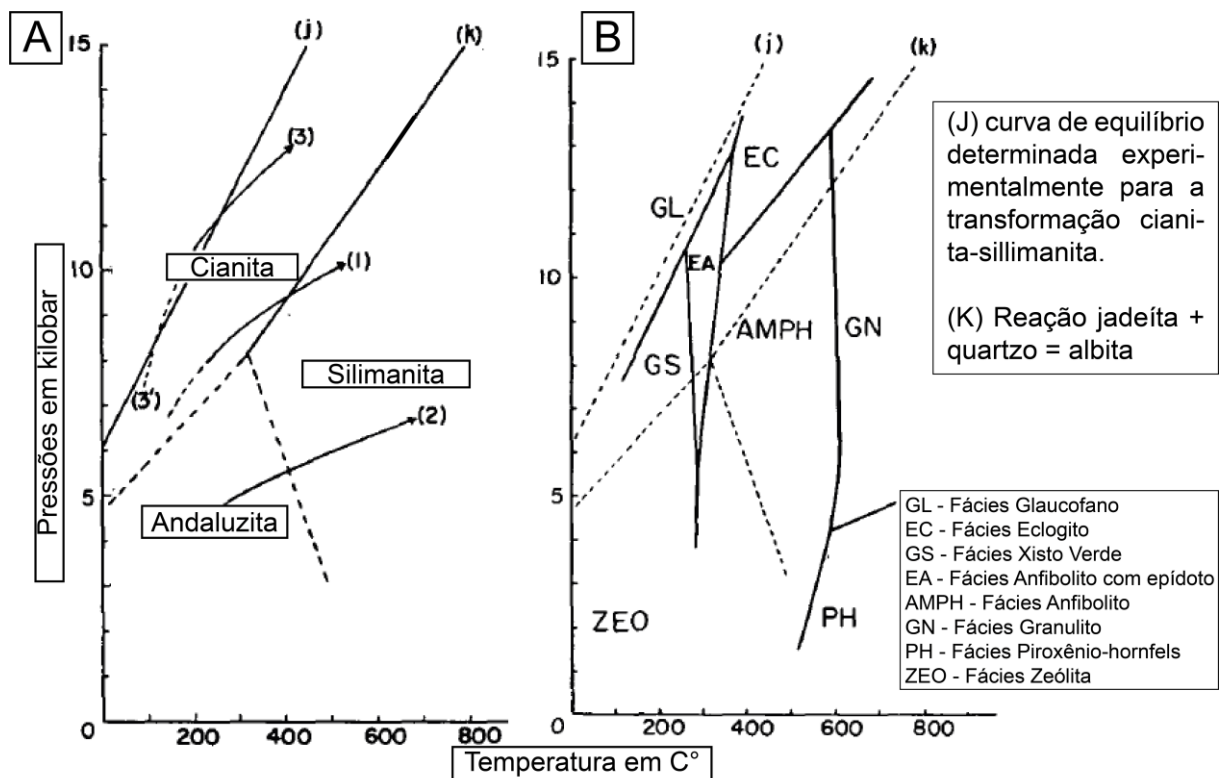
4.1 A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM EM PETROLOGIA METAMÓRFICA PARA A COMPREENSÃO DA EVOLUÇÃO GEODINÂMICA

Identificar as trajetórias de PT durante o metamorfismo permite uma melhor compreensão dos cinturões. No entanto, elas não se comportam de maneira igual ao longo de todo o tempo geológico (Brown, 2014). Hoje a modelagem geoquímica e termodinâmica (pseudoseção) tem um papel muito importante dentro dos estudos de petrologia metamórfica, pois trazem uma compreensão melhor da evolução das condições metamórficas de rochas e regiões, conseqüentemente, da evolução geodinâmica da litosfera (Connolly, 2005). Ao longo das últimas décadas o aumento do poder computacional possibilitou a modelagem e simulação de processos metamórficos, fornecendo avanços significativos na quantificação das condições metamórficas, como pressão (P), temperatura (T) e tempo (t). O estudo do metamorfismo ao longo do tempo geológico também revelou diferenças significativas em distintos períodos em função de mudanças seculares no estado térmico da litosfera ao longo do tempo (Brown, 2014).

De acordo com Miyashiro (1961), há uma ordem crescente de pressão das rochas e suas fácies metamórficas no metamorfismo regional, que podem ser classificadas nas seguintes categorias: (1) tipo andaluzita-silimanita; (2) grupo intermediário de baixa pressão; (3) tipo cianita-silimanita; (4) grupo intermediário de alta pressão; (5) tipo jadeíta-glaucofano (Fig. 7). As fácies metamórficas individuais correspondem a uma certa faixa de temperatura e pressão das rochas, além de outras condições externas. No entanto, a faixa de temperatura e pressão em um terreno metamórfico e cinturão metamórfico geralmente é muito ampla para ser definitiva de uma única fácies metamórfica. Mesmo em um único terreno metamórfico, a variação de temperatura geralmente seria expressa por uma série de fácies metamórficas.

Uma série de fácies metamórficas pode ser representada por uma curva ou um grupo de curvas em um diagrama de temperatura e pressão. De acordo com a localização da curva ou curvas, a série de fácies pode ser classificada em vários tipos. No que diz respeito à classificação das variedades de séries de fácies metamórficas no mundo, elas se baseiam em diferenças mineralógicas facilmente observáveis (Miyashiro., 1961).

Figura 7 – Gráficos de P-T relacionados à estabilidade mineral e sua relação com diferentes fácies metamórficas. A) Relações de estabilidade da andaluzita, cianita e sillimanita, bem como do conjunto jadeíta-quartzo e albita. (1), (2) e (3) indicam trajetórias típicas de temperatura e pressão de rocha no metamorfismo regional dos tipos cianita-sillimanita, andaluzita-sillimanita e jadeíta-glaucofanito, respectivamente; B) Temperaturas e pressões das rochas estimadas para diferentes fácies metamórficas.

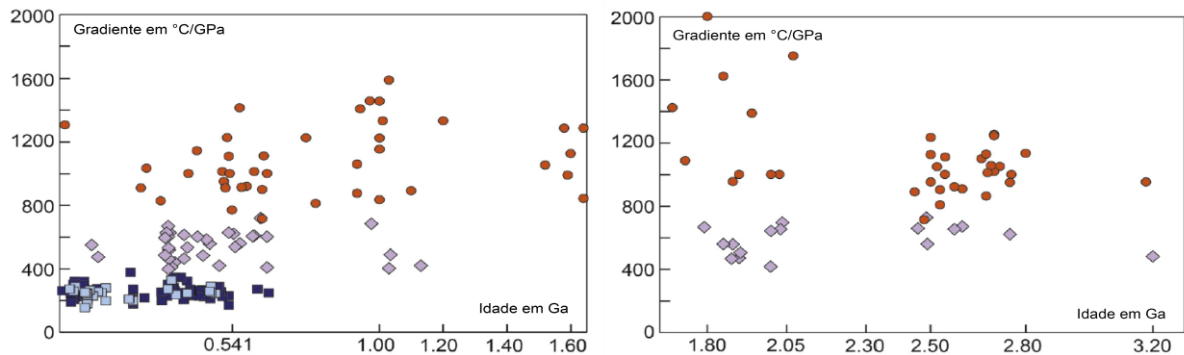


Fonte: modificado de Miyashiro (1961).

A partir de várias descrições e comparações entre diferentes registros de orógenos no mundo, Miyashiro (1961) conclui que o metamorfismo regional do tipo andaluzita-silimanita e do grupo intermediário de baixa pressão ocorreu amplamente desde o período pré-cambriano até o período Mesozoico, enquanto o do tipo cianita-sillimanita foi comum no período Paleozoico, o do tipo jadeíta-glaucofano tornou-se comum no período Ediacarano. Os tipos dominantes de metamorfismo regional mudaram através do tempo geológico. Pode-se considerar que o metamorfismo regional sob pressões mais baixas (provavelmente em profundidades menores) ocorreu em todas as eras, enquanto o metamorfismo regional sob pressões mais

altas (provavelmente em maiores profundidades) ocorreu apenas em épocas geológicas mais recentes (Fig. 8 Brown, 2014).

Figura 8 – Gradientes térmicos aparentes de cinturões metamórficos por tipo, plotados em função da idade: metamorfismo granulítico e de ultratemperatura (G-UHT – círculos laranja); metamorfismo de fácies eclogito e granulito de alta pressão (E-HPG – losangos lilás claro); metamorfismo de alta pressão e ultra-alta pressão (HP-UHP), incluindo fácies xisto-azul com lawsonita e eclogitos (quadrados azul claro); e eclogitos e rochas metamórficas de ultra-alta pressão (quadrados azul escuro).



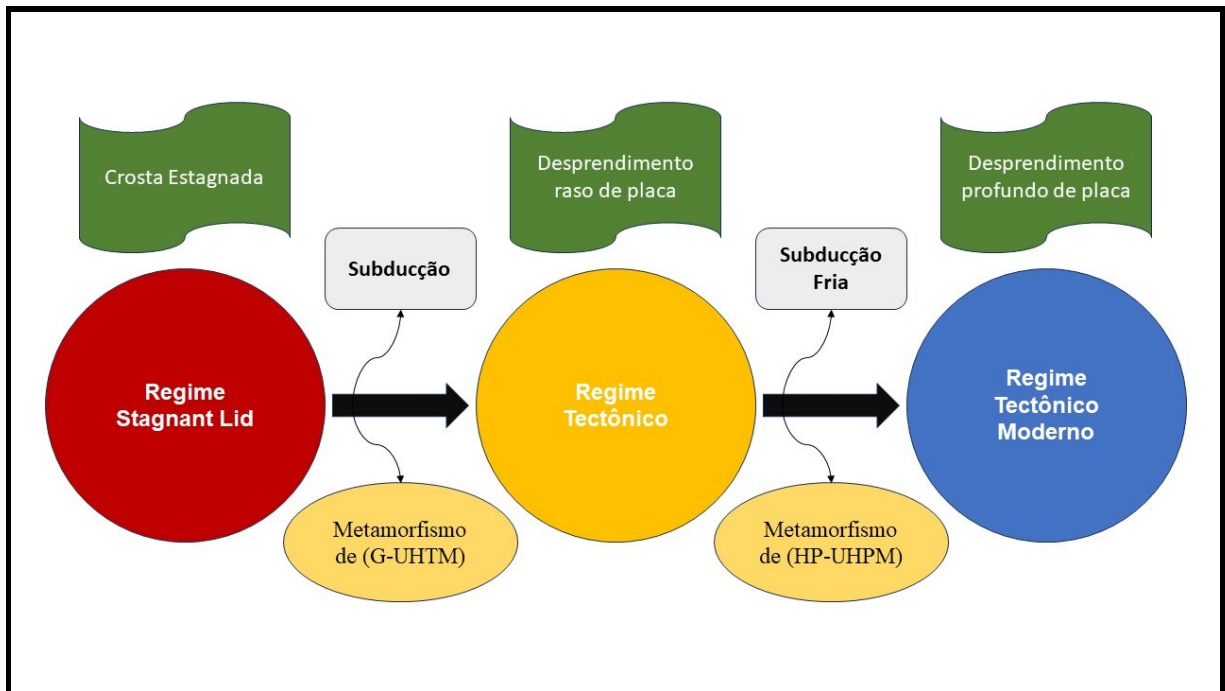
Fonte: modificado de Brown (2014).

Brown (2014), na tentativa de identificar a variação secular das condições de metamorfismo, destaca ter havido pelo menos três regimes geodinâmicos em todo o planeta, separados por dois períodos de mudança nas condições de metamorfismo da Terra (Fig. 9). Tais mudanças normalmente estão relacionadas a quatro parâmetros principais: temperatura do manto superior, produção de calor radiogênico na crosta, espessura da litosfera continental e contraste de densidade entre o manto litosférico subcontinental e o manto astenosférico.

A primeira grande mudança foi o início da subducção, com o fim do regime de crosta tampão “*Stagnant Lid*” e início do regime tectônico no final do Arqueano. Este se caracteriza por uma ocorrência generalizada de metamorfismo granulítico de ultra alta temperatura (G-UHTM), proveniente de uma subducção com desprendimento raso de placa, gerando estilos de colisão tectônica diferentes das colisões continentais contemporâneas. A segunda transição ocorre quando começa a subducção fria durante o Ediacarano-Cambriano. Essa transição se caracteriza pelo desprendimento profundo da placa e um acoplamento mais forte entre a crosta e o

manto, permitindo a subducção continental em maiores profundidades do manto, à medida que a temperatura do manto superior declinava para valores mais baixos que 100°C acima da atual. Esse período marca o início do regime moderno de tectônica de placas, onde são encontrados xistos azuis e rochas de alta pressão a ultra alta pressão (HP-UHPM). Esse período não é apenas caracterizado por uma subducção fria e metamorfismo da crosta continental em profundidades do manto, mas também pela diminuição na ocorrência de metamorfismo de ultra-alta temperatura e sua virtual ausência no registro geológico após o Paleozoico (Brown., 2014).

Figura 9 – Esquema da evolução geodinâmica da Terra.



Fonte: autor, com base em Brown. 2014 (2024).

4.2 TRAJETÓRIAS DE PT EM DIFERENTES CINTURÕES OROGÊNICOS

Importante a percepção de que as trajetórias de pressão e temperatura registradas por rochas metamórficas se comportam de maneiras diferentes em distintos ambientes tectônicos ao longo do tempo geológico (Miyashiro, 1961; Brown, 2014), como exemplificado a seguir.

O Japão é um ótimo local para ser utilizado como objeto de análise devido seus registros acrescionários. Nakamura *et al.* (2021) apresentam estudos petrológicos das rochas metamórficas miloníticas do Cinturão Ryoke relacionadas ao granito milonítico de Kashio e das rochas metamórficas do Cinturão Sanbagawa ao longo da linha tectônica média do Japão, localizada na área de Oshika, no distrito de Chubu. As rochas estudadas registram eventos metamórficos distintos, sendo o pico do Cinturão Ryoke de 650-790°C e 4,6-5,6 kbar a 69-67Ma, seguido de condições retrogradadas de 710°C a 450°C a 5,2-2,6 kbar a 66-64 Ma, causando uma diminuição na distância entre o milonito de Kashio em relação á linha tectônica média do Japão. Por outro lado, o metamorfismo de alta P/T do Sanbagawa registrou condições de 360°C a 398°C e de 4,0 a 8,3 kbar. Tal configuração aliada ao acoplamento entre as duas placas, a superior e a em subducção, e a variação da inclinação de subducção, resulta na formação de cinturões metamórficos pareados entre rochas de baixa P/T, relacionadas ao arco magmático, e alta P/T, relacionadas à fossa.

O atual ambiente de subducção andino registra processos orogênicos do Triássico Superior e do Jurássico Superior, localizado ao longo do norte do Chile. Calderón *et al.* (2017) apresentam dados a respeito de tais processos orogênicos. As unidades Morro Mejillones e Morro Jorgiño, do Complexo Metamórfico Mejillones, apresentam distintas idades metamórficas e evolução térmica. A unidade tectônica Morro Mejillones foi metamorfizada em condições de baixa pressão, menor que 5 kbar, com série andaluzita-silimanita (Pattison, 1992), durante a intrusão de plutons tonalíticos em ca. 208 Ma (Casquet *et al.*, 2014). Enquanto a unidade tectônica do Morro Jorgiño passou por 3 metamorfismos, sendo M1 caracterizado pelo crescimento das granadas com 7,5-7,9 kbar e 580-590°C, seguida pelo pico metamórfico M2, de ~8–9 kbar e ~600–630 °C, fácies epidoto-anfibolito. Após 190 Ma as rochas metamórficas do bloco Morro Jorgiño experimentaram uma fase tectono-metamórfica térmica tardia e uma rápida trajetória de decompressão atingindo condições M3 de fácies anfibolito ~6,0 kbar e 635°C. Aqueles autores assim definem um metamorfismo progressivo do tipo Barroviano, o qual registra uma

elevada geoterma durante o espessamento crustal próximo da borda continental em uma configuração supra-subducção, ligada provavelmente à acreção do terreno Mejillonia. O típico metamorfismo andino de baixa pressão e alta temperatura é estudado por Restrepo *et al.* (2021), que obteve estimativa de metamorfismo em ambiente de arco em hornblenda-biotita xistos, com $\sim 700^{\circ}\text{C}$ e 4,5 Kbar, ou seja, gradiente geotérmico de $46,6^{\circ}\text{C}/\text{Km}$.

Já nos Himalaias, desta vez em ambiente de colisão continental, Sachan *et al.* (2016) apresentam estudos a respeito de metapelitos de grau médio da área de Pangong-Tso, na região Trans-Himalaia, que sofreram metamorfismo de alto grau, zona da silimanita, iniciado durante o Cretáceo, associado à colisão do arco Kohistan e da placa indiana com a Ásia. A trajetória de PT é caracterizada por descompressão quase isotérmica após a fase inicial de espessamento da crosta e pico de metamorfismo de 8 kbar e 650°C no bloco Karakorum. Duas amostras foram analisadas e, respectivamente, apresentaram pico metamórfico de 7,5-8 kbar/ 596°C e 6,7-7,1 kbar/ $650-660^{\circ}\text{C}$, e descompressões de 3-3,5 kbar/ $559-573^{\circ}\text{C}$ e 3,3-4 kbar/ $618-630^{\circ}\text{C}$.

Considerando exemplos do Escudo Sul-rio-grandense, relacionados a orógenos mais antigos, como o Dom Feliciano, De toni *et al.* (2021) estimam e comparam as condições de PT dos complexos Várzea do Capivarita, localizado no Bloco Encruzilhada, e Cerro da Árvore, localizado na Faixa Tijucas. A pseudoseção da amostra de metapelito migmatítico do Complexo Várzea do Capivarita indica que o conjunto Bt + Crd + Grt + Qtz + Kfs + Pl + fusão é estável em condições PT de 4,4–4,8 kbar e $790-820^{\circ}\text{C}$ no pico metamórfico, apresenta isopletras para membros finais de granada, almandina 0,76–0,77, piropo 0,10–0,14, espessartina 0,025–0,03 e para valores de XMg de cordierita 0,52–0,54 e biotita 0,33–0,36. A ocorrência de uma exumação para 2,5-3,4 kbar e $660-680^{\circ}\text{C}$ apresenta assembléia de equilíbrio Crd + Sp + Grt + Sil + Kfs. As isopletras para XMg de cordierita 0,56, espinélio 0,13 e uma curva adicional correspondente a 1 vol.% de silimanita, sugerem estabilização do espinélio. Em contraste, a pseudoseção da amostra de estauroлита granada-quartzo-muscovita xisto do Complexo Cerro da Árvore, feita com o sistema saturado de água, apresenta núcleos de granada com espessartina 0,14–0,15 e almandina 0,73–0,74, que registram $555-565^{\circ}\text{C}$ e 5,4–5,7 kbar para o seu crescimento inicial. As bordas de granada com espessartina 0,11–0,12, almandina 0,73–0,77 e grossulária 0,04–0,05, juntamente com estauroлита XMg 0,11–0,13, biotita XMg 0,37–

0,39 e muscovita Si apfu 3,00 da matriz, definem 560–580°C e 5,8–6,3 kbar como condições metamórficas de pico, por fim apresentando porfiroblastos de andaluzita, que registra uma exumação em condições abaixo de 4 kbar e 580°C. O alto gradiente geotérmico de 50–60°C/km registrado pelo Complexo Várzea do Capivarita durante o processo de exumação é atribuído a uma fase pré-colisional de afinamento dúctil da litosfera, seguida por inversão tectônica da bacia durante a colisão (De toni *et al.*, 2021; Costal *et al.*, 2020). Tais análises apontam para um ambiente colisional muito quente, em contraste com gradientes geotérmicos de ca. 30°C/km registrados pelos metapelitos do Complexo Cerro da Árvore (De toni *et al.*, (2021).

Também relacionado ao Cinturão Dom Feliciano, Costa *et al.* (2021) analisam as condições de PTD da porção sudeste do Complexo Passo Feio, localizado no Bloco São Gabriel. Eles selecionam um filito e um xisto para realizar a modelagem de condições metamórficas. Dentre as duas amostras, o xisto também é selecionado para analisar o significado da andaluzita como indicador de metamorfismo do tipo Buchan. Os resultados da modelagem termodinâmica do filito apresentam uma composição no núcleo dos porfiroblastos de granada que indicam o início de seu crescimento em 490–500°C e 2,5–3,3 kbar e as condições metamórficas de pico foram de 500–510 °C e 5–6,4 kbar. A amostra de xisto apresenta resultados onde os núcleos dos porfiroblastos de granada restringem o início de seu crescimento em 530–550°C e 3–4,3 kbar e condições metamórficas de pico em 560–570°C e 5–5,5 kbar. As andaluzitas encontradas localmente não são coerentes com as taxas de metamorfismo do início do crescimento da granada até as condições de pico, assim corroborando com a ideia de um metamorfismo de contato ou Buchan devido à intrusão do Granito Caçapava (Costa *et al.*, 2021). Essa correlação é reforçada pela idade metamórfica obtida por Battisti *et al.* (2024) de 571 +/- 2 Ma.

As condições metamórficas de PT na Formação Serrinha, localizada no Bloco São Gabriel, foram estudadas por Cerva-Alves *et al.* (2021), que identificam dois estágios contínuos de metamorfismo a partir dos cálculos termodinâmicos e isopletras composicionais de granada. A associação chl + grt + ms + st + ilm + pl + qz + H₂O foi estável em 3,5– 6,5 kbar e 520–583°C. A interceptação de isopletras XCa e XMn restringe a condição de crescimento da granada em 4,5–5,1 kbar e 536–555°C. A fácies anfíbolito inferior foi evidenciada por um único evento, com condições metamórficas indicadas pelo crescimento da granada. A datação U-Pb de granada

de baixo teor de U (<1 ppm) aponta a idade de 721 ± 14 Ma para o crescimento de granada cerca de 18 Ma após a idade máxima deposicional.

Com isso é possível observar que em diferentes ambientes tectônicos as condições de PT variam e se comportam de maneiras distintas. No entanto, é possível organizá-las de acordo com os seus gradientes geotérmicos (Tab. 01).

De Toni *et al.* (2021) apresentam dados de um metamorfismo de alta temperatura e baixa pressão, relacionado a um metamorfismo colisional sobre um ambiente de *back-arc* aquecido anteriormente por tectônica extensional. Por outro lado, Cerva-Alves *et al.* (2021) apresentam condições de metamorfismo mais “comum”, com um gradiente geotérmico tipicamente barroviano, interpretado como gerado durante a acreção de um suposto arco de ilhas com o cráton. Ambos relacionados ao Cinturão Dom Feliciano, no entanto se diferenciando em termos geotérmicos e de ambiente tectônico.

Quando se compara o metamorfismo de ambiente orogênico Andino com o Himalaiano é possível separá-los de acordo com as condições de pressão e temperatura. O metamorfismo andino em ambiente de arco ocorre em pressões e temperaturas moderadas, em profundidades relativamente rasas, enquanto o metamorfismo himalaiano ocorre em pressões e temperaturas mais elevadas, em profundidades maiores. Isso resulta em diferentes tipos de rochas metamórficas formadas em cada um desses ambientes.

Tabela 1 – Comparação de condições P-T em diferentes orógenos.

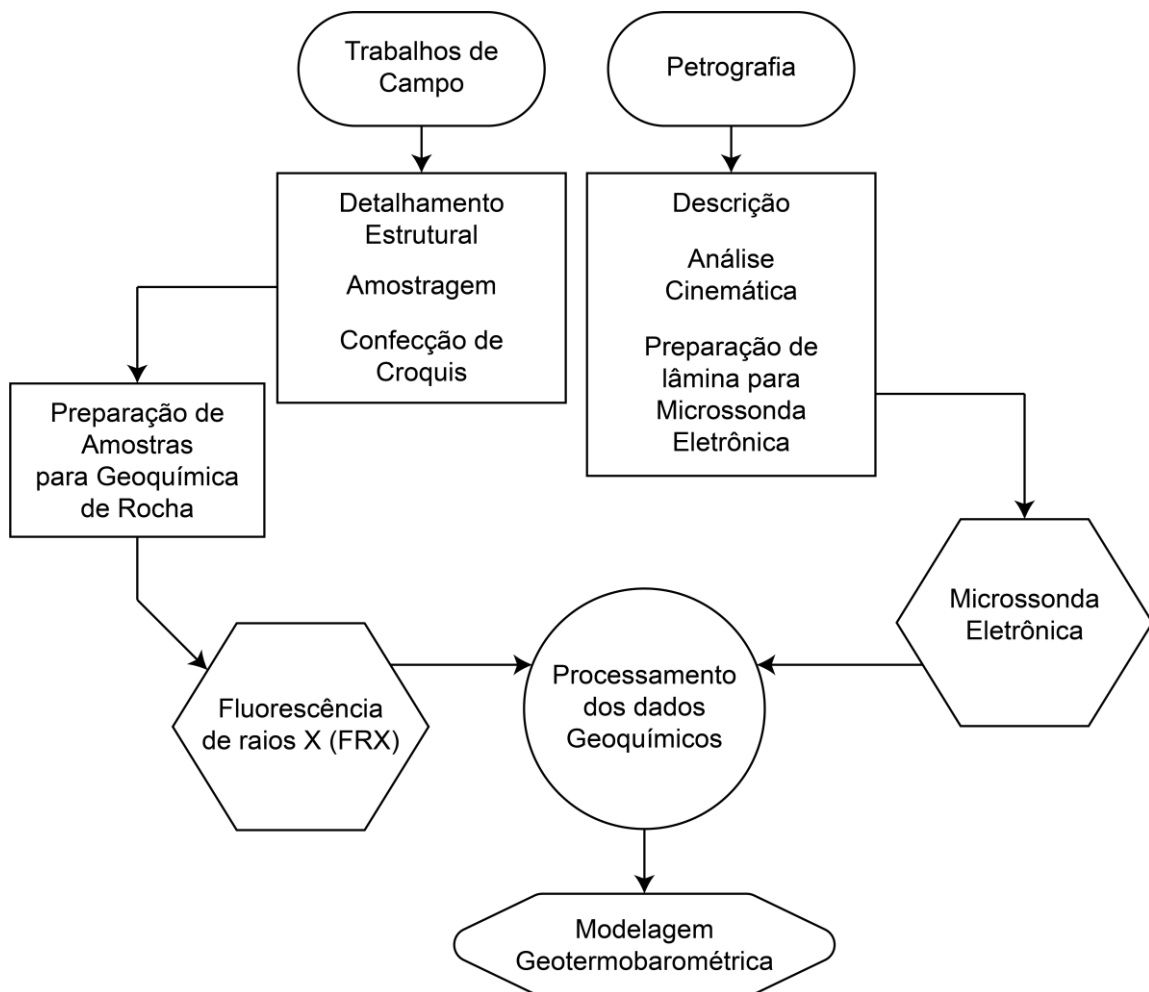
Tectônica	Local	Mineralogia Metamórfica	Metamorfismo	°C/km	Idade Metamórfica	(kbar) Inicial	(°C) Inicial	(kbar) Pico	(°C) Pico	(kbar) Descompressão	(°C) Descompressão	Autores
Acrescionária	Ryoke / Japão	Andaluzita Silimanita	Alta-T/baixa-P	~43°C/km	69 – 64 Ma.	-	-	4.6 - 5.6 kbar	650 - 790°C	5.2-2.6 kbar	710-450°C	Nakamura <i>et al.</i> 2021
	Sanbagawa / Japão	Jadeita Gaugophane	Alta-P/baixa-T	~18°C/km	69 – 64 Ma.	-	-	4.0 - 8.3 kbar	360 - 398°C	-	-	
	Morro Jorgiño Norte do Chile	Bt-And-Sil-	Alta-P	~20°C/km	190 ± 4 Ma.	7.5 - 7.9 kbar	580 - 590°C	8 - 9 kbar	600 - 630°C	6 kbar	635°C	M Calderón <i>et al.</i> 2017
	Formação Serrinha Bloco São Gabriel / BR	Grt-Bt-Ms-Pl- Tur	Barroviano	~36°C/km	721 ± 14 Ma.	4.5 - 5.1 kbar	536 - 555°C	3.5 - 6.5 kbar	520 - 583°C	-	-	Cerva-Alves <i>et al.</i> 2021
	Nariño e Putumayo Sul da Colômbia	An-Bt	Alta-T/baixa-P	~46,6° C/km	160,8 ± 0,8 Ma.	-	-	4,5 kbar	700°C	-	-	Restrepo <i>et al.</i> 2021
Colisional	Pangong Tso Índia (SSZ321)	Qtz-Ms-Bt- Grt-Pl-St	Barroviano	~25°C/km	-	-	-	7.5 - 8 kbar	596 - 606°C	3 - 3.5 kbar	559 - 573°C	Sachan <i>et al.</i> 2016
	Pangong Tso Índia (SSZ322)	Sil-Ms-Qtz- Grt-Bt-Pl-Cal		~28°C/km	-	-	-	6.7 - 7.1 kbar	650 - 660°C	3.3 - 4 kbar	618 - 630°C	
	Complexo Várzea do Capivarita – Bloco Encruzilhada / BR	Sil-Crd-Grt-Bt	Alta-T/baixa-P	~54°C/km	650 – 640 Ma.	3.5 - 4.8 kbar	760 - 830°C	4.4 - 4.8 kbar	790 - 820°C	2.5 - 3.4 kbar	660 - 680°C	De toni <i>et al.</i> 2021
	Complexo Cerro da Árvore – Faixa Tijucas BR	Grt-St-Qtz- Ms	Barroviano	~28°C/km	660 Ma.	5.4 - 5.7 kbar	555 - 565°C	5.8 - 6.3 kbar	560 - 580°C	<4 kbar	580°C	
	Complexo Passo Feio Bloco São Gabriel / BR (Xisto)	St-Grt-Bt- Ms-Chl-Ilm- Qtz-Pl-And		~33°C/km	-	3 - 4.3 kbar	530 - 550°C	5 - 5.5 kbar	560 - 570°C	-	-	Costa <i>et al.</i> 2021
	Complexo Passo Feio Bloco São Gabriel / BR (Filito)	Grt-Bt-Ms- Qtz-Chl-Pl- Ilm		~29°C/km	-	2.5 - 3.3 kbar	490 - 500°C	5 - 6.4 kbar	500 - 510°C	-	-	
	Complexo Passo Feio Bloco São Gabriel / BR (BD03)	Ms-Grt-St-Bt- Pl-Qtz-		~31°C/km	571 ± 2 Ma.	4,7 - 6,4 kbar	560 - 580°C	-	-	-	-	Battisti <i>et al.</i> 2024

Fonte: autor (2024).

5. METODOLOGIA DE ABORDAGEM INTEGRADA

A metodologia de abordagem integrada é um método de investigação que combina diferentes técnicas e áreas de conhecimento para obter uma visão mais abrangente e detalhada de um determinado problema ou fenômeno (Fig. 10). Em estudos científicos essa abordagem é especialmente valiosa pois permite a coleta e análise de dados complementares oriundos de métodos como observações de campo, análises laboratoriais, modelagem computacional e revisão bibliográfica. Ao integrar múltiplas fontes de informação, a metodologia oferece uma compreensão mais completa e precisa dos processos em estudo. Na geociências, por exemplo, uma abordagem integrada pode unir análises estruturais, petrográficas e geoquímicas para esclarecer as condições e processos envolvidos na formação e deformação de uma rocha.

Figura 10 – Ordem sequencial da metodologia de abordagem integrada.

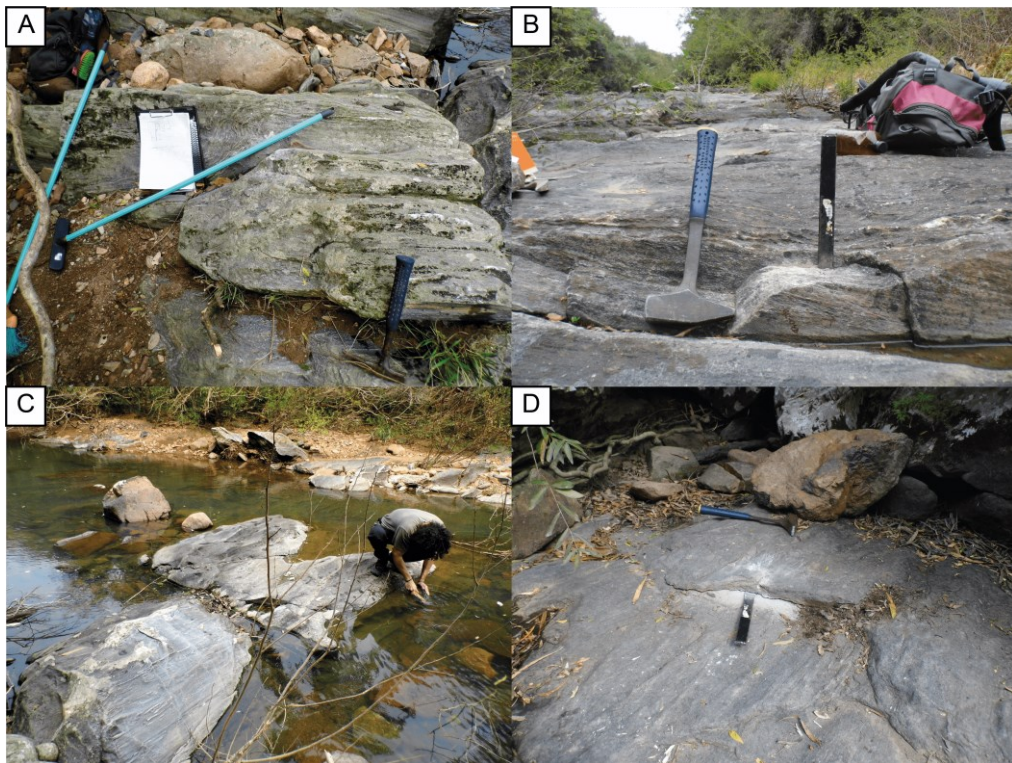


Fonte: autor (2024).

5.1 TRABALHOS DE CAMPO

A etapa de pré-campo contou com o estudo prévio da geologia local do afloramento a partir de imagens de satélite e mapas anteriores, assim como o planejamento e preparação das saídas de campo. A realização de 4 saídas de campo bem-sucedidas teve como principal objetivo analisar as condições estruturais e petrográficas das rochas da área de estudo e suas encaixantes, bem como seu mapeamento em escala de detalhe a partir da confecção de croquis e coleta de amostras orientadas. Foi de fundamental importância para o cumprimento do planejamento prévio, à utilização de equipamentos e ferramentas de trabalho como bússola para obtenção de medidas estruturais, martelo petrográfico e talhadeiras para coleta de amostras, caderneta de campo para anotações e observações de campo, GPS para marcação de coordenadas, lupa de mão, perneiras, câmera fotográfica para fins de registro, folha milimetrada para confecção de croquis, vassouras e escovas de aço para limpeza do afloramento (Fig. 11).

Figura 11 – Registros fotográficos de campo. A) Limpeza em uma porção do afloramento; B) Coleta orientada de amostra em alto ângulo; C) Limpeza de amostra coletada; D) Coleta de amostras chips para análise química.



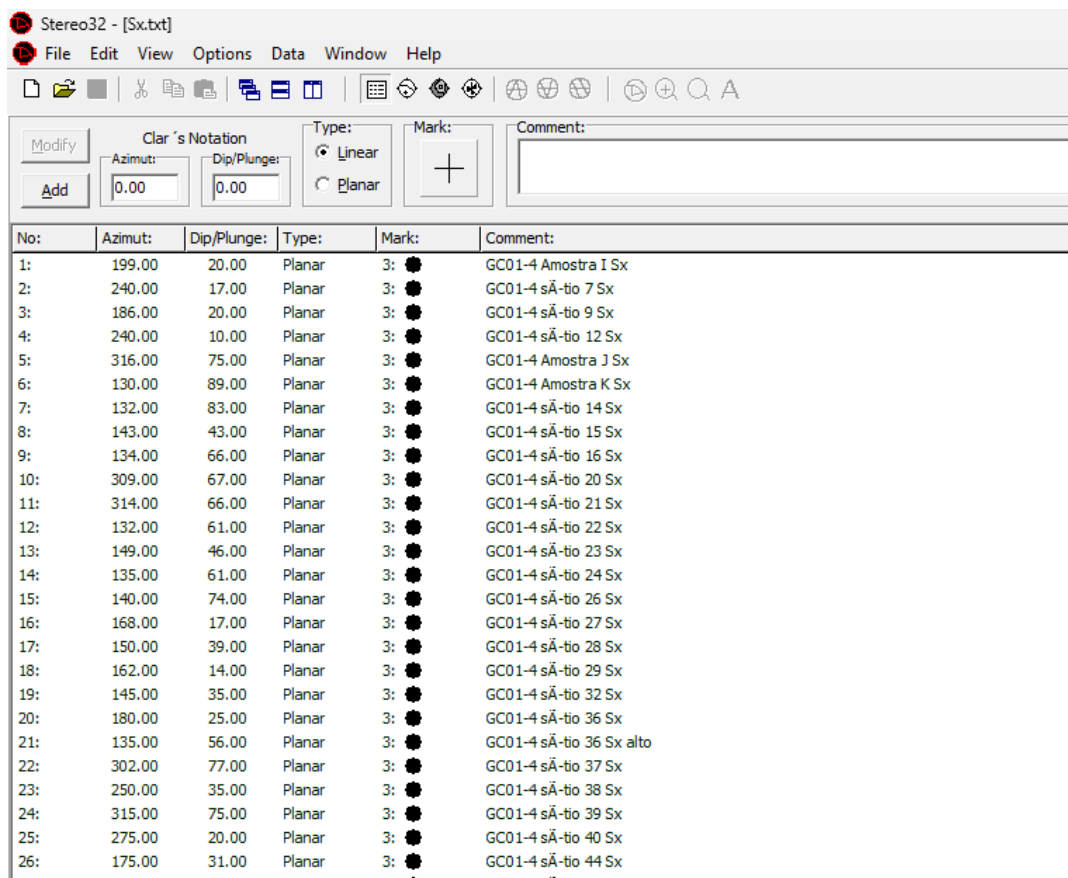
Fonte: autor (2024).

5.1.1 DETALHAMENTO ESTRUTURAL

Durante os trabalhos de campo, o detalhamento estrutural do afloramento se deu a partir do mapeamento e medição das principais feições estruturais como, foliações, lineações, dobras, eixos, injeções, veios boudinados, cortes e contatos presentes no leito do arroio laranjeira.

Foi coletado um total de 374 medidas (148 de foliações, 60 lineações, 60 planos axiais, 69 eixos de dobra e 37 injeções trondhjemíticas), das quais 132 (46 foliações, 31 lineações, 20 planos axiais, 25 eixos de dobra e 10 injeções) obtidas neste trabalho de TCC, às outras 242 (102 foliações, 29 lineações, 40 planos axiais, 44 eixos de dobra e 27 injeções) foram obtidas ao longo do projeto de pesquisa iniciado anteriormente. A partir da coleta e organização em planilha Excel desses dados estruturais, foi possível gerar estereogramas de polos e estereogramas de densidade, utilizando o *software* Stereo32 (Fig. 12). Todos estereogramas gerados foram projetados em rede equiárea no hemisfério inferior.

Figura 12 – Utilização do Stereo32 para produção dos estereogramas.



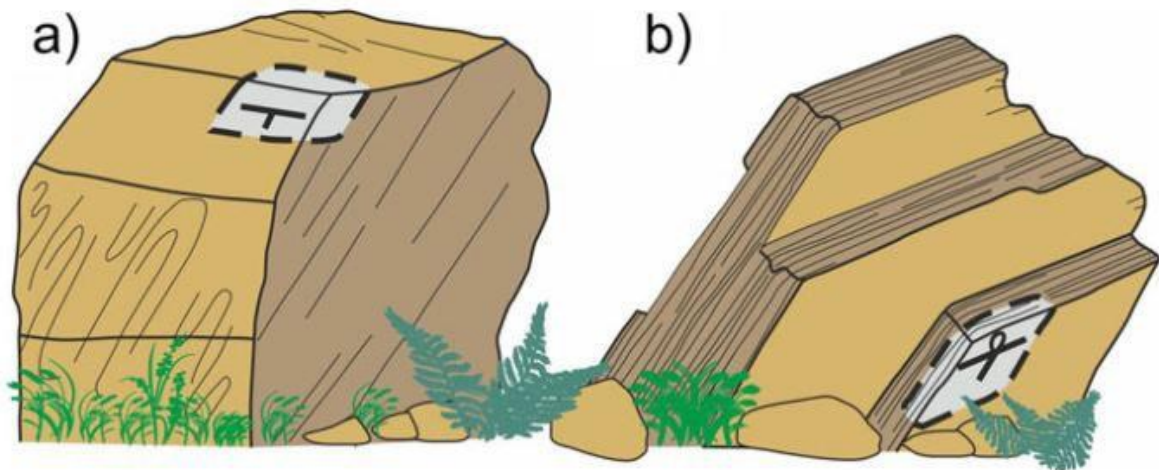
No:	Azimut:	Dip/Plunge:	Type:	Mark:	Comment:
1:	199.00	20.00	Planar	3: ●	GC01-4 Amostra I Sx
2:	240.00	17.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 7 Sx
3:	186.00	20.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 9 Sx
4:	240.00	10.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 12 Sx
5:	316.00	75.00	Planar	3: ●	GC01-4 Amostra J Sx
6:	130.00	89.00	Planar	3: ●	GC01-4 Amostra K Sx
7:	132.00	83.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 14 Sx
8:	143.00	43.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 15 Sx
9:	134.00	66.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 16 Sx
10:	309.00	67.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 20 Sx
11:	314.00	66.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 21 Sx
12:	132.00	61.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 22 Sx
13:	149.00	46.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 23 Sx
14:	135.00	61.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 24 Sx
15:	140.00	74.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 26 Sx
16:	168.00	17.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 27 Sx
17:	150.00	39.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 28 Sx
18:	162.00	14.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 29 Sx
19:	145.00	35.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 32 Sx
20:	180.00	25.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 36 Sx
21:	135.00	56.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 36 Sx alto
22:	302.00	77.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 37 Sx
23:	250.00	35.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 38 Sx
24:	315.00	75.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 39 Sx
25:	275.00	20.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 40 Sx
26:	175.00	31.00	Planar	3: ●	GC01-4 sÃ-tio 44 Sx
--	----	----	--	--	----

Fonte: autor (2024).

5.1.2 AMOSTRAGEM

No presente trabalho foram descritas 19 amostras, 9 das quais obtidas através dos trabalhos de campo referentes ao TCC do autor, às outras 10 referentes ao projeto de pesquisa no qual este TCC se insere. Todas as amostras orientadas foram coletadas segundo as recomendações ilustradas e referenciadas por Gaidzik e Zaba (2021). Para realizar a coleta de amostras em campo é necessário marcar na rocha a direção e o sentido de mergulho de um plano de referência que pode corresponder ou não à foliação da rocha. Segundo os autores, a direção ou *strike* da camada é indicada ao longo de uma linha horizontal, enquanto o mergulho é marcado por uma linha perpendicular, apontando para o sentido de inclinação do plano (Fig. 13).

Figura 13 – Amostragem orientada em rochas deformadas ductilmente. A) posição normal devido medida no topo; B) posição inversa devido medida na base.



Fonte: Gaidzik & Zaba (2021).

É essencial que a superfície seja preferencialmente lisa e tenha uma origem conhecida. Sempre que possível, é recomendável registrar a orientação de quaisquer elementos lineares visíveis em campo, como a lineação (Gaidzik e Zaba, 2021). Após esses procedimentos, a amostra deve ser cuidadosamente removida, e os dados estruturais, junto com o símbolo apropriado, devem ser registrados na caderneta de campo, conforme a figura ilustrativa. Além disso, o corte ao longo do plano XZ deve ser marcado diretamente no local de coleta (Fig. 14).

Figura 14 – Amostra GC-04F, coletada e orientada no próprio local de amostragem, zoom de onde foi realizada a orientação da amostra.



Fonte: autor (2024).

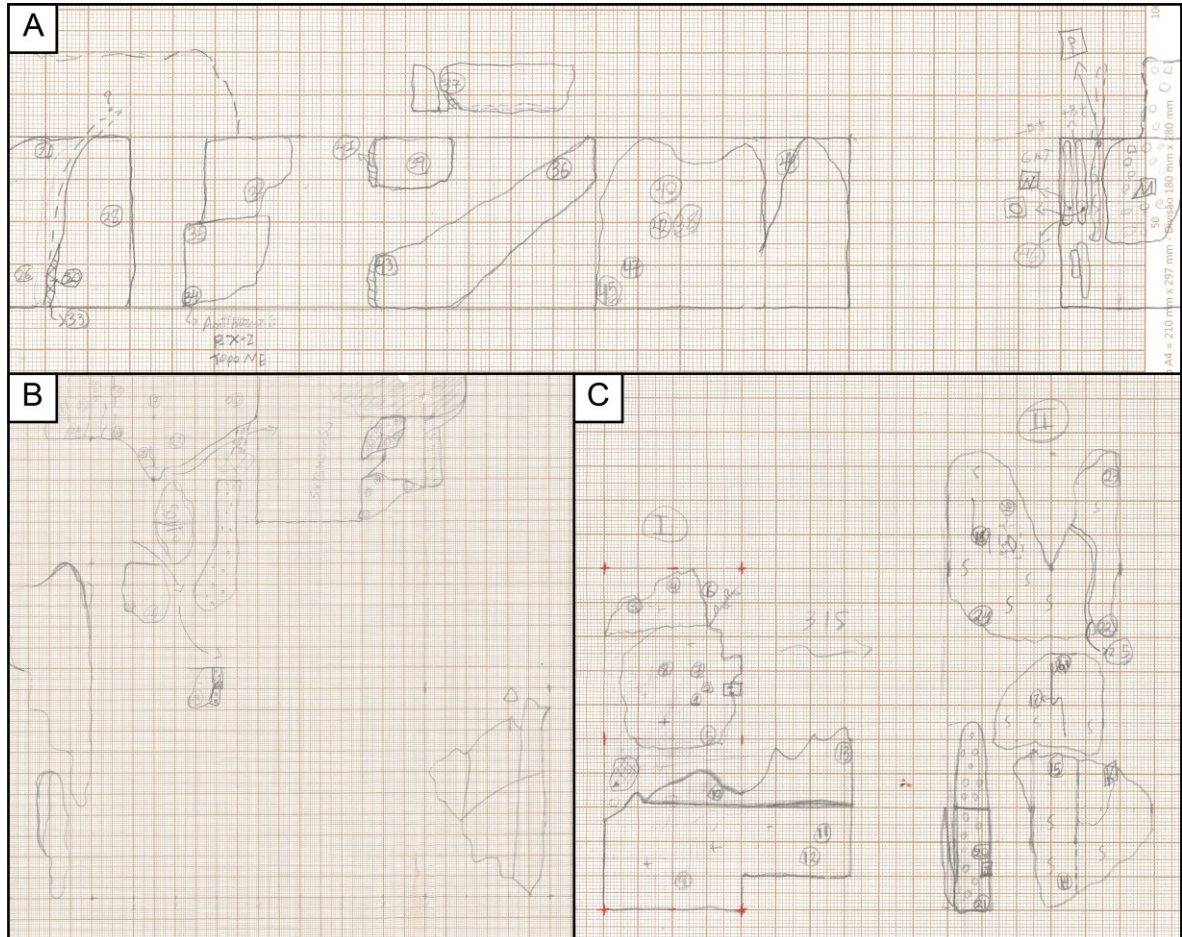
5.1.3 CONFECÇÃO DE CROQUIS

A produção dos croqui de detalhe se deu inicialmente com a utilização da trena para medição dos vários lajeados contidos ao longo do leito do Arroio Laranjeira. Dessa maneira esses lajeados em conjunto ou separadamente formam os diferentes mapas interligados: GC-01-1, -2, -4, -5 e GC-04.

Os mapas dos afloramentos GC-01-1 e GC-01-2, assim como o GC-04, foram realizados originalmente em escala 1:100 durante a fase inicial do projeto de pesquisa pelo orientador. Estes mapas foram posteriormente editados e aprimorados ao longo do desenvolvimento deste TCC, sendo ajustados para a escala 1:50. Além disso, os mapas GC-01-4 e GC-01-5 foram desenvolvidos integralmente ao longo deste TCC, em escala 1:50.

Todas essas informações, observações e medidas foram desenhadas em folhas milimetradas. Quaisquer medidas estruturais, litologias distintas, contatos, intrusões cortando diferentes litotipos, locais de amostragem, sítios estruturais onde foram desenvolvidos medidas, croquis ou obtidas fotografias de estruturas em maior detalhe, perfis e coordenadas coletadas no arroio foram detalhadamente adicionadas em seus respectivos locais dentro dos croquis interligados do arroio (Fig. 15). Por fim, foi realizada a digitalização dessas folhas milimetradas, para ser possível à partir do *software* Adobe Illustrator a vetorização e interconexão entre os 5 mapas produzidos, o qual é apresentado no capítulo de Geologia de Campo, assim como incluído como anexo desta monografia.

Figura 15 – Croquis produzidos em campo. A) Margem SW do croqui GC-01-4; B) Croqui GC01-5 contemplando as 2 margens do arroio; C) Margem NE do croqui GC01-4. Todas as numerações indicam medidas estruturais obtidas e marcadas em campo.

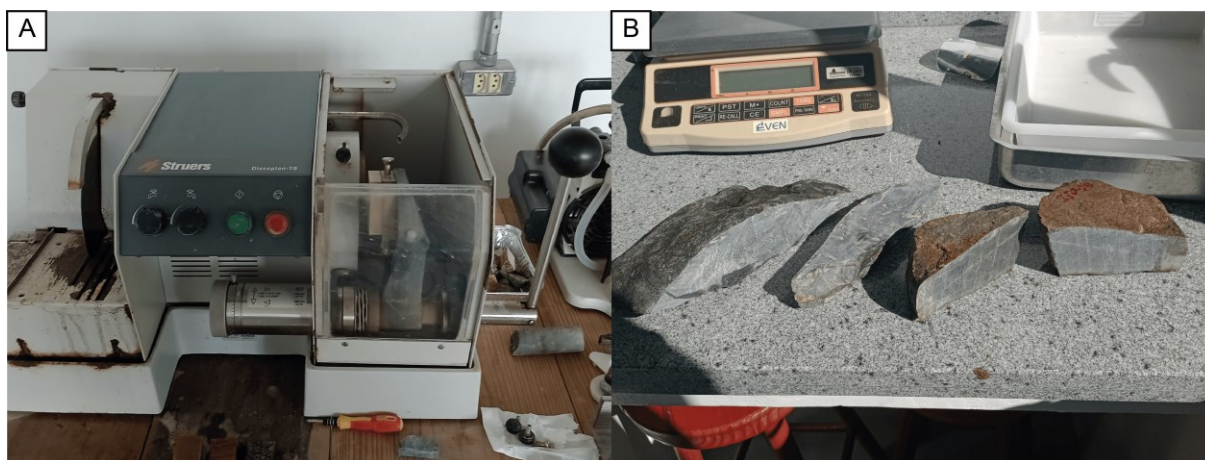


Fonte: autor (2024).

5.2 PETROGRAFIA

Para o aprimoramento e desenvolvimento da petrografia foi indispensável a utilização dos recursos laboratoriais do campus Caçapava para a preparação de lâminas delgadas, tais como serra para corte orientado das amostras coletadas durante as saídas de campo (Fig. 16). Assim obtendo as esqúirulas de tamanho adequado, às quais são então embutidas com resina epóxi em uma lâmina de vidro para melhor estabilização, o que facilita o manuseio. Em seguida, a amostra é lixada em sucessivas granulações de abrasivos, até que a superfície de rocha atinja a milimetrarem ideal de 0.03mm ou 30 micrômetros. Tais trabalhos foram realizados nos domínios do Laboratório de Lavra, Planejamento e Tratamento de Minérios (LATRAM).

Figura 16 – Preparação de lâminas delgadas. A) Serra para corte orientado das amostras e lixamento das esqúirulas; B) Amostras GC-01H e 01I cortadas no plano XZ.



Fonte: autor (2024).

Também foi de extrema importância o uso do microscópio petrográfico Nikon, disponibilizado pelo Laboratório de Microscopia do campus Caçapava (Fig. 17), utilizado para descrição das lâminas. A descrição das amostras de mão e lâminas referentes ao Arroio Laranjeira seguiram uma linha sistemática de observações petrográficas com intuito de classificá-las entre orto- e para-metamórficas. Sendo analisado as feições estruturais, texturais e mineralógicas das amostras tanto em escala macroscópica quanto microscópica. Observações petrográficas do comportamento cinemático em escala meso e microscópica também ocorreram em

paralelo durante as descrições. Por fim, foi realizada a partir desses resultados, a seleção e preparação de certas amostras promissoras para estudos geoquímicos de rocha e de química mineral.

Figura 17 – Laboratório de microscopia do campus Caçapava onde foram realizadas as descrições petrográficas.



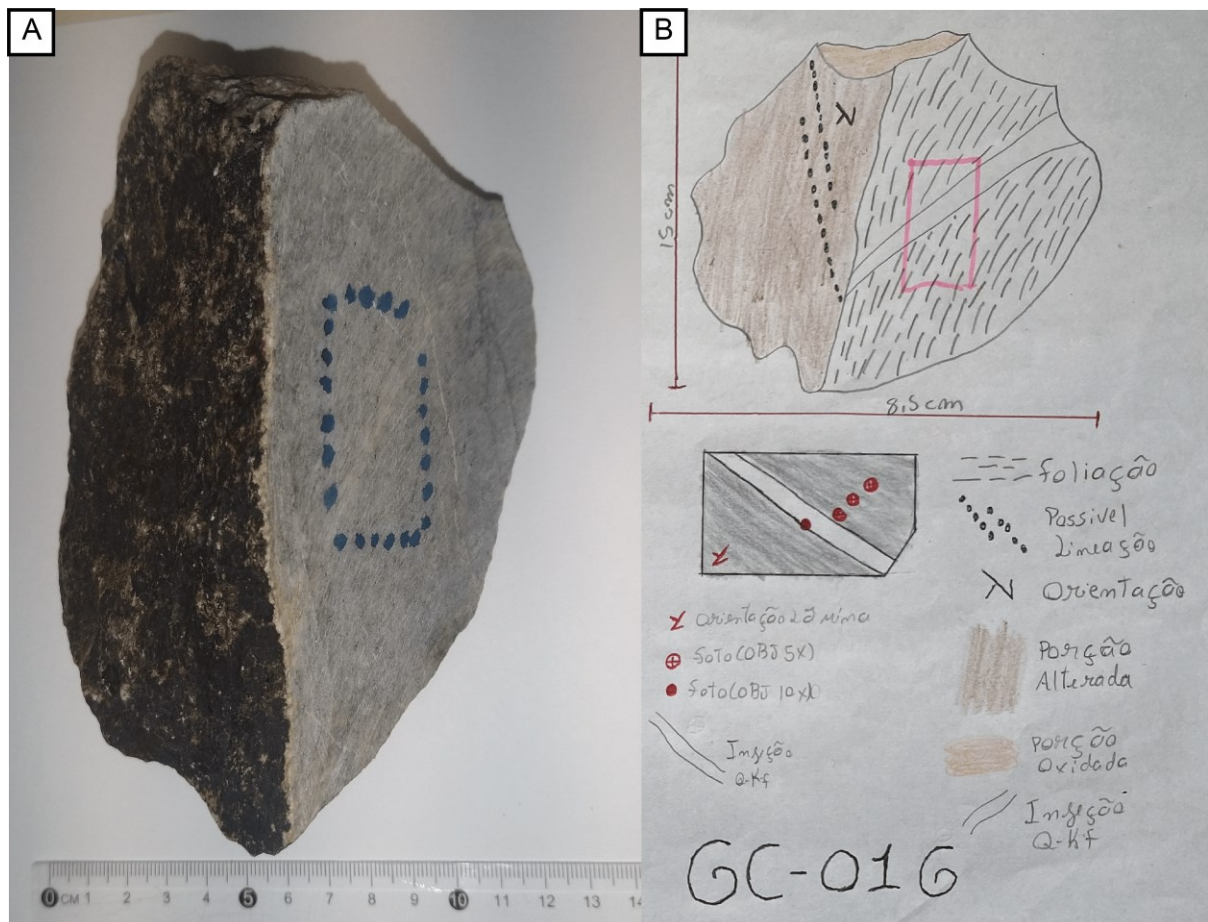
Fonte: Labmicro Unipampa (2024).

5.2.1 DESCRIÇÃO DE AMOSTRAS

5.2.1.1 Macroscópica

Contou com a utilização da lupa de mão, caderneta, lápis, folhas A4 e câmera fotográfica. Tais ferramentas foram utilizadas para a descrição sistemáticas das feições estruturais, texturais e mineralógicas das amostras. A produção de croquis e fotografias dessas amostras também foi de extrema importância para a sua compreensão (Fig. 18).

Figura 18 – Método de descrição de amostra macroscópica. A) Registro fotográfico e descrição da amostra GC-01G; B) Croqui da mesma amostra com as principais observações macro e esboço da lâmina orientada.



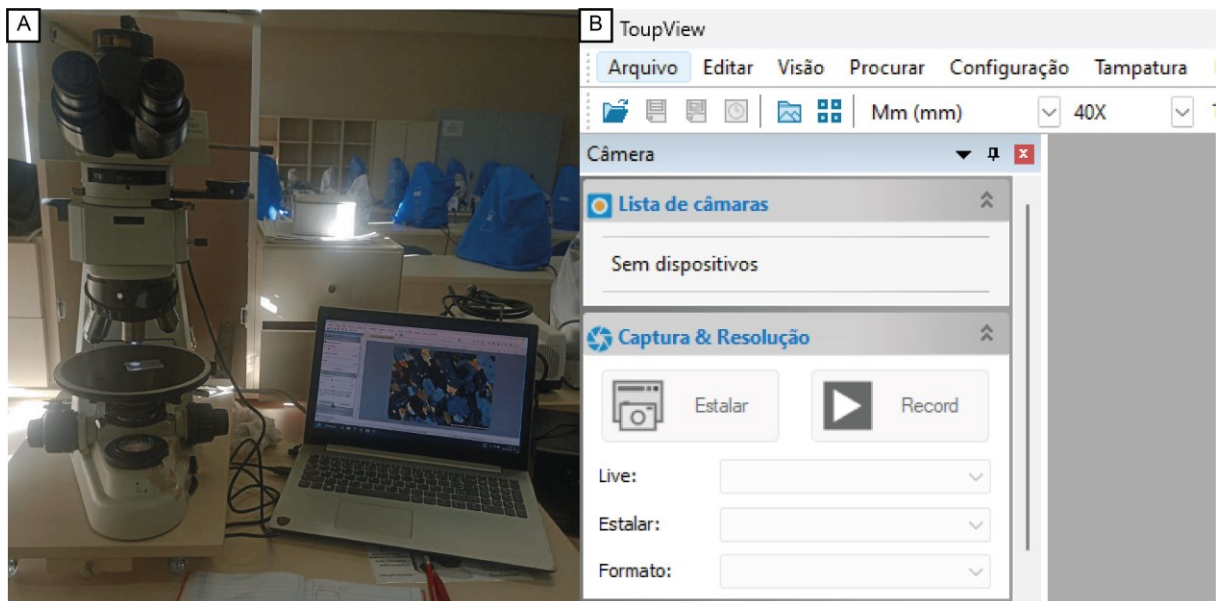
Fonte: autor (2024).

5.2.1.2 Microscópica

Com a utilização do microscópio petrográfico foi possível observar, descrever, registrar e interpretar as principais feições microestruturais, texturais, e composicionais mineralógicas dos diferentes tipos de gnaisses, tanto sob nicóis paralelos quanto sob nicóis cruzados. Dessa forma podendo organizar e classificar em uma planilha Excel de acordo com suas distintas características.

O registro fotográfico a partir do *software* ToupView e a utilização de uma câmera USB conectada ao notebook possibilitou a criação e documentação de microfotografias dentro das principais lâminas estudadas, essenciais para o planejamento das sessões de microsonda eletrônica. (Fig. 29).

Figura 19 – Método de descrição de amostra microscópica. A) Microscópio Nikon com câmera USB ligada ao notebook para descrição petrográfica e registro de fotomicrografias; B) Software ToupView utilizado para captura e adição de escala nas fotomicrografias.



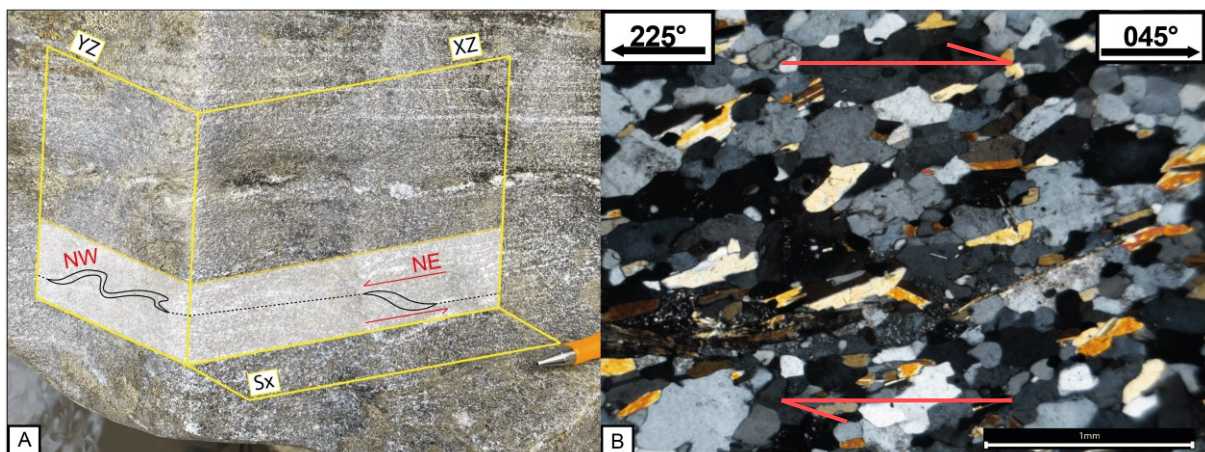
Fonte: autor (2024).

5.2.2 ANÁLISE CINEMÁTICA

A análise cinemática em petrografia metamórfica se dá pelo estudo das direções e sentidos de movimento da sua trama, para entender a deformação que ocorreu. Esse tipo de análise examina tanto as macro, quanto as microestruturas, permitindo identificar o tipo de deformação seja ela: cisalhamento simples, puro ou a combinação de ambos (Passchier *et al.*, 1990, 2005).

Por meio da observação orientada de acordo com o elipsoide de deformação, preferencialmente no plano XZ, em escala meso e microscópica, indicadores como, foliação com dobras assimétricas, injeções boudinadas, veios dobrados assimetricamente, estruturas *mica-fish* e porfiroclastos assimétricos, é possível deduzir o movimento relativo durante o metamorfismo. Tais observações foram coletadas e registradas em campo com a utilização da bussola e câmera fotográfica, enquanto em escala microscópica as lâminas orientadas foram mapeadas e seus indicadores cinemáticos registrado, os principais sítios microestruturais a partir do *software* ToupView com o uso da câmera USB (Fig. 20).

Figura 20 – Exemplo de análise cinemática. A) Ponto chave observado em afloramento indicando componente de estiramento com topo para NE (injeção tonalítica com boudins assimétricos) e encurtamento para NW (injeção tonalítica com dobramento assimétrico); B) Sítio microestrutural na amostra GC01-I com cristais de clinopiroxênio deformados e estirados assimetricamente, também indicando topo para NE.

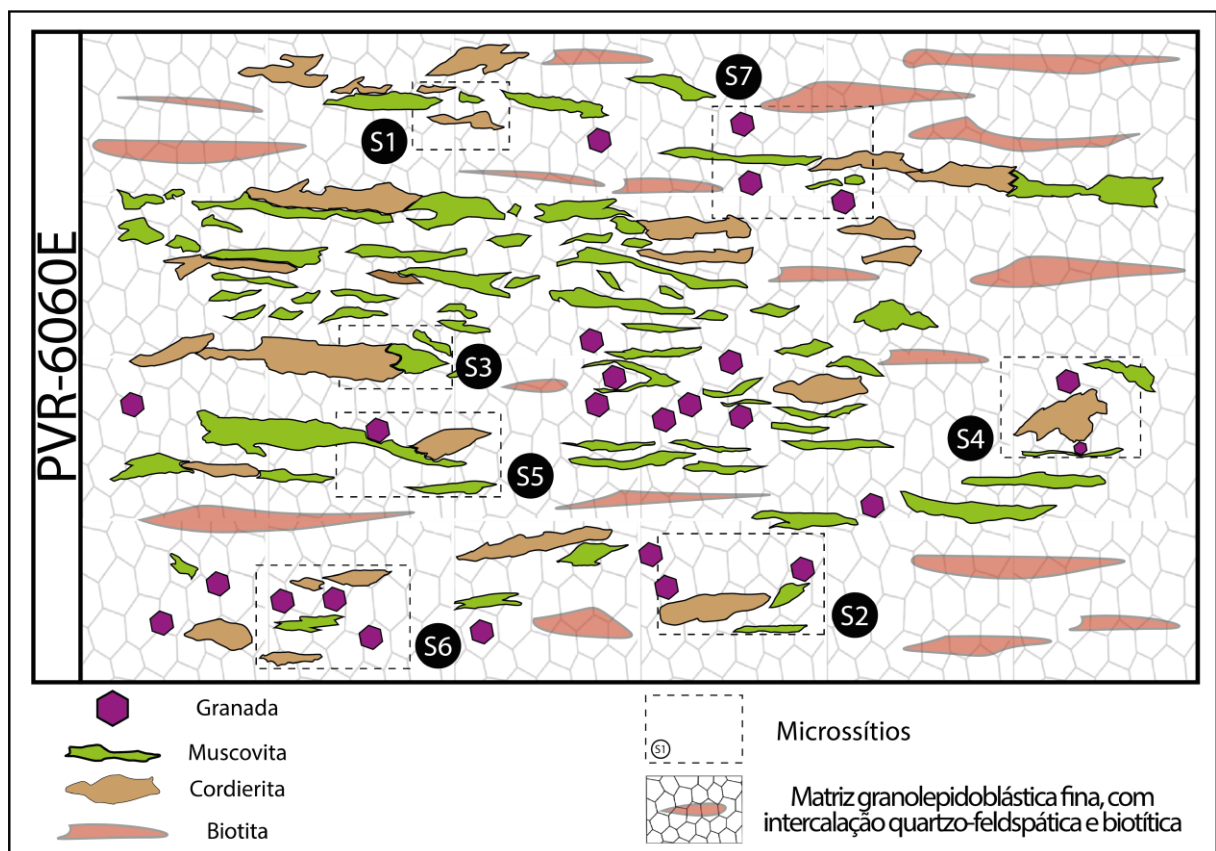


Fonte: autor (2024).

5.2.3 PREPARAÇÃO DE LÂMINA PARA MICROSSONDA ELETRÔNICA

A preparação de lâminas para microsonda eletrônica envolve uma série de etapas para garantir que as lâminas estejam adequadas para análise precisa dos minerais. Dessa maneira, antes das lâminas passarem pelo polimento e metalização, são reconhecidos e mapeados os principais microssítios, onde é registrado com maior detalhe as porções da lâmina com os principais minerais e micro estruturas a serem analisadas (Fig. 21).

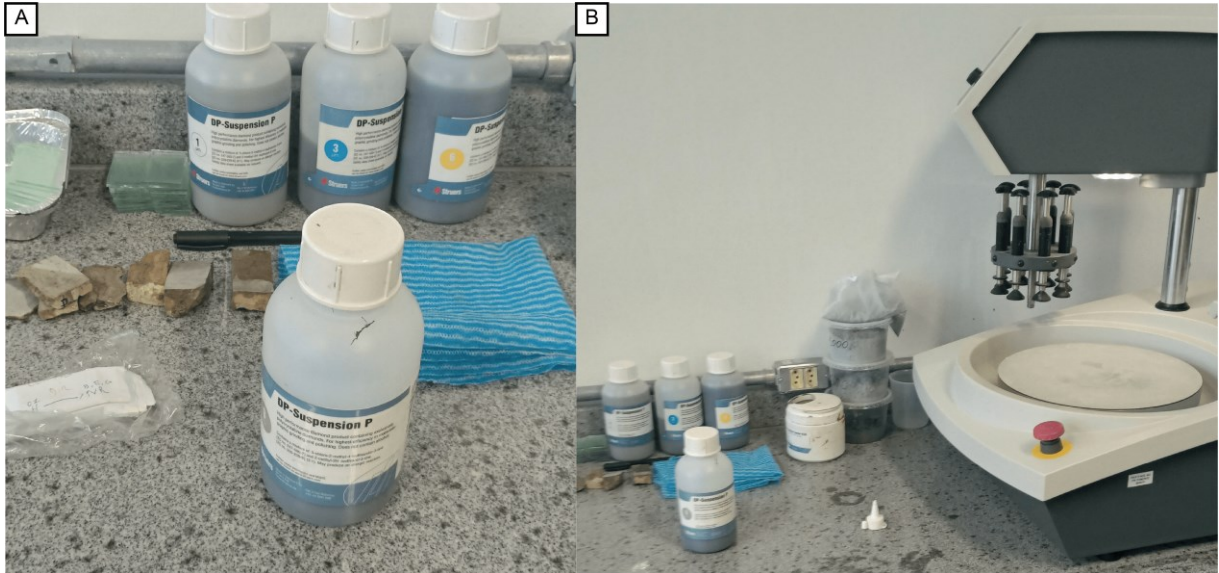
Figura 21 – Mapeamento dos microssítios de interesse para microsonda eletrônica.



Fonte: autor (2024).

Durante a preparação realizada no LATRAM da UNIPAMPA, às lâminas previamente selecionadas a partir das descrições e análise cinemática recebem um polimento com abrasivos de 1/4 μm , para que a superfície fique livre de imperfeições e riscos (Fig. 22). Posteriormente, esse polimento foi refinado no Laboratório de Preparação de Amostras da UFRGS.

Figura 22 – Preparação de lâminas delgadas para metalização. A) Abrasivos utilizados no polimento; B) Lixadeira politriz.



Fonte: autor (2024).

Em seguida a lâmina é metalizada com película de carbono na metalizadora Jeol JEE 4B, ou seja, revestida com uma fina camada de carbono na espessura de 20 nm. Tal metalização é necessária para conduzir a corrente elétrica durante a análise. Depois da metalização as lâminas são armazenadas no armário dessecador com sistema de vácuo até serem operadas na microssonda eletrônica Cameca SXFive a partir de um computador. Todos os procedimentos são executados com precisão para preservar as características mineralógicas da lâmina e garantir a qualidade das análises quantitativas de composição da química mineral. Depois de todas essas etapas finalizadas, as lâminas são então analisadas de duas em duas (Fig. 23).

Figura 23 – Equipamentos utilizados para o processo de metalização das lâminas. A) Metalizadora Jeol JEE 4B; B) Armário dessecador com sistema de vácuo.

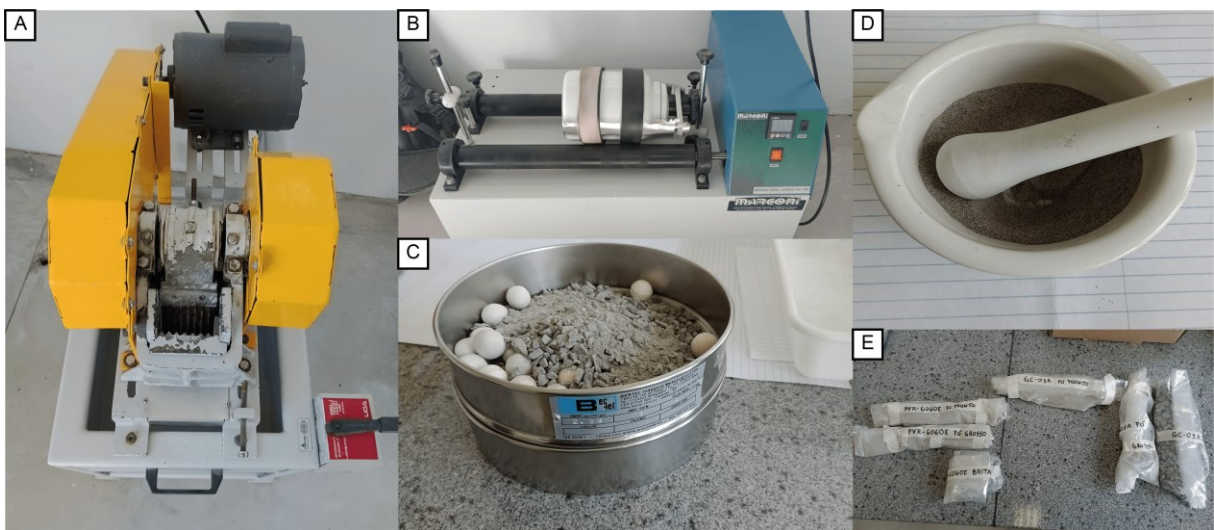


Fonte: LabME-CPGq-IGEO-UFRGS (2024).

5.3 PREPARAÇÃO DE AMOSTRA PARA GEOQUÍMICA DE ROCHA

A preparação das amostras para geoquímica de rocha seguiu etapas rigorosas para assegurar a representatividade e a integridade dos dados analíticos. Primeiramente, as amostras são selecionadas e limpas para remover quaisquer contaminantes superficiais, como poeira, musgo, tinta e partículas externas. Em seguida, as amostras são trituradas com o uso de um britador de mandíbula, até atingir um tamanho adequado para moagem. O material é então triturado em um moinho de bolas, gerando um pó fino e homogêneo com alguns poucos cacos restantes que são então peneirados e moídos no gral com a utilização do pistilo até atingir 200 mesh (Fig. 24).

Figura 24 – Processo de preparação de amostra para análise química de rocha. A) Britador de mandíbula onde as amostras foram inicialmente trituradas; B) Moinho de bolas utilizado para moagem inicial; C) Separação em peneira do que foi moído no moinho de bolas; D) – Moagem final no gral; E) Embalagem e etiquetagem das amostras para envio ao (CPGq) da UFRGS.



Fonte: autor (2024).

Durante todo o processo, é fundamental evitar a contaminação cruzada das diferentes amostras preparadas nos mesmos equipamentos, que são devidamente limpos entre o uso consecutivo com as diferentes amostras. Após a moagem, o pó da amostra é guardado em sacos limpos e etiquetados. A preparação dessas amostras foram realizadas até essa etapa no LATRAM.

Na sequência, as amostras foram enviadas para o laboratório do Centro de Pesquisas em Geoquímica (CPGq) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(UFRGS), onde ocorreu a preparação das pastilhas na Prensa Herzog, para posterior análise da geoquímica de rocha no Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X RIX 2000 da Rigaku (Fig. 25).

Figura 25 – A) Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X RIX 2000 da Rigaku; B) Prensa Herzog.



Fonte: FRX-CPGq-IGEO-UFRGS (2024).

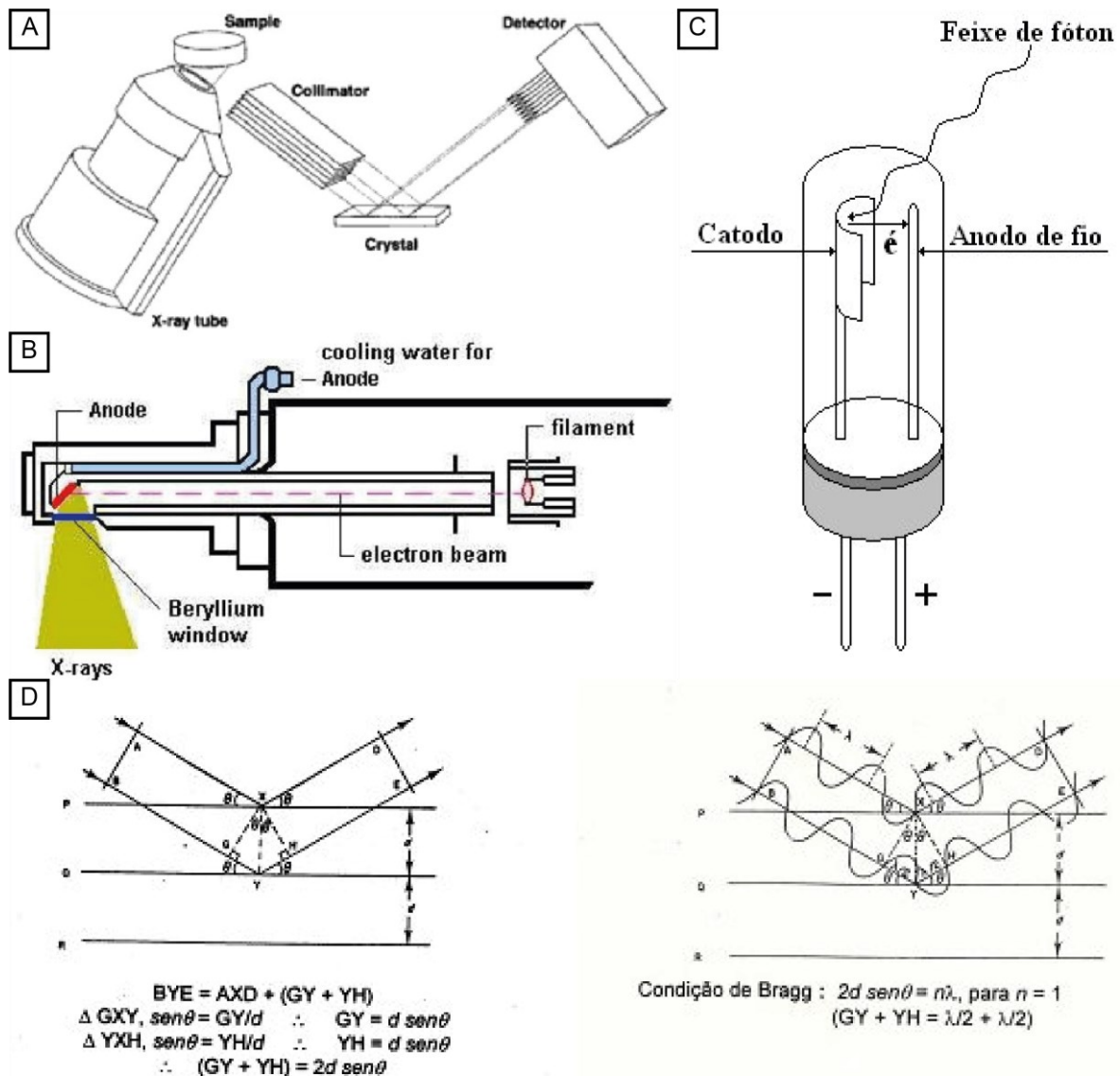
5.4 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

A Espectrometria por Fluorescência de Raios-X é uma técnica analítica não destrutiva utilizada para determinar os elementos químicos ($Z > 10$) presentes em uma amostra (análise qualitativa), assim como estabelecer a proporção em que cada elemento se encontra presente na amostra (análise quantitativa).

As análises são executadas em materiais sólidos, onde são necessários 10g de material representativo em pó a 200 mesh (74 μm). O mesmo deve ser acondicionado em embalagens identificadas. Com isso é possível a determinação da concentração de elementos maiores em forma de seus óxidos (elementos químicos que normalmente encontram-se acima de 0,01% nas rochas): SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (total), MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , P_2O_5 .

No processo, a amostra é exposta a um feixe de raios X, o que excita os átomos presentes na amostra e resulta na emissão de fluorescência característica de cada um desses elementos químicos. A intensidade da radiação fluorescente emitida é então medida e correlacionada com a concentração dos elementos presentes na amostra (Fig. 26). O equipamento de FRX é calibrado com padrões conhecidos para garantir a precisão das medições.

Figura 26 – Técnica analítica utilizada para determinar elementos químicos ($Z > 10$). A) Arranjo instrumental de um espectrômetro de fluorescência de raios-X; B) Ilustração dos principais componentes de um tubo de raios X; C) Difração de raios X, a partir do espalhamento de um feixe de raios X, com os planos de átomos de um cristal e a condição de Bragg para que ocorra a difração; D) Ilustração dos principais componentes do filamento no tubo de raios X.



Fonte: Morais *et al.* (2015)

5.5 MICROSSONDA ELETRÔNICA

O funcionamento da microsonda eletrônica Cameca SXFive na obtenção da química mineral e criação de mapas composicionais envolve a análise detalhada da composição química de minerais em escala microscópica. A microsonda eletrônica é equipada com cinco espectrômetros tipo WDS e um espectrômetro tipo EDS, microscópio eletrônico de varredura nos modos de elétrons secundários, elétrons retroespalhados e catodoluminescência, microscópio ótico integrado que produz imagens nos modos de luz refletida e transmitida com campo de visão contínuo desde 250 até 1700 μm (Fig. 27). A precisão e a resolução das análises dependem de fatores como a calibração do equipamento, as condições de operação (como a tensão e corrente do feixe de elétrons) e o preparo adequado da amostra.

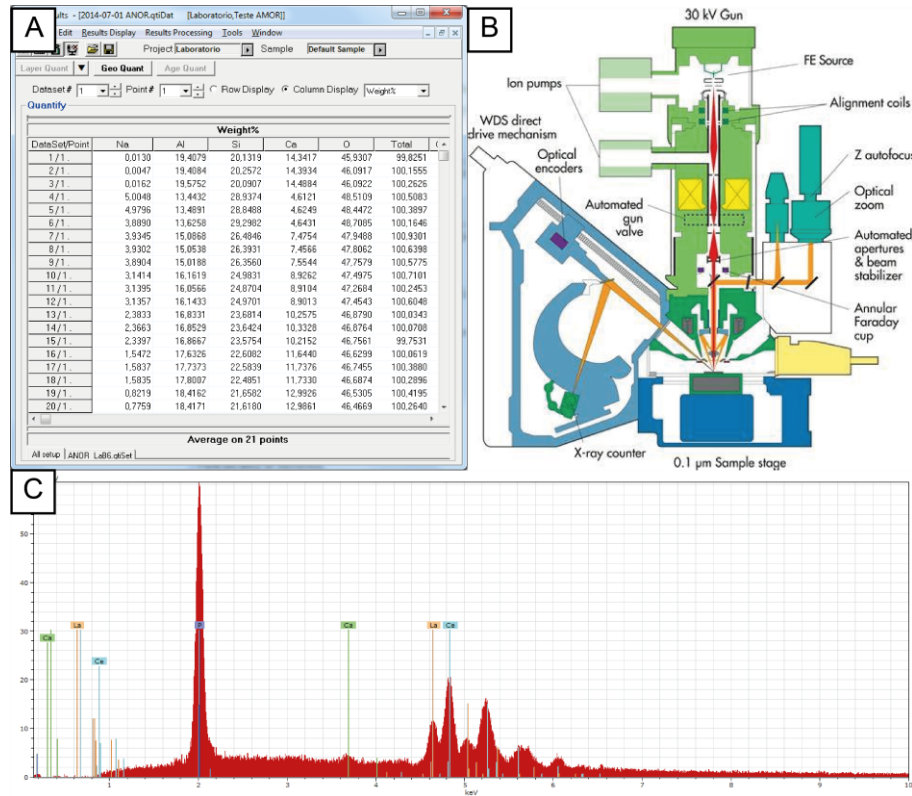
Figura 27 – Utilização da microsonda eletrônica Cameca SXFive no LabME-CPGq-IGEO-UFRGS.



Fonte autor (2024).

A microsonda utiliza um feixe de elétrons focalizado que incide sobre a amostra, gerando raios-X característicos dos elementos presentes nos minerais analisados. Quando o feixe de elétrons interage com a amostra, ele excita os átomos, fazendo com que emitam raios X característicos. O detector de EDS mede a energia dos raios X emitidos. Cada elemento tem um conjunto único de energias de raios X, permitindo a identificação dos elementos presentes. O detector de WDS mede o comprimento de onda dos raios X emitidos, proporcionando uma resolução espectral mais alta e uma melhor separação de picos próximos (Fig. 28).

Figura 28 – Técnica analítica utilizada para realização da química mineral. A) Análise quantitativa WDS (Wavelength-Dispersive X-Ray Spectroscopy); B) Aparato instrumental da microsonda eletrônica Cameca SXFive; C) Análise qualitativa/semiquantitativa por EDS (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy).



Fonte: LabME-CPGq-IGEO-UFRGS (2024).

Através da varredura sistemática da superfície da amostra, é possível obter um mapa composicional, onde cada ponto é representado pela concentração relativa dos elementos presentes. Para a criação do mapa composicional, o feixe de elétrons é direcionado para pontos específicos dentro de um polígono previamente definido na amostra, e a intensidade dos raios X emitidos é registrada. Esses dados são então processados para gerar uma representação gráfica da distribuição dos elementos, permitindo a visualização das variações químicas dentro de uma região específica da amostra. Os mapas composicionais são analisados para entender a composição e a distribuição dos elementos na amostra.

5.6 PROCESSAMENTO DE DADOS GEOQUÍMICOS

Para a análise dos dados geoquímicos, foram empregadas técnicas de análise multivariada, incluindo a análise de componentes principais (PCA), análise de agrupamento e gráficos de dispersão. Estas abordagens permitiram explorar as relações entre os elementos analisados e as diferentes amostras, possibilitando uma visualização clara das variações composicionais. Os resultados obtidos foram então interpretados à luz do contexto geológico, a fim de fornecer insights sobre os processos formadores das rochas e minerais presentes na área de estudo.

5.6.1 LITOQUÍMICA

Os dados de geoquímica de rocha total obtidos por fluorescência de Raios-X (FRX) foram utilizados para a classificação de protólitos, assim como para o cálculo e plotagem de diagramas petrogenéticos para investigar condições metamórficas. Representativos da composição específica da rocha em estudo. Estes diagramas foram projetados considerando intervalos estimados de pressão e temperatura (PT) através da pseudoseção, estabelecidos com base na mineralogia descrita previamente.

5.6.2 QUÍMICA MINERAL

Posteriormente, os dados de química mineral são utilizados para cálculo da fórmula mineral (DEER *et al.*, 2013) e classificação das espécies minerais reconhecidas nas amostras, seguidamente, a plotagem de curvas composicionais (isopletas) dos minerais que apresentam solução sólida, como por exemplo: granadas, micas, plagioclásio, cordierita etc.

5.7 MODELAGEM GEOTERMOMBAROMÉTRICA

Uma abordagem integrada para estimar as condições de pressão e temperatura durante o metamorfismo, em especial de protólitos sedimentares, é a modelagem geotermobarométrica com o uso do software *Perple_X*. A partir dos dados geoquímicos de rocha com base nas técnicas de Fluorescência de Raios X (FRX) e a química mineral adquirida pela microsonda eletrônica, é possível chegar a uma trajetória das condições P-T que atuaram no metamorfismo dos gnaisses estudados. Durante o tratamento dos dados geoquímicos de rocha foi necessário a conversão do Fe₂O₃ para FeO, multiplicando o Fe₂O₃ pelo fator de conversão de 0,89 (Tab. 2), assim como a remoção estequiométrica do equivalente em CaO da fórmula da apatita, necessária visto que, o fósforo não é incluído no sistema químico considerado pela modelagem geotermobarométrica durante a confecção da pseudoseção no *Perple_X*. A combinação de FRX na obtenção da composição elementar e microsonda eletrônica para análises de alta resolução espacial e criação de mapas composicionais detalhados, proporciona uma análise detalhada e precisa da composição mineralógica e da variação dos elementos dentro dos minerais. Com os dados químicos obtidos, o *software Perple_X* é usado para realizar cálculos termodinâmicos baseados em modelos de equilíbrio mineral. O *Perple_X* utiliza modelos de fase para correlacionar as fases minerais observadas com os parâmetros termodinâmicos calculados, fornecendo assim informações sobre a trajetória metamórfica e o ambiente geotérmico em que a rocha se formou (Connolly, 2005).

Tabela 2 – Resultado das análises de geoquímica total e dados tratados com a conversão do Fe₂O₃ para FeO e desconto estequiométrico do equivalente em CaO da fórmula da apatita.

% em peso (g/100g)	GC-01C Análise	GC-01C Tratado	GC-01I Análise	GC-01I Tratado	GC-01H Análise	GC-01H Tratado	PVR-6060E Análise	PVR-6060E Tratado
SiO ₂	63,33	63,33	64,48	64,48	64,46	64,46	63,17	63,17
Al ₂ O ₃	14,76	14,76	14,01	14,01	14,53	14,53	15,60	15,60
TiO ₂	0,71	0,71	0,93	0,93	0,90	0,90	0,84	0,84
Fe ₂ O ₃ >FeO	6,70	6,03	8,09	7,28	6,03	5,42	6,59	5,93
MnO	0,25	0,25	0,17	0,17	0,10	0,10	0,11	0,11
CaO-CaOapatita	3,76	3,49	3,15	2,96	4,73	4,30	2,46	2,25
MgO	2,24	2,24	2,83	2,83	1,13	1,13	3,21	3,21
K ₂ O	2,45	2,45	0,56	0,56	1,82	1,82	3,16	3,16
Na ₂ O	4,10	4,10	5,16	5,16	4,07	4,07	3,11	3,11
P ₂ O ₅	0,23	-	0,16	-	0,36	-	0,18	-
L.O.I	1,47	1,47	0,47	0,47	1,89	1,89	1,56	1,56
Total	100	98,83	100	98,85	100	98,62	100	98,94

Fonte: autor (2024).

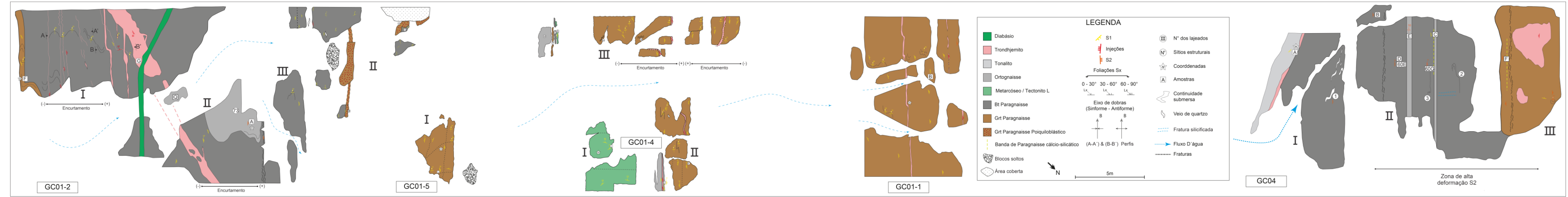
6. GEOLOGIA DE CAMPO

6.1 MAPEAMENTO DE DETALHE

A caracterização de campo conduzida no leito do Arroio Laranjeira permitiu a confecção de croquis digitalizados em uma escala de detalhe 1:50, assim como a identificação detalhada de diferentes tipos de gnaisses que se alternam em escala métrica. Entre estes gnaisses foram reconhecidos tanto ortognaisses quanto paragnaisses, exibindo variações significativas em termos de composição mineralógica (Fig. 29). Os ortognaisses e os paragnaisses presentes no afloramento apresentam um contato delicado e discreto ao longo do leito do arroio. Esta alternância pode ser observada na mudança textural, mineralógica e de cor dos diferentes gnaisses, orto- e paraderivados.

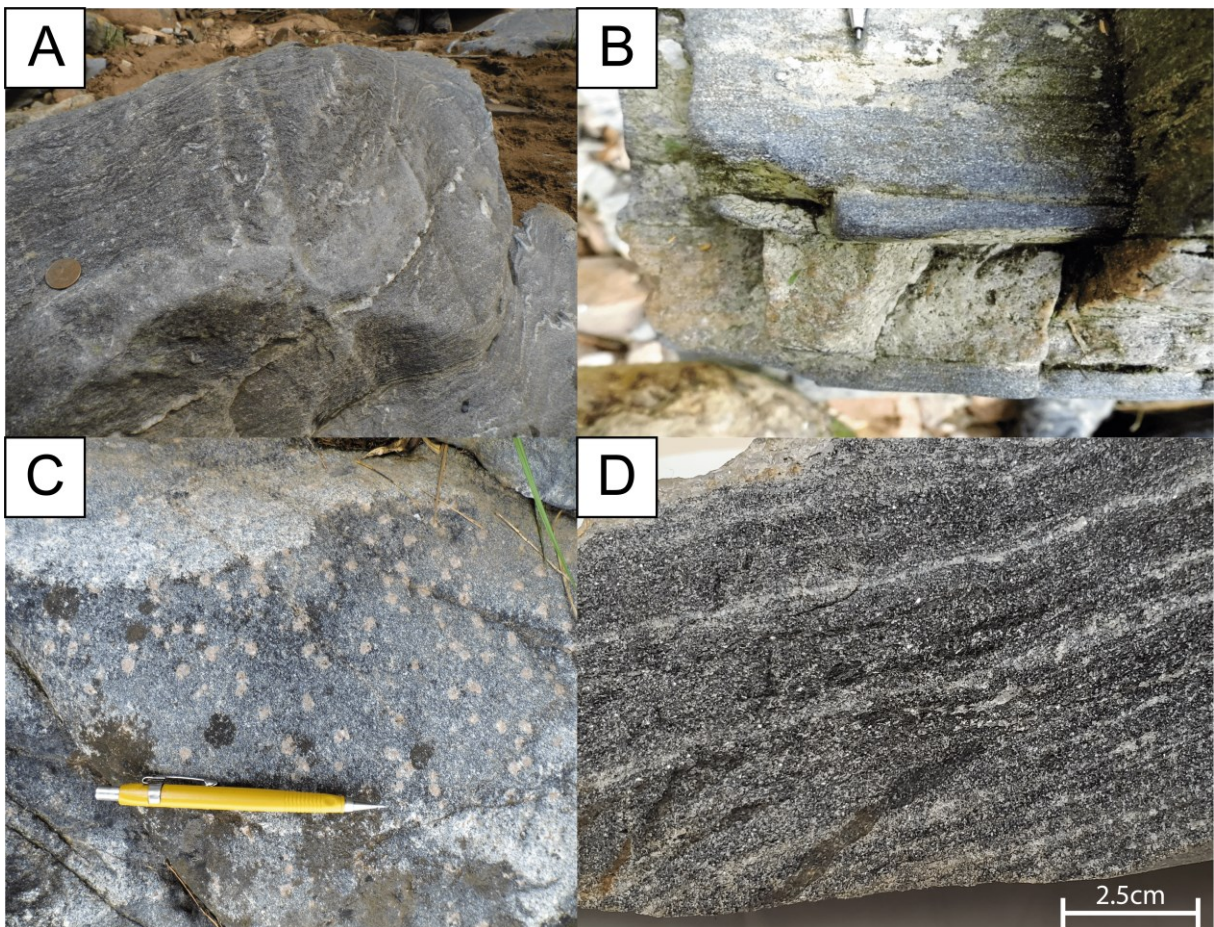
Os gnaisses de origem sedimentar apresentam uma coloração cinza clara, textura fina, presença de um bandamento milimétrico a centimétrico de composição quartzo-feldspática intercalado com bandas biotíticas e uma maior ocorrência de quartzo em comparação com os ortognaisses, além de apresentar, em algumas ocasiões, granada. Em comparação, os gnaisses de origem ígnea apresentam uma coloração cinza escura, textura ligeiramente mais grossa, menor quantidade de quartzo e ocasionalmente, anfibólio visível em lupa de mão (Fig. 30).

Figura 29 – Representação reduzida do croqui geral vetorizado interligando os croquis (GC-01-1, GC-01-2, GC-01-4, GC-01-5 e GC-04). Para observações em escala original de 1:50, consultar anexo.



Fonte: autor (2024).

Figura 30 – Aspectos macroscópicos dos orto- e paragnaisses do Arroio Laranjeira. A) Paragnaisse com bandamento milimétrico de bandas quartzo-feldspáticas e bandas biotíticas em baixo ângulo dobrado; B) Injeção trondhjemítica discordante em ortognaisse com foliação de alto ângulo e anfibólios milimétricos observáveis em lupa de mão; C) Paragnaisse poiquiloblástico com granadas centimétricas em matriz quartzo-feldspática e biotítica; D) Amostra de ortognaisse intercalando bandas ricas em anfibólio com bandas quartzo-feldspáticas de textura equigranular média.



Fonte autor (2024).

Localmente foi encontrado no afloramento um gnaiss para-derivado, em baixo ângulo, distinto tanto em composição quanto em estrutura, por se apresentar rico em plagioclásio e pobre em biotita ou anfibólio. Sua lineação é predominante sobre a foliação, caracterizando um tectonito L (Fig. 31).

Figura 31 – Aspectos macroscópicos do tectonito L. A) Detalhamento em campo de Tectonito L com lineação de baixo caimento para SW; B) Amostra (GC01-I) serrada para laminação do tectonito L.

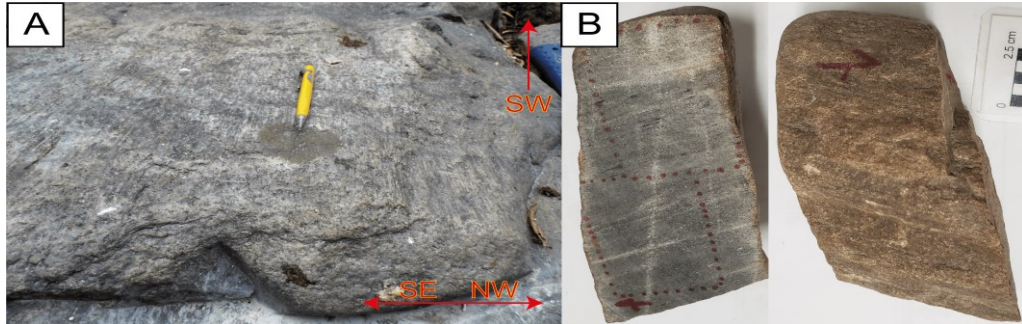
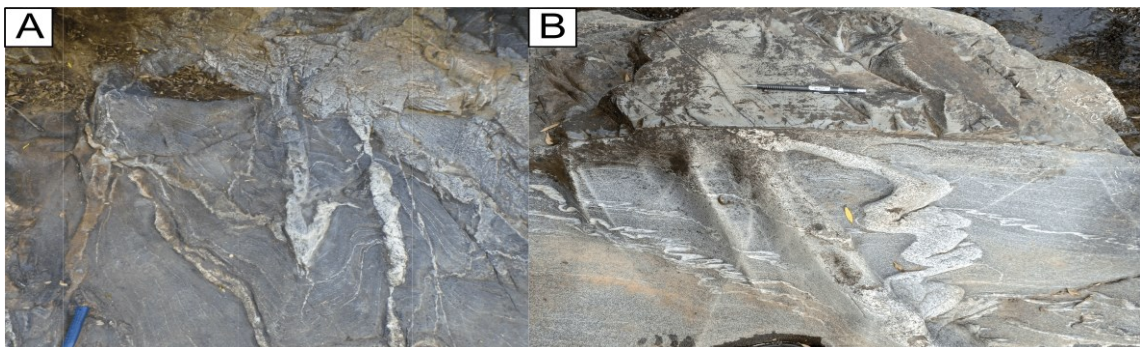


Figura: autor (2024).

Em todo o afloramento foram observadas injeções trondhjêmicas que ocorreram em uma fase um pouco mais tardia do que a formação dos gnaisses. Essas injeções se distribuem ao longo dos planos de foliação dos gnaisses, assim como nos planos axiais das dobras, aproveitando as zonas de fraqueza estrutural preexistentes dentro dos gnaisses. Além das injeções trondhjêmicas, o afloramento também apresenta diques de diabásio que se caracterizam por sua cor escura e textura fina, contrastando visivelmente com os gnaisses e os trondhjêmitos mais claros e de granulação variada, eles cortam tanto os gnaisses quanto os trondhjêmitos (Fig. 32).

Figura 32 – Aspectos macroscópicos da interação estrutural das injeções trondhjêmicas e de dique de diabásio com os gnaisses. A) Injeções trondhjêmicas transitando tanto na foliação dobrada quanto nos planos axiais das dobras, ao longo do qual ocorre boudinagem e *pinch-and-swell*; B) Dique de diabásio cortando os gnaisses e trondhjêmitos.

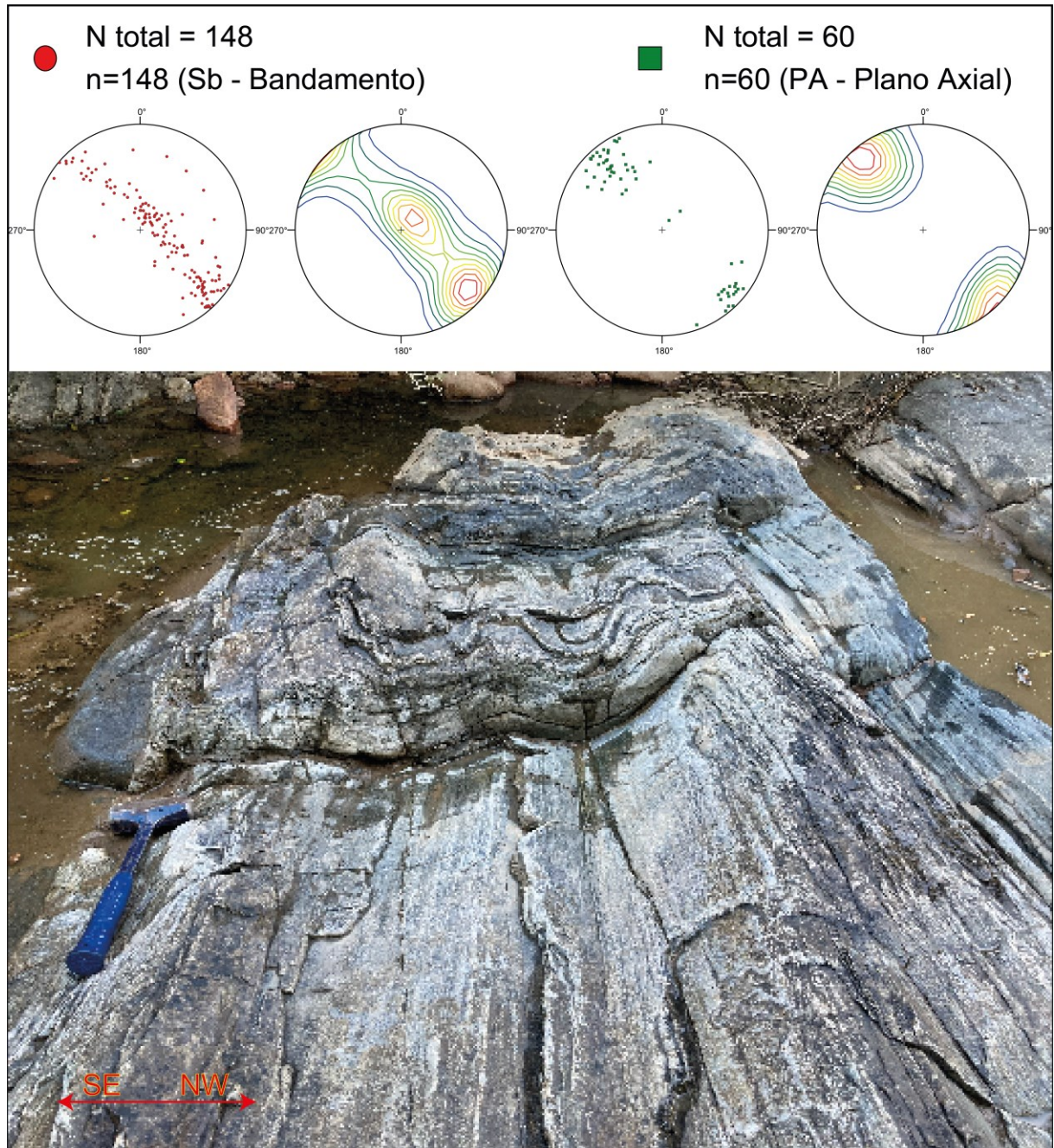


Fonte: autor (2024).

6.2 GEOLOGIA ESTRUTURAL

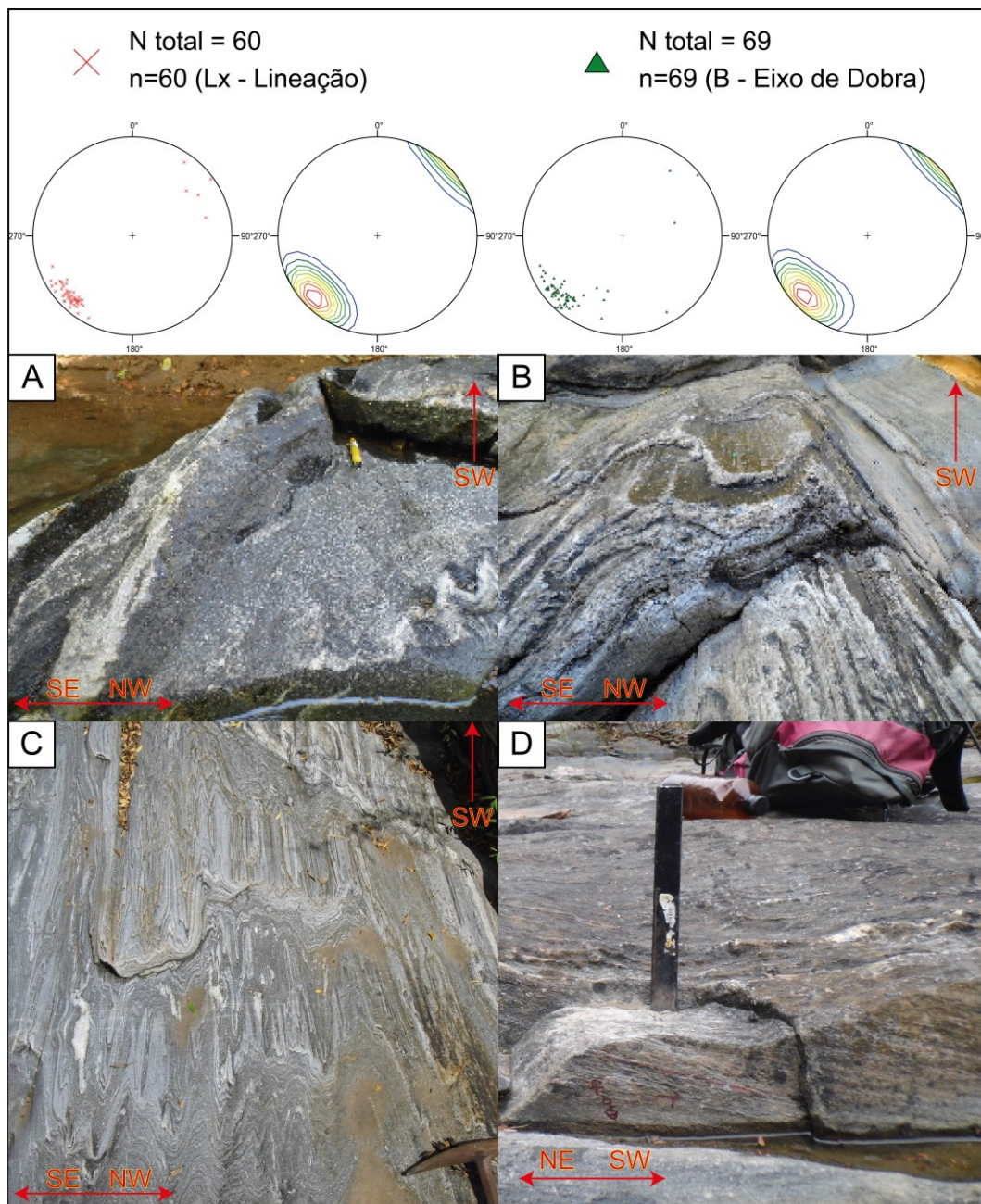
Em escala de afloramento, a foliação principal dos gnaisses apresenta um mergulho predominantemente para noroeste (NW), onde exibe uma variação no ângulo de inclinação, variando de baixo ângulo até alto ângulo. Tal variação também é ilustrada pela guirlanda formada nos estereogramas de polos de foliação e de contorno. Essa variação é atribuída à presença de dobras com eixos de baixo caimento e planos axiais de direção (NE-SW) e mergulho predominante de alto ângulo (Fig. 33). As dobras presentes nesses gnaisses variam entre abertas, com ângulos amplos entre seus flancos, até dobras isoclinais, onde os flancos são paralelos entre si, representando assim a heterogeneidade da deformação desses gnaisses. Dois polos de planos axiais subhorizontais (Fig. 33 - Estereograma com polos de PA) estão relacionados à deformação ao longo da S1, que foi mais efetiva em causar a transposição e obliteração dessa primeira fase de dobras, que é anterior à S1. As lineações de estiramento observadas e medidas em campo apresentam um baixo caimento para sudoeste (SW) e foram observadas tanto nas foliações de baixo ângulo, quanto nas foliações de alto ângulo. Estas lineações são essencialmente subparalelas aos eixos das dobras (Fig. 34), o que sugere tanto o caráter progressivo da deformação que gerou a trama principal e seu dobramento como também o seu caráter construtivo. Além dessas evidências, as injeções trondhjemíticas observadas, que variam em espessuras centimétricas a métricas, se alinham paralelamente à foliação dobrada dos gnaisses e ao longo dos planos axiais das dobras, por vezes transitando entre ambos (Fig. 35), o que é sugestivo de seu caráter sintectônico.

Figura 33 – Estereogramas dos polos de foliação e planos axiais apresentando dobramento na foliação com mergulho predominante para NW e planos axiais de direção NE-SW. Registro fotográfico da porção mais a jusante do croqui (GC-01-3 / Lajeado V / Sítio 24 a 26).



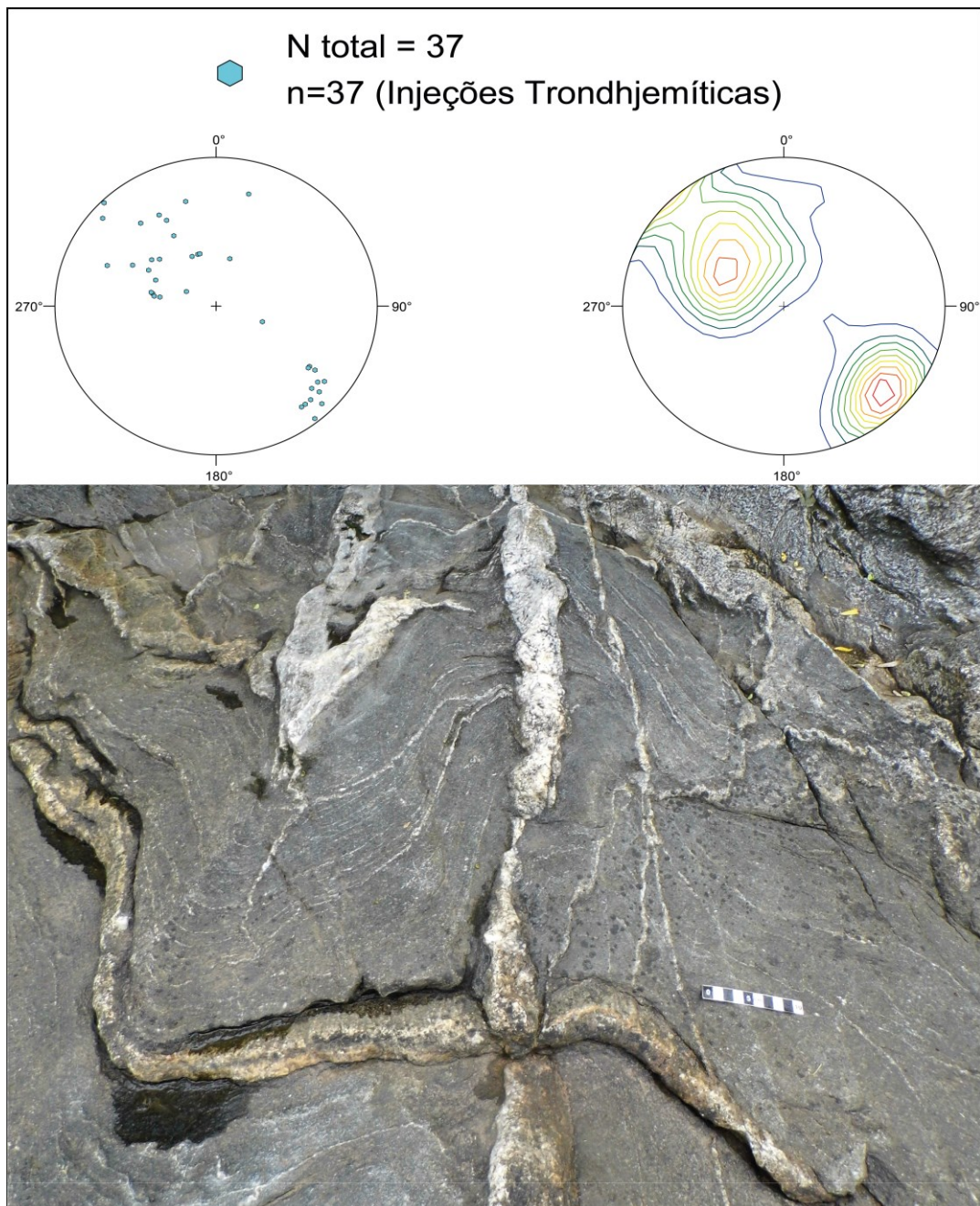
Fonte autor (2024).

Figura 34 – Registros fotográficos de campo e estereogramas de lineações e eixos de dobras subparalelos. A) Caneta amarela indicando baixo caimento do eixo de dobra paralelo a lineação de estirramento. (GC-01-5 / Lajeado II / Sítios 13 e 18); B) Foliação dobrada com lineação de estirramento paralela à eixo de baixo caimento para SW. (GC-01-3 / Lajeado V / Sítio 29); C) Lineação de estirramento paralela à eixo de dobra com baixo caimento para SW. (GC-01-2 a jusante do Lajeado I); D) Foliação em alto ângulo de mergulho contendo lineação de estirramento com baixo caimento para SW. Local de amostragem da amostra GC-04D no croqui (GC-04 / Lajeado II).



Fonte: autor (2024).

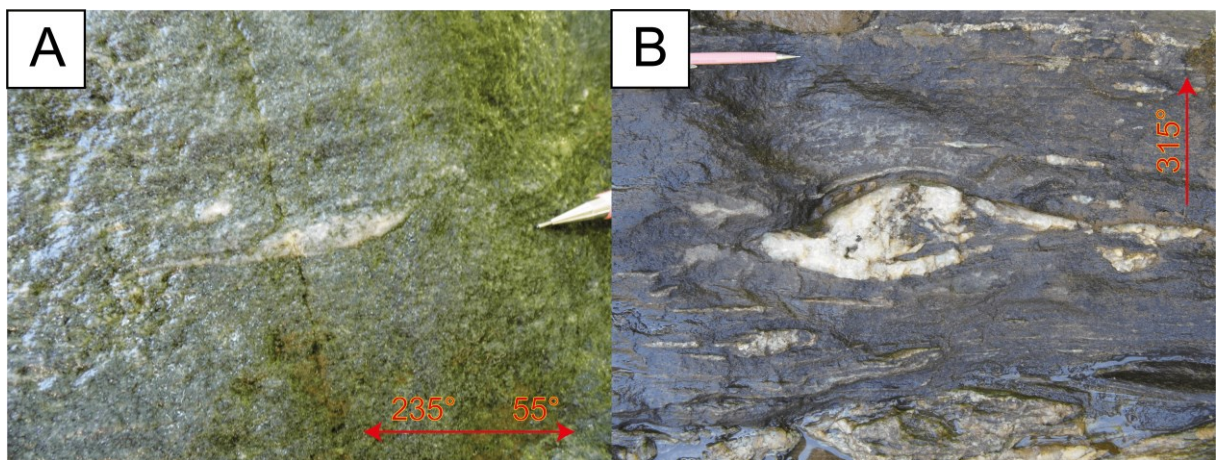
Figura 35 – Estereograma de polos representando as injeções trondhjemíticas transitando nos planos de foliação dobrado e nos planos axiais das dobras simultaneamente. Ocorre boudinagem e *pinch-and-swell* da injeção trondhjemítica ao longo da foliação plano-axial. Hexágonos azuis = Injeções trondhjemíticas formando guirlanda semelhante as dos estereogramas de foliação. Registro fotográfico da porção mais a montante do croqui (GC-01-2 / Lajeado I / Seção B-B').



Fonte: autor (2024).

Indicadores cinemáticos observados em escala mesoscópica, tais como injeções boudinadas e veios de quartzo, forneceram evidências de um componente de empurrão direcionado para nordeste (NE) ao longo das foliações de baixo ângulo, associado á transcorrência destal em foliações de alto ângulo (Fig. 36). Indicador em baixo ângulo registrado no croqui (GC-01-3 / Lajeado IV / Sítio 23) e indicador em alto ângulo no croqui (GC-04 / Lajeado II / Sítio 2). A combinação destas componentes sugerem um cenário onde forças compressivas e de cisalhamento coexistiram, o que é típico de deformação transpressiva (FOSSSEN *et al.*, 2012).

Figura 36 – Registro fotográfico dos indicadores cinemáticos observados em escala de afloramento ao longo dos planos XZ, tanto na foliação de baixo ângulo (plano XZ em perfil), quanto em alto ângulo (plano XZ em planta). A) Injeção trondhjemítica boudinada em baixo ângulo, indicando cinemática de empurrão para NE (GC-01-3 / Lajeado IV / Sítio 23); B) Veio de quartzo boudinado em alto ângulo, indicando transcorrência destal (GC-04 / Lajeado II / Sítio 2).



Fonte: autor (2024).

7. PETROGRAFIA

Dentre as descrições petrográficas de 30 lâminas relacionadas a 19 amostras, 10 foram classificadas como paragneisses pelíticos, 2 paragneisses de composição arco-seana, 1 paragneisse calciossilicático e 6 ortogneisses de composição tonalítica a granodiorítica (Tab. 3).

Tabela 3 – Principais características petrográficas das amostras descritas organizada em Excel.

Amostras	Litologia	Estrutura	Textura	% Minerais											
GC-01A	Orto	Foliada	Nematoblástica	Pl 35%	Qtz 25%	Bt 15%	An 12%	K-f 10%	Ttn 2%	Ep 1%					
GC-01B	Para Pelítico	Bandada	Lepidoblástica	Qtz 35%	Pl 25%	Bt 25%	K-f 12%	Grt 3%							
GC-01C				Qtz 35%	Pl 25%	Bt 25%	K-f 10%	Grt 3%	Ms 2%						
GC-01D				Qtz 38%	Pl 25%	Bt 25%	K-f 8%	Grt 4%							
GC-01E1				Qtz 35%	Pl 25%	Bt 25%	K-f 12%	Grt 3%							
GC-01E2		2 Foliações		Lepidoblástica	Qtz 35%	Pl 30%	Bt 25%	K-f 7%	Grt 3%						
GC-01F1					Foliada	Poiquiblastica	Qtz 30%	Pl 25%	Bt 20%	K-f 15%	Grt 9%	Ms 1%			
GC-01F2							Blastopsamítica	Pl 40%	Cpx 25%	Qtz 20%	K-f 10%	An 3%	Bt 2%		
GC-01F3								Nematoblástica	An 40%	Pl 30%	Qtz 20%	K-f 10%			
GC-01H1	Orto	Bandada	An 35%	Pl 30%			Qtz 20%		K-f 15%						
GC-01H2			Foliada	Blastopsamítica	Pl 35%	Cpx 25%	Qtz 20%	K-f 10%	An 5%	Bt 3%	Grt 2%				
GC-01I1	Para Arco-seano	Nematoblástica			Pl 30%	An 25%	Qtz 20%	Bt 15%	K-f 6%	Ttn 4%					
GC-01I2					Lepidoblástica	Qtz 35%	Bt 26%	Pl 22%	K-f 15%	Ms 2%					
GC-01J1			Orto	Foliada		Pl 35%	Qtz 25%	An 20%	Bt 12%	K-f 8%					
GC-01J2	Para Pelítico	Lepidoblástica			Qtz 35%	Bt 30%	Pl 25%	K-f 5%	Ms 3%	Grt 2%					
GC-01M1			Orto	Dobrada	Poligonal	An 35%	Pl 35%	Qtz 25%	K-f 3%	Ttn 2%					
GC-01M2	Para Pelítico	Bandada				Lepidoblástica	Qtz 35%	Bt 25%	Pl 25%	K-f 10%	Grt 5%				
GC-01N1			Para Arco-seano	Foliada	Blastopsamítica		Qtz 30%	Pl 20%	Bt 20%	Ms 15%	Grt 8%	K-f 4%	Crd 2%	Sil 1%	
GC-01N2	Orto	Bandada				Lepidoblástica	Qtz 26%	Chl 24%	Pl 20%	An 12%	K-f 8%	Grt 6%	Ep 2%	Ttn 2%	
GC-01N3			Para Pelítico	Foliada	Lepidoblástica										
GC-01Q	Para Pelítico	Bandada				Lepidoblástica									
GC-04B1			Orto	Dobrada	Poligonal										
GC-04B2	Para Pelítico	Bandada				Lepidoblástica									
GC-04C			Orto	Bandada	Lepidoblástica										
GC-04D1	Para Pelítico	Foliada				Lepidoblástica									
GC-04D2			Orto	Dobrada	Poligonal										
GC-04E	Para Pelítico	Bandada				Lepidoblástica									
GC-04F			Para Pelítico	Bandada	Lepidoblástica										
PVR-6060E	Para Calciossilicático	Foliada				Lepidoblástica									
PVR-6060G															

Qtz = quartzo, Bt = biotita, Pl = plagioclásio, An = Anfólio, K-f = feldspato alcalino, Cpx = clinopiroxênio, Ms = muscovita, Grt = granda, Chl = clorita, Ep = epidoto, Ttn = titanita, Crd = cordierita e Sil = silimanita.

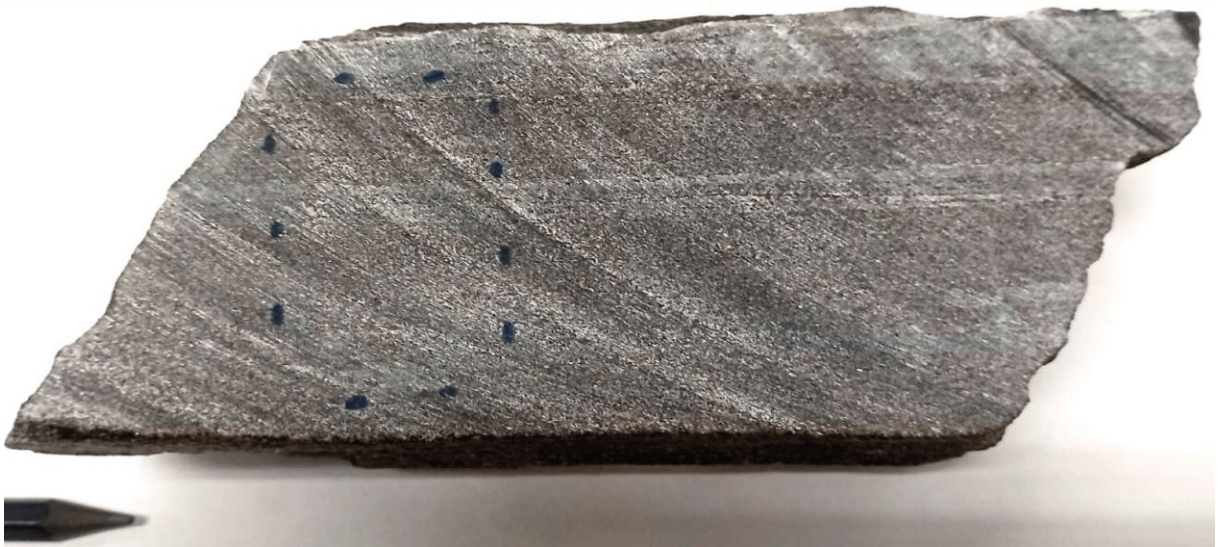
Fonte: autor (2024).

7.1 PARAGNAISSES PELÍTICOS

Em escala macroscópica, as amostras GC-01B, -01C, -01D, -01E, -01F, -01H, GC-04B, -04D, -04F e PVR-6060E apresentam uma coloração cinza, em geral frescas, foliação marcada principalmente por bandas milimétricas a centimétricas de composição quartzo-feldspática intercalada com bandas biotíticas. Exibem textura equigranular fina e sua mineralogia é composta de quartzo, biotita, plagioclásio, feldspato alcalino e por vezes granada. Dentre as amostras classificadas como metapelitos, foi possível subdividir 4 tipos de paragneisses com diferentes proporções e composições mineralógicas. Tais diferenças foram observadas tanto em campo quanto em lâmina durante as descrições petrográficas.

As amostras GC-04B e GC-04D foram classificadas como Bt paragnaisse, exibem coloração cinza escuro, normalmente apresentando oxidações em face alterada. Sua foliação é predominantemente marcada por biotita. Apresenta textura equigranular fina e sua quantidade de plagioclásio é relativamente menor em comparação com os demais metapelitos (Fig. 37). É composta por quartzo (35%), biotita (30%), plagioclásio (25%) e K-feldspato (7%).

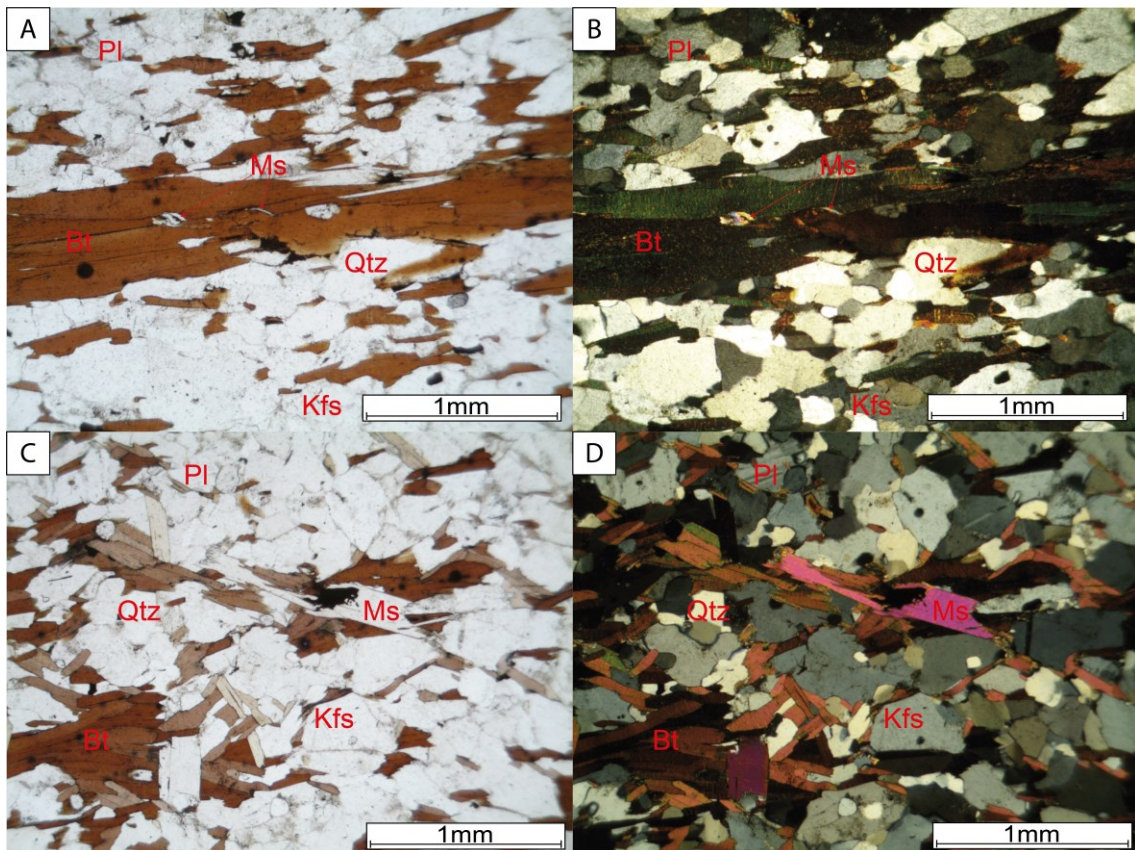
Figura 37 – Fotografia de Bt paragnaisse pelítico (amostra GC-04D), com foliação marcada por biotita e intercalação de bandas quartzo-feldspáticas e bandas biotíticas. Marcas diagonais curvas são marcas da serra.



Fonte: autor (2024).

Em lâmina essas amostras exibem uma foliação marcada principalmente por biotita, formando uma textura lepidoblástica e granoblástica fina, devido a contatos poligonais entre os minerais prismáticos à equidimensionais de quartzo, plagioclásio e K-feldspato (Fig. 38). Sua mineralogia se dá principalmente por: 35% de quartzo prismático à equidimensionais apresentando recristalização por rotação de subgrão com dimensões de 0,2 mm até 0,6 mm; 30% de biotita alongadas conforme a orientação da foliação, com dimensões de 0,4 mm até 2 mm; 25% de plagioclásio prismático levemente sericitizado, medindo 0,2 mm até 0,6 mm; 7% de K-feldspato subédrico de 0,2 mm até 0,6 mm; 2% de ocasionais muscovitas que variam de sub-mm até 0,4 mm e <1% de raras granadas milimétricas.

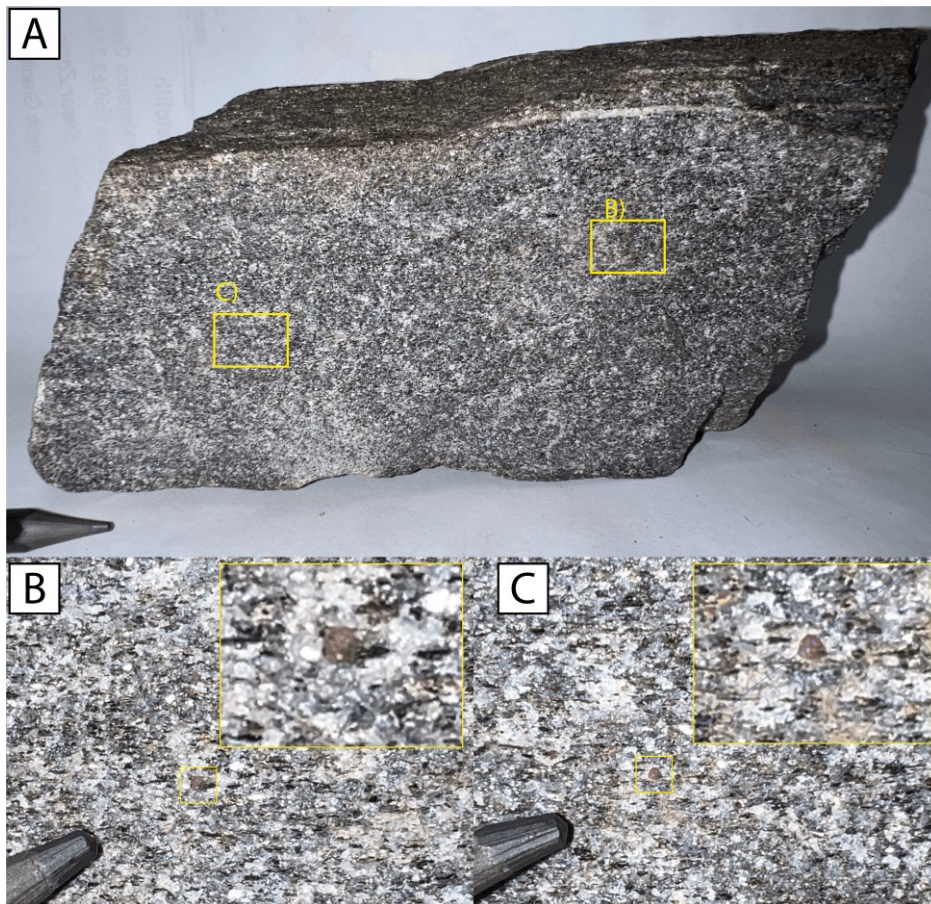
Figura 38 - Fotomicrografias representativas dos Bt paragneisses (amostra GC-04B). A) Porção rica em biotita marcando foliação. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC apresentando composição rica em quartzo e feldspatos; C) Feição expondo uma segunda foliação de maneira sutil, marcada pelas biotitas de orientação oblíqua. ND em objetiva de 5x; D) Mesma feição de C) sobre NC com muscovita acompanhando a orientação da segunda foliação.



Fonte: autor (2024).

Os metapelitos GC-01B, -01C, -01D, -01E, -01F e GC-04F foram classificados como Bt-Grt paragnaisse porfiroblástico e exibem uma coloração que varia de cinza claro à cinza escuro, dependendo da quantidade de quartzo e biotita. Apresenta certa oxidação em face alterada. Sua foliação é marcada por biotita e quartzo estirado. Granadas milimétricas são observáveis nestes metapelitos com lupa de mão, o que possibilita sua classificação em campo (Fig. 39B e C). Normalmente apresenta intercalação milimétrica de bandas quartzo-feldspáticas com bandas biotíticas e sua textura é lepidoblástica e granoblástica fina, rica em quartzo (Fig. 40A). Sua composição se dá por quartzo (30%), biotita (25%), plagioclásio (25%), K-feldspato (8%), muscovita (7%), granada (5%) e mais raramente cordierita.

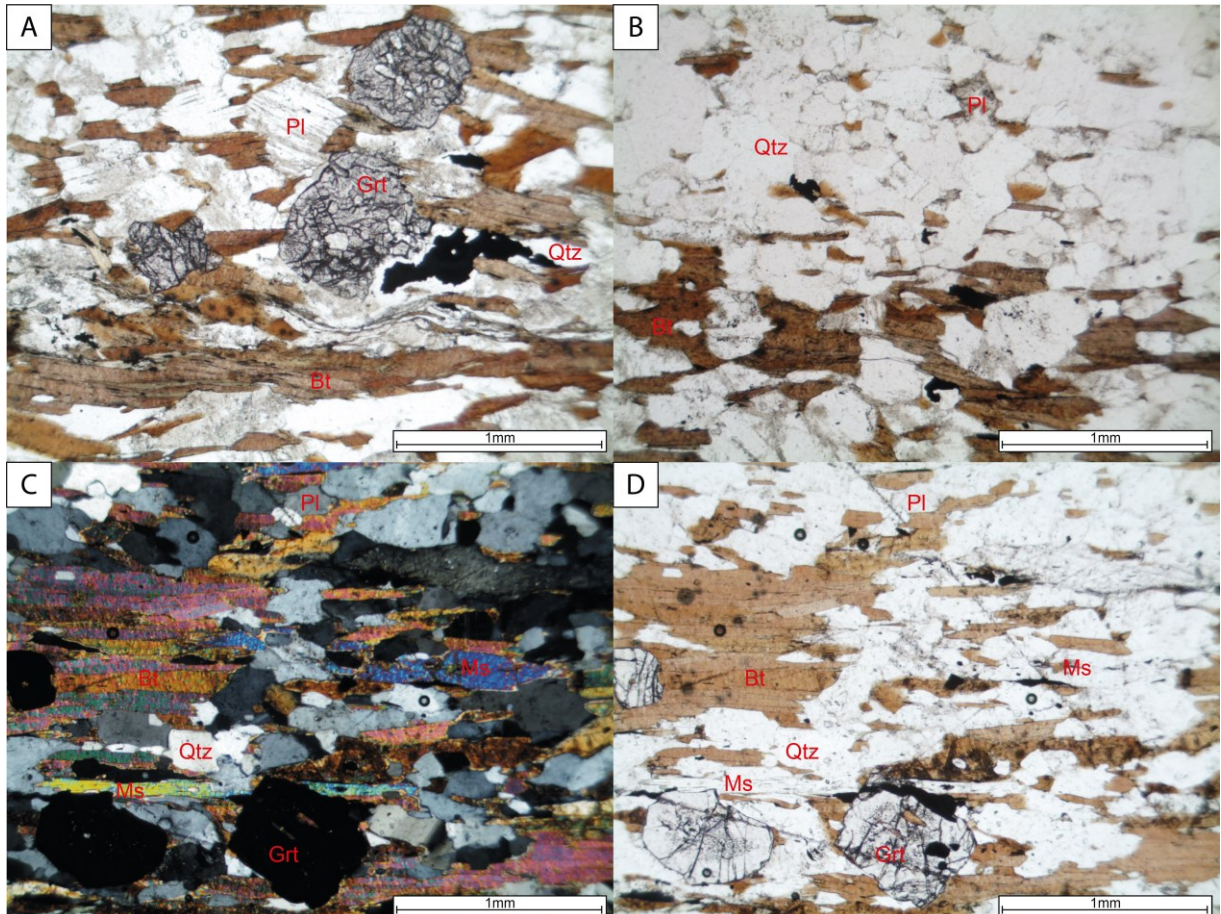
Figura 39 – Fotografia de Grt-Bt paragnaisse porfiroblástico, com corte frontal da amostra próximo do plano XY (plano de foliação da amostra GC-01B). A) Amostra de mão com foliação rica em biotita; B) Zoom em granada milimétrica, onde também se notam agregados de biotita alinhados e a matriz rica em quartzo de textura granoblástica; C) Zoom em outra granada milimétrica, semelhante à fotografia (B).



Fonte: autor (2024).

Em lâmina os Grt-Bt paragnaisses porfiroblásticos exibem um certo grau de alteração, visível principalmente em plagioclásio sericitizado, K-feldspato e granada. A foliação é bem definida pela biotita, quartzo estirado e pela intercalação de bandas quartzo-feldspáticas com bandas biotíticas de espessuras que variam de milimétricas a centimétricas. Sua textura é definida como granoblástica poligonal fina a média, presente nas bandas quartzo-feldspáticas, lepidoblástica nas bandas biotíticas e porfiroblástica quando ocorre granada e/ou muscovita (Fig. 40). Também expõe quartzo recristalizado por rotação de subgrão, indicando plasticidade intracristalina no quartzo de temperatura intermediária (Passchier *et al.*, 2005). A assembleia mineral é composta por: 30 a 35% de quartzo prismático com até 0,6 mm; 20 a 25% de plagioclásio equidimensional de até 0,6 mm; 20 a 25% de biotita alongada conforme a orientação da foliação de 0,2 mm até 1 mm; 8 a 12% de K-feldspato de até 0,6 mm; 7% de muscovita com dimensões que variam de 0,1 mm até 2 mm; e 5% granada subédrica normalmente concentrada em bandas biotíticas e contornadas pelas mesmas, possuem dimensões de 0,1 mm até 2 mm.

Figura 40 - Fotomicrografias representativas dos Grt-Bt paragnaises (amostra GC-04F). A) Banda biotítica com granadas de 0,6 mm contornadas pela foliação. ND em objetiva de 5x; B) Intercalação de banda quartzo-feldspática com banda biotítica. ND em objetiva de 5x; C) Assembleia mineral de quartzo, biotita, plagioclásio, granada e muscovita. NC em objetiva de 5x; D) Mesma feição de C) sobre ND.

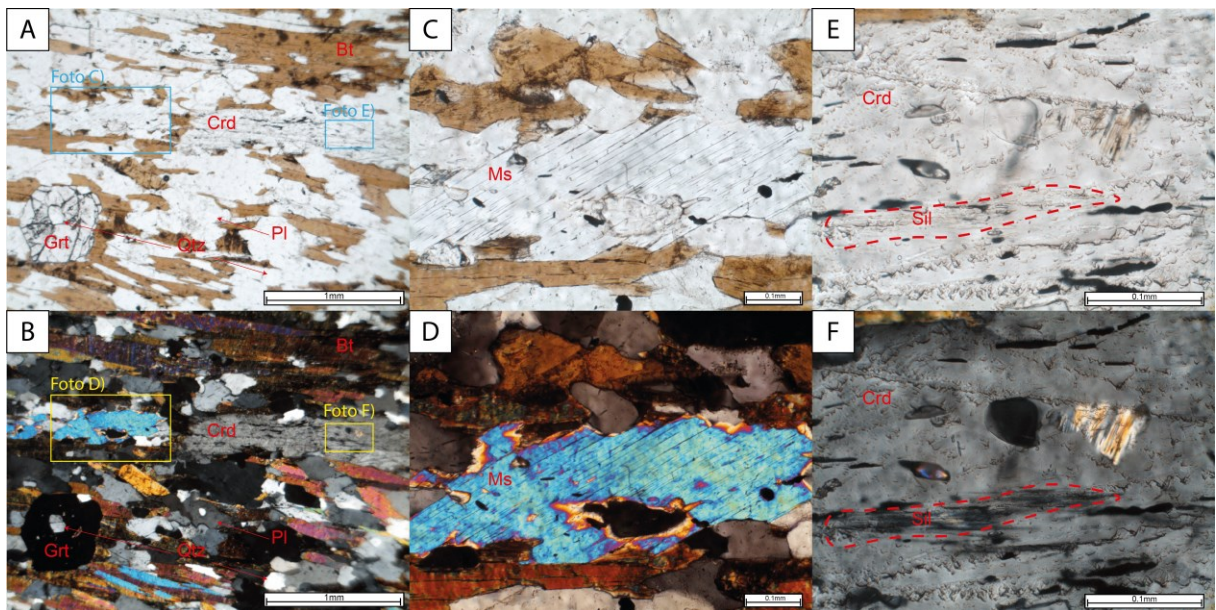


Fonte: autor (2024).

Dentre os metapelitos porfiroblásticos, a amostra PVR-6060E foi classificada como Grt-Ms-Bt paragnaisse com cordierita, possuindo uma assembleia mineral mais diversificada, contendo: 30% de quartzo prismático medindo até 0,6 mm, expondo contatos poligonais e cristais recristalizados por rotação de subgrão; 20% de plagioclásio granoblástico levemente sericitizado com dimensão de até 0,7 mm; 20% de biotita alongada marcando a foliação e medindo 0,2 mm até 1,2 mm; 15% de muscovita alongada de até 1,4 mm, também geralmente marcando a foliação, e ocasionalmente sobrecrecida em cordierita e/ou com orientação discordante da foliação principal da rocha (Fig. 41C e D); 8% de granada subédrica medindo até 0,8 mm, tipicamente fraturadas e com inclusões de quartzo e/ou opacos; 4% de K-

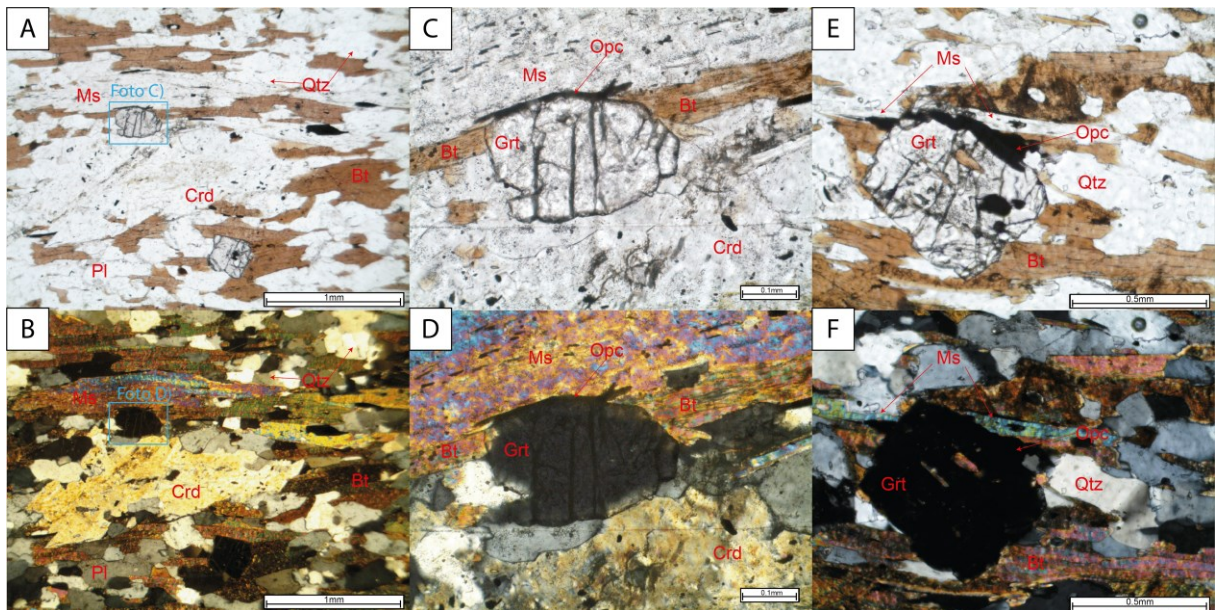
feldspato granoblástico de até 0,5 mm; 2% de porfiroblastos de cordierita prismática de até 2mm e $\leq 1\%$ de agregados de sillimanita com no máximo 0,06mm, incluso dentro das muscovitas e cordieritas (Fig. 41E e F). Normalmente as granadas não apresentam contato direto com as muscovitas, estando frequentemente separadas delas por minerais opacos arredondados (Fig. 42C, D, E e F), sugerindo um não-equilíbrio entre esses dois minerais. O microssítio 3 apresenta uma interdigitização da muscovita com a cordierita (Fig. 43A e B), sugerindo uma provável substituição da cordierita pela muscovita, o que também é reforçado pela orientação discordantes observada (Fig. 41C e D). Também ocorre sillimanita inclusa em cordierita e muscovita (Fig. 43C e D).

Figura 41 - Fotomicrografias representativas do microssítio 2 (amostra PVR-6060E). A) Feição geral do sítio expondo principais minerais e foliação marcada por biotita. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC, com destaque para zoom na muscovita e cordierita com agregado de sillimanita; C) Muscovita sobrecrecendo cordierita com orientação de clivagem discordante. ND em objetiva de 20x; D) Mesma feição de C) sobre NC; E) Feição interna da cordierita com sillimanita acicular sub-mm e sobrecrecimento pontual de muscovita discordante. ND em objetiva de 40x; F) Mesma feição de E) sobre NC.



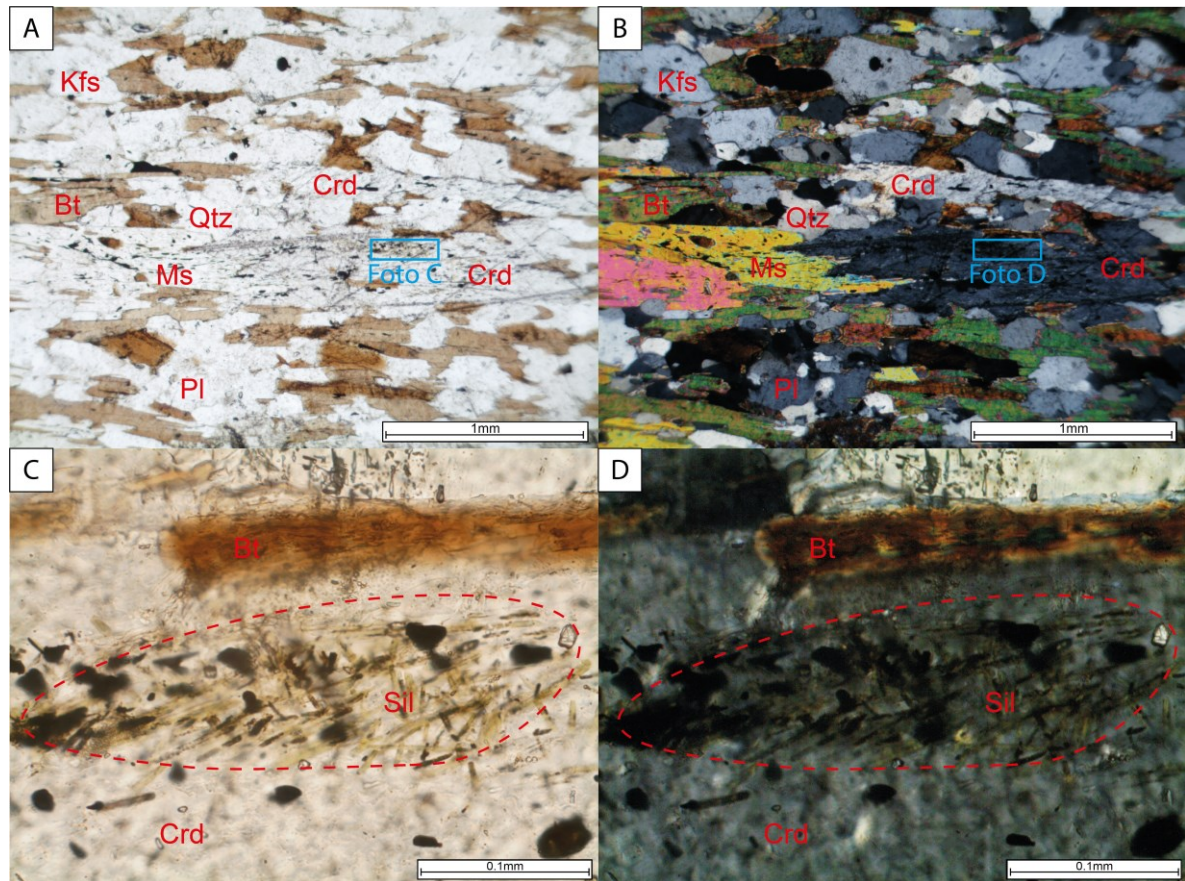
Fonte: autor (2024).

Figura 42 - Fotomicrografias representativas dos microssítios 4 e 7 (amostra PVR-6060E). A) Feição geral da assembleia mineral do sítio 4 com destaque para zoom na granada da parte superior da imagem. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC evidenciando cordierita no centro da imagem; C) Exemplo de granada em disequilíbrio com muscovita separada por opaco e em contato com cordierita. ND em objetiva de 20x; D) Mesma feição de C) sobre NC; E) Outro exemplo de granada em disequilíbrio com muscovita no sítio 7. ND em objetiva de 10x; F) Mesma feição de F) sobre NC.



Fonte: autor (2024).

Figura 43 - Fotomicrografias representativas do microssítio 3 (amostra PVR-6060E). A) Feição geral da assembleia mineral do sítio 3 com destaque para zoom em agregado de silimanita incluso em cordierita. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC exibindo uma interdigitalização entre cordierita e muscovita; C) Porção interna da cordierita com agregado sub-mm de silimanita e opacos arredondados. ND em objetiva de 40x; D) Mesma feição de C) sobre NC.



Fonte: autor (2024).

A amostra GC-01H foi o único metapelito classificado como Bt-Grt paragnaisse poiquiloblástico. Foi encontrado sem alterações visíveis a olho nu, apresenta cor cinza fosca e sua estrutura é aparentemente maciça, por não exibir uma foliação visível em escala macro (Fig. 44). Sua principal característica se dá pela presença de agregados de granadas atingindo dimensões centimétricas, visíveis a olho nu, definindo uma textura poiquiloblástica. É composta por quartzo (30%), plagioclásio (25%), biotita (20%), K-feldspato (15%) e granada <10%.

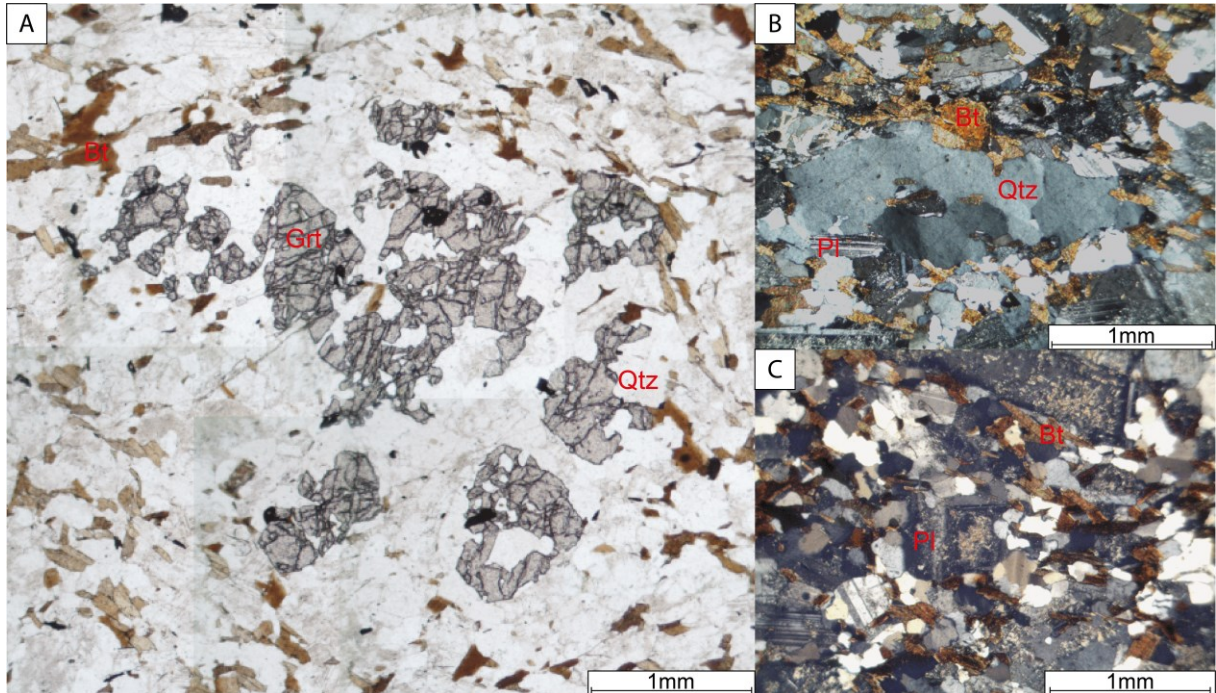
Figura 44 – Fotografia de Grt-Bt paragnaisse poiquiloblástico (amostra GC-01H) exibido uma estrutura maciça com agregados centimétricos de granadas visíveis ao centro.



Fonte: autor (2024)

A microscopia da GC-01H apresentou certa sericitização nos plagioclásio. Exibe foliação marcada por biotita e cristais estirados de quartzo. A presença de porfiroblastos de granada em meio á essa foliação define uma textura poiquiloblástica. A textura granoblástica é definida pelos contatos poligonais entre os minerais em particular de quartzo, plagioclásio e K-feldspato (Fig. 45B e C). É composta por: 30% de quartzo equidimensionais medindo de 0,2 mm até 1,6 mm, com presença de subgrão recristalizado; 25% de plagioclásio prismático com dimensões de 0,2 mm até 0,8 mm; 20% de biotita anédrica de até 0,6 mm; 15% de k-feldspato poligonal de até 0,6 mm; 9% de granada anédrica medindo até 2 mm, fraturadas e com abundantes inclusões de quartzo e opaco anédrico (Fig. 45A); <1% de ocasionais muscovitas milimétricas.

Figura 45 - Fotomicrografias representativas dos Grt-Bt paragneisses poiquiloblástico (amostra GC-01H). A) Feição da lâmina exibindo a foliação marcada pela biotita, contornando agregado de granadas anédricas. ND em objetiva de 5x; B) Feição exibindo quartzo com subgrãos e grãos recristalizados. NC em objetiva de 5x; C) Porção da lâmina rica em plagioclásio sericitizado. NC em objetiva de 5x.



Fonte: autor (2024).

7.2 PARAGNAISSE ARCOSEANO

As amostras GC-01N e o tectonito L (amostra GC-01I) exibem uma coloração cinza claro, levemente alterada, com foliação e lineação marcada por plagioclásio e quartzo estirados, além de clinopiroxênio orientado. Expõe uma textura equigranular fina com minerais de plagioclásio, quartzo, clinopiroxênio e biotita (Fig. 46).

Figura 46 – Fotografia de paragnaisse arcoseano (amostra GC-01N), amostra de mão orientada, rica em plagioclásio, exibindo porção serrada.

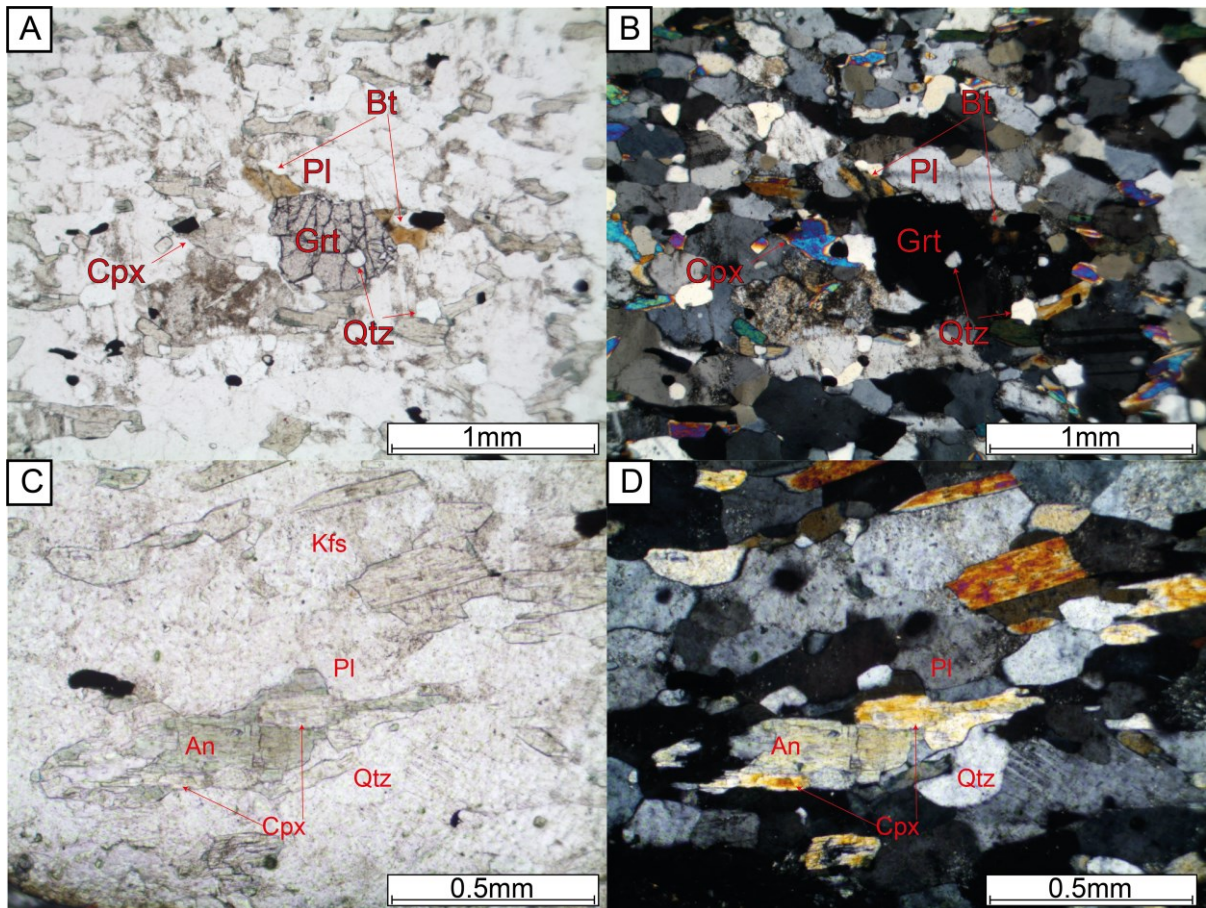


Fonte: autor (2024).

Em escala microscópica estes gnaisses se apresentam moderadamente alterados, perceptível na sericitização do plagioclásio. Exibe textura blastopsamítica e granoblástica, foliação marcada principalmente por clinopiroxênio e pela orientação dimensional dos minerais prismáticos, também ocorre quartzo recristalizado por rotação de subgrão (Fig. 47B e D). A composição mineralógica característica dessas duas amostras inclui: 35% de plagioclásio prismático com dimensões de 0,8 mm x 0,4 mm; 25% de clinopiroxênio com orientação mineral marcando a foliação e dimensões de 0,6 mm x 0,1 mm; 20% de quartzo poligonal recristalizado formando subgrão que varia de 0,6 mm x 0,3 mm; 10% de K-feldspato em geral prismáticos, com 0,6 mm x 0,3 mm; 5% de anfibólio sobrecrecido na ponta dos cristais de clinopiroxênio (Fig. 47C), apresenta em média 0,4 mm x 0,1 mm; 5%

de biotita também marcando a foliação, com 2 mm x 0,5 mm, $\leq 1\%$ de ocasionais granadas de 0.5 mm x 0.5 mm observadas apenas na amostra GC-01N e zircão detrítico em ambas.

Figura 47 – Fotomicrografias representativas de paragnaisses arcoaseanos. A) Cpx paragnaisse (amostras GC-01N) apresentando granada com inclusões de quartzo. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) sobre NC; C) Tectonito L de composição arcoseana (amostra GC-011) rico em clinopiroxênio e ocorrência de porfiroblasto de anfibólio assimétrico, sugestivo de transporte tectônico com cinemática horária (topo para NE). ND em objetiva de 5x; D) Mesma feição de C) sob NC.

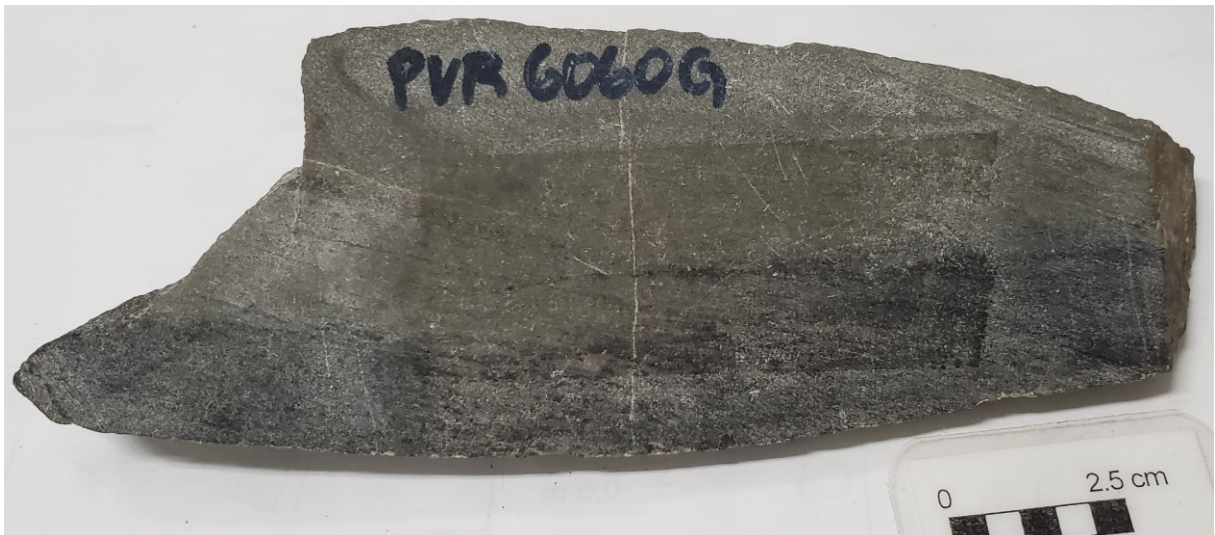


Fonte: autor (2024).

7.3 PARAGNAISSE CÁLCIO-SILICÁTICO

A amostra PVR-6060G foi a única classificada como um paragnaisse cálcio-silicático, ainda que essas rochas tenham sido observadas em alguns locais, pontualmente, no afloramento (Fig. 29). É possível observar um contato entre uma porção rica em clorita e uma porção com presença de cristais submilimétricos de anfibólio, observáveis com lupa de mão (Fig. 48). Em mão a principal evidência se dá pela mudança na coloração da rocha, de um cinza esverdeado (rico em clorita) para um cinza escuro (rico em anfibólio). Tais observações define um contato entre gnaisses para-derivado cálcio-silicático com orto-derivado rico em anfibólio.

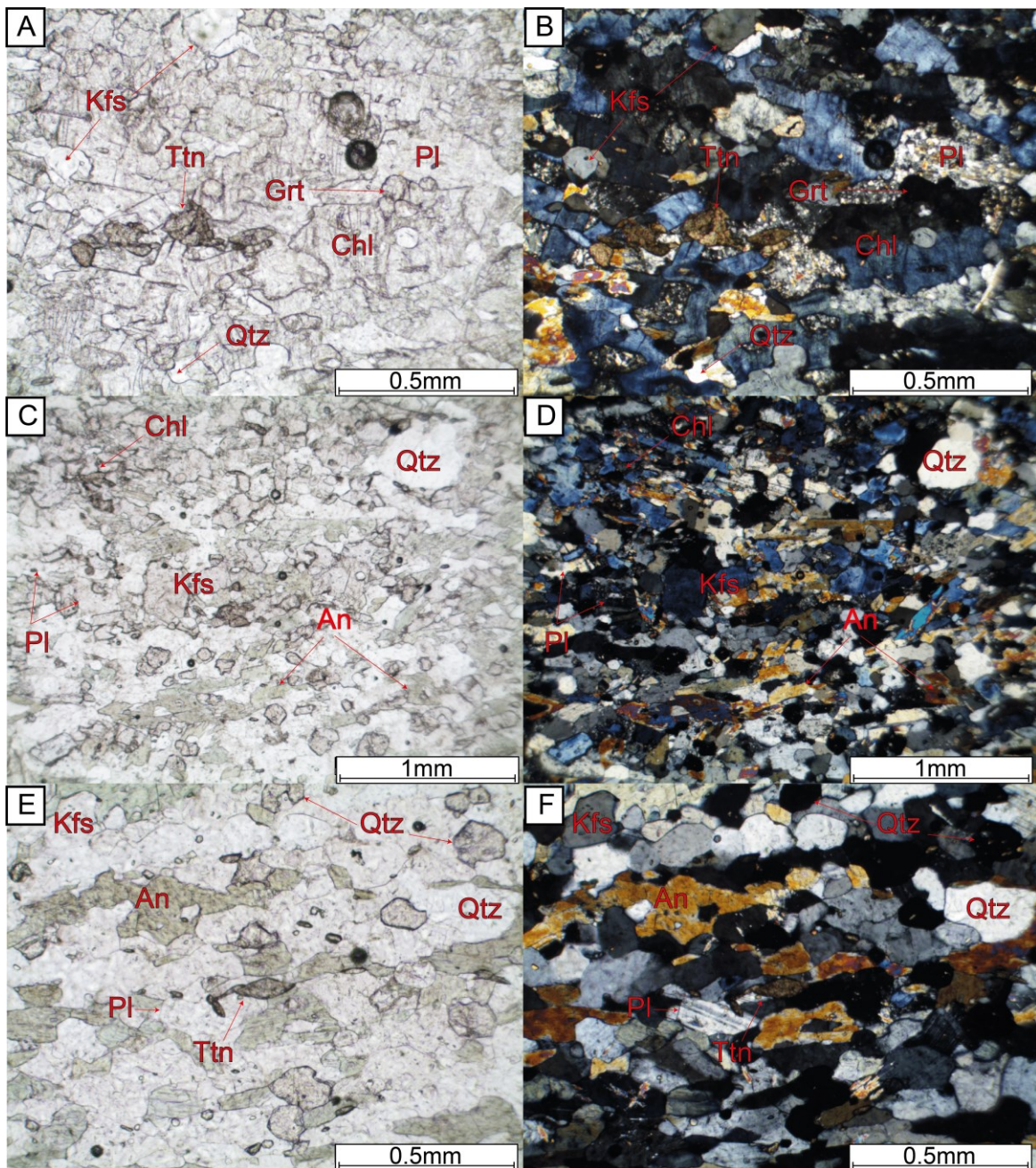
Figura 48 – Amostra macro de paragnaisse cálcio-silicático exibindo contato com ortognaisse a baixo.



Fonte: autor (2024).

Em lâmina a rocha apresenta uma foliação bem-marcada pela clorita e anfibólio, caracterizando uma textura lepidoblástica e nematoblástica. A amostra também demonstra um certo grau de deformação evidenciado por mecanismos de rotação de subgrão em quartzo (Fig. 49). Apresenta uma composição distinta com: 26% de quartzo prismático com 0,2mm x 0,5mm; 24% de clorita anédrica com 0,2mm x 1mm; 20% de plagioclásio anédrico com 0,2mm x 0,7mm geralmente sericitizado; 12% de anfibólio subédrico com 0,2mm x 1mm; 8% de K-feldspato com 0,2mm x 0,4mm; 6% de granada menor que 0,2mm presente apenas na porção cálcio-silicática; 2% de epidoto submilimétricos e 2% de titanita subédrica com dimensões de até 0,3mm.

Figura 49 – Fotomicrografias representativas do paragneisse cálcio-silicático. A) Porção da rocha rica em clorita e com presença de titanita. ND em objetiva de 10x; B) Mesma feição de A) sobre NC; C) Contato da porção cálcio-silicática com banda ortognaissica, evidenciada pela diminuição da clorita e aumento do anfibólio. ND em objetiva de 5x; D) Mesma feição de C) sobre NC; E) Porção ortognaissica rica em anfibólio e presença de titanita. ND em objetiva de 10x; F) Mesma feição de E) sobre NC.

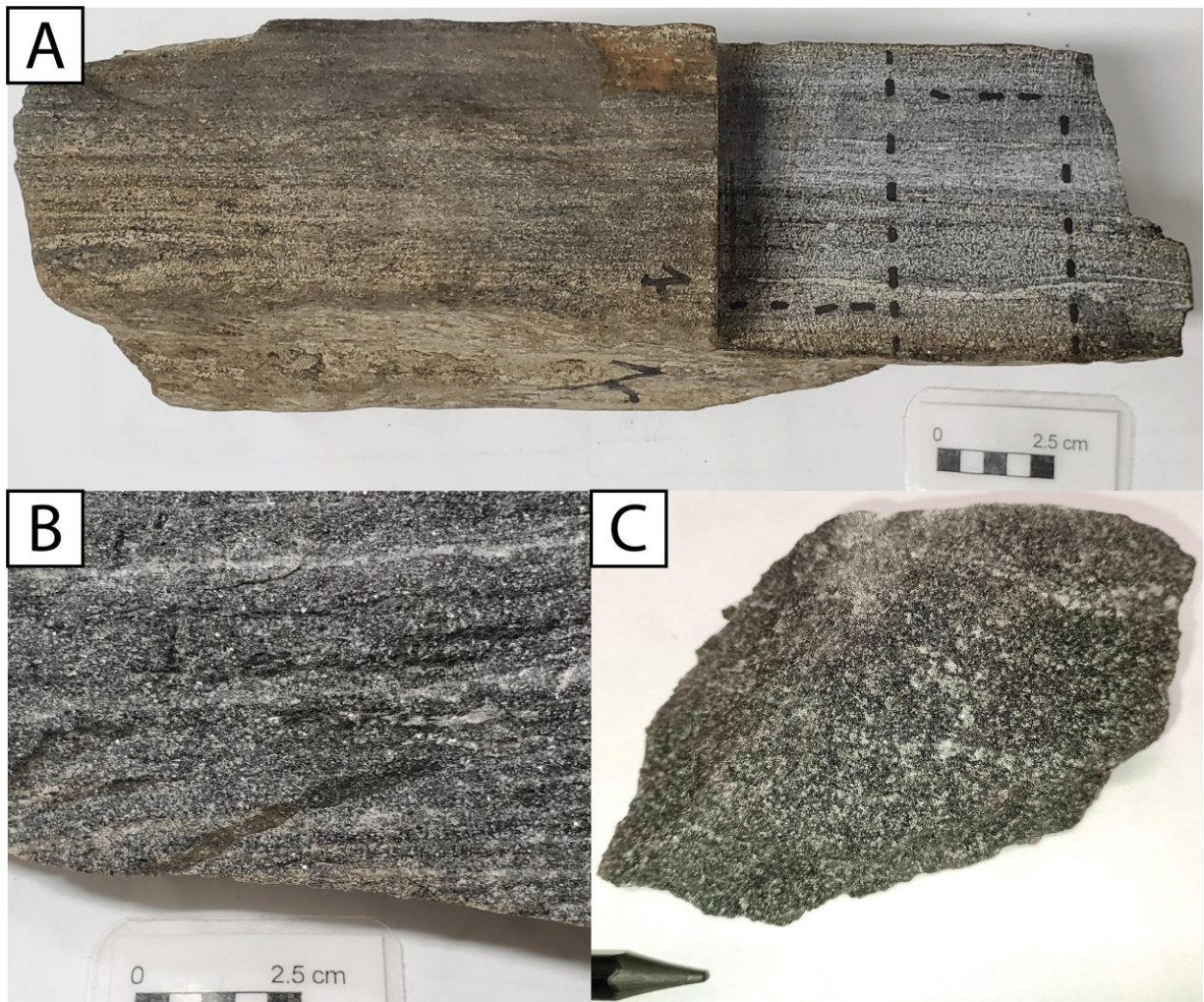


Fonte: autor (2024).

7.4 ORTOGNAISSES

As amostras classificadas como ortognaisses GC-01A, -01J, -01M, -01Q, GC-04C e GC-04E exibem coloração cinza escuro, face alterada com leve oxidação (Fig. 50A). A foliação é marcada por anfibólios milimétricos, observáveis a olho nu (Fig. 50B). Apresenta textura equigranular média e sua mineralogia é composta principalmente por plagioclásio, quartzo, anfibólio e biotita (Fig. 50C).

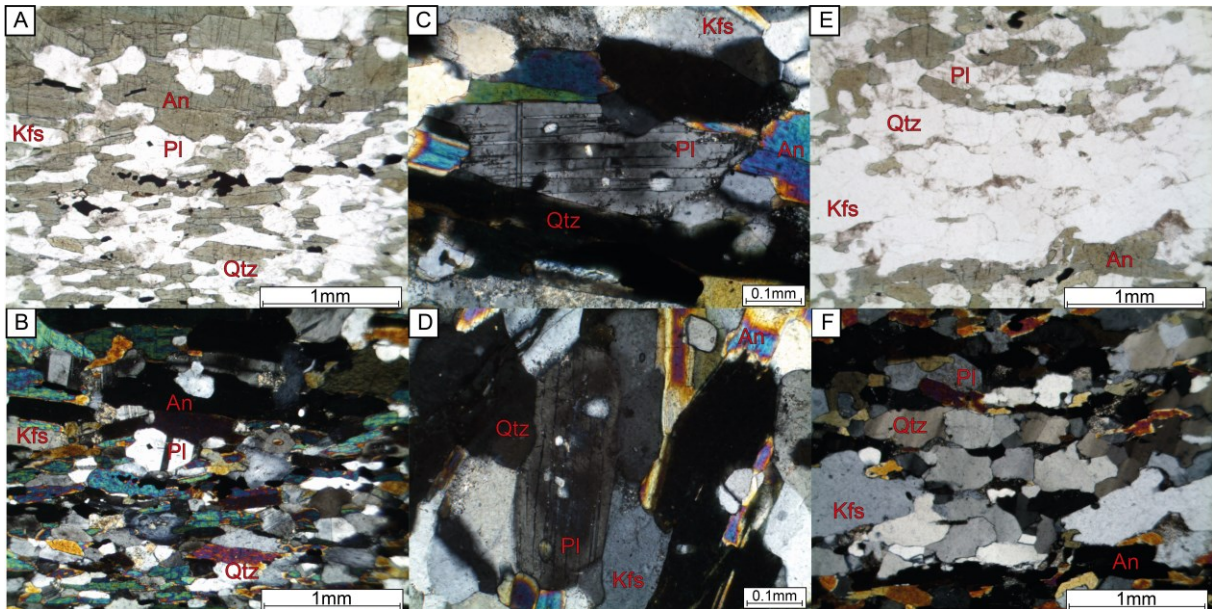
Figura 50 – Fotografias representativas dos ortognaisses. A) Amostra macro GC-01M orientada, exibe porção alterada com coloração marrom e face fresca em porção serrada, onde se observa o bandamento composicional milimétrico à centimétrico, realçado por injeções leucocráticas; B) Foco em agregados de anfibólio presente na amostra GC-01J; C) Face fresca da amostra GC-01Q exibindo bandas quartzo-feldspáticas e bandas ricas em anfibólio.



Fonte: autor (2024).

Em lâmina esses gnaisses evidenciam uma composição tonalítica a granodiorítica, com foliação definida pela orientação dimensional dos minerais. Expõe uma textura granoblástica poligonal média, nematoblástica e lepidoblástica. Ocasionalmente, contém cristais de plagioclásio subédrico, zonado, frequentemente com inclusões circulares sub-mm de quartzo, que são interpretados como relictos ígneos (Fig. 51E e F). A rotação de subgrão e quartzo recristalizado indica deformação sob condições de plasticidade cristalina de temperatura intermediária (Passchier *et al.* 2005 - Fig. 51D). A assembleia mineralógica compreende em média: 25 a 30% de anfibólio subédrico com dimensões de 0,2mm x 1,6mm sendo o principal mineral marcador da foliação; 20 a 25% de plagioclásio subédricos ocasionalmente prismáticos com zonação e leve sericitização medindo 0,2mm x 0,6mm; 20 a 25% de quartzo granoblástico poligonal e subédrico de até 0,8mm; 5 a 10% de biotita subédrica de até 0,6mm; 2 a 5% de K-feldspato prismático e subédrico com 0,2mm x 0,8mm; 1 a 3% de titanita subédricas de até 0,3mm e <1% de epidoto submilimétricos.

Figura 51 – Fotomicrografias representativas dos ortognaisses. A) Ortognaisse tonalítico (amostra GC-01J) rico em anfibólio. ND em objetiva de 5x; B) Mesma feição de A) apresentando plagioclásio subédrico com inclusões de quartzo (ao centro) e com textura granoblástica associado a quartzo (porção inferior). ND em objetiva de 5x; C) Plagioclásio subédrico zonado com inclusões de quartzo, interpretado como relicto ígneo (amostra GC-01J). NC em objetiva de 20x; D) Outro plagioclásio subédrico semelhante ao da fotomicrografia C), onde também se destaca os contatos poligonais com quartzo e plagioclásio granoblástico ao seu redor (amostra GC-01J). NC em objetiva de 20x; E) Ortognaisse (amostra GC-01M) com bandas ricas em anfibólio e bandas quartzo-feldspáticas. ND em objetiva de 5x; F) Mesma feição de E) sobre NC, apresenta textura granoblástica poligonal entre os cristais prismáticos de quartzo e k-feldspato.



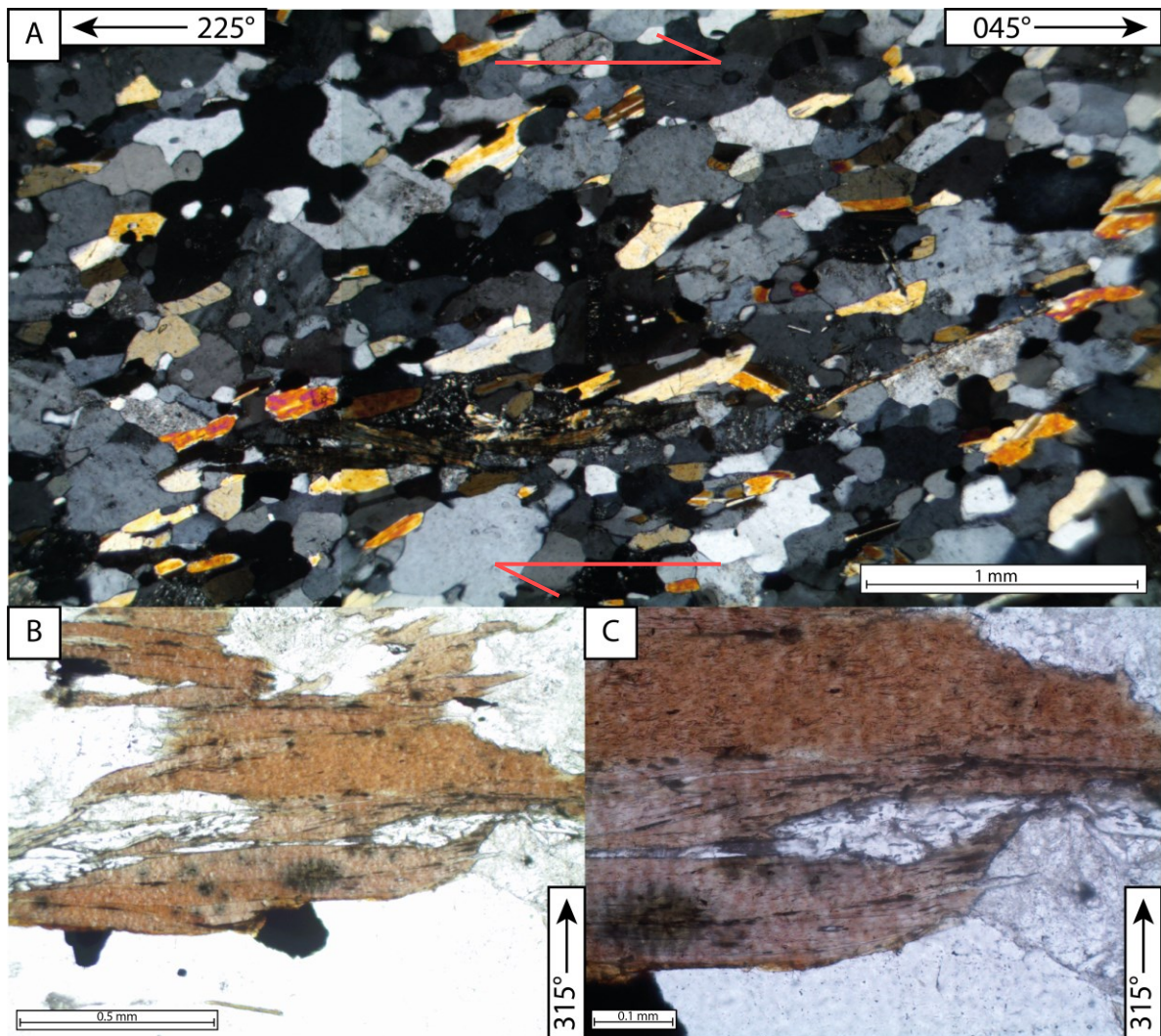
Fonte: autor (2024).

7.5 MICROTTECTÔNICA

Durante a descrição petrográfica, algumas amostras de rochas controladas por foliação de baixo e alto ângulo de mergulho apresentaram indicadores cinemáticos importantes para a interpretação da deformação presente nas rochas do Complexo Cambaí. Essas amostras foram orientadas em campo, preferencialmente buscando o plano XZ, sendo ele ortogonal á foliação e paralelo á lineação (Passchier *et al.*, 2005; Gaidzik e Zaba, 2021).

Dentre as amostras descritas somente o tectonito L de composição arcoseana GC-01I, coletado no baixo ângulo e uma amostra dos metapelitos GC-04F coletada no alto angulo, exibiram feições microestruturais confiáveis. Em baixo ângulo a trama da foliação é marcada por abundantes porfiroblastos de clinopiroxênio assimétricos (Fig. 52A), assim como mais raramente porfiroblastos de hornblenda assimétricos (Fig. 47C e D), condizente com o indicador observado em campo (Fig. 37A). Enquanto em alto ângulo, a cinemática observada foi dextral, marcada por indicadores do tipo *fish* a partir da recristalização e estiramento assimétrico de vênulas de quartzo em bandas biotíticas (Fig. 52B e C), o que também está de acordo com os indicadores cinemáticos observados em escala de afloramento (Fig. 36B).

Figura 52 – Indicadores cinemáticos dos gnaisses do Arroio Laranjeiras observados em escala micro. Amostras GC-01I e GC-01F. A) Feição com cristais assimétricos de Clinopiroxênio oblíquos em relação à foliação da rocha, indicando movimento horário com topo para NE. NC em objetiva de 5x; B) Vênula de quartzo sub-milimétrica boudinada em meio a agregado de biotita, com caudas de recristalização estiradas assimetricamente destal. ND em objetiva de 10x; C) Mesma feição de B) com objetiva de 20x.



Fonte: autor (2024).

8. LITOQUÍMICA

Os dados geoquímicos de rocha total adquiridos através da Fluorescência de Raios X (Fig. 53) indicam que, em conjunto, os protólitos dos paragneisses pelíticos GC-01C, -01H, -01I e PVR-6060E podem ser classificados como grauvascas com diferentes proporções de argila quando se utiliza as razões do log de Na₂O/K₂O *versus* log SiO₂/Al₂O₃ (Pettijohn *et al.*, 1987 - Fig. 54A). Os protólitos destas rochas também podem ser classificados como folhelhos com distintas quantidades de ferro a partir das razões do log de Fe₂O₃/K₂O *versus* log SiO₂/Al₂O₃ (Herron, 1988 - Fig. 54B).

Figura 53 – Resultado da química de rocha obtido pela Fluorescência de Raios X.

Equipamento: Espectrômetro RIX 2000 Rigaku® com tubo de Rh (Ródio)

Concentração de elementos maiores em % em peso (g/100g)

n° LAB	Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	L.O.I.	Total
LAB1526	GC-01C	63,33	14,76	0,71	6,70	0,25	3,76	2,24	2,45	4,10	0,23	1,47	100
LAB1527	GC-01I	64,48	14,01	0,93	8,09	0,17	3,15	2,83	0,56	5,16	0,16	0,47	100
LAB1528	GC-01H	64,46	14,53	0,90	6,03	0,10	4,73	1,13	1,82	4,07	0,36	1,89	100
LAB1529	PVR-6060E	63,17	15,60	0,84	6,59	0,11	2,46	3,21	3,16	3,11	0,18	1,56	100
MRC AC-E	Referência ¹	70,35	14,70	0,11	2,53	0,06	0,03	0,34	4,49	6,54	0,01		
	\bar{X}	71,79	13,62	0,12	2,60	71,79	0,34	Nd	4,59	6,74	0,01		
	s (n=10)	0,3	0,7	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0		

Legenda: L.O.I. "Loss on Ignition", Perda ao Fogo feita por gravimetria; "nd" não detectado pela metodologia.

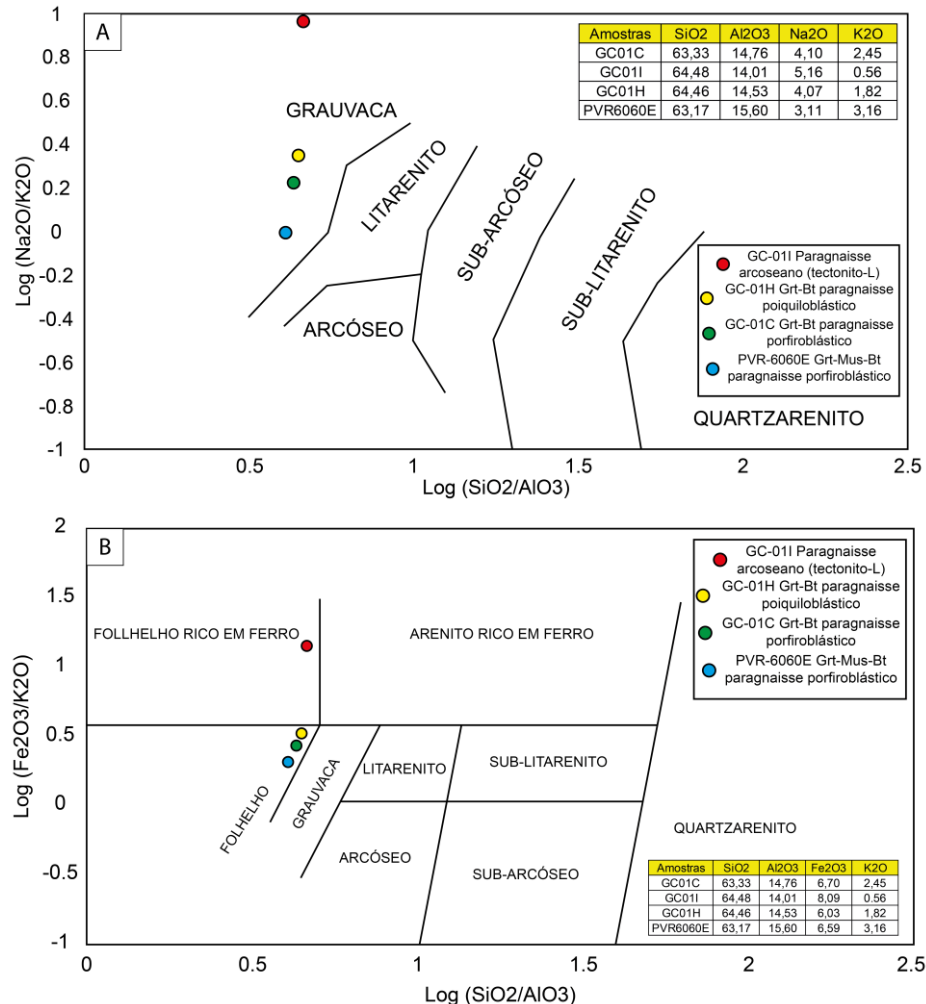
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL

Porto Alegre, 19 de setembro de 2023

Centro de Pesquisas em Petrologia e Geoquímica (CPGq)
Núcleo de Litoquímica e Análises Mineraiis

Fonte: CPGq Núcleo de Litoquímica e Análises Mineraiis (2023).

Figura 54 – Classificação geoquímica dos protólitos dos paragneisses pelíticos. A) Gráfico para classificação de rochas areníticas segundo Pettijohn et al. (1987); B) Gráfico para classificação das rochas lamacentas de acordo com o esquema de Herron (1988).



Fonte: autor com base em Pettijohn *et al* (1987) e Herron, (1988).

9. QUÍMICA MINERAL

Neste capítulo são apresentados os dados de química mineral obtidos em silicatos da amostra de Grt-Mus-Bt paragneisse, PVR-6060E (Tab. 4, 5, 6, 7 e 8). Posteriormente, os dados da química mineral são utilizados para cálculo da fórmula mineral (DEER *et al.*, 2013) e classificação das espécies minerais reconhecidas nas amostras. Seguidamente, ocorre a plotagem das curvas composicionais (isopletras) dos minerais que apresentam solução sólida, como por exemplo as granadas e micas.

A partir do tratamento dos dados de química mineral foi possível o cálculo da fórmula mineral de cada espécie mineral, com ênfase para a proporção entre os membros finais da granada, e conseqüentemente á proporção entre seus membros finais: piropo (10,05 até 15,89); almandina (61,08 até 63,58); espessartita (18,31 até 22,60) e grossulária (3,19 até 6,58), (Tab. 4). Também foi calculado para a muscovita o índice XMg $[(Mg/(Mg+Fe)*100)]$, que variou de 50,48 até 60,60 (Tab. 5). Os valores calculados do índice XMg para a biotita foi de 53,6 até 56,17 (Tab. 7), enquanto os teores medidos de anortita em apenas dois cristais de plagioclásio, variaram entre 22,19 e 24,14 (Tab. 8).

Tanto as análises de química mineral, realizadas pontualmente nas cordieritas, quanto os mapas composicionais gerados no microssítio 3 da PVR-6060E (Fig. 55A, B e C), evidenciam que os minerais classificados como cordierita na petrografia apresentam química compatível com aquela encontrada nas muscovitas (Tab. 6) ou uma mistura entre os dois minerais em desequilíbrio, com destaque para a análise 43 da tabela 6, com 3,69% de MgO. A situação desta amostra assemelha-se ao exemplo descrito por Sanislav *et al.* (2020), que apresenta reação de desequilíbrio parcialmente desenvolvida em metapelitos com estauroлита e andaluzita no oeste do Maine, EUA, contendo porfiroblastos de cordierita parcialmente pseudomorfizados por muscovita e biotita de grãos grandes. No entanto, na amostra PVR-6060E essa reação de desequilíbrio se encontra quase completa, sendo interpretada como um pseudomorfismo de muscovita sobre cordierita. A principal evidência é a alta quantidade de potássio e baixa quantidade de magnésio encontrado na química mineral do pseudomorfo de cordierita. Além disso, chama a atenção o fato de que o contato entre minerais observado no sítio 3 da amostra PVR-6060E (Fig. 43A e B) não ser observado nos mapas composicionais realizados por microsonda eletrônica (Fig. 55A, B, C), onde tanto a região ocupada petrograficamente pela muscovita, quanto o pseudomorfo de muscovita sobre cordierita, tem exatamente a mesma composição.

Tabela 4 – Dados da química mineral realizada nas granadas referente a amostra PVR-6060E e os valores de membros finais utilizados para plotagem das curvas composicionais.

Granada																									
Pontos	4/1.	6/1.	7/1.	14/1.	15/1.	16/1.	22/1.	23/1.	24/1.	35/1.	36/1.	37/1.	39/1.	40/1.	41/1.	45/1.	46/1.	47/1.	54/1.	55/1.	37'/1.	38'/1.	39'/1.	40'/1.	41'/1.
Al₂O₃	20.59	21.14	21.16	21.10	20.92	21.05	21.07	21.24	21.09	21.19	21.02	21.05	21.43	20.80	21.14	21.03	20.93	21.09	20.79	21.11	21.03	21.08	21.12	21.30	21.14
SiO₂	37.25	37.09	37.26	36.95	37.13	37.41	37.33	37.07	37.22	37.12	37.31	37.34	37.17	37.40	36.86	37.37	37.52	37.11	37.41	37.39	37.26	37.33	37.12	37.48	37.27
MgO	3.11	3.42	3.00	3.97	2.87	3.18	3.79	3.32	2.50	2.99	2.89	2.95	3.70	3.97	2.96	2.98	3.78	2.90	3.21	3.17	3.27	2.93	3.08	3.33	2.88
CaO	1.31	1.26	1.75	1.21	2.27	1.43	1.21	1.30	2.17	1.72	1.84	1.62	1.29	1.29	1.71	1.82	1.24	2.11	1.32	1.17	1.23	2.00	1.19	1.11	1.76
MnO	8.97	8.46	9.15	8.04	8.97	8.77	8.44	9.01	9.87	9.11	9.37	9.14	8.59	8.22	9.05	8.91	8.16	9.10	8.80	9.15	9.09	9.08	9.02	9.06	9.53
FeO	27.41	27.93	27.52	27.73	27.13	27.53	28.03	27.83	27.03	27.50	27.46	27.51	27.82	27.59	27.63	27.06	27.71	26.95	27.86	27.47	27.65	27.38	28.18	27.93	27.32
TiO₂	0.02	0.02	-	0.01	0.02	-	-	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.03	0.02	-	0.00	-	0.03	0.03	-	0.01	0.04
Total	98.70	99.32	99.85	99.06	99.42	99.39	99.88	99.82	99.94	99.67	99.96	99.69	100.01	99.33	99.40	99.26	99.39	99.27	99.40	99.48	99.58	99.86	99.72	100.27	99.97
Número de cátions na fórmula (na base de 24 O)																									
Al	3.95	4.03	4.02	4.02	3.99	4.00	3.99	4.03	4.01	4.03	3.99	4.00	4.05	3.95	4.04	4.01	3.97	4.02	3.96	4.01	4.00	4.00	4.02	4.02	4.01
Si	6.06	5.99	6.00	5.97	6.01	6.04	6.00	5.97	6.00	5.99	6.01	6.02	5.96	6.03	5.97	6.04	6.04	6.00	6.04	6.03	6.01	6.01	5.99	6.00	6.00
Mg	0.75	0.82	0.72	0.96	0.69	0.76	0.91	0.80	0.60	0.72	0.69	0.71	0.88	0.95	0.71	0.72	0.91	0.70	0.77	0.76	0.79	0.70	0.74	0.80	0.69
Ca	0.23	0.22	0.30	0.21	0.39	0.25	0.21	0.23	0.37	0.30	0.32	0.28	0.22	0.22	0.30	0.32	0.21	0.37	0.23	0.20	0.21	0.34	0.21	0.19	0.30
Mn	1.24	1.16	1.25	1.10	1.23	1.20	1.15	1.23	1.35	1.24	1.28	1.25	1.17	1.12	1.24	1.22	1.11	1.25	1.20	1.25	1.24	1.24	1.23	1.23	1.30
Fe	3.73	3.77	3.71	3.75	3.67	3.71	3.77	3.75	3.65	3.71	3.70	3.71	3.73	3.72	3.74	3.66	3.73	3.65	3.77	3.71	3.73	3.69	3.81	3.74	3.68
Ti	0.00	0.00	-	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	0.00	0.01
Total	15.96	15.99	15.99	16.01	15.99	15.96	16.01	16.01	15.99	15.99	15.99	15.97	16.01	16.00	16.01	15.96	15.97	15.99	15.98	15.96	15.99	15.99	16.00	15.98	15.99
Cálculo de membros finais																									
Piropo	12.67	13.79	12.04	15.89	11.58	12.90	15.04	13.27	10.05	12.05	11.58	11.93	14.72	15.85	11.92	12.13	15.22	11.74	12.96	12.87	13.16	11.79	12.37	13.36	11.59
Almandina	62.70	63.19	62.01	62.31	61.31	62.71	62.47	62.49	61.08	62.13	61.79	62.38	62.15	61.80	62.43	61.88	62.54	61.19	63.05	62.59	62.48	61.71	63.58	62.80	61.58
Espessartina	20.78	19.38	20.89	18.31	20.53	20.24	19.05	20.49	22.60	20.84	21.34	20.98	19.44	18.64	20.71	20.65	18.66	20.93	20.16	21.12	20.80	20.74	20.61	20.64	21.75
Grossulária	3.85	3.64	5.06	3.49	6.58	4.16	3.44	3.75	6.27	4.98	5.29	4.71	3.69	3.71	4.94	5.34	3.57	6.15	3.83	3.42	3.56	5.77	3.43	3.19	5.08
XMg	0.17	0.18	0.16	0.20	0.16	0.17	0.19	0.18	0.14	0.16	0.16	0.16	0.19	0.20	0.16	0.16	0.20	0.16	0.17	0.17	0.17	0.16	0.16	0.18	0.16

Fonte: autor (2024).

Tabela 5 – Dados da química mineral realizada nas muscovitas referente a amostra PVR-6060E e os valores de XMg utilizados para plotagem das curvas composicionais.

Muscovita											
Pontos	2 / 1 .	12 / 1 .	13 / 1 .	17 / 1 .	20 / 1 .	21 / 1 .	29 / 1 .	48 / 1 .	49 / 1 .	53 / 1 .	59 / 1 .
Na₂O	1.10	1.17	1.15	1.03	1.07	1.10	1.06	1.08	1.09	1.03	1.24
Al₂O₃	35.67	35.47	36.12	35.63	35.95	35.60	35.35	35.59	35.59	36.17	35.89
SiO₂	45.82	44.92	45.54	46.17	46.08	46.25	45.86	45.61	45.94	45.82	45.43
MgO	0.70	0.65	0.53	0.74	0.69	0.75	0.76	0.63	0.77	0.63	0.54
CaO	0.00	-	-	0.03	0.03	0.01	-	-	0.00	0.02	0.10
MnO	-	0.02	0.03	-	0.03	-	0.03	0.02	0.02	-	0.05
FeO	0.94	0.95	0.72	0.95	0.89	0.88	0.89	1.10	0.98	0.93	0.72
K₂O	9.49	9.35	9.46	9.30	9.29	9.42	9.55	9.39	9.58	9.30	8.85
TiO₂	0.79	0.61	0.84	0.51	0.71	0.83	0.97	0.98	0.89	0.77	0.60
Total	94.56	93.15	94.42	94.37	94.75	94.87	94.52	94.44	94.92	94.70	93.44
Número de cátions na fórmula (na base de 22 O)											
Na	0.28	0.31	0.30	0.27	0.27	0.28	0.27	0.28	0.28	0.26	0.32
Al	5.61	5.67	5.68	5.60	5.63	5.57	5.56	5.61	5.58	5.67	5.69
Si	6.11	6.09	6.08	6.16	6.12	6.14	6.13	6.10	6.11	6.09	6.11
Mg	0.14	0.13	0.11	0.15	0.14	0.15	0.15	0.13	0.15	0.12	0.11
Ca	0.00	-	-	0.00	0.00	0.00	-	-	0.00	0.00	0.01
Mn	-	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	0.00	-	0.01
Fe	0.11	0.11	0.08	0.11	0.10	0.10	0.10	0.12	0.11	0.10	0.08
K	1.62	1.62	1.61	1.58	1.58	1.60	1.63	1.60	1.63	1.58	1.52
Ti	0.08	0.06	0.08	0.05	0.07	0.08	0.10	0.10	0.09	0.08	0.06
Total	13.95	13.98	13.95	13.92	13.92	13.93	13.94	13.94	13.96	13.91	13.91
XMg	57.11	54.78	56.63	58.01	58.24	60.31	60.60	50.48	58.33	54.62	57.01

Fonte: autor (2024).

Tabela 6 – Dados da química mineral realizada nas cordieritas referente a amostra PVR-6060E.

Cordierita														
Pontos	1 / 1 .	5 / 1 .	9/1.	19 / 1 .	30 / 1 .	31 / 1 .	33 / 1 .	50 / 1 .	51 / 1 .	58 / 1 .	60 / 1 .	42'/1.	36'/1.	43'/1.
Na₂O	1.03	1.12	1.17	1.13	1.03	1.13	1.16	1.01	1.08	1.15	1.09	1.26	1.12	0.56
Al₂O₃	34.94	35.34	35.72	36.27	35.38	36.11	36.72	34.74	35.27	36.19	35.86	36.52	35.66	29.31
SiO₂	45.55	45.54	45.58	44.96	45.94	46.24	45.87	45.80	45.41	45.40	45.84	46.43	46.17	44.51
MgO	0.70	0.74	0.62	0.63	0.73	0.76	0.51	0.81	0.65	0.71	0.74	0.52	0.59	3.69
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	0.06
MnO	0.01	0.04	-	0.03	0.00	0.03	-	0.01	-	0.01	0.01	-	-	0.03
FeO	0.97	0.93	0.79	0.77	0.97	0.93	0.69	1.05	0.92	0.89	0.93	0.72	0.78	4.53
K₂O	9.29	9.48	9.56	9.40	9.45	9.43	9.33	9.69	9.55	9.46	9.39	9.31	9.42	9.25
TiO₂	0.85	0.91	0.74	0.83	0.66	0.92	0.65	0.83	0.70	0.80	0.73	0.55	0.91	1.06
Total	93.37	94.17	94.26	94.07	94.17	95.63	94.98	94.00	93.68	94.65	94.64	95.32	94.70	93.06
Número de cátions na fórmula (na base de 18 O)														
Na	0.22	0.24	0.25	0.24	0.22	0.24	0.24	0.21	0.23	0.24	0.23	0.26	0.24	0.12
Al	4.55	4.57	4.61	4.69	4.57	4.59	4.69	4.51	4.59	4.65	4.61	4.64	4.57	3.93
Si	5.03	5.00	5.00	4.94	5.03	4.99	4.97	5.04	5.01	4.95	5.00	5.01	5.03	5.06
Mg	0.11	0.12	0.10	0.10	0.12	0.12	0.08	0.13	0.11	0.12	0.12	0.08	0.10	0.63
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	0.01
Mn	0.00	0.00	-	0.00	0.00	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	-	-	0.00
Fe	0.09	0.09	0.07	0.07	0.09	0.08	0.06	0.10	0.08	0.08	0.08	0.07	0.07	0.43
K	1.31	1.33	1.34	1.32	1.32	1.30	1.29	1.36	1.34	1.32	1.31	1.28	1.31	1.34
Ti	0.07	0.08	0.06	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07	0.06	0.07	0.06	0.04	0.07	0.09
Total	11.39	11.42	11.43	11.43	11.40	11.40	11.40	11.42	11.42	11.43	11.41	11.39	11.38	11.61
XMg	56.08	58.87	58.49	59.45	57.35	59.37	56.62	57.84	55.73	58.66	58.78	56.18	57.44	59.20

Fonte: autor (2024).

Tabela 7 – Dados da química mineral realizada nas biotitas referente a amostra PVR-6060E.

Biotita												
Pontos	3 / 1 .	8 / 1 .	10 / 1 .	25 / 1 .	26 / 1 .	28 / 1 .	34 / 1 .	38 / 1 .	42 / 1 .	43 / 1 .	52 / 1 .	56 / 1 .
Na₂O	0.15	0.26	0.28	0.08	0.99	0.28	0.16	0.24	0.19	0.16	0.26	0.26
Al₂O₃	19.17	18.99	19.19	18.45	35.65	19.14	19.01	19.12	19.11	19.22	19.00	19.29
SiO₂	36.24	36.16	35.84	33.46	45.68	36.12	35.69	36.10	36.36	36.05	36.65	35.67
MgO	11.50	11.62	11.31	12.52	0.81	11.84	11.28	10.97	11.32	11.06	11.60	11.10
CaO	0.05	-	0.10	0.21	0.06	0.03	0.11	0.04	0.03	0.29	-	-
MnO	0.14	0.18	0.17	0.42	0.00	0.16	0.22	0.25	0.26	0.17	0.15	0.27
FeO	16.35	16.89	16.61	19.07	1.13	16.82	16.58	16.93	16.56	16.47	16.13	15.76
K₂O	8.99	8.65	8.28	6.34	9.25	8.61	8.59	8.69	8.72	8.19	8.79	8.80
TiO₂	2.05	2.04	1.92	1.35	0.78	1.86	2.27	2.00	2.14	2.05	2.15	1.74
Total	94.70	94.89	93.78	92.00	94.40	94.90	93.92	94.40	94.74	93.72	94.78	92.94
Número de cátions na fórmula (na base de 22 O)												
Na	0.05	0.08	0.08	0.03	0.26	0.08	0.05	0.07	0.06	0.05	0.07	0.08
Al	3.40	3.36	3.43	3.40	5.61	3.39	3.40	3.41	3.38	3.43	3.35	3.48
Si	5.45	5.44	5.43	5.22	6.10	5.42	5.41	5.46	5.46	5.46	5.49	5.45
Mg	2.58	2.60	2.56	2.92	0.16	2.65	2.55	2.47	2.54	2.50	2.59	2.53
Ca	0.01	-	0.02	0.04	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.05	-	-
Mn	0.02	0.02	0.02	0.06	0.00	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04
Fe	2.06	2.12	2.11	2.49	0.13	2.11	2.10	2.14	2.08	2.09	2.02	2.02
K	1.72	1.66	1.60	1.26	1.58	1.65	1.66	1.68	1.67	1.58	1.68	1.72
Ti	0.23	0.23	0.22	0.16	0.08	0.21	0.26	0.23	0.24	0.23	0.24	0.20
Total	15.51	15.52	15.47	15.56	13.93	15.54	15.48	15.49	15.47	15.41	15.47	15.50
XMg	55.62	55.09	54.83	53.94	56.11	55.66	54.81	53.60	54.92	54.48	56.17	55.66

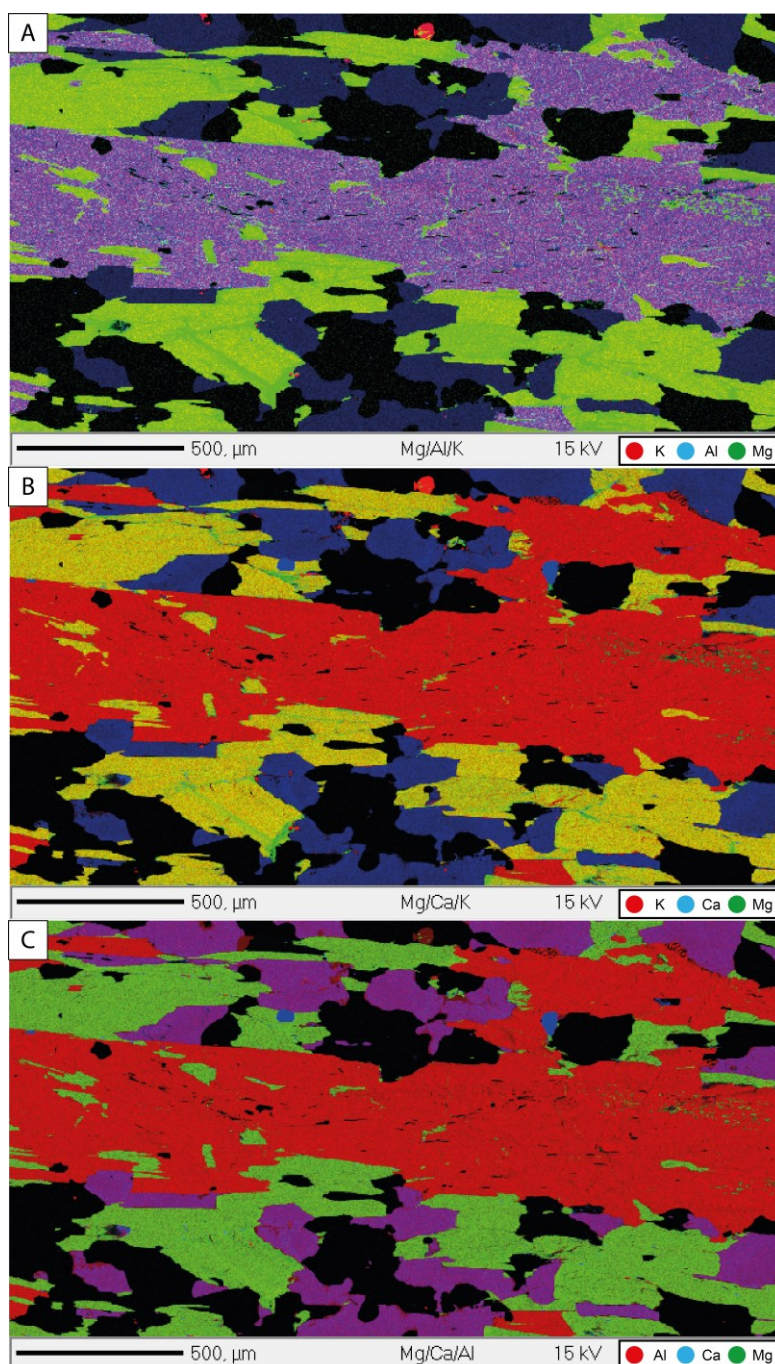
Fonte: autor (2024).

Tabela 8 – Dados da química mineral realizada nos plagioclásios referente a amostra PVR-6060E.

Plagioclásio		
Pontos	82 / 1 .	83 / 1 .
Na₂O	8.75	9.01
Al₂O₃	23.81	23.34
SiO₂	62.53	62.71
MgO	0.01	-
CaO	5.07	4.69
FeO	0.01	0.06
K₂O	0.09	0.11
TiO₂	-	-
Total	100.27	99.92
Número de cátions na fórmula (na base de 32 O)		
Na	3.00	3.10
Al	4.96	4.87
Si	11.05	11.11
Mg	0.00	-
Ca	0.96	0.89
Fe	0.00	0.01
K	0.02	0.03
Ti	-	-
Total	19.98	20.01
Anortita	24.14	22.19

Fonte: autor (2024).

Figura 55 – Mapas composicionais ternários (R, G, B) obtidos na microsonda eletrônica para o sítio 3 da amostra PVR-6060E, exibido na (Fig. 44A e 44B). A) Mapa composicional do sítio 3 com base na proporção de Mg (verde), Al (azul) e K (vermelho); B) Mapa composicional do sítio 3 com base na proporção de Mg (verde), Al (azul) e K (vermelho); B) Mapa composicional com base na proporção de Mg (verde), Ca (azul) e K (vermelho); C) Mapa composicional com base na proporção de Mg (verde), Ca (azul) e Al (vermelho). Em todos os mapas gerados não é possível identificar o limite entre cordierita e muscovita, que foi descrito durante a petrografia.



Fonte: autor (2024).

10. MODELAGEM GEOTERMOBAROMÉTRICA

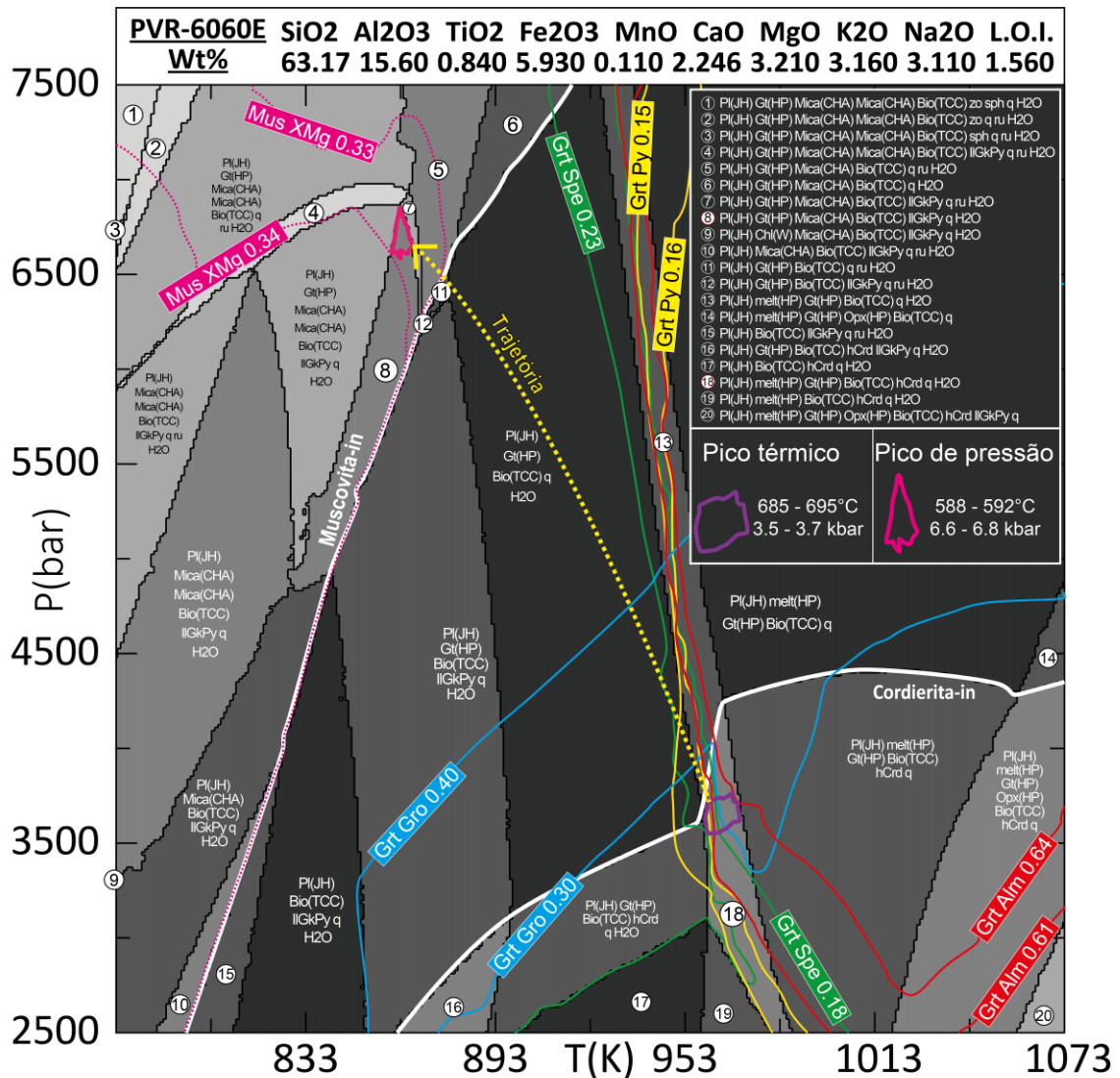
A partir da modelagem geotermobarométrica da amostra PVR-6060E (paragneisse pelítico), duas paragêneses minerais distintas foram encontradas, indicando uma possível trajetória do metamorfismo. A pseudoseção realizada a partir da química de rocha total possibilitou a produção da grade petrogenética, onde 2 polígonos com paragêneses minerais diferentes foram encontradas em lâmina, indicando um campo de alta temperatura no início do metamorfismo (Polígono 18 – $Pl+Grt+Bt+Crd+Qtz$ da figura 56) e um campo de alta pressão no fim da trajetória metamórfica (Polígono 8 - $Pl+Grt+Ms+Bt+Ilm+Qtz$ da figura 56) sugerido pela relação de corte e substituição total ou parcial da muscovita sobre a cordierita.

A plotagem das curvas composicionais a partir da química mineral permitiu uma melhor restrição das condições de P-T. As composições medidas de biotita (Tab. 7) e de plagioclásio (Tab. 8) não apresentaram boas correlações com as composições modeladas, sendo elas o índice XMg para biotita (modelado em 48,43 até 54,03) e o teor de anortita para o plagioclásio (modelado entre 32,57 e 53,47). Essa diferença entre medido e modelado ocorre possivelmente em razão da mineralogia estar em desequilíbrio, conforme demonstram as análises de cordierita (Tab. 6). Com isso a distribuição de elementos, como o Mg, não condiz com a modelagem para uma condição de equilíbrio. O cruzamento das isopletras de granada no campo de alta temperatura e as isopletras da muscovita no campo de alta pressão, sugerem o desequilíbrio não só entre a cordierita e a muscovita por estarem em campos diferentes dentro da grade petrogenética, mas também um não equilíbrio entre a granada analisada e a muscovita. Isso é evidenciado também na petrografia, com os minerais opacos frequentemente entre a granada e a muscovita, que não se tocam (Fig. 42C, D, E e F).

A presença de cordierita na foliação principal dos paragneisses, parcialmente substituída por muscovita (Fig. 43 e 55) em orientação discordante (Fig. 41C, D, E e F), sugere uma trajetória no diagrama P-T, com paragênese de pico térmico ($Pl+Grt+Bt+Crd+Qtz$, 685 - 695°C / 3.5 – 3.7kbar) seguida pelo reequilíbrio do pico de pressão ($Pl+Grt+Ms+Bt+Ilm+Qtz$, 588 - 592°C / 6,6 - 6,8 kbar). Assim a pseudoseção indica uma trajetória de aumento da pressão e/ou diminuição da temperatura, visto que ambos os minerais não coexistem em equilíbrio na pseudoseção modelada. O gradiente geotérmico calculado, considerando 1 kbar

aproximadamente equivalente à 3,3 km, para o pico termal foi de $\sim 58^\circ\text{C}/\text{km}$, enquanto o do pico de pressão foi de $\sim 26,68^\circ\text{C}/\text{km}$ (calculado com base em Best, 2002 - cap. 1, pgs. 5-10). A mudança de gradiente geotérmico sugere uma transição entre estágios orogênicos distintos, enquanto a paragênese do pico térmico parcialmente preservada sugere que não houve tempo do reequilíbrio total em pico de pressão, o que sugere uma exumação rápida (trajetória rápida) dos gnaisses.

Figura 56 - Modelagem geotermobarométrica da amostra PVR-6060E (paragneisse pelítico), exibindo os campos de estabilidade de diferentes assembleias minerais dentro da grade petrogenética modelada (pseudoseção). Também exibe a plotagem das curvas composicionais (isopletas) de granada (almandina - Grt Alm; piropo - Grt Py; espessartita - Grt Spe; e grossulária - Grt Gro) e muscovita (Mus XMg).



Fonte: autor (2024).

11. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A identificação detalhada de diferentes tipos de gnaisses que se alternam em escala métrica e apresentam foliações Sx mergulhando para NW, variando de baixo a alto ângulo devido a dobras com eixos de baixo caimento e planos axiais (NE-SW) com alto ângulo de mergulho, que variam de abertas a isoclinais, são indicativos da heterogeneidade da deformação. As foliações Sx de baixo ângulo e alto ângulo tem Lx com baixo caimento para SW, subparalelas aos eixos de dobra, e indicam o caráter progressivo da deformação que gerou a trama principal e seu dobramento. Injeções transitando na foliação Sx dobrada dos gnaisses e no PA das dobras simultaneamente, ao longo do qual deformam-se com boudinagem e *pinch-and-swell*, são estruturas sugestivas de seu caráter sintectônico.

Indicadores cinemáticos, tanto em escala macroscópica quanto em escala microscópica, na foliação de baixo ângulo apresentam componentes de empurrão para NE, enquanto sugerem transcorrência dextral na foliação de alto ângulo, representando componentes de uma deformação transpressiva. A constrição que gerou o tectonito-L ocorreu possivelmente devido á partição da deformação no metarcóseo em provável zona de charneira, por ser mais competente, o que é reforçado pelo paralelismo entre Lx e eixo das dobras.

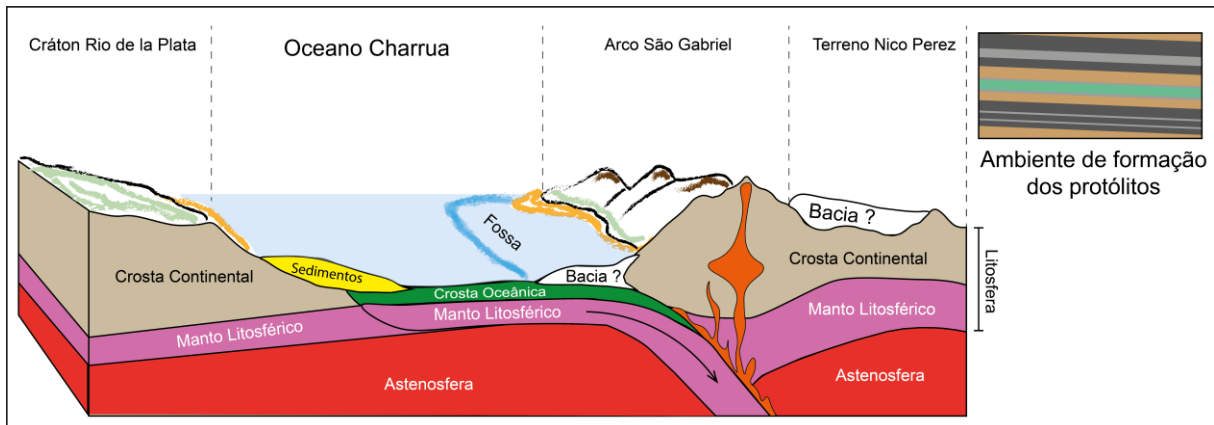
A descrição petrográfica, associada ao detalhamento estrutural e a intercalação litológica dos orto- e paragneisses observada em afloramento, junto com informações geocronológicas com idades de cristalização de aproximadamente 750 Ma (Babinski *et al.*, 1996) e geoquímica cálcio-alcalina dos ortogneisses (desde Silva Filho, 1984 até Siviero *et al.*, 2021) proveniência cronocorrelata dos paragneisses (Lena *et al.*, 2014; Cerva-Alves *et al.*, 2021; Hartmann *et. al.*, 2011 entre outros constantes na bibliografia), permitem tecer interpretações sobre o ambiente formador destas rochas. A integração destes dados sugere a interpretação deste paleoambiente como uma bacia vulcanossedimentar relacionada a um arco magmático de margem continental (Fig. 57).

A litoquímica de rocha total dos paragneisses pelíticos indica que, em conjunto, os protólitos sedimentares podem ser classificados como grauvacas com diferentes proporções de argila e/ou folhelhos com diferentes proporções de ferro. Essa interpretação reforça o ambiente vulcanossedimentar textural e quimicamente imaturo de formação dos protólitos, como provável ambiente de arco continental.

A modelagem geotermobarométrica a partir das pseudoseções, cálculo de curvas composicionais e evidências petrográficas, indicam o desequilíbrio entre a paragênese mineral com cordierita e aquela com muscovita, com pseudomorfismo da muscovita em substituição parcial a quase completa da cordierita. Isso sugere uma trajetória metamórfica relativamente rápida, sem possibilidade de reequilíbrio completo, de aumento da pressão e/ou diminuição da temperatura, com gradiente geotérmico inicial de pico termal de $\sim 58^{\circ}\text{C}/\text{km}$, seguida do pico de pressão com gradiente geotérmico de $\sim 26,68^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Por fim, a deformação transpressiva com a trajetória de aumento de pressão e rápida mudança de gradiente geotérmico sugere a transição entre os dois tipos de orogênese. A modelagem sugere que o pico térmico tenha ocorrido em um orógeno acrescionário (Fig. 58), em ambiente de bacia vulcanossedimentar de arco magmático, comparável ao arco magmático de Ryoke, no Japão, com $\sim 43^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Nakamura *et al.*, 2021); ao arco magmático andino, com $\sim 46,6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Restrepo *et al.*, 2021); ou ao ambiente pré-colisional do Complexo Várzea do Capivarita, com $\sim 54^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (De Toni *et al.*, 2021). Desta forma, estima-se que o pico térmico experienciado pelos gnaisses do Arroio Laranjeira tenha ocorrido durante a subducção. Este pico térmico foi então seguido de uma mudança no gradiente geotérmico, interpretada como resultante de uma colisão (Fig. 59), sendo comparável em termos de gradiente à orogênese himalaiana em Pangong Tso, Índia, com gradientes entre 25 e $28^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Sachan *et al.*, 2016). A transição entre os dois tipos de orogênese registrada nos gnaisses do Arroio Laranjeira, Complexo Cambaí, é atribuída ao fechamento do antigo oceano Charrua.

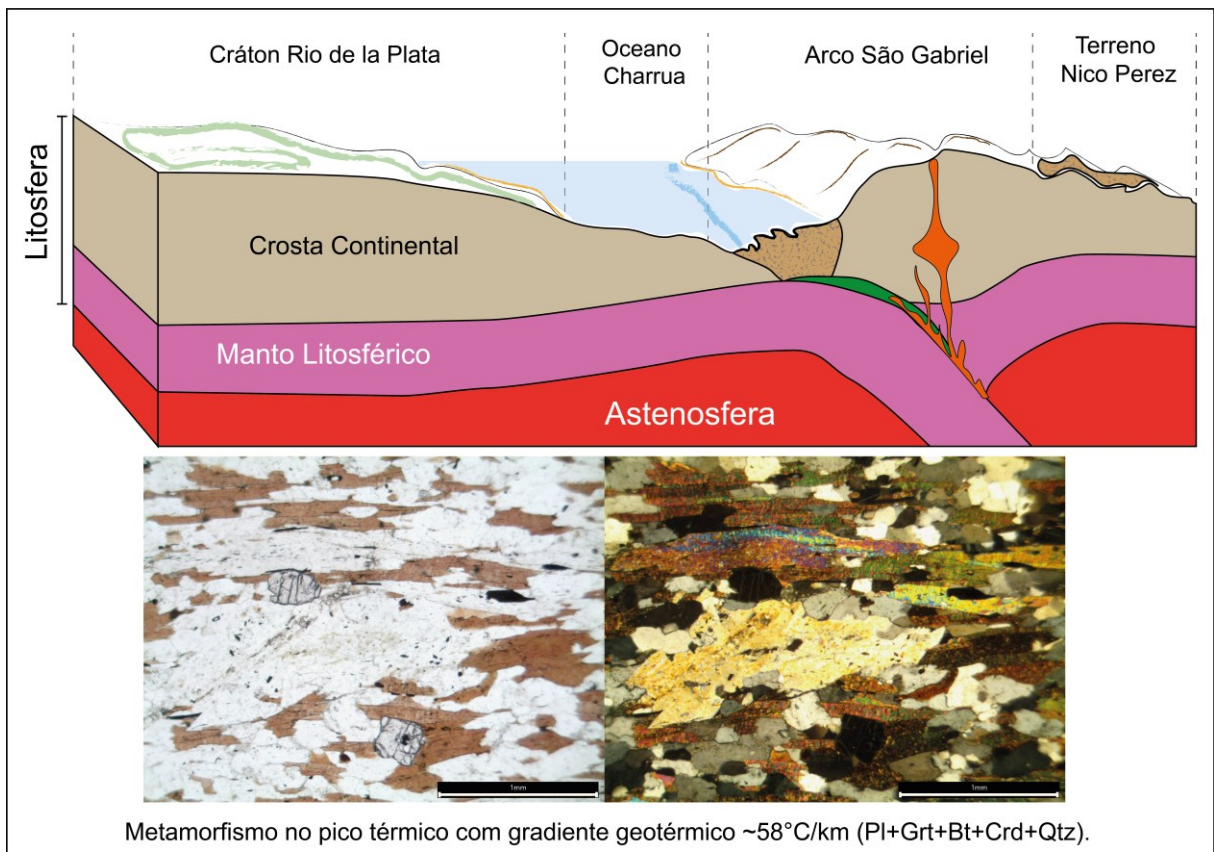
Perspectivas futuras para a continuidade dos trabalhos na área de estudo incluem a determinação geocronológica das paragêneses aqui definidas como de pico térmico e pico de pressão, assim podendo compreender quando ocorreu a transição entre as duas fases orogênicas no tempo geológico e corroborar com os estudos sobre a evolução do regime tectônico terrestre.

Figura 57 – Modelo ilustrativo para o ambiente formador dos protólitos.



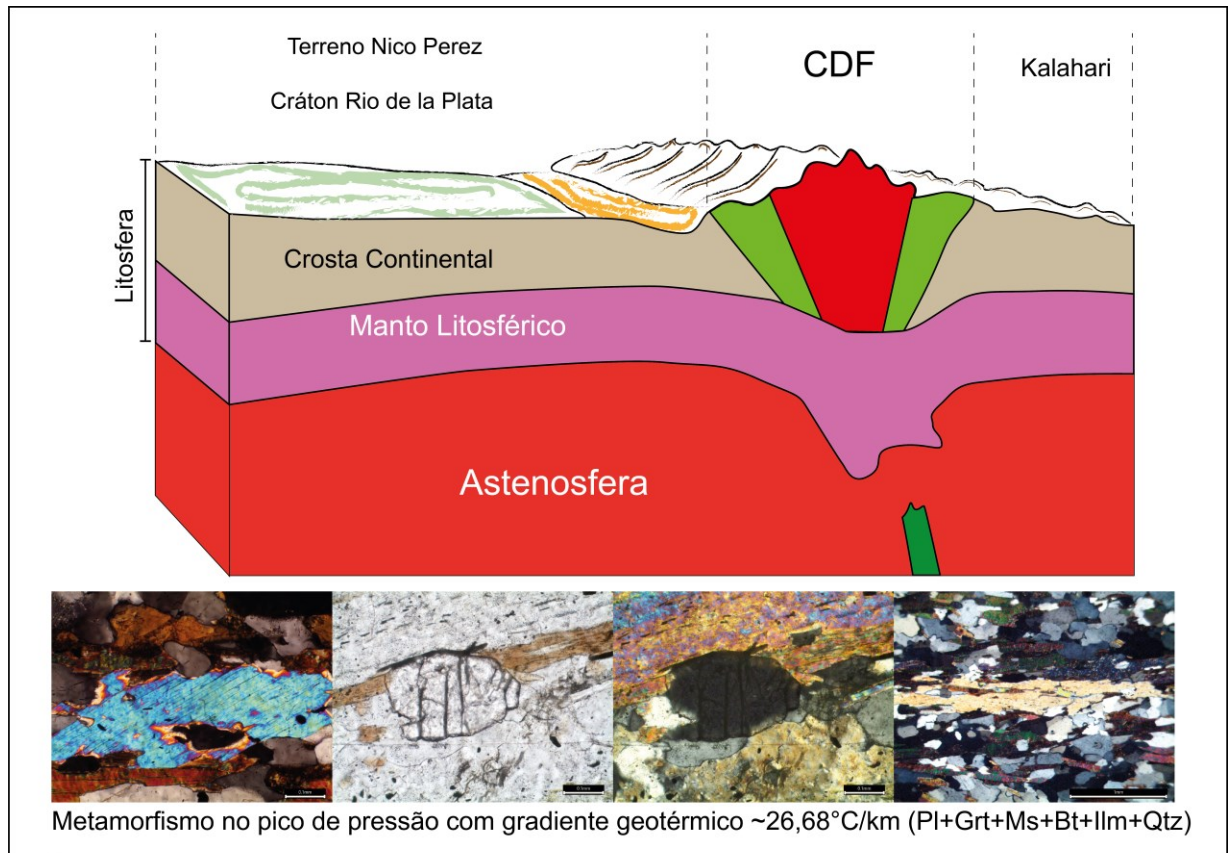
Fonte: autor (2024).

Figura 58 - Modelo ilustrativo para o ambiente metamórfico de pico térmico.



Fonte: autor (2024).

Figura 59 - Modelo ilustrativo para o ambiente metamórfico do pico de pressão.



Fonte: autor (2024).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews*, v. 17, n. 1-2, p. 1-29, 1981.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques; CARNEIRO, Celso Dal Ré. Origem e evolução da Serra do Mar. *Brazilian Journal of Geology*, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.

BABINSKI, M. *et al.* Juvenile accretion at 750–700 Ma in southern Brazil. *Geology*, v. 24, n. 5, p. 439-442, 1996.

BATTISTI, Matheus Ariel *et al.* Petrochronology of the Dom Feliciano Belt foreland in southernmost Brazil reveals two distinct tectonometamorphic events in the western central Kaoko–Dom Feliciano–Gariép orogen. *International Journal of Earth Sciences*, v. 113, n. 4, p. 973-1004, 2024.

BROWN, M. The contribution of metamorphic petrology to understanding lithosphere evolution and geodynamics. *Geoscience Frontiers*, v. 5, n. 4, p. 553-569, 2014.

CALDERÓN, M. *et al.* P–T–time evolution of the Mejillones Metamorphic Complex: Insights into Late Triassic to Early Jurassic orogenic processes in northern Chile. *Tectonophysics*, v. 717, p. 383-398, 2017.

CASQUET, C. *et al.* The Mejillonia suspect terrane (Northern Chile): Late Triassic fast burial and metamorphism of sediments in a magmatic arc environment extending into the Early Jurassic. *Gondwana Research*, v. 25, n. 3, p. 1272-1286, 2014.

CERVA-ALVES, T. *et al.* Metamorphic evolution of the juvenile Serrinha forearc basin in the southern Brasiliano Orogen. *Precambrian Research*, v. 365, p. 106394, 2021.

CHEMALE JR, F.; HARTMANN, L. A.; SILVA, L. C. da. Stratigraphy and tectonism of the Precambrian to Early Paleozoic units in southern Brazil and Uruguay-excursion guidebook. *Acta Geológica Leopoldensia*, v. 42, n. XVIII, p. 5-117, 1995.

CONNOLLY, J. A. D. Computation of phase equilibria by linear programming: a tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 236, n. 1-2, p. 524-541, 2005.

COSTA, E. O. *et al.* Reassessing the PT conditions of Neoproterozoic collisional metamorphism and partial melting in southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 100, p. 102584, 2020.

COSTA, E. O. *et al.* PTD evolution of the southeast Passo Feio Complex and the meaning of the Caçapava Lineament, Dom Feliciano Belt, southernmost Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 112, p. 103465, 2021.

DEER, William Alexander; HOWIE, Robert Andrew; ZUSSMAN, Jack. An introduction to the rock-forming minerals. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, 2013.

DE TONI, G. B. *et al.* Dom Feliciano Belt orogenic cycle tracked by its pre-collisional magmatism: the Tonian (ca. 800 Ma) Porto Belo Complex and its correlations in southern Brazil and Uruguay. *Precambrian Research*, v. 342, p. 105702, 2020.

DE TONI, G. B. *et al.* Autochthonous origin of the Encruzilhada Block, Dom Feliciano Belt, southern Brazil, based on aerogeophysics, image analysis and PT-paths. *Journal of Geodynamics*, v. 144, p. 101825, 2021.

FOSSÉN, Haakon. *Geologia estrutural*. São Paulo: Oficina dos textos, p. 204-205, 2012.

GAIDZIK, Krzysztof; ŻABA, Jerzy. Oriented Rock Samples for Detailed Structural Analysis. *Structural Geology and Tectonics Field Guidebook—Volume 1*, p. 715-723, 2021.

GOSCOMBE, Ben D.; GRAY, David R. Metamorphic response in orogens of different obliquity, scale and geometry. *Gondwana Research*, v. 15, n. 2, p. 151-167, 2009.

HARTMANN, L. A. *et al.* Time frame of 753–680 Ma juvenile accretion during the São Gabriel orogeny, southern Brazilian Shield. *Gondwana Research*, v. 19, n. 1, p. 84-99, 2011.

HERRON, Michael M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *Journal of Sedimentary Research*, v. 58, n. 5, p. 820-829, 1988.

KONOPÁSEK, J. *et al.* Did the circum-Rodinia subduction trigger the Neoproterozoic rifting along the Congo–Kalahari Craton margin?. *International Journal of Earth Sciences*, v. 107, p. 1859-1894, 2018.

LEITE, J. A. D. *et al.* SHRIMP U/Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost Brazil. *International Geology Review*, v. 40, n. 8, p. 688-705, 1998.

LENA, L. O. F. *et al.* The evolution of the Neoproterozoic São Gabriel juvenile terrane, southern Brazil based on high spatial resolution U-Pb ages and $\delta^{18}\text{O}$ data from detrital zircons. *Precambrian Research*, v. 247, p. 126-138, 2014.

LI, Zheng-Xiang; EVANS, David AD; HALVERSON, Galen P. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland. *Sedimentary Geology*, v. 294, p. 219-232, 2013.

MIYASHIRO, A. Evolution of metamorphic belts. *Journal of Petrology*, v. 2, n. 3, p. 277-311, 1961.

NAKAMURA, Y. *et al.* Amalgamation of the Ryoke and Sanbagawa metamorphic belts at the subduction interface: New insights from the Kashio mylonite along the Median Tectonic Line, Nagano, Japan. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 40, n. 3, p. 389-422, 2021.

ORIOLO, Sebastián *et al.* Contemporaneous assembly of Western Gondwana and final Rodinia break-up: implications for the supercontinent cycle. *Geoscience Frontiers*, v. 8, n. 6, p. 1431-1445, 2017.

OYHANTÇABAL, P.; SIEGESMUND, S.; WEMMER, K. The Río de la Plata Craton: a review of units, boundaries, ages and isotopic signature. *International Journal of Earth Sciences*, v. 100, p. 201-220, 2011.

PASSCHIER, Cees W.; TROUW, Rudolph AJ. *Microtectonics*. Springer Science & Business Media, 2005.

PASSCHIER, Cees W. *et al.* Metamorphic History of Gneiss Terrains. *Field Geology of High-Grade Gneiss Terrains*, p. 94-107, 1990.

PATTISON, D. R. M. Stability of andalusite and sillimanite and the Al₂SiO₅ triple point: constraints from the Ballachulish aureole, Scotland. *The Journal of Geology*, v. 100, n. 4, p. 423-446, 1992.

PETTIJOHN, F. J. *et al.* Introduction and source materials. *Sand and sandstone*, p. 1-21, 1987.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; BASEI, M. A. S. The tectonic evolution of the São Gabriel terrane, Dom Feliciano belt, southern Brazil: the closure of the Charrua ocean. In: *Geology of Southwest Gondwana*, p. 243-265, 2018.

RESTREPO, Marcela *et al.* Tectonic implications of the jurassic magmatism and the metamorphic record at the southern Colombian Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 111, p. 103439, 2021.

SAALMANN, K.; REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A. Geochemistry and crustal evolution of volcano-sedimentary successions and orthogneisses in the Sao Gabriel Block, southernmost Brazil—relics of Neoproterozoic magmatic arcs. *Gondwana Research*, v. 8, n. 2, p. 143-161, 2005a.

SAALMANN, K. *et al.* Sm–Nd isotope geochemistry of metamorphic volcano-sedimentary successions in the São Gabriel Block, southernmost Brazil: evidence for the existence of juvenile Neoproterozoic oceanic crust to the east of the Rio de la Plata craton. *Precambrian Research*, v. 136, n. 2, p. 159-175, 2005b.

SAALMANN, K.; REMUS, M. V. D.; HARTMANN, L. A. Tectonic evolution of the Neoproterozoic São Gabriel block, southern Brazil: constraints on Brasiliano orogenic evolution of the Rio de La Plata cratonic margin. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 21, n. 3, p. 204-227, 2006.

SACHAN, H. K. *et al.* Metamorphic P–T conditions and CO₂ influx history of medium-grade metapelites from Karakorum, Trans-Himalaya, India. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 124, p. 126-138, 2016.

SANISLAV, Ioan V.; ABU SHARIB, Ahmed SAA; QUENTIN DE GROMARD, Raphael SA. Deformation-induced cordierite breakdown—an example from western Maine, USA. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 38, n. 8, p. 831-852, 2020.

SILVA FILHO, B. C. Structural Sequence and Petrogenesis of the Polyphase Deformed Precambrian Terrane of the Vila Nova Region, State of Rio Grande Do Sul, Southern Brazil. Tese (Doutorado) - University of Glasgow, Reino Unido, 1984.

SILVA FILHO, B. C. Structural Sequence and Petrogenesis of the Polyphase Deformed Precambrian Terrane of the Vila Nova Region, State of Rio Grande Do Sul, Southern Brazil. Tese (Doutorado) - University of Glasgow, Reino Unido, 1991.

SIVIERO, R. S. *et al.* Age and geochemistry of Cambaí Complex, São Gabriel Terrane, Brazil: Arc-related TTG-like rocks. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 108, p. 103165, 2021.

