

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Modelagem termodinâmica de fusão parcial e metamorfismo  
em condições de fácies granulito: exemplo do Complexo  
Itatins, SP**

Mauricio Pavan Silva

Orientador: Prof. Dr. Renato de Moraes

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

SÃO PAULO

2017



MAURICIO PAVAN SILVA

**Modelagem termodinâmica de fusão parcial e metamorfismo em condições de fácies granulito: exemplo do Complexo Itatins, SP**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Mineralogia e Petrologia

Orientador: Prof. Dr. Renato de Moraes

SÃO PAULO

2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do  
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Silva, Maurício Pavan

Modelagem termodinâmica de fusão parcial e metamorfismo em condições de fácies granulito: exemplo do Complexo Itatins, SP. / Maurício Pavan. - São Paulo, 2017.

280 p. : il. + anexos + apêndices + mapas

Tese (Doutorado) : IGc/USP

Orient.: Moraes, Renato de

1. Geologia 2. Petrologia metamórfica 3. Geocronologia I. Título

*À Cíntia,  
por me dar a certeza que tudo vai dar certo.*



## Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à Cíntia por todo o apoio durante esses anos, sempre me incentivando, especialmente nos momentos mais difíceis.

Agradeço a meus pais, Francisco e Sônia pelo apoio nessa empreitada.

Ao amigo e orientador Renato de Moraes, por ter aceitado me orientar nesse projeto que começou com a partir de duas amostras de “presente”.

Ao colega de CPRM e Prof. Frederico Meira Faleiros, pela disposição demonstrada da busca por uma área alvo de estudo, por me apresentar a região de Peruíbe e pela ajuda na fase final do projeto.

Aos amigos Bruna, Renato e Darwin, por terem se tornado parte da nossa família.

Aos Professores Adriana Alves, Rogério Guitarrari Azzone, Gergely Szabó, Lucelene Martins, Silvio Farias Vlach e aos colegas da pós-graduação pela ajuda e discussão de assuntos petrológicos;

Ao pessoal da gráfica, em especial Henrique e Claudionor sempre solícitos para ajudar com as cópias dos trabalhos e apostilas;

Aos funcionários do instituto, entre eles Katerine e Alexandre da Seção de Pós-graduação, Marcos e Leandro (microsonda) Angélica (petrografia), Isaac (MEV), Valter, Solange e Luiza (CPGEO) e ao pessoal do laboratório de química e da laminação.

À equipe do laboratório de microsonda eletrônica da UFRGS, Prof. Dra. Márcia Gomes e Susan.

Aos amigos que sempre estiveram presentes: André, Elder, Graziani, Gustavo, Fábio, Felipe, Júlio, Leopoldo e Rafael, Camila e Maria Elisa.

Gostaria de agradecer a todos os meus colegas e superiores da CPRM - Serviço Geológico do Brasil, pois o meu doutorado e minha ida ao Canadá só foram possíveis devido à colaboração e à confiança de todos. Dentre esses faço um agradecimento especial aos colegas da Gerência de Geologia e Recursos Minerais (GEREMI) da Superintendência Regional de São Paulo (SUREG-SP), Elizete Domingues Salvador, José Carlos Garcia Ferreira (Diretor de Geologia e Recursos Minerais), Dr. Luiz Carlos da Silva e Dr. Roberto Ventura dos Santos (ex-Diretor de Geologia e Recursos Minerais) e ao Dr. Manoel Barretto (ex-diretor presidente).

Agradeço também a toda equipe do Grupo de Pesquisa em Recursos Minerais da Université du Quebec à Chicoutimi (Canadá), em especial Charley Duran, Luiz Salim, Marko Prasek, Nadège Samalens e Pia Plese.

Aos Professores Dr. Edward W. Sawyer e Dra. Sarah-Jane Barnes, cuja dedicação à pesquisa, generosidade e confiança em meu trabalho permitiu um grande avanço em meu conhecimento científico.

Ao Dr. Chris McFarlane e ao técnico Brandon Boucher do laboratório de LA-ICP-MS da University of New Brunswick (Canadá).

Agradeço ao Instituto Florestal da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo pela autorização e apoio durante as etapas de campo na Estação Ecológica Juréia – Itatins.

Faço um agradecimento especial ao corpo técnico do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), do Programa Ciências Sem Fronteiras (CsF) por todo suporte logístico e financeiro concedido – processo 206521/2014-6.

Agradeço a FAPESP pelo suporte financeiro (processos 2013/04007-0 e 2016/22627-3).



## RESUMO

No presente trabalho são apresentados os resultados da modelagem da fusão parcial a partir de composições químicas ideais de grauvaca, folhelho e granodiorito visando estabelecer uma metodologia para o estudo de rochas da fácies granulito submetidas à fusão parcial usando o programa THERMOCALC. Os resultados são comparados à rochas ortoderivadas do Complexo Itatins, Faixa Ribeira Meridional, SP. O complexo está localizado na junção dos terrenos tectono-estratigráficos Embu, Curitiba e Costeiro e é constituído por dois tipos principais de rochas: (i) biotita granulito félsico e (ii) paragnaisse migmatítico estromático, ambos apresentando alta taxa de fusão parcial, registrado pela alta proporção de leucossoma observado no campo e com a presença frequente de *rafts* de granulito máfico.

A estimativa da variação composicional do líquido anatético e das condições de metamorfismo foi feita através da modelagem metamórfica usando o programa THERMOCALC. As composições do líquido anatético e do resíduo correspondente foram calculadas a partir de duas composições ideais de rochas sedimentares. Essa técnica permitiu avaliar como ocorre a variação composicional dos produtos de fusão parcial ao longo do aquecimento isobárico em duas condições: sistema aberto (com extração do líquido anatético e modificação da composição modelada) e sistema fechado (com acumulação do líquido anatético e sem modificação da composição modelada). Os resultados indicam que o líquido gerado possui composição granodiorítica a granítica, com teores de K<sub>2</sub>O aumentando progressivamente conforme K-feldspato e biotita são consumidos. No sistema aberto, o K-feldspato permanece estável em um intervalo maior de temperatura. As associações minerais de fácies granulito variam de acordo com o protolito, tendo ortopiroxênio como fase diagnóstica para a grauvaca. No caso do folhelho, não há uma fase que seja diagnóstica no intervalo *P-T* estudado, pois ortopiroxênio é estável só em condições de pressão inferiores a 0,3 GPa. Porém no sistema aberto, a presença de espinélio marca as condições de metamorfismo granulítico.

A alta taxa de fusão parcial registrada e os indícios de que houve extração do líquido anatético indicam que a composição do protolito não foi preservada, sendo necessária a adoção de uma composição ideal. A partir de critérios petrográficos foi selecionada a composição de um granodiorito (material de referência JG-1 – Imai *et al.*, 199) para a modelagem. Como a composição dos minerais analisados no biotita granulito félsico eram distintas daquelas geradas no modelo, foi feito um ajuste na razão  $X_{Fe}$  ( $Fe^{2+}/Fe^{2+}+Mg$ ) da composição modelada de 0,550 para 0,649. As condições *P-T* de pico metamórfico para o Complexo Itatins são de  $0,86 \pm 0,14$  GPa e  $858,5 \pm 13,5$  °C, o que corresponde a um evento dínamo-termal ocorrido na base da

crosta continental, com geoterma aparente de  $25 \text{ }^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ . Como a quantidade de líquido anatético necessária para a formação da proporção de leucossoma observado no campo é maior do que aquela prevista pelo modelo (com uma diferença de aproximadamente 40%), interpreta-se que houve a entrada de aproximadamente 7,21 mol. % de  $\text{H}_2\text{O}$  na rocha (cerca de 2,0 % em peso), o que tornou a composição mais fértil para geração de líquido anatético. As composições de líquido anatético e do resíduo modeladas possuem valores inferiores de  $\text{K}_2\text{O}$  e de  $X_{\text{Fe}}$  e superiores de  $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$  que as amostras do biotita granulito félsico e do leucossoma. Essa tendência pode ser explicada pela atuação da cristalização fracionada na formação dos leucossomas, fracionando  $\text{K}_2\text{O}$  no líquido e cristalizando plagioclásio na fração não segregada.

Dados de ETRs e U-Pb em zircão indicam que os núcleos tem assinatura ígnea e foram formados durante o Paleoproterozoico, entre 2.158 e 2.139 Ma (intercepto superior), com idade concórdia de  $2.137,2 \pm 4,6$  Ma. As bordas sobrecrecidas apresentam padrão ETR leves sem anomalia negativa de Pr e Nd, a qual é descrita na literatura como relacionada a recristalização em ortognaisses. Dados U-Pb nas bordas do zircão forneceram resultados entre 628 e 594 Ma (intercepto inferior), com idade concórdia  $628,2 \pm 4,6$  Ma.

Os resultados obtidos para o biotita granulito félsico permitem a interpretação de que o Complexo Itatins possa ser correlacionado ao Complexo Serra Negra, integrante do Cráton Luis Alves. Dessa forma o Complexo Itatins corresponderia à margem do cráton, retrabalhada no Neoproterozoico, durante a colagem de terrenos que consolidou o continente Gondwana Ocidental.

## ABSTRACT

This thesis presents the results of metamorphic modeling of the partial melting of ideal bulk compositions of graywacke, shale, and granodiorite, to establish a methodology for the study of granulite facies rocks using the software THERMOCALC. The results are compared to ortho-derived rocks from Itatins Complex, Southern Ribeira Belt, State of São Paulo. The complex is located at the junction of the tectonostratigraphic terranes Embu, Curitiba, and Costeiro, being composed of two main types of rocks: (i) biotite felsic granulite and (ii) stromatic migmatite paragneiss. Both rocks show a high degree of partial melting, marked by the widespread presence of leucosome, and frequent occurrence of rafts of mafic granulite.

The estimated variation of the composition of the anatectic melt and the calculation of the P-T conditions of the metamorphism were calculated using THERMOCALC. The compositions of the anatectic melt and the residue counterpart were calculated for two ideal compositions of sedimentary rocks. This approach allowed the evaluation of how the composition of the products from partial melting changes during an isobaric heating path in two scenarios: open-system (with the extraction of the anatectic melt and modification of the bulk composition) and closed-system (with the accumulation of the anatectic melt and no changes in bulk composition). The results indicate the anatectic melt has granodiorite to granite composition, with increasing content of K<sub>2</sub>O, as melting reactions consume K-feldspar and biotite. In open-system, K-feldspar becomes stable up to higher temperatures. The mineral assemblage of granulite facies metamorphism changes in response to the protolith, with orthopyroxene as the main phase of the graywacke bulk composition. For the shale bulk composition, there is not a diagnostic phase for the P-T interval modeled, as orthopyroxene is stable only at pressure below 0.3 GPa. However, for the open-system, the presence of spinel marks the conditions for granulite facies metamorphism.

The high degree of partial melting recorded in the rocks of Itatins Complex and the indications of the extraction of the anatectic melt suggest a modification of the protolith's bulk composition. Because of this modification, it is necessary to adopt an ideal composition (reference material JG-1, from a granodiorite), selected by petrographic criteria. As the composition of the minerals from the biotite felsic granulite is different from those calculated modeled from the JG-1 bulk composition, the  $X_{\text{Fe}}$  ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}$ ) was modified from 0.550 to 0.649. The P-T conditions of the metamorphic peak are  $0.86 \pm 0.14$  GPa, and  $858.5 \pm 13.5$  oC, which corresponds to a dynamo-thermal event occurred in the lower continental crust, with an apparent geotherm of 25 oC.km<sup>-1</sup>. As the proportion of anatectic melt necessary to generate

the amount of leucosome observed in the outcrops is higher than the predicted by the model (a difference of at least 40 %), we interpret that an influx of 7.21 mol. % of H<sub>2</sub>O (around 2.0 wt. %) in the rock, making it more fertile. The composition of the modeled anatectic melt and residue shows lower values for K<sub>2</sub>O and XFe and higher values of CaO+Na<sub>2</sub>O than the samples of biotite granulite and leucosome. The fractional crystallization can explain this difference in compositions during leucosome formation, with the fractionation of K<sub>2</sub>O from the anatectic melt during plagioclase crystallization in the non-segregated part.

REE and U-Pb data in zircon indicate that the core of the crystals had an igneous signature and was formed during the Paleoproterozoic, 2158-2139 Ma (superior intercept), with concordia age of  $2137.2 \pm 4.6$  Ma. The overgrowth rims present LREE composition without the negative anomaly in Pr and Nd, which is related to zircon recrystallization in orthogneiss. Dates from zircon rims are in the interval of 628-594 Ma (lower intercept), with concordia age of  $628.2 \pm 4.6$  Ma.

The results from biotite felsic granulite allow the assumption that the Itatins Complex can be related to the Serra Negra Complex, part of the Luis Alves Craton. In this scenario, the Itatins Complex could represent the margin of the craton, reworked in the Neoproterozoic, during the collage of terranes in the assembly of West Gondwana.

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Localização da área de estudo (retângulo negro) e principais rodovias do sudeste do Estado de São Paulo. (A) Mapa com limites estaduais indicando a posição da figura (B) no estado de São Paulo. Fonte: figura elaborada pelo autor. ....   | 27 |
| Figura 2: Mapa das Unidades de Conservação entre os municípios de Peruíbe e Iguape. Abreviações: EE – Estação Ecológica; PE – Parque Estadual; RDS- Reserva de Desenvolvimento Sustentável; RVS – Refúgio de Vida Silvestre. Os números destacados indicam os municípios de Peruíbe (1), Miracatu (2) e Iguape (3). Fonte: modificado de Instituto Florestal (2009). ....  | 28 |
| Figura 3: Mapa geotectônico simplificado da porção centro-sudeste-sul do Brasil, destacando as províncias reconhecidas. Linhas tracejadas indicam limite aproximado das faixas móveis que compõem a Província Mantiqueira. Mapa de detalhe da área de estudo – ver figura 5. Fonte: figura elaborada pelo autor. ....  | 36 |
| Figura 4: Mapa geotectônico simplificado da Faixa Ribeira entre os estados do Paraná e Rio de Janeiro e unidades geotectônicas adjacentes. Legenda: 1- depósitos sedimentares recentes; Faixa Ribeira: 2 - Bacia de Castro, 3 - Complexo Costeiro, 4 - Domínio Apiaí (Apiaí, Embu e São Roque), 5 - Terreno Curitiba e 6 - Núcleos cratônicos (Luís Alves – PR/SP e Cabo Frio – RJ); Faixa Brasília: 7 - Faixa Brasília Meridional, 8 - Terreno Juiz de Fora; 9 - Mantiqueira; 10 - Cráton São Francisco. Fonte: modificado de Campanha e Sadowski (1999). ....  | 37 |
| Figura 5: Mapa geotectônico da Faixa Ribeira Meridional no Sudeste do Estado de São Paulo, destacando as principais unidades geotectônicas aflorantes na região e principais zonas de cisalhamento. Fonte: modificado de Perrotta <i>et al.</i> (2005). ....   | 38 |
| Figura 6: Mapa geológico simplificado do Complexo Itatins. Fonte: modificado de SILVA <i>et al.</i> , 1981. ....   | 45 |
| Figura 7: Compartimentação tectônica de acordo com Hasui <i>et al.</i> , (1980) para os Estados do Paraná e São Paulo. Faixas de dobramentos neoproterozoicas: 1 - Apiaí, 2 - São Roque; Maciços Medianos: 3 - Joinville, 4 - Guaxupé; Faixas móveis retrabalhadas parcialmente durante o Brasiliano: 5 - Formação Setuva (parte do Terreno Curitiba), 6 - Complexos Amparo e Pinhal. Fonte: modificado de DAITX, 1996. ....   | 48 |
| Figura 8: Visão geral do biotita granulito félsico mostrando a distribuição e morfologia do leucossoma nos afloramentos CI-013 (A, B e C) e CI-054 (D). (A) visão geral do Bt granulito com enclaves de granulito máfico (em cinza escuro) e com leucossoma formando as seguintes estruturas: (a) veios paralelos à foliação / bandamento; (b) pequenas lentes isoladas caracterizando fusão <i>in-situ</i> (estrutura tipo <i>patch</i> – fig. 7); (c) veios cortando a foliação da rocha; (d) veios de leucossoma envolvendo enclaves de granulito máfico; (e) domínios com acumulação de leucossoma. Fonte: figura elaborada pelo autor. .... | 60 |
| Figura 9: Destaques das estruturas formadas pelo leucossoma. (A) veios de leucossoma paralelos e dobrados segundo à foliação (afloramento CI-013); (B) veios de leucossoma cortando a estrutura, com cristais de plagioclásio cinza, orientados segundo fluxo do líquido anatético (afloramento CI-013); (C) Dique granítico que alimenta bolsão diatexitico, cortando a estrutura do biotita granulito félsico (afloramento CI-054). Fonte: figura elaborada pelo autor. ....   | 61 |
| Figura 10: Fotomicrografias das feições texturais observadas em cristais de ortopiroxênio no Bt granulito. Abreviações minerais utilizadas foram: amp (anfíbólio); ap (apatita), bt (biotita), pl (plagioclásio), opx (ortopiroxênio) e qtz (quartzo). (A) Cristal de ortopiroxênio envolvendo quartzo – nicóis paralelos. (B) Biotita e anfíbólio substituindo o ortopiroxênio – nicóis paralelos; (C) Limites irregulares de cristal de ortopiroxênio em contato com quartzo indicando a mobilidade do limite de grão do quartzo – nicóis cruzados e analisador. Fonte: figura elaborada pelo autor. ....                                      | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 11: Fotomicrografias das feições texturais indicativas da ocorrência de fusão parcial, presença de resquícios de líquido anatético e cristalização a partir do líquido anatético no Bt granulito. Abreviações minerais utilizadas foram: bt (biotita), pl (plagioclásio) e qtz (quartzo). (A) Limite irregular de cristal de plagioclásio com pequeno ângulo interfacial (setas) que são interpretados como resultado da infiltração do líquido anatético – nicóis cruzados e analisador. (B) Filme de quartzo (laranja) com setas indicando limites arredondados interpretados como resultado de reequilíbrio textural com aumento do ângulo interfacial – nicóis cruzados e analisador. Fonte: figura elaborada pelo autor.....   | 63 |
| Figura 12: Feições texturais nos leucossomas do biotita granulito félsico. Abreviações minerais usadas foram: bt (biotita), pl (plagioclásio), qtz (quartzo) e zircão (zrn).(A) Cristal de plagioclásio com bordas arredondadas ao lado de quartzo; (B) Cristal de plagioclásio com bordas arredondadas (alto ângulo interfacial) e bordas pontiagudas (baixo ângulo interfacial) em contato com quartzo, indicando reequilíbrio textural parcial; (C) Cristais de zircão associados a inclusões/exsoluções de feldspato potássico no plagioclásio. Fonte: figura elaborada pelo autor. ....   | 65 |
| Figura 13: Feições texturais nos leucossomas do biotita granulito félsico. Abreviações minerais usadas foram: bt (biotita), pl (plagioclásio), opx (ortopiroxênio), qtz (quartzo) e zrn (zircão). (A) Cristal euédrico de plagioclásio cinza com grande quantidade de pequenas inclusões além de uma inclusão prismática de zircão; (B) Veios tonalíticos (marcados pelas linhas tracejadas em vermelho) composto por biotita + plagioclásio + quartzo, cortando leucossoma; (C) Bolsão de leucossoma de composição tonalítica onde cristais de plagioclásio e quartzo exibem diferentes formas; alguns são anédricos com bordas com embainhamento, enquanto outros exibem contatos retos indicando alto grau de reequilíbrio textural. Fonte: figura elaborada pelo autor ..... | 66 |
| Figura 14: Feições de campo observadas no Paragnaisse migmatítico estromático. (CI-017). (A) Visão geral da estrutura bandada da rocha. (B) Região de acumulação de leucossoma com fragmentos do granulitos máfico. Fonte: figura elaborada pelo autor.....  | 68 |
| Figura 15: Feições de campo observadas no Sillimanita-granada-bitotita diatexito. (A) Diques hololeucocráticos intrusivos no diatexito, exibindo feições indicativas de colocação em condição dúctil-rúptil. (B) Detalhe de região composta por leucossoma e neossoma residual constituído por porfiroblastos de granada envolvidos biotita + sillimanita. Fonte: figura elaborada pelo autor. ....  | 69 |
| Figura 16: Feições texturais observadas em porfiroblastos de granada. (A) Aspecto geral de porfiroblasto de granada, rico em inclusões elipsoidais de quartzo com a associação quartzo + biotita + sillimanita envolvendo o cristal – nicóis paralelos. (B) Inclusão em granada constituída por quartzo e cristais prismáticos de sillimanita – nicóis cruzados e analisador. (C) Associação retrometamórfica composta por plagioclásio + quartzo + sillimanita + opacos + espinélio, substituindo cristal de granada. – nicóis paralelos. Fonte:figura elaborada pelo autor.....  | 70 |
| Figura 17: feições texturais em granada da amostra CI-046. (A) Visão geral de porfiroblasto de granada com inclusões de quartzo, plagioclásio e biotita. Ao redor do cristal ocorre uma fina coroa composta por plagioclásio e biotita – nicóis paralelos. (B) Visão geral do pseudomorfo de granada – nicóis paralelos. (C) Detalhe de pseudomorfo de granada constituído pela associação cordierita + biotita + opacos + plagioclásio + quartzo – nicóis cruzados e analisador. Fonte: figura elaborada pelo autor. ....   | 72 |
| Figura 18: Fotomicrografias de seções delgadas da unidade de diatexito. (A) Detalhe de inclusão de espinélio esverdeado em cristal de plagioclásio – nicóis paralelos. (B) detalhe das inclusões de sillimanita e quartzo em cristal de plagioclásio – nicóis cruzado e analisador. Figura elaborada pelo autor.....   | 73 |
| Figura 19:Visão geral das ocorrências de granulito máfico no biotita granulito félsico (A e B) e no paragnaisse migmatítico estromático (C). O leucossoma pode intrudir partes dos <i>rafts</i> de granulito máfico (A) ou fragmentá-lo (B). Em (C) observa-se granulito máfico formando camadas de espessura decimétrica no migmatitos praderivado. ....  | 75 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 20: Feições texturais do granulitos máfico. (A) Cristal de hornblenda com inclusões elipsoidais de quartzo e prismática de mineral opaco – nicóis paralelos. (B) Cristal de hornblenda sendo substituído por biotita + ortopiroxênio. Notar o crescimento de ortopiroxênio na clivagem da biotita – nicóis paralelos. (C) Cristal de ortopiroxênio com contatos retos a curvos, envolvendo parcialmente plagioclásio. Notar o contato parcialmente irregular entre hornblenda e plagioclásio- nicóis paralelos. Fonte: figura elaborada pelo autor.....   | 77 |
| Figura 21: Feições texturais do granulitos máfico. (A) Cristal de plagioclásio com exsoluções/inclusões elipsoidais e retangulares – nicóis cruzados e analisador. (B) Detalhe para filmes de quartzo (indicados pelas setas vermelhas) no limite dos cristais de hornblenda. Notar baixo ângulo interfacial, sugerindo cristalização a partir do líquido anatético – nicóis cruzados e analisador. (C) Cristal de granada parcialmente substituído com coroa de plagioclásio (interna) e clinopiroxinênio + hornblenda + opacos (externa) – nicóis paralelos. Fonte: figura elaborada pelo autor..... | 78 |
| Figura 22: Diagrama de variação de $Fe^{+3} + Ti$ vs. $Al_{total}$ dos cristais de plagioclásio do biotita granulito félsico e do leucossoma. As análises com maiores valores de $Fe^{+3}+Ti$ correspondem aos cristais de coloração cinza-escuro, ricos em inclusões opacas. Fonte: figura elaborada pelo autor.....  | 88 |
| Figura 23: Diagramas $\square Nd(t)$ vs. T (Ma) das rochas migmatíticas da Faixa Ribeira Meridional. No diagrama nota-se a sobreposição dos campos dos dados do Complexo Atuba (roxo) e Serra Negra (cinza) e tendência de evolução de Nd similar entre o biotita granulito félsico e as rochas do com do Complexo Serra Negra. Fonte de dados: Complexo Atuba (Sato <i>et al.</i> , 2003; Faleiros; Morais; Costa, 2012 e Faleiros; Pavan, 2013); Complexo Serra Negra (Faleiros; Pavan, 2013). Fonte: figura elaborada pelo autor.....   | 94 |





## Índice de tabelas

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1: Composições dos litotipos usados na modelagem metamórfica em % peso (dado original) e % molar normalizada a 100% usada no THERMOCALC.....        | 81  |
| Table 2: U-Pb LA-ICP-MS data from zircon grains of biotite granulite, sample CI-013-RA. Age estimates were calculated with 95 % confidence. ....           | 236 |
| Tabela 3: U-Pb LA-ICP-MS data from zircon grains of biotite granulite, sample CI-019-RA. Age estimates were calculated with 95 % confidence. ....          | 237 |
| Tabela 4: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada.....  | 246 |
| Tabela 5: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 4.....   | 247 |
| Tabela 6: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 5.....   | 248 |
| Tabela 7: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 6.....   | 249 |
| Tabela 8: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 7.....   | 250 |
| Tabela 9: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 8.....   | 251 |
| Tabela 10: Tabela com os resultados da contagem modal das amostras selecionadas.....   | 253 |
| Tabela 11: Tabela com os resultados da contagem modal das amostras selecionadas. Continuação da tabela 10.....   | 254 |
| Tabela 12: Concentração dos principais óxidos (% peso) das amostras representativas de cada litotipo determinada através de Fluorescência de Raios-X. .... | 256 |
| Tabela 13: Concentração de elementos menores (ppm) das amostras representativas de cada litotipo determinada através de Fluorescência de Raios-X. ....     | 257 |
| Tabela 14: Concentração de elementos traço (ppm) das amostras representativas de cada litotipo determinada através espectrometria de massa (ICP-MS).....   | 258 |
| Tabela 15: Análises químicas de biotita da amostra CI-011-RD (biotita granulito félsico) .....   | 260 |
| Tabela 16: Análises químicas de biotita na amostra CI-013-RA (biotita granulito félsico) .....   | 261 |
| Tabela 17: Análises químicas de biotita na amostra CI-019-RA (biotita granulito félsico) .....   | 262 |
| Tabela 18: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-011-RD (biotita granulito félsico) ....  | 263 |
| Tabela 19: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-012-RB (leucossoma) .....  | 264 |
| Tabela 20: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-012-RB (leucossoma) - continuação da tabela 19.....  | 265 |
| Tabela 21: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-013-RC (biotita granulito félsico)....   | 265 |
| Tabela 22: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-019-RA (biotita granulito félsico) ....  | 266 |
| Tabela 23: Análises químicas de clinopiroxênio da amostra CI-013-RC (biotita granulito félsico)...   | 267 |
| Tabela 24: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-011-RD (biotita granulito félsico).....   | 268 |
| Tabela 25: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-011-RD (Bt granulito) – continuação da tabela 24.....   | 269 |
| Tabela 26: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-012-RB (leucossoma).....  | 269 |
| Tabela 27: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-012-RB (leucossoma) – continuação da tabela 26.....   | 270 |
| Tabela 28: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-013-RB (biotita granulito félsico).....   | 271 |
| Tabela 29: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-013-RB (biotita granulito félsico) - continuação da tabela 28.....                              | 272 |
| Tabela 30: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-013-RC (biotita granulito félsico).....   | 273 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 31: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-019-RA (biotita granulito félsico).....  | 274 |
| Tabela 32: Razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ em rocha total .....   | 275 |
| Tabela 33: Análises isotópicas em zircão da amostra CI-011-RD (biotita granulito félsico).....  | 277 |
| Tabela 34: Análises isotópicas em zircão da amostra CI-013-RA (biotita granulito félsico).....  | 278 |
| Tabela 35: Análises isotópicas de zircão da amostra CI-019-RA (biotita granulito félsico).....  | 279 |
| Tabela 36: Análises isotópicas “ <i>in-situ</i> ” em zircão por LA-ICP-MS em biotita granulito félsico (CI-011-RD, 013-RA e 019-RA) e leucossoma (CI-012-RA)..... | 280 |

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| Capítulo I – Introdução .....  | 23 |
| 1 Apresentação da tese .....   | 23 |
| 2 Introdução ao tema .....   | 24 |
| 3 Objetivos e Justificativas .....   | 26 |
| 4 Localização .....  | 27 |
| Capítulo II – Metodologia analítica .....  | 29 |
| 1 Pesquisa Bibliográfica .....   | 29 |
| 2 Levantamento Geológico .....   | 29 |
| 3 Cartografia Geológica .....  | 29 |
| 4 Análise petrográfica .....   | 30 |
| 5 Litogeoquímica .....   | 30 |
| Fluorescência de Raios-X e Espectrometria de massa em plasma de indução acoplada .....                                   | 30 |
| 6 Química Mineral .....  | 30 |
| Microsonda Eletrônica .....  | 31 |
| 7 Geocronologia e Geologia Isotópica .....   | 31 |
| Análises isotópicas U-Pb por espectrometria de massa em plasma de indução acoplada por ablação a laser (LA-ICP-MS) ..... | 31 |
| Geoquímica isotópica (Rb-Sr e Sm-Nd em rocha total) .....  | 32 |
| 8 Modelagem metamórfica e termobarometria .....  | 33 |
| Pseudosseções .....  | 33 |
| Geotermobarometria otimizada .....   | 33 |
| Geotermobarometria via distribuição catiônica .....  | 34 |
| Capítulo III – Apresentação dos resultados .....   | 35 |
| 1 Contexto Geológico .....   | 35 |
| Faixa Ribeira .....  | 36 |
| Terreno Embu .....   | 38 |
| Terreno Curitiba .....   | 40 |
| Terreno (Cráton) Luís Alves .....  | 41 |
| Terreno Paranaguá .....  | 42 |
| Terreno Costeiro .....   | 43 |
| Contexto Geológico local .....   | 43 |
| Considerações sobre as referências consultadas .....   | 46 |
| Terminologia tectônica .....   | 46 |
| Nomenclatura estratigráfica .....  | 47 |
| 2 Migmatitos .....   | 50 |

|  |     |
|--|-----|
| Definições e constituintes .....   | 50  |
| Estruturas e nomenclatura.....   | 53  |
| Geoquímica de Migmatitos.....  | 55  |
| 3 Confeção dos Mapas.....  | 58  |
| 4 Caracterização Litológica.....   | 59  |
| Biotita granulito félsico.....   | 59  |
| Paragnaisse migmatítico estromático.....   | 67  |
| Neossoma mesocrático.....  | 68  |
| Leucossoma.....  | 73  |
| Neossoma melanocrático .....   | 74  |
| Granulito máfico.....  | 74  |
| 5 Modelagem Metamórfica e termobarometria.....   | 79  |
| Modelagem metamórfica .....  | 79  |
| Capítulo IV – Considerações Finais .....   | 83  |
| 1 Discussão dos resultados.....  | 83  |
| Modelagem da fusão parcial .....   | 83  |
| Modelagem da fusão parcial no Complexo Itatins .....   | 86  |
| Implicações geotectônicas.....   | 91  |
| 2 Conclusões .....   | 95  |
| 3 Referências Bibliográficas .....   | 98  |
| Capítulo V – ANEXOS .....  | 117 |
| Manuscritos Científicos.....   | 117 |
| The composition of anatectic melt and its complementary residue by forward modelling of closed-system and open-system melting using THERMOCALC .....             | 119 |
| Partial melting of granodiorite, a common igneous rock: insights from Ediacaran granulite-facies metamorphism in the Itatins Complex, Ribeira Belt, Brazil ..... | 179 |
| Capítulo VI – APÊNDICES.....   | 239 |
| APÊNDICE A – MAPA GEOLÓGICO.....   | 241 |
| APÊNDICE B – MAPA DE PONTOS.....   | 243 |
| APÊNDICE C – tabela de Descrições petrográficas .....  | 245 |
| APÊNDICE D – Tabela de contagem de pontos.....   | 253 |
| APÊNDICE E - Química de rocha total .....  | 255 |
| Determinação de elementos maiores, menores e traços.....   | 255 |
| APÊNDICE F - Química mineral.....  | 259 |
| Análises por microsonda eletrônica (EPMA) .....  | 259 |
| APÊNDICE G - Análises isotópicas .....   | 275 |

|  |     |
|--|-----|
| Análises isotópicas Rb-Sr e Sm-Nd.....   | 275 |
| Análises isotópicas com espectrometria de massa em plasma de indução acoplada (multi-coletor) por ablação a laser (LA-ICP-MS)..... | 276 |



# CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

## 1 APRESENTAÇÃO DA TESE

Esta tese apresenta os resultados da modelagem do processo de fusão parcial em sistemas aberto e fechado, focando na variação composicional do líquido anatético gerado e seu resíduo correspondente. Dentro do escopo do projeto abordou-se o estudo petrológico do Complexo Itatins, no Sudeste do Estado de São Paulo, visando determinar as condições *P-T* e idade do metamorfismo de fácies granulito que afetou o complexo.

A tese está dividida em seis capítulos. No capítulo I (Introdução) é apresentado o tema da tese, objetivos e justificativas e a localização da área de estudo. No capítulo II (Metodologia Analítica) é feita uma breve descrição das técnicas analíticas adotadas. No capítulo III (Apresentação dos Resultados) constam: (i) revisão bibliográfica sobre o contexto geológico (regional e local), com uma visão crítica da nomenclatura geotectônica e litológica adotada para as rochas da região; (ii) síntese do tema migmatitos; (iii) caracterização petrográfica dos três litotipos predominantes no Complexo Itatins; e (iv) apresentação da modelagem termodinâmica para composições ideais de rochas. O capítulo IV (Discussão dos resultados e conclusão) apresenta a discussão integrada dos resultados obtidos, seguida das conclusões. No capítulo V (Anexos), são apresentados os seguintes manuscritos redigidos para o projeto: ANEXO I - manuscrito intitulado: “*The composition of anatetic melt and its complementary residue by forward modelling of closed and open-system melting using THERMOCALC*”, submetido ao *Journal of Metamorphic Geology*, que discute a variação composicional do líquido anatético e do respectivo resíduo a partir de processos de fusão parcial em sistemas aberto e fechado em protolitos sedimentares (grauvaca e pelito); ANEXO II - manuscrito intitulado: “*Partial melting of granodiorite, a common igneous rock: insights from Ediacaran granulite-facies metamorphism in the Itatins Complex, Ribeira Belt, Brazil*”, a ser submetido ao *Journal of Petrology*, que aborda a caracterização e modelagem metamórfica da unidade ortoderivada do Complexo Itatins. No capítulo VI (Apêndices) constam mapa geológico na escala 1:100.000 (apêndice A), mapa de localização dos afloramentos descritos e compilados no estudo (apêndice B), dados de petrografia (apêndices C e D) e tabelas de análises químicas de elementos maiores, menores e traços de rocha total (apêndice E), de elementos maiores em minerais (apêndice F) e razões isotópicas Rb-Sr e Sm-Nd em rocha total e análises U-Pb em zircão (apêndice G).

## 2 INTRODUÇÃO AO TEMA

A importância do estudo das rochas metamórficas de alto grau reside na conexão que sua gênese, envolvendo os processos metamórficos, de fusão e tectônicos, tem com a geração e transformação da crosta continental. Os migmatitos e granulitos possuem uma característica muito importante e que representa um desafio científico para seu estudo, já que durante o processo de fusão parcial ao qual estas rochas foram expostas, comumente está associada deformação, responsável pela segregação e extração do líquido gerado. Por consequência ocorre a modificação tanto da composição da rocha como da sua estrutura original e a partir deste momento, se torna extremamente complexo recuperar a história evolutiva dessas rochas.

Com a evolução dos métodos para investigação da Petrologia Metamórfica nos últimos anos, tais como aplicação de técnicas analíticas *in situ* e uso de programas acoplados a bancos de dados termodinâmicos, permitindo integrar informações provenientes da evolução metamórfica, é possível elaborar cenários mais detalhados para compreensão das condições  $P$ - $T$  de metamorfismo, sua relação com o tempo, caminamento metamórfico, relações com a fusão parcial e deformação.

Os trabalhos pioneiros de England e Thompson (1984) e Thompson e England (1984) trouxeram grande avanço para modelagem das trajetórias  $P$ - $T$ - $t$  de terrenos metamórficos. A partir destes trabalhos foi possível avaliar a influência e interação dos parâmetros envolvidos na geração e evolução do metamorfismo, tais como taxa de erosão, velocidade de soterramento, produção e fluxo de calor, taxa de aquecimento, etc, em diferentes ambientes tectônicos, incluindo zonas de subducção ou de colisão continental. Com a modelagem tornando-se cada vez mais sofisticada, foi possível combinar modelamento metamórfico e tectônico (*e.g.* JAMIESON *et al.*, 2004; JAMIESON; BEAUMONT, 2011), o que permitiu estudar com maior detalhe como os processos metamórficos evoluem com o tectonismo.

O surgimento de bancos de dados termodinâmicos internamente consistentes, acoplados a programas como THERMOCALC (HOLLAND; POWELL, 1998) ou Perple\_X (CONNOLY, 1990), tornou possível o cálculo de condições  $P$ - $T$ , grades petrogenéticas em diversos sistemas químicos e pseudosseções (POWELL; GUIRAUD; WHITE, 2005). Esse avanço significativo na modelagem metamórfica a tornou dinâmica, sendo que a interpretação textural feita em conjunto com pseudosseções mostra-se uma ferramenta muito poderosa, permitindo o traçado de trajetórias  $P$ - $T$  complexas (JOHNSON; BROWN, 2004). Pode-se também através dessa



ferramenta avaliar como ocorrem variações químicas em minerais e na composição das rochas, e qual o seu efeito na associação mineral resultante.

Complementando a modelagem metamórfica, a determinação da idade do pico metamórfico é possível através da aplicação de métodos geocronológicos em minerais que façam parte da paragênese de mais alta temperatura. O estudo do contexto textural desses minerais, para seleção dos grãos a serem datados isotopicamente com métodos *in situ* (microsonda, LA-ICP-MS ou SHRIMP – MÖLLER; MEZGER; SCHENK, 2000 e MONTEL *et al.*, 1996) ou de alta resolução (datação de mono cristais com ID-TIMS - BALDWIN *et al.*, 2004), veio adicionar o ingrediente que faltava no estabelecimento das trajetórias *P-T-t*, usando grãos passíveis de serem datados em contexto textural conhecido.

No litoral sul de São Paulo, segmento crustal importante expõe rochas da porção média a basal da crosta continental, na região de Miracatu-Peruíbe. Lá é possível investigar os processos envolvidos na formação, deformação, fusão e metamorfismo da crosta continental. O Complexo Itatins é a unidade litoestratográfica que domina a porção costeira na área (SILVA *et al.*, 1981) e representa núcleo granulítico em meio à rochas ígneas e metamórficas. O Complexo Itatins é descrito como constituído por rochas ígneas da série dos charnockitos (Azevedo Sobrinho, 1995) e paragneisses aluminosos, que foram expostos à condições extremas de metamorfismo, para as quais não existem registros, até o momento, nas unidades contíguas. Diversos trabalhos abordando temas distintos (mapeamento geológico, geologia estrutural, petrografia e geoquímica de rocha total, mineral e isotópica) foram feitos na região de Miracatu-Peruíbe (COUTINHO 1971a, 1971b e 1972; GIRARDI; MADUREIRA FILHO; HYPOLITO, 1971; SADOWSKI, 1974; HASUI; CARNEIRO; COIMBRA, 1975; SILVA *et al.*, 1977; SADOWSKI; DIAS-NETO; EGYDIO-SILVA, 1978; SILVA *et al.*, 1981; EGYDIO-SILVA, 1981; EGYDIO-SILVA; TROMPETTE, 1982; KAUL; TEIXEIRA, 1982; DANTAS *et al.*, 1987a e 1987b; GIMENEZ FILHO *et al.*, 1987; FIGUEIREDO *et al.*, 1988; PIKANÇO, 1994; AZEVEDO SOBRINHO, 1995; AZEVEDO SOBRINHO; GIRARDI, 1995; PIKANÇO *et al.*, 1998; PASSARELLI, 2001; PASSARELLI *et al.*, 2004, 2005, 2007, 2011, 2014 e 2016, SORZE; TASSINARI, 2011), porém a formação dos granulitos e migmatitos ainda não foi elucidada com detalhe.

Desta forma, ao aliar técnicas atuais de modelagem metamórfica, química de rocha total e mineral, geoquímica isotópica e geocronologia, foi possível obter informações valiosas na interpretação dos processos petrogenéticos que atuaram na evolução metamórfica das rochas ortoderivadas do Complexo Itatins e, conseqüentemente, na crosta continental.

### 3 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O objetivo do projeto é investigar a formação e transformação das porções média e basal da crosta continental, com o estudo de granulitos e migmatitos, usando como alvo as rochas ortoderivadas do Complexo Itatins (fig. 3 e 4). Com o estudo empreendido, o conhecimento geológico do Complexo Itatins foi melhorado, no que tange a caracterização do metamorfismo de fácies granulito e da fusão parcial associada. Assim, foram determinadas as condições de pico metamórfico, trajetória  $P$ - $T$  e idades isotópicas de grãos de zircão em situações de contexto textural determinado.

Dentre os trabalhos executados na região, que abordaram diretamente ou indiretamente o Complexo Itatins, alguns deles forneceram informações importantes sobre a constituição litológica, estilo estrutural, condições mínimas  $P$ - $T$  para o metamorfismo e idades isotópicas das rochas do complexo. No entanto, ainda existem questões em aberto sobre a evolução petrológica do Complexo Itatins.

A modelagem da evolução metamórfica utilizando pseudosseções permite a obtenção de bons dados para as condições  $P$ - $T$ , já que o método parte da composição química de rocha estudada, não se limitando apenas aos pares de minerais presentes na rocha, premissa básica para o cálculo termobarométrico clássico. É possível também através deste método determinar composições dos minerais e sua variação dentro de intervalo  $P$ - $T$  específico, além de estimar a composição do líquido anatético e da associação residual correspondente. Com a composição química de elementos traço e terras-raras em minerais metamórficos índices, tais como granada e ortopiroxênio, e em zircão e monazita é possível estimar se os minerais a serem datados estiveram em algum momento em equilíbrio com os minerais metamórficos e, assim, estabelecer qual o significado petrológico da idade obtida (e.g. MÖLLER; MEZGER; SCHENK, 2000; KELLY; HARLEY, 2005).

Desta forma, a aplicação destas técnicas analíticas modernas permitiu determinar com maior precisão como ocorreu a evolução petrológica do complexo em questão e qual seu papel na estruturação da Faixa Ribeira Meridional.

## 4 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo localiza-se na microrregião Litoral Sul-Paulista, entre os municípios de Peruíbe, Miracatu e Iguape (fig. 1). O acesso à região a partir de São Paulo pode ser feito utilizando-se as rodovias SP-160 (Imigrantes) ou SP-150 (Anchieta) até a região da Baixada Santista, e depois seguindo para Sudoeste pela rodovia SP-055 (Padre Manuel da Nóbrega) até Peruíbe. Rota alternativa inclui seguir a partir de São Paulo pela rodovia BR-116 (Régis Bittencourt) – sentido Sul, até o km 384, onde se deve tomar a rodovia SP-055 até chegar a Peruíbe.

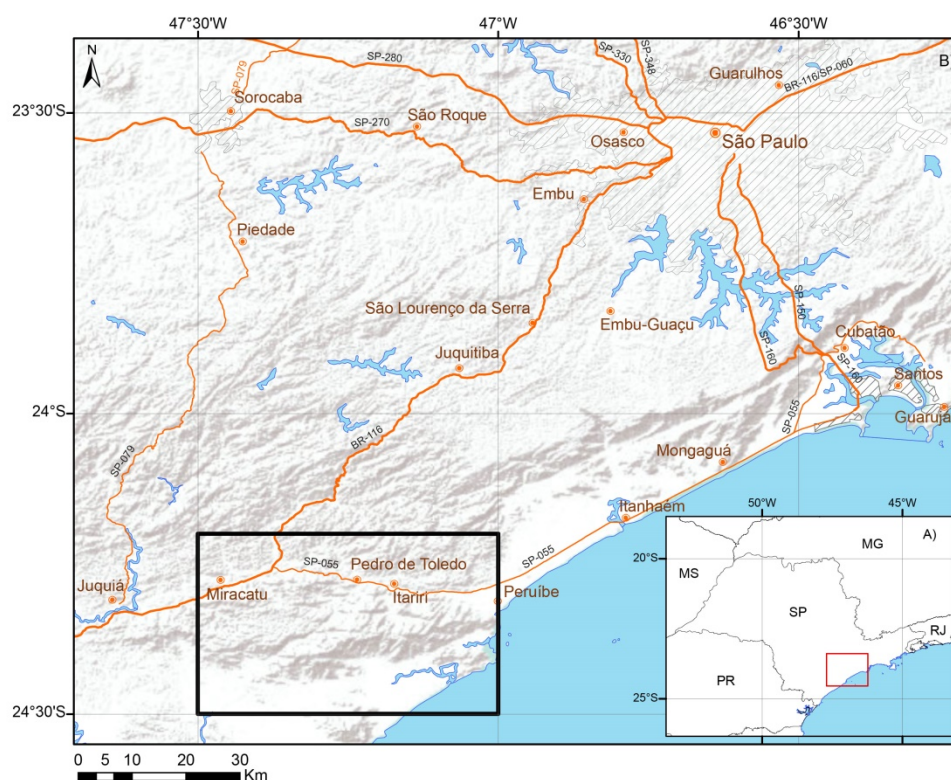


Figura 1: Localização da área de estudo (retângulo negro) e principais rodovias do sudeste do Estado de São Paulo. (A) Mapa com limites estaduais indicando a posição da figura (B) no estado de São Paulo. Fonte: figura elaborada pelo autor.

Em grande parte do Leste e Sul-Paulista, faixas de Mata Atlântica estão sendo preservadas graças a delimitação de Áreas de Proteção Ambiental, sob a jurisdição do Instituto Florestal do Estado de São Paulo. Na área do projeto encontram-se algumas destas Unidades de Conservação da Natureza (UCs), entre elas: Estação Ecológica Juréia-Itatins, Parque Estadual do Itinguçu e as Reservas de Desenvolvimento Sustentável do Despraiado e Barra do Una (fig. 2). Seguindo os protocolos determinados pela Comissão Técnico-Científica do Instituto Florestal, foi feita a solicitação de desenvolvimento de projeto de pesquisa. Uma vez aprovado o projeto, iniciaram-se as atividades de campo na região.

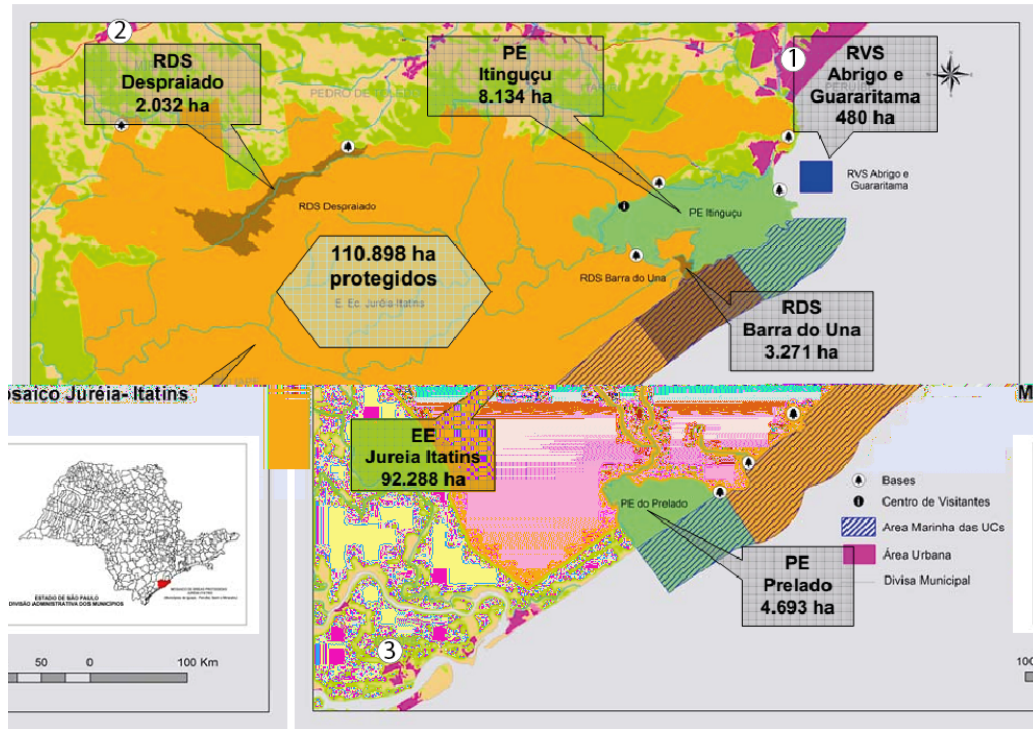


Figura 2: Mapa das Unidades de Conservação entre os municípios de Peruibe e Iguape. Abreviações: EE – Estação Ecológica; PE – Parque Estadual; RDS- Reserva de Desenvolvimento Sustentável; RVS – Refúgio de Vida Silvestre. Os números destacados indicam os municípios de Peruibe (1), Miracatu (2) e Iguape (3). Fonte: modificado de Instituto Florestal (2009).

# **CAPÍTULO II – METODOLOGIA ANALÍTICA**

## **1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA**

O projeto envolveu inicialmente pesquisa bibliográfica nos projetos executados pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, trabalhos prévios de petrografia, química de rocha total e isotópica, visando integrar todas as informações geradas na região de estudo. Posteriormente foram consultados trabalhos sobre os métodos analíticos a serem utilizados no trabalho e as interpretações oriundas de suas aplicações.

## **2 LEVANTAMENTO GEOLÓGICO**

Foram executadas três etapas de trabalho de campo na região de Peruíbe, totalizando cinquenta e quatro afloramentos descritos, para coleta de dados estruturais e amostragem dos diversos litotipos que constituem o Complexo Itatins. Os dados estruturais obtidos foram tratados para reconhecimento das estruturas regionais e locais e posterior correlação com as informações regionais. As amostras coletadas foram usadas na caracterização petrográfica das unidades litológicas e para análises química e isotópica em rocha total e em minerais.

## **3 CARTOGRAFIA GEOLÓGICA**

A base geológica da região foi atualizada sem restringir ao objeto de estudo, tendo sido construída uma base SIG (Sistema de Informações Georreferenciadas) no programa ArcGIS® 10.2. Incluiu-se nesta atualização a revisão da nomenclatura geológica utilizada para as rochas na área de estudo e também a modificação das siglas geológicas adotadas, de acordo com o Código de Nomenclatura Estratigráfica e com o padrão utilizado no Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM. Esta base digital permite acesso mais ágil às informações já existentes da região e às geradas neste projeto. Os mapas gerados são apresentados nos apêndices A e B.

## 4 ANÁLISE PETROGRÁFICA

A descrição petrográfica detalhada das amostras selecionadas (150 lâminas delgadas) foi feita utilizando-se lupa e microscópio óptico com luz transmitida e refletida para caracterização mineralógica e textural dos litotipos do complexo e escolha das amostras que foram analisadas para química de rocha total, mineral e isotópica. Na caracterização dos litotipos foram incorporadas as descrições efetuadas por petrógrafos do Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM nos projetos de mapeamento da região. Nas amostras representativas de cada litotipo foram delimitados campos retangulares nos quais foi feita contagem modal utilizando-se contador semi-automático analógico. As tabelas com a caracterização petrográfica e proporções modais são apresentadas nos apêndices C e D.

## 5 LITOGEOQUÍMICA

### FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X E ESPECTROMETRIA DE MASSA EM PLASMA DE INDUÇÃO ACOPLADA

Ao total foram analisadas quinze amostras por fluorescência de raios-X no Laboratório de Fluorescência de Raios-X do Departamento de Mineralogia e Geotectônica do IGc-USP, utilizando-se espectrômetro de Fluorescência de raios X da marca Philips, modelo PW2400, de acordo com a metodologia descrita em Mori *et al.* (1999). A determinação do teor de FeO foi feito através da técnica de titrimetria no Laboratório de Química do NAP Geoanalítica do IGc-USP. Os elementos traços foram determinados através de Espectrometria de Massa com Plasma Induzido no Laboratório de Química e ICP-OES/MS do NAP Geoanalítica do IGc-USP. O laboratório conta com um espectrômetro do tipo quadrupolo modelo ELAN 6100DRC da PerkinElmer/Sciex, de acordo com a metodologia analítica descrita em Navarro *et al.* (2008). A tabela com a composição química das amostras selecionadas encontra-se no Apêndice E.

## 6 QUÍMICA MINERAL

As análises químicas em minerais foram efetuadas utilizando-se duas técnicas: (i) microsonda eletrônica e (ii) LA-ICP-MS

## MICROSSONDA ELETRÔNICA

As concentrações de óxidos maiores em feldspatos, biotita, granada, ortopiroxênio, ilmenita, magnetita e espinélio foram determinadas através de análise pontual utilizando microsonda eletrônica (Electron Probe Micro-Analyzer – EPMA) em sessões executadas em três laboratórios: (i) Laboratório de Microsonda Eletrônica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), utilizando equipamento da marca CAMECA, modelo SX Five; (ii) Laboratório de Microsonda Eletrônica do NAP Geoanalítica do IGc-USP, usando equipamento da marca JEOL, modelo JXA-8530F – Hyperprobe, Field Emission Electron Probe Microanalyzer (FE-EPMA); e (iii) Laboratório de microanálise do Departamento de Geologia e Engenharia Geológica da Universidade Laval, Québec - Canadá, usando equipamento da marca CAMECA, modelo SX-100. As condições analíticas adotadas para análises pontuais foram de: voltagem de 15kV, corrente de 20nA e spot com 5 µm de diâmetro. Mapas composicionais de granada foram obtidos utilizando-se o equipamento da NAP Geoanalítica do IGc-USP, sob as seguintes condições analíticas: voltagem de 15kV, corrente de 250nA e dwell time de 20 ms.

As análises pontuais foram tratadas utilizando-se planilhas da Open University ([http://www.open.ac.uk/earth-research/tindle/AGT/AGT\\_Home\\_2010/Microprobe-2.html](http://www.open.ac.uk/earth-research/tindle/AGT/AGT_Home_2010/Microprobe-2.html)) e o programa MinPet® (RICHARD, 1995) para cálculo das fórmulas estruturais.

Algumas análises foram selecionadas e tratadas com o programa A-X (<http://www.esc.cam.ac.uk/research/research-groups/research-projects/tim-hollands-software-pages/ax>) para cálculo razões catiônicas e a atividade dos membros-finais de cada fase mineral. Estes dados foram usados na modelagem metamórfica via THERMOCALC. As tabelas com as composições químicas dos minerais analisados são apresentadas no Apêndice F.

## 7 GEOCRONOLOGIA E GEOLOGIA ISOTÓPICA

### ANÁLISES ISOTÓPICAS U-Pb POR ESPECTROMETRIA DE MASSA EM PLASMA DE INDUÇÃO ACOPLADA POR ABLAÇÃO A LASER (LA-ICP-MS)

Para a obtenção de dados geocronológicos foram utilizados métodos analíticos de datação “in-situ” e datação pontual em mounts de concentrado de minerais, empregando as técnicas de LA-ICP-MS (KOŠLER, 2001) em zircão (datação U-Pb).

As análises “in-situ” em zircão foram efetuadas no laboratório de LA-ICP-MS do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de New Brunswick (Canadá). O equipamento utilizado é composto por um sistema de ablasão a laser da Australian Scientific Instruments, modelo Resolution, em célula tipo “S-155-LR” acoplado a um espectrômetro de massa em plasma de indução acoplada (quadropolo) da Agilent, modelo 7700x. As condições analíticas adotadas foram: diâmetro do feixe de 19µm, frequência de 4Hz e energia de operação de 5J.cm<sup>-2</sup>. O tempo de análise foi de 40s de ablasão do material. Os resultados foram calibrados utilizando-se os materiais de referência NIST-610 e NIST-612. A série de isótopos analisado foi: <sup>31</sup>P, <sup>45</sup>Sc, <sup>89</sup>Y, <sup>139</sup>La, <sup>140</sup>Ce, <sup>141</sup>Pr, <sup>146</sup>Nd, <sup>147</sup>Sm, <sup>153</sup>Eu, <sup>157</sup>Gd, <sup>159</sup>Tb, <sup>163</sup>Dy, <sup>165</sup>Ho, <sup>166</sup>Er, <sup>169</sup>Tm, <sup>172</sup>Yb, <sup>175</sup>Lu, <sup>178</sup>Hf, <sup>208</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U. O tratamento dos dados foi efetuado utilizando-se o programa Iolite v2.2 (PATON *et al.*, 2011). O material utilizado foram seções delgadas polidas com espessura de 80 a 100 µm dos litotipos representativos. A seleção dos pontos a serem analisados nos minerais foi feita de forma criteriosa evitando a presença de inclusões.

A preparação do material para datação dos concentrados minerais (cominuição das amostras e separação e concentração das frações de zircão) e as análises em “mounts” de cristais de zircão foram feitas nos laboratórios Centro de Estudos Geocronológicos do Instituto de Geociências da USP (CPGEO-USP). Visando identificar padrões texturais químicos nos cristais de zircão, foram feitas imagens de catodoluminescência dos *mounts* em microscópio eletrônico de varredura Quanta 250FEG. A determinação das razões isotópicas de U-Pb foram efetuadas utilizando-se um sistema de ablasão a laser ArF excimer – 193 nm, da marca Photon, acoplado a um espectrômetro de massa (multi-coletor) da marca Finnigan, modelo Neptune. Os parâmetros analíticos adotados foram: diâmetro do feixe de 32µm, frequência de 6Hz e energia de operação de 7J.cm<sup>-2</sup>, com tempo de análise de 40s para ablasão do material. A série de isótopos determinados foi: <sup>202</sup>Hg, <sup>204</sup>Hg+<sup>204</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb, <sup>208</sup>Pb e <sup>238</sup>U. As idades e os gráficos foram geradas utilizando-se o programa ISOPLOT 3.0 (LUDWIG, 2003). As tabelas com os resultados constam no apêndice G e como material suplementar do manuscrito apresentado no ANEXO II.

## GEOQUÍMICA ISOTÓPICA (RB-SR E SM-ND EM ROCHA TOTAL)

As amostras foram analisadas no Centro de Estudos Geocronológicos da Universidade de São Paulo (CPGEO), via TIMS (Thermal ionization Mass Spectrometry), utilizando um espectrômetro VG354 em um detetor Faraday único, de acordo com a metodologia descrita em



Torquato e Kawashita (1994), Sato *et al.* (1995) e Souza (2009). Para o cálculo das razões iniciais foram utilizadas as razões Rb/Sr e Sm/Nd calculadas a partir dos resultados obtidos por fluorescência de Raios-X e espectrometria de massa (ICP-MS). As razões isotópicas adotadas foram:  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  (STEIGER & JÄGER, 1978) e  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  (De PAOLO, 1981). A tabela com os resultados obtidos é apresentada no Apêndice G.

## 8 MODELAGEM METAMÓRFICA E TERMOBAROMETRIA

### PSEUDOSSEÇÕES

Os dados químicos de rocha total e mineral foram utilizados para modelagem metamórfica através de pseudosseções usando o programa THERMOCALC (HOLLAND; POWELL, 1998). Pseudosseções consistem em diagramas binários calculados para determinada composição química de rocha. A principal vantagem da técnica é a construção de grades petrogenéticas (e.g. diagramas  $P$ - $T$ ,  $T$ - $X_{\text{CO}_2}$  e  $P$ - $X_{\text{H}_2\text{O}}$ ), usando a composição química total da rocha (*bulk rock composition*) ou composição química efetiva (*effective bulk composition*) da amostra a ser estudada, ao invés de se utilizar grades petrogenéticas para sistemas ideais (e.g. KFMASH – SPEAR; CHENEY, 1989). Deste modo, nas pseudosseções apenas as associações minerais que aquela composição química permite ocorrer dentro de certa janela  $P$ - $T$  são representadas. Nestes diagramas é possível modelar variações em diversos parâmetros minerais como moda e razões catiônicas, variações na composição química da rocha ou variação da composição da fase fluida durante a evolução metamórfica ou da fusão da mesma. As pseudosseções construídas para este estudo foram calculadas no intervalo de 0,3-1,0 GPa e 650-950 °C, no sistema químico  $\text{Na}_2\text{O}$ - $\text{CaO}$ - $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{FeO}$ - $\text{MgO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$ - $\text{TiO}_2$ - $\text{O}$  (NCKFMASHTO). O componente “O” se refere ao valor de  $\text{O}_2$  da amostra, calculado a partir da diferença da quantidade de oxigênio que sobra da transformação de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em  $\text{FeO}$ .

### GEOTERMOBAROMETRIA OTIMIZADA

A determinação das condições  $P$ - $T$  através da geotermobarometria otimizada (*optimal geothermobarometry* – POWELL; HOLLAND, 1994), baseia-se nas análises químicas dos diferentes minerais interpretados com constituintes de uma determinada associação mineral (pico metamórfico ou associação retrometamórfica). As análises selecionadas são tratadas com o programa A-X, para determinação da atividade de seus membros-finais. A técnica faz parte

do programa THERMOCALC, modo *averagePT*, e sua aplicação seguiu o protocolo recomendado por Powell e Holland (1994). Os resultados *P-T* são obtidos combinando-se informações de várias reações e suas correlações estatísticas. Os cálculos usam o método dos mínimos quadrados e as informações termodinâmicas dos membros-finais envolvidos em um grupo de reações linearmente independentes.

#### GEOTERMOBAROMETRIA VIA DISTRIBUIÇÃO CATIÔNICA

Essa técnica é baseada na comparação dos valores de distribuição dos cátions nos minerais, permitindo a determinação com maior precisão das condições *P-T* de formação de uma determinada associação mineral. Para calcular as feições que constituem os diagramas (i.e. linhas e pontos), o programa THERMOCALC determina a composição química dos minerais dentro do intervalo *P-T* estudado, para cada iteração necessária no cálculo. Por exemplo, quando uma linha é calculada, seja ela um limite de campo de estabilidade de uma associação mineral ou uma reação univariante, o programa gera uma série de pontos que serão interpolados para formar essa linha. Em cada ponto, as fases minerais tem uma composição específica.

Os modelos de atividade mineral usados pelo THERMOCALC usam parâmetros termodinâmicos para calcular o equilíbrio entre as fases. Parte desses parâmetros corresponde a proporção molar dos cátions em sítios cristalográficos específicos, com por exemplo  $\text{Fe}^{3+}$  no sítio octaédrico da biotita. O programa permite o cálculo de isolinhas destes parâmetros, permitindo ao usuário reconhecer como uma determinada fase varia composicionalmente dentro de um intervalo.

Ao se determinar esses parâmetros nos minerais da rocha estudada, através das análises de EPMA, é possível estima-los dentro de um diagrama *P-T* ou *T-X*. Se as fases estudadas fazem parte de uma paragênese metamórfica, a intersecção das isolinhas dentro do campo de estabilidade dessa associação mineral, pode delimitar um intervalo de *P-T* com incertezas inferiores a 5,0 °C e 0,01 GPa.

# CAPÍTULO III – APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

## 1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está inserida na porção centro-meridional da Província Mantiqueira (ALMEIDA *et al.*, 1977 e 1981) ou Sistema Orogênico Mantiqueira (BRITO NEVES; CAMPOS NETO; FUCK, 1999 – fig. 3). A província representa conjunto de faixas móveis, constituídas por diversos terrenos gerados entre o Arqueano e Neoproterozoico, que se justapõem através de extensas suturas reativadas como zonas de cisalhamento transcorrentes (*e.g.* Zona de Cisalhamento Cubatão). Sua consolidação viria a ocorrer durante o Ciclo Brasileiro (ca. 800-520 Ma), quando da formação do paleocontinente Gondwana Ocidental. Os terrenos que compõem a província são constituídos por rochas metamórficas de grau variado, desde filitos até migmatitos e granulitos, com ocorrências locais de bacias de transição neoproterozoicas, por vezes com vulcanismo associado, tendo sido afetadas por intenso magmatismo granítico pré- a pós-colisional.

Devido sua complexidade geológica e grande extensão, desde o sul do Estado da Bahia até o Uruguai, a Província Mantiqueira é segmentada em três partes principais: (i) segmento setentrional, representado pela Faixa Araçuaí; (ii) segmento central, representado pela Faixa Ribeira; (iii) segmento meridional, representado pelas Faixas Dom Feliciano e São Gabriel (HEILBRON *et al.*, 2004). Alguns autores incluem a Faixa Brasília Meridional no segmento central da Província Mantiqueira (HEILBRON *et al.*, 2004), assumindo que esta unidade foi afetada pela colagem da Faixa Ribeira durante o Neoproterozoico. Desde a sua denominação como Faixa Alto Rio Grande (HASUI; OLIVEIRA, 1984), e posterior modificação para Faixa Brasília Meridional (FUCK *et al.*, 1993), esta unidade geotectônica seria constituinte da Província Tocantins (ALMEIDA *et al.*, 1977). Dada à ambiguidade de definições, na qual a mesma unidade tectônica faria parte de duas províncias distintas, será considerada neste trabalho a definição de Fuck *et al.* (1993). Admite-se, como previamente mencionado, que o segmento central da Província Mantiqueira seja representado apenas pela Faixa Ribeira, descrita a seguir.

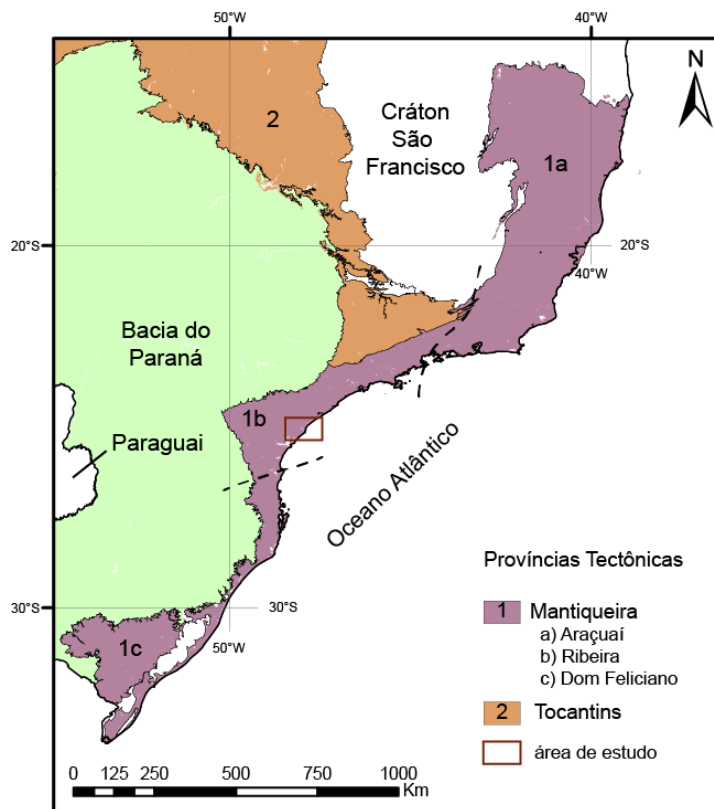


Figura 3: Mapa geotectônico simplificado da porção centro-sudeste-sul do Brasil, destacando as províncias reconhecidas. Linhas tracejadas indicam limite aproximado das faixas móveis que compõem a Província Mantiqueira. Mapa de detalhe da área de estudo – ver figura 5. Fonte: figura elaborada pelo autor.

## FAIXA RIBEIRA

Definida como Cinturão Ribeira por Almeida *et al.* (1973), caracteriza-se como faixa de orientação NE-SW entre os estados do Paraná e Rio de Janeiro (fig. 4), representada por rochas pré-cambrianas, afetadas por intenso magmatismo intrusivo proterozoico e extrusivo mesozoico, com desenvolvimento localizado de bacias pull-apart (e.g. Indaiatuba – FALEIROS *et al.*, 2012; e Quatis – CAMPANHA *et al.*, 1985). Este pacote de rochas guarda origem e evolução associadas a complexo sistema orogênico colisional, entre os crátons do Rio de La Plata, Paranapanema e São Francisco – Congo, que resultaria na consolidação do paleocontinente Gondwana Ocidental durante o Ciclo Brasileiro (TROMPETTE *et al.*, 1993 e BRITO NEVES; CAMPOS NETO; FUCK, 1999).

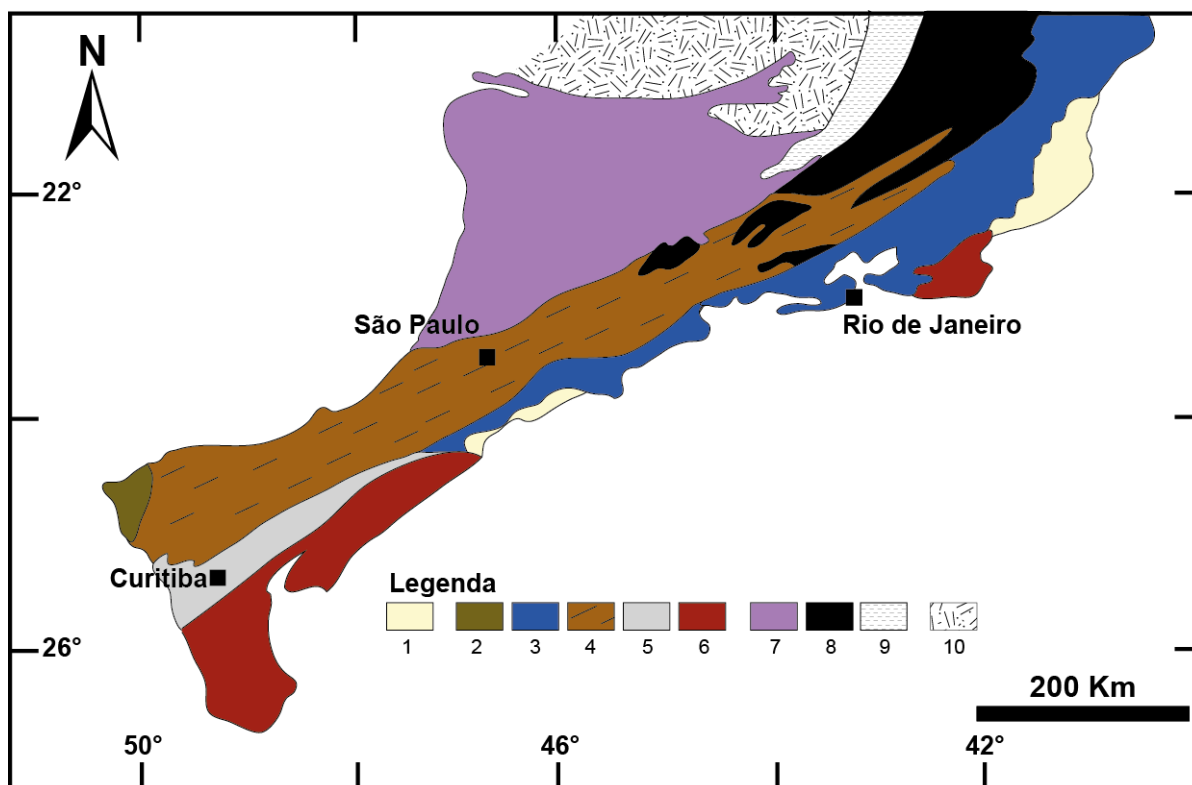


Figura 4: Mapa geotectônico simplificado da Faixa Ribeira entre os estados do Paraná e Rio de Janeiro e unidades geotectônicas adjacentes. Legenda: 1- depósitos sedimentares recentes; Faixa Ribeira: 2 - Bacia de Castro, 3 - Complexo Costeiro, 4 - Domínio Apiaí (Apiaí, Embu e São Roque), 5 - Terreno Curitiba e 6 - Núcleos cratônicos (Luís Alves – PR/SP e Cabo Frio – RJ); Faixa Brasília: 7 - Faixa Brasília Meridional, 8 - Terreno Juiz de Fora; 9 - Mantiqueira; 10 - Cráton São Francisco. Fonte: modificado de Campanha e Sadowski (1999).

Vários trabalhos abordaram a caracterização litológica, estrutural, estratigráfica e tectônica do embasamento cristalino no leste paranaense e sudeste paulista (ver compilação detalhada em FALEIROS, 2008 e MEIRA 2014). Dentre estes trabalhos destacam-se aqueles que determinaram os componentes fundamentais na estruturação da Faixa Ribeira no Leste-Sudeste do Estado de São Paulo: os blocos tectônicos e a estrutura que os separa. Coutinho (1971a) ao caracterizar o Falhamento de Cubatão no leste paulista, indica que esta feição separa dois blocos com litologias contrastantes: Bloco Cotia, constituído por rochas metassedimentares intercaladas com gnaisses afetados por intrusões graníticas sin- a tardi-tectônicas; e o Bloco Costeiro, constituído por rochas de alto grau metamórfico. Leonardos Jr. e Fyfe (1974) incorporaram as rochas do Bloco Costeiro no Cinturão Granulítico Atlântico, que representa o embasamento do Bloco Cotia. Posteriormente Hasui (1975) ao detalhar a geologia do Bloco Cotia, termina por separá-lo nas faixas dobradas de Tijuca, Apiaí e São Roque.

A divisão da Faixa Ribeira Meridional permaneceria em blocos até as publicações de Basei *et al.* (1992) e Siga Jr. (1995). Nelas os autores consolidam a concepção de que a Faixa

Ribeira Meridional é representada por arranjo complexo, onde diversos terrenos agora se encontram lado a lado. Porém os autores utilizaram o modelo tectônico de abertura e fechamento de oceanos para descrever a arquitetura tectônica. Faleiros *et al.* (2011 e 2016) aplicam a terminologia de Howell (1995), onde os terrenos constituem unidades tectono-estratigráficas, com origem e evolução distintas.

Na região de estudo são reconhecidos cinco destes terrenos (fig. 5): Embu, Curitiba, Luis Alves, Paranaguá e Costeiro. Segundo Faleiros (2008), Cury (2009) e Faleiros *et al.* (2011), os terrenos são limitados pelas Zonas de Cisalhamento da Lancinha-Cubatão, Serra do Azeite, Itariri e Icapara. Será apresentada a seguir a descrição simplificada dos terrenos, com seus principais litotipos.

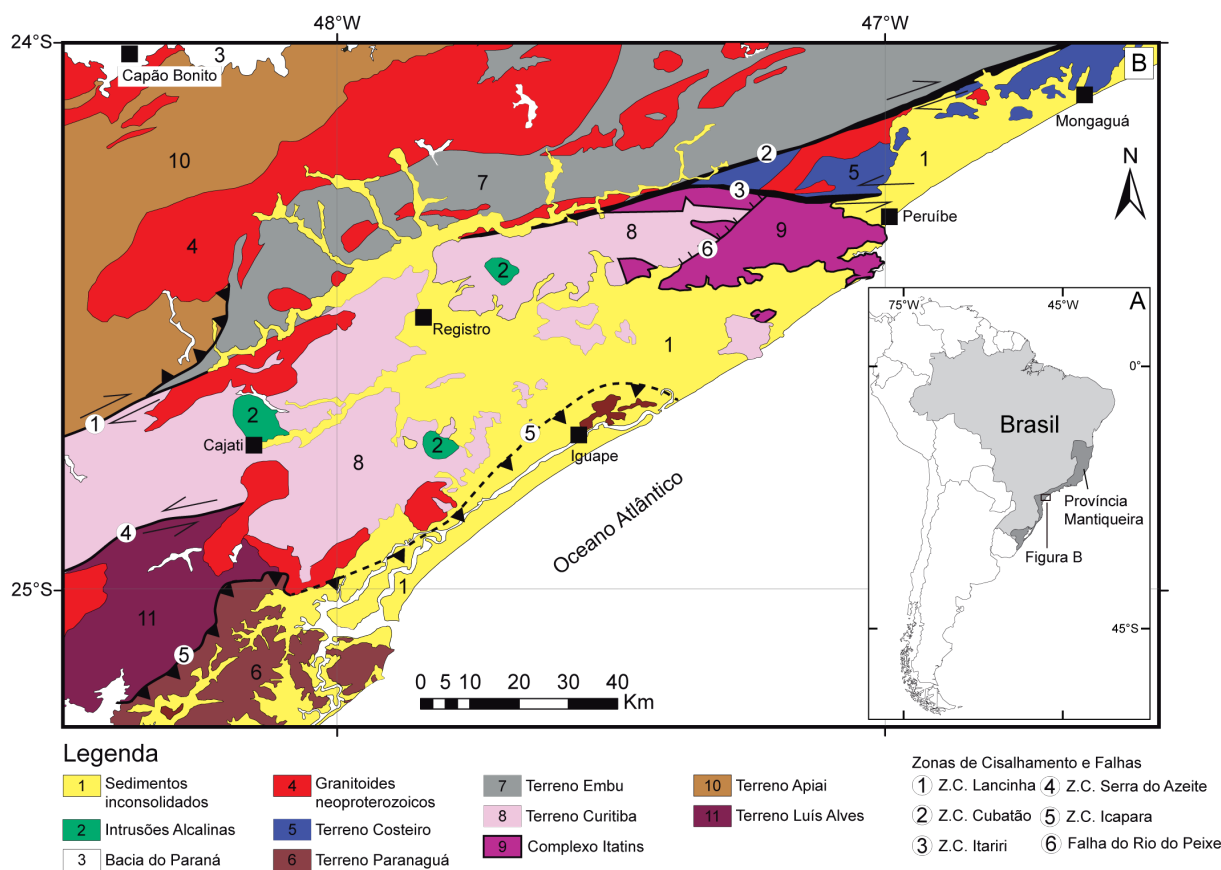


Figura 5: Mapa geotectônico da Faixa Ribeira Meridional no Sudeste do Estado de São Paulo, destacando as principais unidades geotectônicas aflorantes na região e principais zonas de cisalhamento. Fonte: modificado de Perrotta *et al.* (2005).

## TERRENO EMBU

Nos primeiros trabalhos de reconhecimento geológico regional, interpreta-se que a faixa de rochas metamórficas de alto grau aflorantes a noroeste da Zona de Cisalhamento de Cubatão corresponde à porção basal do cinturão de dobramentos Apiaí. Hasui (1975), em trabalhos

mapeamento e análise estrutural do cristalino pré-cambriano a sudoeste da cidade de São Paulo, separa as rochas metamórficas do Grupo Açungui na região em dois complexos: Embu (migmatítico) e Pilar do Sul (rochas metamórficas de baixo grau). A denominação de Complexo de Embu foi incorporada nos trabalhos decorrentes, com Hasui e Sadowski (1976) aplicando-a nas demais exposições localizadas no lado oeste da Zona de Cisalhamento de Cubatão. Campos Neto & Figueiredo (1995), admitem que como o Complexo Embu possui características tectono-estratigráficas distintas das demais unidades, ele constitui o Terreno Embu (ou Terreno Acrescido Embu).

Nos arredores da região de estudo, o Complexo Embu é representado por rochas metassedimentares metamorfizadas em condições que variam desde baixo até alto grau. Ocorrem metarenito a quartzito, com intercalações de filito, quartzo-filito e quartzo-xisto, paragneisse migmatítico e milonitizado, com intercalações de rochas máficas e calciossilicáticas (SILVA *et. al.*, 1981 e FALEIROS *et al.*, 2014). Esta sequência de rochas é intrudida por uma série de corpos graníticos, alguns alongados na direção NE-SW e outros com caráter pós-cinemático. A direção da deformação regional NE-SW é a mesma do terreno em questão no presente trabalho.

Estudos mais detalhados abordando aspectos petrográficos, metamórficos, estruturais e geocronológicos, restringem-se a exposições nos arredores da cidade de São Paulo e na região Nordeste do Estado de São Paulo. Nessa região o complexo é separado em três unidades (FERNANDES, 1991): (i) Redenção da Serra é representada por gnaiss aluminoso migmatítico e gnaiss tonalítico a granodiorítico, com intercalações de rochas calciossilicáticas e anfibólito; (ii) Rio Paraibuna que é representada pela mesma associação de litotipos descritos para a unidade Redenção da Serra, porém com presença mais frequente de quartzito; (iii) Rio Una é representada por xisto com intercalações de quartzito impuro.

O acervo de dados geocronológicos para o Complexo Embu no sudoeste de São Paulo é escasso. Cordani, Nutman e Coutinho (2002) obtiveram idade de cristalização em grãos de zircão de ortogneisse com o método U-Pb, usando SHRIMP, de  $811 \pm 13$  Ma. O evento metamórfico principal registrado nestas rochas foi datado em 790 Ma, com datações em grãos metamórficos de zircão e monazita (VLACH, 2001; NEGRI; VLACH; TEIXEIRA, 2004; FALEIROS *et al.*, 2014). Meira *et al.* (2014) apresentam idades de cristalização de rochas meta-ígneas intrusivas no complexo (meta-aplito -  $786 \pm 6$  Ma e metagranito -  $768 \pm 8$  Ma) e idades de zircão detrítico em quartzitos (1002-3740 Ma).

## TERRENO CURITIBA

Na região de estudo o Terreno Curitiba é representado por associações de rochas de migmatíticas posicionadas a sudeste da Zona de Cisalhamento Lancinha-Cubatão e a sul da Zona de Cisalhamento de Itariri. Estas associações se dividem em duas unidades principais: Complexos Gnáissico-Migmatítico e Itatins.

O Complexo Gnáissico-migmatítico é representado por ortognaisse migmatítico bandado, com alternância de leitos de espessura milimétrica a centimétrica, ora ricos em biotita e hornblenda, ora hololeucocráticos a leucocráticos, com coloração variando entre branco e rosa. Ocorrem intercalações de anfíbolito e de xisto magnesiano. Silva *et al.* (1981) se referem à unidade como rochas gnáissico-migmatíticas transamazônicas, enquanto Dantas *et al.* (1987a e 1987b) a classificam como complexo.

A ausência de caracterização petrológica detalhada desta unidade e sua exposição restrita aos arredores de Miracatu e Registro, fazem com que a interpretação de sua origem e a correlação com as unidades litoestratigráficas adjacentes seja especulativa. Passarelli *et al.* (2004) utilizando a denominação de Domínio Registro para estas rochas apresentam idade intercepto superior de  $1894 \pm 26$  Ma para anfíbolio-biotita granodiorito e idade intercepto superior de  $2197 \pm 41$  Ma e intercepto inferior de  $580 \pm 24$  para biotita-monzogranitos. Os autores admitem a idade de 2197 Ma como correspondente à cristalização do protolito enquanto que a idade de intercepto inferior (apesar de imprecisa) representaria o evento que propiciou a migmatização observada.

Alguns autores correlacionaram o Complexo Gnáissico-Migmatítico ao Complexo Atuba (SIGA JR., 1995; CAMPOS NETO & FIGUEIREDO, 1995; BASEI *et al.*, 1999), aflorante nos arredores de Curitiba (PR) e nas cercanias de Cajati (SP). Na região de Curitiba o complexo é caracterizado por ortognaisses com leitos hololeucocráticos a leucocráticos concordantes com a foliação principal, interpretados como produto de primeiro evento metamórfico, de fácies anfíbolito alto a granulito, ocorrido no Paleoproterozoico (2200 – 1800 Ma – SIGA JÚNIOR, 1995 e SIGA JÚNIOR *et al.*, 1995). Outras porções de material leucocrático, ora concordante com a foliação, ora discordante, são interpretadas como o segundo evento de migmatização, ocorrido no Neoproterozoico (640 – 560 Ma – SIGA JÚNIOR, 1995; SIGA JÚNIOR *et al.*, 1995 e SATO *et al.*, 2003).

Dada à similaridade petrográfica e dos dados geocronológicos a correlação entre os Complexos Gnáissico-Migmatítico e Atuba se faz razoável, havendo, no entanto carência de



dados petrológicos que permitam comprovar essa correlação. Nos trabalhos recentes do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) as rochas migmatíticas da região foram consideradas como parte do Complexo Atuba (ALMEIDA *et al.*, 2014).

A descrição do Complexo Itatins será apresentada de forma detalhada no item 2.2 – Contexto Geológico Local.

#### TERRENO (CRÁTON) LUÍS ALVES

Apesar do Cráton Luís Alves não ocorrer na área de estudo sua apresentação se faz oportuna, uma vez que a unidade geotectônica é correlacionada com o objeto de estudo desta tese.

O Terreno Luís Alves é constituído por gnaiss granulítico, migmatito, rochas ultramáficas, quartzito, paragnaisse, e formações ferríferas, além de corpos graníticos intrusivos sin- a pós-colisionais (SIGA JÚNIOR; BASEI; MACHIAVELLI, 1993). É limitado ao sul pelo Cinturão Dom Feliciano, a oeste e norte com o Terreno Curitiba pelas Zonas de Cisalhamento Morretes, Faxinal e Serra do Azeite, e a leste com o Terreno Paranaguá pela Zona de Cisalhamento de Icapara (CURY 2009). No sudeste do estado de São Paulo, a unidade é representada por gnaiss-granulítico, Complexo Serra Negra, e por rochas metassedimentares de baixo grau metamórfico, Formação Rio das Minas (FALEIROS; PAVAN, 2013).

#### Complexo Serra Negra

O Complexo Serra Negra engloba ortognaiss-migmatítico de composição básica a ácida e é separado em três unidades: Gnaiss Granulítico, Gnaiss Anfibolítico e Gnaiss Granítico (FALEIROS; PAVAN, 2013). A unidade de gnaiss granulítico é composta por rocha gabróide, de granulação fina a média, por vezes bandada. Enclaves de gndito granulítico são comuns. O Gnaiss anfibolítico possui características similares aos termos granulíticos, sendo diferenciado pelo intenso retrometamorfismo superimposto. Ocorrem bandas decamétricas de rocha metaultramáfica que podem representar termos cumuláticos, além de corpos de anfibolito e enclaves de formações ferríferas. O gnaiss granítico é representado por corpos circunscritos e de pequena área de exposição. Associados aos termos graníticos ocorrem corpos de rocha vulcânica básica a intermediária. Datações geocronológicas na região forneceram idades de cristalização do protolito ígneo de ca. 2200 Ma (FALEIROS e PAVAN, 2013).

## Formação Rio das Minas

As rochas que compõe esta formação foram atribuídas à Sequência Cachoeira (SILVA *et al.*, 1981), mas com os projetos recentes de mapeamento do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, foi feita a adequação da nomenclatura da unidade (para mais detalhes, ver FALEIROS; PAVAN, 2013), sendo redefinida para Formação Rio das Minas, a qual é composta por três subunidades litológicas, que compreendem ardósia e filito, com intercalações de formação ferrífera, granada-micaxisto e paragnaisse.

## TERRENO PARANAGUÁ

Com pequenas áreas de exposição em São Paulo, as rochas do Terreno Paranaguá se distribuem ao longo da costa, margeando a borda sudeste do Terreno Luis Alves. Segundo Cury (2009), o Terreno Paranaguá é constituído por uma série de suítes graníticas, denominadas de Morro Inglês, Rio do Poço e Estrela-Canavieiras, intrusivas em embasamento gnássico-migmatítico, representado pelo Complexo São Francisco do Sul, e em rochas metassedimentares da Sequência Rio das Cobras.

Em geral os corpos graníticos têm composição variando entre sienogranito e granodiorito, são heterogeneamente deformados, com idade de cristalização em um intervalo aproximado de 600-580 Ma (CURY, 2009).

A Sequência Rio das Cobras compreende xistos de composição variada, quartzito, mármore, gnaisse e anfibolito. As condições do metamorfismo registrado na sequência metassedimentar são de fácies xisto-verde, tendo sido descritas associações locais de fácies anfibolito e granulito. Grãos detríticos de zircão forneceram idades de núcleo no intervalo de 1800 – 2100 Ma, com bordas de sobrecrecimento em 600 Ma. As idades mais recentes foram interpretadas como correspondentes a um evento metamórfico (CURY, 2009).

O Complexo São Francisco do Sul é constituído por ortognaisse migmatítico, de composição diorítica a monzogranítica, apresentando estrutura bandada e milonítica. Idades U-Pb determinadas em zircão (CURY, 2009) indicam ao menos três eventos de cristalização do mineral: Paleoproterozoico (2173 Ma), Neoproterozoico (626 Ma) e Cambriano (510-490).

## TERRENO COSTEIRO

O Terreno Costeiro, ou Complexo Costeiro, aflora ao longo da costa de São Paulo, entre as regiões de Peruíbe, SP, e a Baía de Angra dos Reis, RJ, (SILVA *et al.*, 2005). É limitado a Sul pela Zona de Cisalhamento de Itariri e a Leste pela Zona de Cisalhamento Cubatão. Sua constituição litológica compreende gnaiss-migmatítico, para- e ortoderivado, metamorfizado em fácies anfíbolito e granulito. Em estudos efetuados na região da Baixada Santista, Dias Neto (2001) e Dias Neto *et al.*, (2008 e 2009) apresentam idades magmatismo granítico de aproximadamente 630 Ma, com posterior evento metamórfico ocorrido em 570 Ma. Dados geocronológicos apresentados por Passarelli (2001) e Passarelli *et al.*, (2004, 2005, 2007, 2014 e 2016), para as exposições do Terreno Costeiro na região de estudo desta tese, forneceram idades de paleo a mesoproterozoicas (2.200 – 1.100 Ma) para os protolitos do conjunto de gnaiss-migmatítico, com auge do metamorfismo em 745 Ma. Para os corpos graníticos os autores apresentam idades entre 640 – 578 Ma.

## CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

O Complexo Itatins (SILVA *et al.*, 1977) localiza-se entre os municípios de Iguape, Miracatu e Peruíbe. Exibe formato romboedral, sendo limitado a norte pela Zona de Cisalhamento de Itariri, a sul-sudeste pelo Oceano Atlântico e sedimentos recentes e a leste por falhas normais (fig. 6). Segundo Silva *et al.* (1981), o complexo é representado por dois litotipos principais, cada qual predominando em determinada região do complexo. As exposições do litoral são representadas por rochas kinzigíticas com estruturas migmatíticas, incluindo estromática, schöllén e surreica, com frequentes lentes e enclaves de termos enderbíticos e anfíbolíticos, comumente dobrados, estirados e boudinados, com presença de granulito charnockítico e hiperstênio-granodiorito. Para o centro do complexo predominam enderbita e opdalito, aos quais se associam leitos de granada-piroxênio-biotita-gnaiss e migmatito estromático. Os granulitos apresentam feições remanescentes da anatexia, com leucossoma discordante da estrutura principal. Associados aos litotipos predominantes ocorrem rochas metabásicas, metaultrabásicas, serpentinito, biotita-hornblenda-gnaiss, granada-biotita-gnaiss e sillimanita-granada-biotita-gnaiss. A esta associação de rochas foi sugerida origem vulcanossedimentar, de idade arqueana, metamorfizada em fácies granulito.

Sadowski (1974) e Sadowski, Dias Neto e Egydio-Silva (1978) detalharam os estilos tectônicos dos blocos migmatíticos litorâneos de São Paulo, separando o Maciço Itatins em dois

blocos. O bloco a oeste, denominado Miracatu, é constituído por gnaiss-migmatítico da fácies anfíbolito e por termos graníticos. O bloco a leste, denominado Peruíbe, é constituído por migmatito da fácies granulito. O estilo estrutural do maciço é representado por foliação de orientação E-W, oscilando para NW e NE, com mergulho para sul, sendo plano-axial de dobras isoclinais.

Segundo Silva *et al.* (1981), as rochas do Complexo Itatins, em conjunto com gnaiss-migmatítico da Sequência Cachoeira (SILVA *et al.*, 1978), constituem o Bloco Itatins, extremo NE do Maciço de Joinville de Hasui, Carneiro e Coimbra (1975).

Dantas *et al.* (1987a), em projeto de mapeamento na escala 1:50.000 executado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) pelo Programa Pró-Minério, redefiniram as unidades que formavam o Bloco Itatins. Os litotipos foram separados em : (i) Suíte Itatins – rochas charnockíticas com aspecto ígneo; (ii) Suíte Ortognáissica – rochas gnáissico-migmatíticas com aspecto ígneo; (iii) Sequência Cachoeira – rochas metavulcanossedimentares. Os autores propuseram mudanças na cartografia do Complexo Itatins, sugerindo que a unidade não teria a expressão geográfica representada nos projetos de mapeamento do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), devendo-se restringir esta denominação a pequenos corpos dispersos na Suíte Ortognáissica.

Picanço (1994) e Azevedo Sobrinho (1995) caracterizaram com maior detalhe as rochas na região de Itariri e Peruíbe. Utilizando a definição de Dantas *et al.* (1987a) para as rochas do complexo, separam os granulitos em dois litotipos, Azeite e Guaraú. Os granulitos tipo Azeite apresentam associação mineral composta por plagioclásio + feldspato alcalino + quartzo + ortopiroxênio + biotita + clinopiroxênio + hornblenda, enquanto que o tipo Guaraú é representado pela associação ortopiroxênio + biotita + feldspato alcalino + quartzo. A diferença entre os dois tipos reside na presença mais frequente de paragênese de retrometamorfismo registrada no litotipo Azeite, caracterizada pela substituição do Opx pela associação biotita + quartzo ± hornblenda. As rochas kinzigíticas apresentam feições de migmatização mais intensa sendo constituídas pela associação sillimanita + biotita + granada + plagioclásio + feldspato alcalino + quartzo ± anfibólio.

Os dados isotópicos Sm-Nd em rocha total e minerais indicam que as rochas descritas como charnockitos por Picanço (1994) e Azevedo Sobrinho (1995), foram extraídas do manto em 2500 Ma, com granulitização em 2200 Ma (SILVA *et al.*, 1981 e KAUL; TEIXEIRA, 1982). Admitem que por volta de 720 Ma as rochas foram retrabalhadas, com estabilização tectônica por volta de 580 Ma (PICANÇO, 1994). Picanço *et al.* (1998) obtiveram idades U-Pb

(SHRIMP) de  $2173 \pm 18$  Ma em cristais de zircão do charnockito. Segundo os autores, embora os cristais apresentem aspecto homogêneo e prismático, a presença de bordas arredondadas em parte da população pode indicar que o mineral teria sido gerado por metamorfismo de alto grau. Dada as características texturais do zircão, os autores levantam duas interpretações possíveis para a idade obtida: (i) poderia representar metamorfismo de fácies granulito (Paleoproterozoico), ou (ii) os grãos de zircão são ígneos com metamorfismo granulítico do Neoproterozoico. Esta segunda interpretação leva em conta os resultados de Sm-Nd apresentados pelos autores no mesmo trabalho.

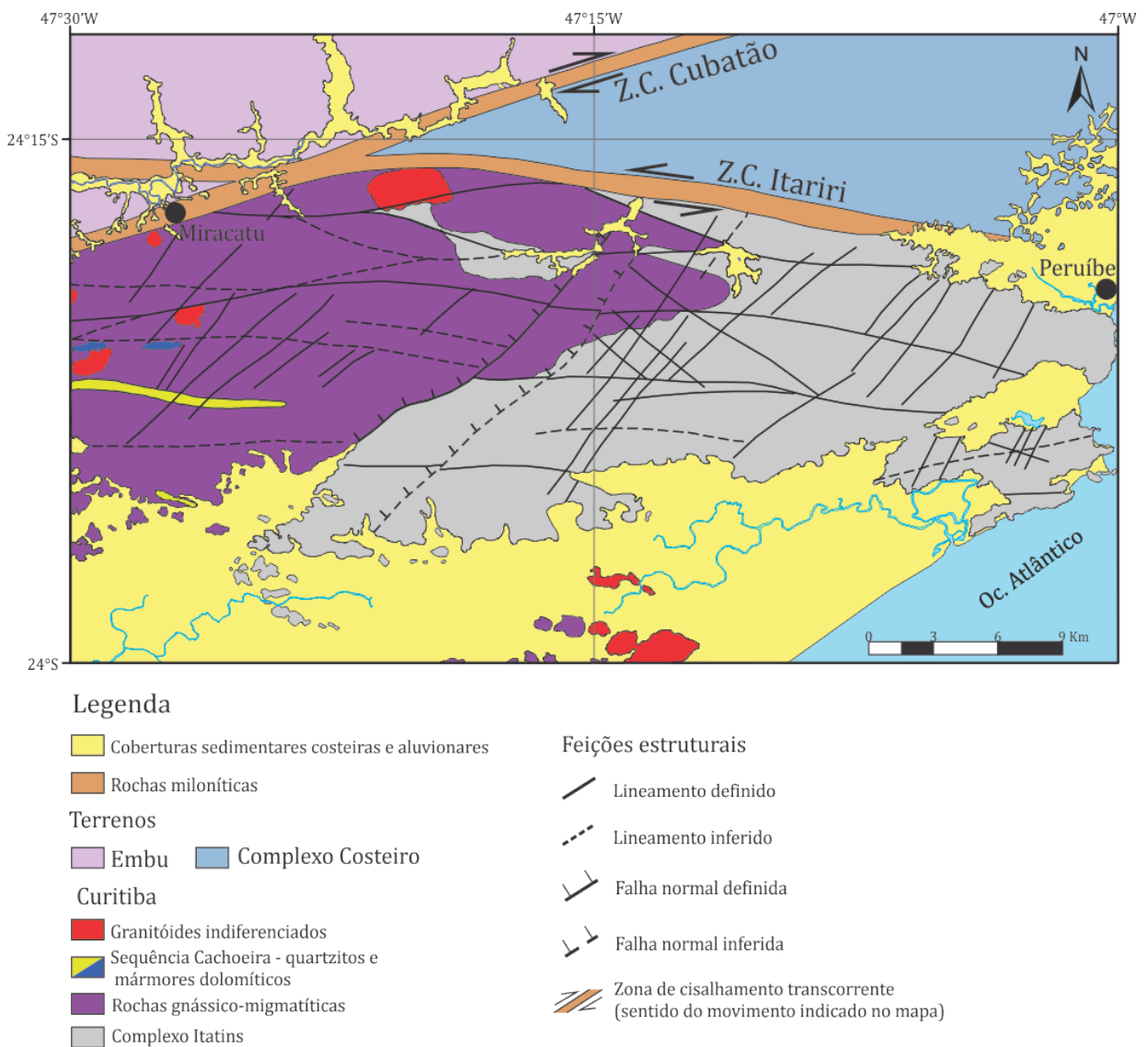


Figura 6: Mapa geológico simplificado do Complexo Itatins. Fonte: modificado de SILVA *et al.*, 1981.

As condições de temperatura do metamorfismo para as rochas do Complexo Itatins foram determinadas por Azevedo Sobrinho (1995), utilizando geotermometria clássica com

dois piroxênios. Foram obtidas temperaturas da ordem de 760 °C para o charnockito e entre 778 e 793 °C para os enclaves básicos. Com base na composição química das rochas charnockíticas, Azevedo Sobrinho (1995) argumenta que estas representam uma sequência cálcioalcalina bimodal formada por litotipos de composição intermediária a ácida, com enclaves básicos associados. Logo, esta associação representaria um ambiente tectônico colisional entre placas micro-continentais, com manifestações ígneas de composição variada.

Assim como o Complexo Gnáissico-Migmatítico pode ser correlacionado com o Complexo Atuba a partir de dados petrográficos e geocronológicos, a mesma correlação poderia ser feita com as rochas granulíticas do Complexo Itatins e do Terreno Luís Alves. Apesar de possuírem idades de cristalização do protolito similares (em torno de 2200 Ma), no Terreno Luís Alves não existem registros de eventos tectono-metamórficos significativos após o Paleoproterozoico. Os dados isotópicos (Sm-Nd) obtidos por Picanço *et al.* (1998) indicam que as rochas do Complexo Itatins foram afetadas por um evento metamórfico (seja ele de caráter dinamo-termal ou estritamente termal) durante o Neoproterozoico. Portanto admite-se que as rochas granulíticas do Terreno Luís Alves e o Complexo Itatins apesar de compartilharem algumas características, representam fragmentos de blocos com história evolutiva distinta.

## CONSIDERAÇÕES SOBRE AS REFERÊNCIAS CONSULTADAS

O acervo de referências consultadas fornece extensa base de dados e interpretações que mostra como o conhecimento sobre a geologia do Sudeste de São Paulo evoluiu ao longo dos anos. Há porém de se fazer algumas observações sobre os conceitos e ideias aplicados na descrição do Complexo Itatins.

### TERMINOLOGIA TECTÔNICA

Dentre as diversas referências consultadas, vários termos são utilizados na descrição das unidades tectônicas que constituem a Faixa Ribeira, tais como maciços, blocos e domínios. Cada qual é aplicado de acordo com o grau de conhecimento sobre a evolução tectônica do objeto em questão. Nos trabalhos que abordam a compartimentação tectônica do sudeste de São Paulo executados pelos pesquisadores do IGc-USP (*e.g.* PASSARELLI *et al.*, 2007) utiliza-se o termo Domínio tectônico para separar conjuntos de rochas que compartilham evolução

tectônica. Neste caso, os autores separam os conjuntos de rochas no sudeste de São Paulo em Domínios Iguape, Registro, Embu e Mongaguá.

Por outro lado, nos projetos de mapeamento do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, desenvolvidos após 2003, tem sido utilizada a terminologia de Howell (1995). Nela os conjuntos de rochas que representam um mesmo ambiente tectônico e/ou que tenham mesma evolução tectônica são denominados de terrenos tectono-estratigráficos.

Apesar da ambiguidade na utilização e significado dos termos domínio e terreno, será adotado ao longo do trabalho o termo terreno para se referir aos conjuntos de rochas que compartilham origem e evolução tectônica, sendo limitados por importantes zonas de cisalhamento.

#### NOMENCLATURA ESTRATIGRÁFICA

A cartografia e nomenclatura adotada pela equipe de mapeamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) no projeto de mapeamento da região de Miracatu – Juquiá visou separar as rochas migmatíticas da região de acordo com as feições de anatexia reconhecidas nas rochas. A utilização de termos descritivos para caracterização de rochas em terrenos constituídos por migmatitos e granulitos é a mais recomendada (PASSCHIER; MYERS; KRONER, 1993 e SAWYER, 2008), visando evitar interpretações equivocadas. As rochas de aflorantes nos arredores de Peruíbe exibem vasto conjunto de feições texturais e estruturais comuns em rochas que foram submetidas a processos de fusão parcial. No entanto se descritas separadamente podem induzir o observador a separar litotipos originados da mesma fonte e que sofreram o mesmo processo petrogenético (*i.e.* anatexia).

Tendo o trabalho de Silva *et al.* (1981) caracterizado e definido o Complexo Itatins como unidade litoestratigráfica única, na qual seus aspectos petrográficos e estruturais a diferem das demais rochas na região, admite-se que esta denominação seja a mais adequada para os migmatitos de fácies granulito presentes nos arredores de Peruíbe.

#### Sequência Cachoeira

No que diz respeito à designação de Sequência Cachoeira para rochas metavulcanossedimentares aflorantes na região de Peruíbe, algumas observações devem ser destacadas. O termo Sequência Cachoeira (SILVA *et al.*, 1981) foi usado para designar rochas

metaultramáficas e metapsamíticas encaixadas em gnaisses do embasamento na região de Antonina (PR). Como se admitia que as rochas gnáissico-migmatíticas do litoral paranaense e paulista compunham extenso cinturão denominado Maciço Mediano de Joinville (fig. 5), o embasamento da Sequência Cachoeira, Cráton Luis Alves, seria correlacionado às rochas da região de Peruíbe. Desta forma as rochas metassedimentares encaixadas neste cinturão seriam, por analogia, correspondentes.

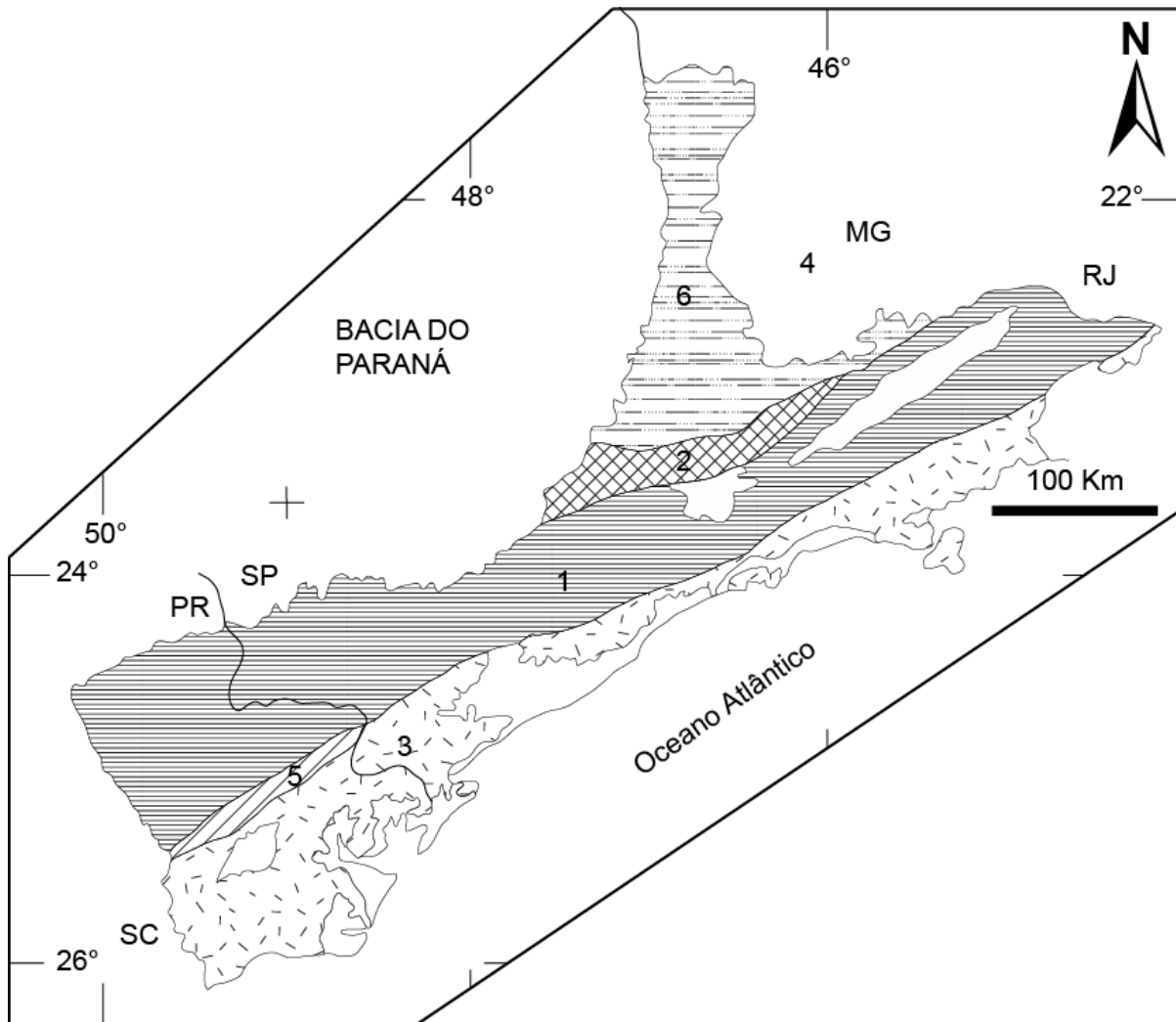


Figura 7: Compartimentação tectônica de acordo com Hasui *et al.*, (1980) para os Estados do Paraná e São Paulo. Faixas de dobramentos neoproterozoicos: 1 - Apiaí, 2 - São Roque; Maciços Medianos: 3 - Joinville, 4 - Guaxupé; Faixas móveis retrabalhadas parcialmente durante o Brasiliano: 5 - Formação Setuva (parte do Terreno Curitiba), 6 - Complexos Amparo e Pinhal. Fonte: modificado de DAITX, 1996.

Ao longo dos últimos anos, diversos trabalhos desenvolvidos no nordeste do Paraná e sudeste de São Paulo forneceram informações importantes para a construção de um cenário mais completo para a evolução da Faixa Ribeira Meridional. Basei *et al.*, (1992) sugeriram abolir a definição de Maciço Mediano de Joinville, uma vez que os gnaisses e migmatitos da



região representariam distintos terrenos tectônicos cada qual com história evolutiva própria. Admite-se que mesmo havendo similaridades entre as formas de ocorrência e composição litológica, as rochas metassedimentares encaixadas em gnaisses, migmatitos e granulitos no nordeste do Paraná e sudeste de São Paulo representam fragmentos de unidades litológicas distintas, cada qual pertencendo a um terreno específico.

Portanto ao longo deste trabalho a utilizou-se a nomenclatura tectônica adotada em trabalhos do Serviço Geológico do Brasil – SGB/ CPRM, na qual a Faixa Ribeira é representada por terrenos limitados por zonas de cisalhamento. Para os litotipos descritos na região de Peruíbe, adota-se a nomenclatura estratigráfica de Silva *et al.* (1981) para o Complexo Itatins, aliada à terminologia de migmatitos de Sawyer (2008).

## 2 MIGMATITOS

Neste item será feita breve discussão do tema migmatitos abordando sua classificação e características.

### DEFINIÇÕES E CONSTITUINTES

O reconhecimento da presença de rochas com evidências de fusão em diversas regiões teve seu ápice durante o final do século XIX e início do século XX, quando começaram a surgir as diferentes hipóteses sobre como estas rochas seriam formadas. Dentre os principais trabalhos destacam-se Hutton (1795), Lyell (1855) e Sederholm<sup>1</sup> (1907 apud SEDERHOLM, 1967). Este último introduz o termo migmatito para se referir a rochas compostas pela mistura de dois componentes geneticamente diferentes, sendo um intrusivo ao outro. Nessa mistura seria reconhecida estrutura em rede, característica de fusão incipiente, veios sem terminação e aspecto brechado, representados por fragmentos envolvidos por rocha leucocrática. Feições de bandamento descritas como herança da rocha original também foram reconhecidas como algo comum. O mesmo autor sugere que se utilize o termo anatexia para se referir ao processo de fusão das rochas.

Com a evolução do estudo dos migmatitos, diversas definições e modelos para sua geração foram sendo criados. De acordo com Mehnert (1968), migmatito corresponderia a rocha composta por duas ou mais porções petrograficamente distintas, sendo que uma representa a rocha encaixante com variado grau metamórfico, e a outra fase pegmatítica, aplítica, granítica ou de aspecto plutônico. Composto por fases ou partes com características singulares, um migmatito é representado por duas partes:

Paleossoma: rocha original com pequena taxa de fusão parcial ou que apresente composição refratária, ou ainda a rocha encaixante;

Neossoma: rocha neoformada gerada pelo processo de anatexia, na qual podem ser reconhecidas duas porções:

- leucossoma: rocha gerada no processo de anatexia, geralmente de aspecto hololeucocrático ou leucocrático, composta por quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino, com alguma fase máfica (*e.g.* biotita, granada, hornblenda, piroxênio);

---

<sup>1</sup> SEDERHOLM, J. J. Om granit och gneis, deras uppkomst, uppträdande och utbredning inom urbeget i Fennoskandia. *Bulletin de la Commission géologique de Finlande*, 23.

- melanossoma: porção rica em minerais máficos, associada à borda do leucossoma e/ou como lentes dispersas no leucossoma.

Para descrever rochas (ou porções delas) onde as relações estruturais e texturais entre paleossoma e neossoma são complexas ou de difícil reconhecimento, Henkes & Johannes (1981) introduziram o termo mesossoma, que define como uma rocha de cor intermediária entre o leucossoma e o melanossoma.

Uma revisão dos termos aplicados na descrição de migmatitos foi apresentada por Sawyer (2008). Neste trabalho o autor atualiza o termo migmatito como “rochas encontradas em áreas metamórficas de grau médio a alto, que podem ser heterogêneas em escala micro a macroscópica e consistindo de duas ou mais partes petrograficamente distintas. Uma destas partes (neossoma) deve ter sido gerada por fusão parcial e contém rochas que são geneticamente relacionadas entre si e com o protolito. Esta parte é comumente representada por termos leucocráticos (leucossoma), compostos por quartzo, plagioclásio e/ou feldspato alcalino, e termos melanocráticos (melanossoma) enriquecidos em minerais ferro-magnesianos. O neossoma pode apresentar apenas modificações de composição mineralógica, textural e granulométrica, sem necessariamente desenvolver porções com coloração distinta” A outra parte corresponderia a rochas que não foram afetadas pela anatexia, preservando textura (microestruturas), composição e estrutura original e designada de paleossoma. Este conjunto de feições torna o migmatito uma rocha morfologicamente complexa em qualquer escala de trabalho. Deve-se notar que a definição de paleossoma é radicalmente diferente da usada por Mehnert (1968).

Sawyer (2008) propõe uma reinterpretação da terminologia de Mehnert (1968), onde os migmatitos são constituídos pelos mesmos componentes fundamentais, neossoma e paleossoma. Porém, devido à complexidade estrutural e textural decorrente dos processos anatéticos, o neossoma é subdividido nas seguintes partes:

Neossoma: rocha de granulometria superior à do restante da rocha, na qual microestruturas previamente existentes vão sendo destruídas com o aumento da fusão parcial. Se algumas porções preservadas dentro do neossoma exibirem estruturas pré-anatexia, estas devem ser consideradas como protolito ou rocha parental (JOHANNES, 1985 e ASHWORTH, 1985). No neossoma podem ser reconhecidos os seguintes componentes:

- i) resíduo: porção do neossoma predominantemente composta pela fração sólida restante da fusão parcial (i.e. fases peritéticas e fases não consumidas nas reações

de fusão), onde parte ou todo o líquido anatético foi extraído. Ao contrário do que se imagina, o resíduo não é necessariamente de coloração escura, podendo ser constituído por quartzo e feldspato(s). Microestruturas presentes são indicativas de processo de anatexia;

- ii) melanossoma: corresponde a porção melanocrática (ou escura) do neossoma, onde predominam minerais como biotita, granada, cordierita, piroxênios e anfibólios. Sua interpretação é similar à do resíduo, representando acúmulo de fases peritéticas e residuais das reações de fusão. Assim como no resíduo, feições microestruturais de anatexia podem estar preservadas.
- iii) leucossoma: porção holo a leucocrática (clara) do neossoma, constituída essencialmente por quartzo e feldspatos. Representa a porção cristalizada do líquido anatético, preservada no migmatito. Exibe microestruturas que indicam cristalização a partir de líquido. Por representar o produto da cristalização fracionada do fundido, sua composição não deve representar a composição do líquido gerado pela anatexia. Como o leucossoma pode representar distintas fases de geração e extração do fundido, esta fase pode ser classificada como:

leucossoma in-situ: corresponde ao produto de cristalização do líquido anatético, que se separou do resíduo, mas se manteve no local onde ocorreu a fusão;

leucossoma in-source: corresponde ao produto de cristalização do líquido anatético, que se separou do resíduo e migrou para um local próximo, ainda na mesma “área-fonte”;

dique ou veio leucocrático: corresponde ao produto de cristalização do líquido anatético que migrou para fora da “área-fonte”, sendo injetado em outra rocha presente na região onde ocorreu o processo de anatexia;

fase “plutônica”, dique ou sill: corresponde ao produto de cristalização de líquido anatético que migrou para fora de sua “área-fonte”, sendo injetada em rochas de menor grau metamórfico. Essa feição indica que houve longo deslocamento do líquido anatético;

Paleossoma: rocha distinta do neossoma no migmatito que não foi afetada pela fusão parcial e na qual as estruturas como foliação, dobras, bandamento, anteriores a anatexia estão preservados. Aspectos mineralógicos e texturais não devem ser distintos daqueles observados em rochas similares fora da zona afetada pela anatexia.

Um terceiro componente que pode estar presente em rochas afetadas por anatexia é denominado de selvedge. O termo é aplicado a camadas ou bordas formadas ao redor de injeções do neossoma em uma rocha hospedeira. A presença dessa feição indica a existência de desequilíbrio químico entre a rocha hospedeira e o neossoma, sugerindo diferença na composição química da rocha hospedeira e a área-fonte do neossoma.

Embora os dois conjuntos de denominações aqui apresentados sejam semelhantes, diferem basicamente na interpretação de sua formação. Uma característica marcante da nomenclatura de Sawyer (2008) é a não utilização do termo mesossoma, empregado para descrever porções de migmatitos onde as relações entre fundido e resíduo ou paleossoma seriam ambíguas.

## ESTRUTURAS E NOMENCLATURA

Uma vez definidas as denominações das partes fundamentais dos migmatitos, passa-se a necessitar de classificação que possa descrever os migmatitos como um todo. Dessa necessidade surgiu a classificação de Dietrich e Mehnert (1960) e Mehnert (1968) para as estruturas reconhecidas nos migmatitos (fig. 6). Essa classificação tem sido utilizada como base no estudo de rochas que sofreram fusão parcial, por contemplar as principais feições reconhecidas.

A apresentação das estruturas na figura 6 é feita de forma a ilustrar, ou descrever, as feições que podem ser reconhecidas nos migmatitos, sem atribuir a cada uma delas um determinado processo. Mehnert (1968) argumenta que pela sua complexidade era possível atribuir mais de um mecanismo para cada estrutura, às vezes completamente distintos. Portanto seria mais “seguro” utilizar esta classificação de forma descritiva. Sawyer (2008) por sua vez, argumenta que apesar de não haver correlação entre as estruturas, e as mesmas serem descritivas, elas estão intimamente ligadas aos processos que as geraram, ou seja, relação da taxa de fusão, taxa de preservação ou perda de fundido e taxa de deformação.

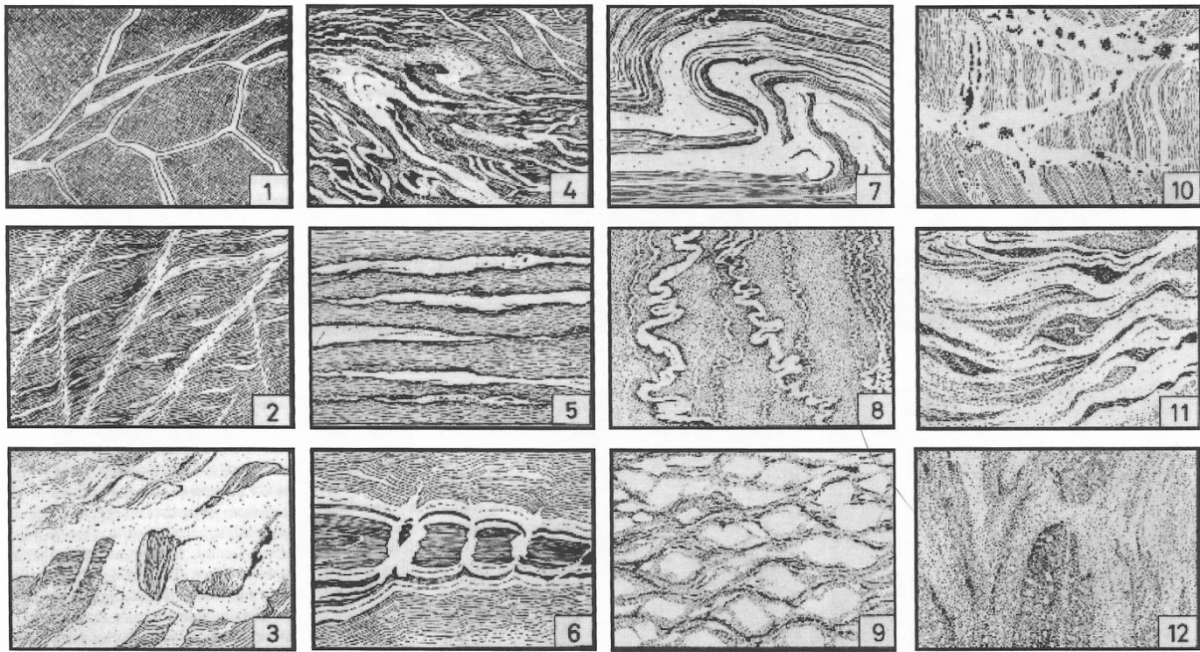


Figura 1: Estruturas reconhecidas em migmatitos. Tipos de estruturas: 1 – agmatítica ou brechada; 2 – dictionítica ou em rede; 3 – schollen ou em placas; 4 – flebítica ou em veios; 5 – estromática; 6 – surreítica ou de dilatação; 7 – dobrada; 8 – ptigmática; 9 – oftalmítica, augen ou ocelar; 10 – estiolítica, manchada ou em nódoas; 11- schlieren; 12 – nebulítica. Fonte: modificado de MEHNERT, 1968.

Característica importante nos migmatitos é a quantidade de neossoma presente na rocha. Esse fator condiciona a separação dos migmatitos em dois tipos ou padrões morfológicos:

1) metatexitos (SCHEUMANN<sup>2</sup>, 1937 apud MEHNERT, 1968): corresponde a migmatitos heterogêneos em escala de afloramento e no qual se observam estruturas pré-fusão parcial no paleossoma e provavelmente no resíduo ainda com coerência regional. Em geral a fração de fundido é pequena. O neossoma é segregado em leucossoma e melanossoma e a separação entre neossoma e resíduo pode não ocorrer;

2) diatexitos (GÜRICH<sup>3</sup>, 1905 apud MEHNERT, 1968): migmatito no qual o neossoma é dominante e o fundido está distribuído de forma pervasiva. Estruturas pré-fusão parcial são ausentes e comumente são substituídas por estruturas de fluxo anatético ou por neossoma isotrópico. Paleossoma é geralmente ausente nos diatexitos, porém pode ocorrer como enclaves.

A gradação de um tipo para o outro pode ser gradual ou abrupta, de acordo com o grau de perturbação tectônica e gradiente geotérmico ao qual o migmatito foi exposto.

<sup>2</sup> SCHEUMANN, K, H. 1937. Metatexis und Metablastesis. *Tschermaks Mineral. Petro. Mitt.* 48: 402 – 412

<sup>3</sup> GÜRICH, G. 1935. Granit und gneis. *Himmel Erde*, 17: 241 - 251

Tendo argumentado que as estruturas presentes devem ter correlação com os processos de geração, Sawyer (2008) apresenta diagrama (fig. 7a) com a relação das estruturas com o grau de fusão parcial e deformação que afetou a rocha e, conseqüentemente, em qual tipo morfológico elas ocorrem. Neste diagrama também é mostrado como o arranjo mineral e/ou forma dos grãos influencia na morfologia da rocha (fig. 7b).

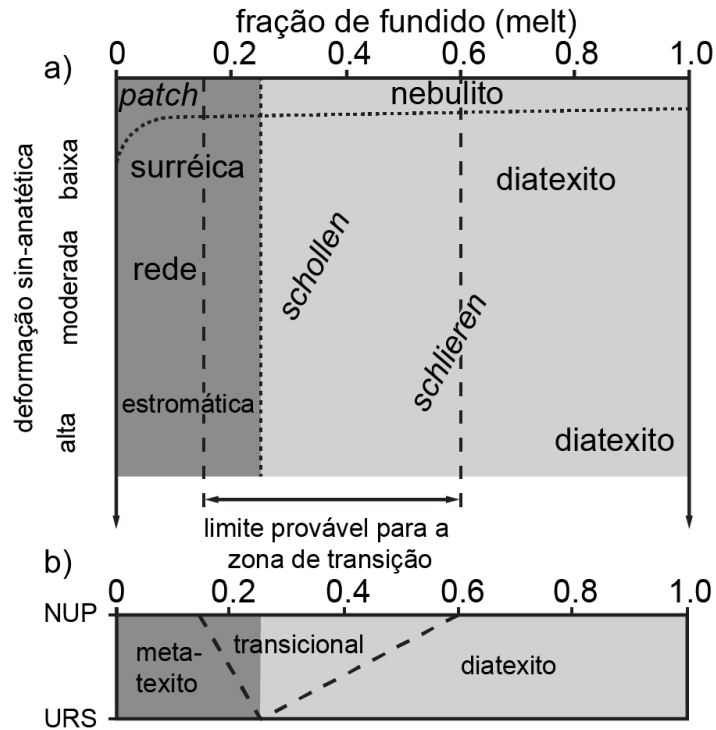


Figura 2: Diagrama exibindo a relação das estruturas com a fração de fundido nos migmatitos e tipos morfológicos gerados de acordo com a fração de fundido (a). De acordo com o e arranjo mineral (b) pode haver uma zona transicional entre os dois tipos morfológicos. Siglas: URS (*uniform rigid spheres* – esferas rígidas e uniformes) e NUP (*nonuniform solid particles* – partículas sólidas não-uniformes). No domínio URS o limite entre metatexitos e diatexitos é de aproximadamente 0.26 de fração de fundido. Fonte: modificado de SAWYER, 2008.

## GEOQUÍMICA DE MIGMATITOS

A geoquímica é ferramenta amplamente utilizada na caracterização e classificação das rochas ígneas e metamórficas, e sua aplicação no estudo de terrenos granulíticos é útil na investigação dos processos que ocorreram na formação dos migmatitos, permitindo que se estime a composição do protolito e das várias partes que compõe a rocha, além da investigação das fases envolvidas na fusão parcial.

A escolha das porções a serem analisadas por geoquímica de rocha total demanda certo cuidado, em especial pelas interpretações que venham a ser consideradas. Uma escolha

frequente para estimar a composição do protolito é analisar o resíduo da rocha. Sendo um constituinte residual na rocha, após o processo anatético e extração total ou parcial do líquido, essa parte pode guardar alguma conexão composicional com o protolito. No entanto, esta porção do migmatito não representa a composição original do protolito e interpretações geoquímicas devem ser feitas em conjunto com a composição das demais partes, leucossoma, melanossoma, selvedge.

A estimativa da composição original da rocha pode ser feita de três maneiras. A primeira seria amostrar grandes quantidades de neossoma, leuco- e melanossoma, quando se reconhece que a fusão parcial ocorreu em sistema fechado. A segunda seria amostras de litotipos similares nos arredores do migmatito e que não tenham sofrido fusão parcial. O terceiro modo seria assumir uma composição média partindo da compilação de dados bibliográficos.

Para estimar a composição do líquido anatético em casos em que não ocorre segregação do neossoma, *i.e.* sistema fechado, Sawyer (2008) sugere que os dados dos minerais normativos sejam plotados em diagramas ternários para líquidos haplograníticos, Ab-Or-Qtz ou Ab-An-Or. A superposição dos dados com o ponto cotético destes diagramas indicaria as condições P-T para formação do líquido anatético e sua provável composição “inicial”. Em casos em que houve segregação das fases neoformadas, a comparação nos diagramas ternários também pode ser feita. Porém deve-se levar em conta que outros fatores deverão afetar a composição do líquido anatético, modificando sua posição no diagrama.

Uma maneira mais ampla de investigação geoquímica de migmatitos é a utilização dos óxidos maiores em diagramas ternários e binários e de elementos traços e terras raras em spidergrams. Nesses diagramas é possível comparar as diferentes porções que compõe a rocha e qual sua relação com processos associados a anatexia (cristalização fracionada, contaminação) e identificar possíveis correlações.

Os diagramas para óxidos maiores comumente utilizados são variações dos diagramas binários do tipo Harker (HARKER, 1909), em que são comparados valores ou concentrações de óxidos que sejam característicos dos tipos litológicos, e.g. FeO+MgO vs. SiO<sub>2</sub>, CaO+K<sub>2</sub>O vs. SiO<sub>2</sub>. Ao plotar as concentrações dos diferentes componentes de um migmatito (fig. 8) é possível através do método da isócona (GRANT, 2009), avaliar se existe correlação entre os componentes e se os processos atuaram em sistema aberto ou fechado.



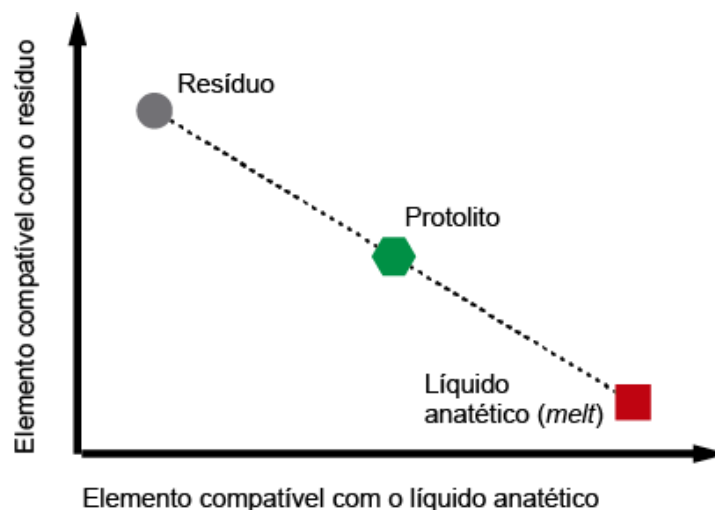


Figura 3: Diagrama binário esquemático mostrando a relação entre os componentes de um migmatito. Fonte: modificado de SAWYER, 2008.

Para a interpretação destes diagramas é necessário também incluir pontos de referências e/ou linhas de tendência compilada, visando a comparação com informações consistidas.

Uma característica observada nestes diagramas é a dispersão da nuvem de pontos de cada componente do migmatito. Sawyer (2008) destaca que a dispersão tende a aumentar do líquido anatético para o resíduo. Esse fato se deve a heterogeneidade composicional dos litotipos, processos de extração do líquido anatético e cristalização de determinadas fases minerais. Este último corresponde a alinhamentos de dados, por vezes discretos, dentro da nuvem de pontos.

Outra forma de representação gráfica são as projeções ternárias, utilizando os valores molares dos componentes. Largamente utilizada para representações de paragêneses minerais em rochas metamórficas (THOMPSON, 1957), a praticidade dessa ferramenta incide na grande possibilidade de arranjos de óxidos ou elementos que podem ser comparados, dependendo da composição dos litotipos desejados.

Outro método possível é a confecção de diagramas de normalização nos quais as partes do migmatito são normalizadas pelo resíduo ou pelo leucossoma e a partir daí é possível avaliar o processo de fusão (SOUZA, 2014).

### 3 CONFECÇÃO DOS MAPAS

A base cartográfica geológica da região de estudo conta com informações em escalas variando entre 1:50.000 e 1:1.000.000. Nos últimos dez anos o Serviço Geológico do Brasil – CPRM (SGB-CPRM) vem efetuando projetos de integração geológica e atualização cartográfica, nos quais se destacam os projetos GIS Brasil, em escala 1:1.000.000 e Mapa Geológico do Estado de São Paulo (PERROTTA *et al.*, 2005), em escala 1:750.000. Nestes projetos, foram incorporadas as modificações na cartografia do Complexo Itatins sugeridas por Dantas *et al.* (1987a).

Com o intuito de recuperar as informações cartográficas geradas no mapeamento da Folha Pedro de Toledo (SG.23-V-A-II), do Projeto Integração e Detalhe Geológico do Vale do Ribeira (SILVA *et al.*, 1981), foi confeccionada a carta geológica apresentada no Apêndice A, seguindo o modelo de mapas geológicos em escala 1:100.000 do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (SGB-CPRM). Nela são apresentados dados de geofísica aerotransportada (magnetometria e gamaespectrometria), legenda geológica atualizada, encarte tectônico, coluna tectono-estratigráfica e mapa geológico acompanhado de perfil esquemático. No Apêndice B é apresentada uma carta topográfica com a base de dados de afloramentos visitados, que incluem pontos de projetos antigos e deste trabalho. Ambas as cartas foram confeccionadas utilizando-se o programa ArcGIS® 10.2.

## 4 CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA

Os trabalhos de campo executados focaram a descrição e coleta de amostras em exposições ou seções-tipo dos principais litotipos aflorantes na porção leste e central do Complexo Itatins. São reconhecidos três litotipos principais: (i) biotita granulito félsico; (ii) paragnaisse migmatítico estromático; e (iii) granulito máfico. A associação mineral reconhecida nas amostras descritas junto com a nomenclatura adotada e proporção modal das fases em amostras representativas são apresentadas respectivamente nos Apêndices C e D.

### BIOTITA GRANULITO FÉLSICO

A unidade possui suas melhores exposições nos costões entre a cidade de Peruíbe (afloramentos CI-012 e 013) e a Praia de Barra do Una (afloramento CI-019) – Apêndice B. A rocha foi classificada macroscopicamente como biotita granulito félsico.

No afloramento na Praia do Costão (fig. 9) e na Barra do Una, a rocha predominante foi classificada como neossoma leuco a mesocrático, de coloração cinza-esbranquiçada, equigranular fina a média (0,1 – 2,0 mm), bandada, foliada e heterogênea. O bandamento é caracterizado pela alternância de leitos de espessura milimétrica com quantidade variável de minerais máficos. Dobras assimétricas com eixo subverticais e bandas de cisalhamento localizadas são comuns. Frequentemente ocorrem enclaves de rocha meso a melanocrática, com coloração cinza-escura a cinza-esverdeada, equigranular média a fina e bandada. Sua descrição detalhada é apresentada no item “Granulito máfico”.

A presença de rocha hololeucocrática é feição característica na unidade, exibindo coloração esbranquiçada, inequigranular seriada fina a média. Ela é constituída essencialmente por quartzo + plagioclásio cinza-escuro + feldspato alcalino, com os demais minerais ocorrendo como traços. A rocha se distribui de forma irregular pela encaixante, formando lentes e bolsões concordantes com a foliação e veios que cortam a estrutura (fig. 10). Em alguns locais a rocha forma bolsões de tamanho métrico, envolvendo a porção bandada e os enclaves máficos (fig. 9d).

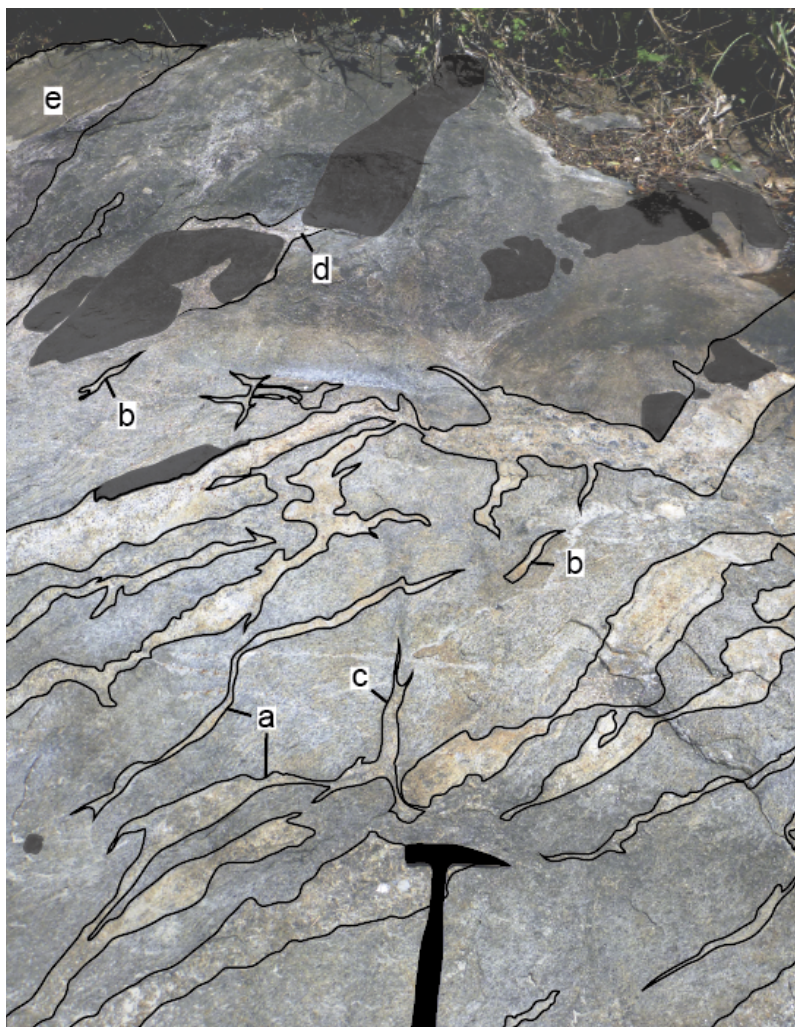


Figura 8: Visão geral do biotita granulito félsico mostrando a distribuição e morfologia do leucossoma nos afloramentos CI-013 (A, B e C) e CI-054 (D). (A) visão geral do Bt granulito com enclaves de granulito máfico (em cinza escuro) e com leucossoma formando as seguintes estruturas: (a) veios paralelos à foliação / bandamento; (b) pequenas lentes isoladas caracterizando fusão *in-situ* (estrutura tipo *patch* – fig. 7); (c) veios cortando a foliação da rocha; (d) veios de leucossoma envolvendo enclaves de granulito máfico; (e) domínios com acumulação de leucossoma. Fonte: figura elaborada pelo autor.

A matriz do litotipo predominante é constituída por quartzo, plagioclásio, biotita, ortopiroxênio, feldspato alcalino, minerais opacos, monazita, apatita, zircão, com ou sem hornblenda (apêndices C e D). O tamanho dos cristais se distribui em duas modas: (i) fina-média, entre 0,1 e 1,0 mm, que inclui os minerais ferro-magnesianos e pequena fração dos feldspatos e quartzo; e média-grossa, entre 1,0 e 1,5 mm, em que predominam feldspatos e quartzo. Ortopiroxênio (fig. 11) ocorre como cristais subédricos, com pleocroísmo intenso entre as cores azul e vermelho. Sua forma irregular, por vezes envolvendo cristais de plagioclásio ou quartzo (fig. 11A) e contatos com baixo ângulo interfacial (fig. 11C) sugere origem metamórfica. Na borda dos cristais há o desenvolvimento de finas coroas de biotita, com formação de anfibólio esverdeado quando em contato com plagioclásio (fig. 11B). Essa associação indica a substituição do ortopiroxênio durante o retrometamorfismo.

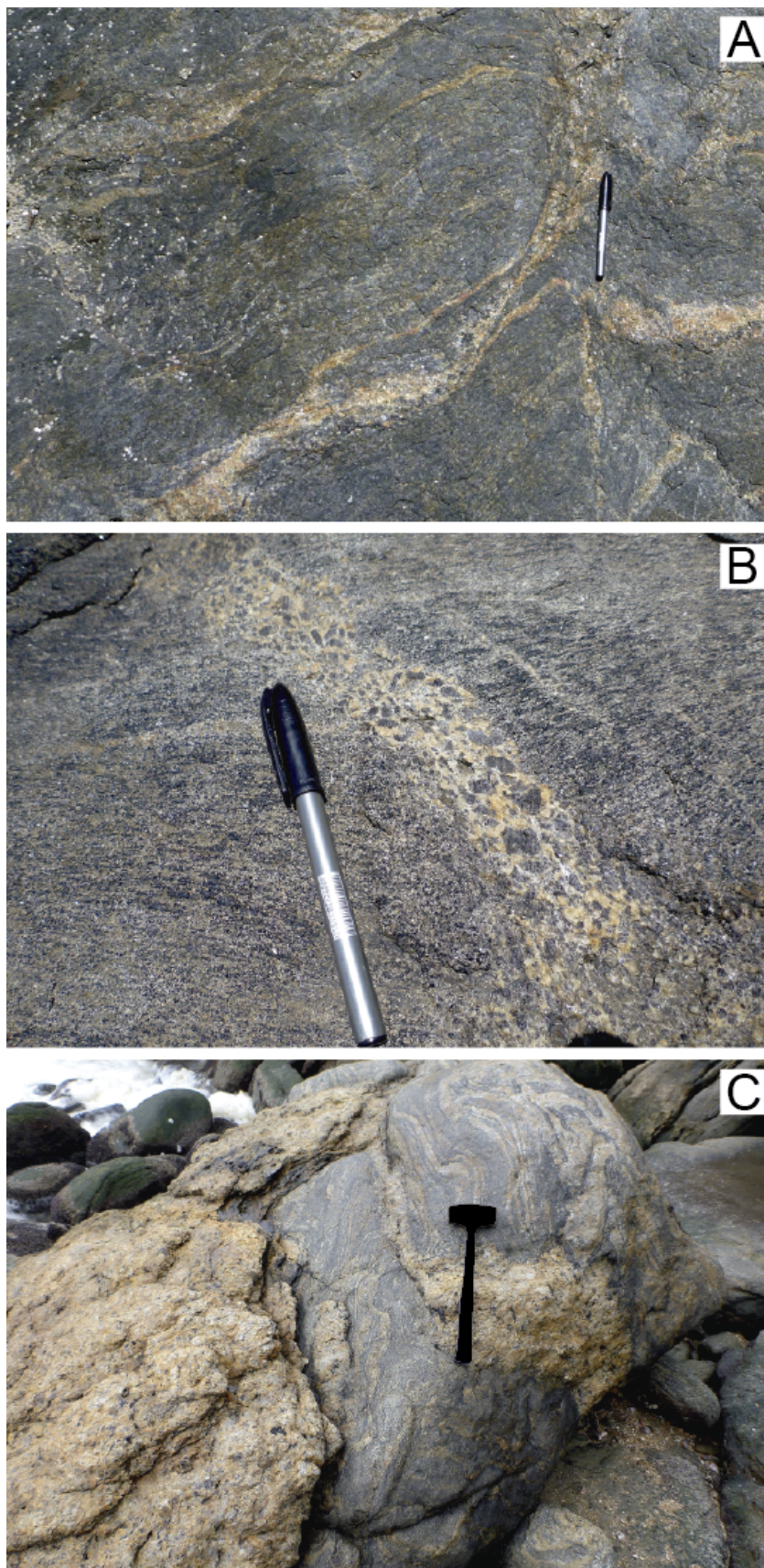


Figura 9: Destaques das estruturas formadas pelo leucossoma. (A) veios de leucossoma paralelos e dobrados segundo à foliação (afloramento CI-013); (B) veios de leucossoma cortando a estrutura, com cristais de plagioclásio cinza, orientados segundo fluxo do líquido anatético (afloramento CI-013); (C) Dique granítico que alimenta bolsão diatexitico, cortando a estrutura do biotita granulito félsico (afloramento CI-054). Fonte: figura elaborada pelo autor.

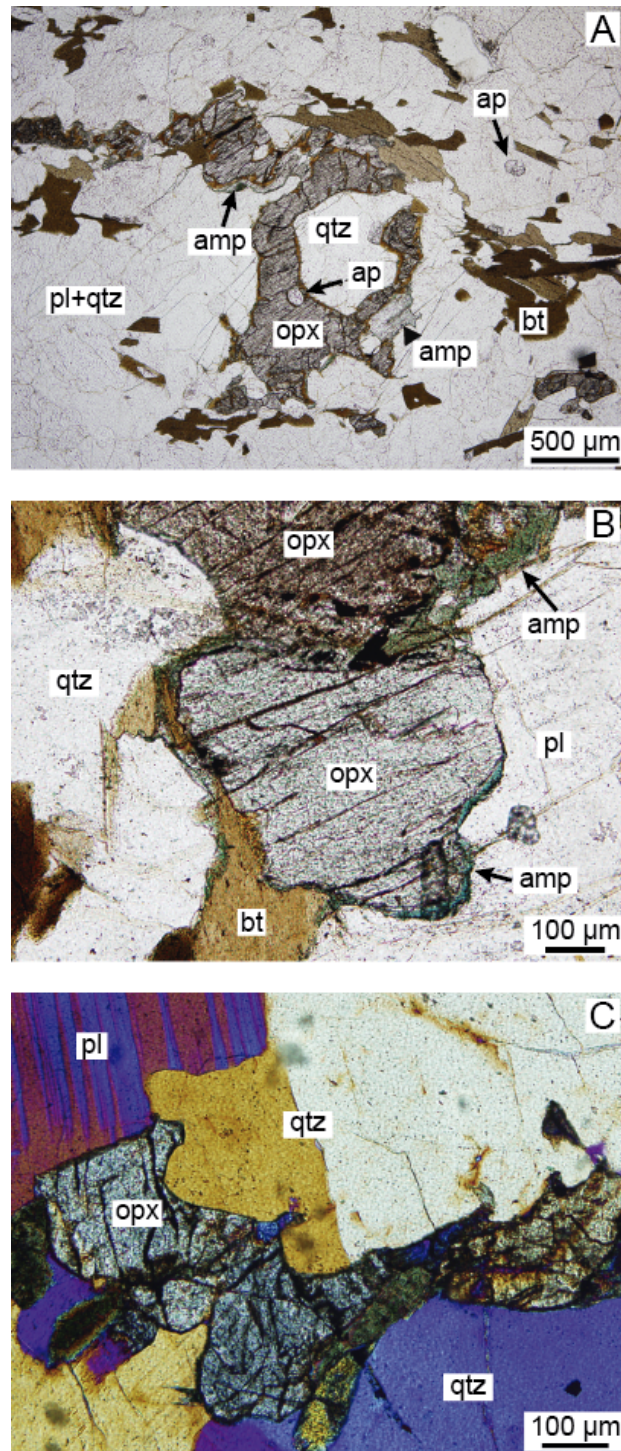


Figura 10: Fotomicrografias das feições texturais observadas em cristais de ortopiroxênio no Bt granulito. Abreviações minerais utilizadas foram: amp (anfíbólio); ap (apatita), bt (biotita), pl (plagioclásio), opx (ortopiroxênio) e qtz (quartzo). (A) Cristal de ortopiroxênio envolvendo quartzo – nicóis paralelos. (B) Biotita e anfíbólio substituindo o ortopiroxênio – nicóis paralelos; (C) Limites irregulares de cristal de ortopiroxênio em contato com quartzo indicando a mobilidade do limite de grão do quartzo – nicóis cruzados e analisador. Fonte: figura elaborada pelo autor.

Plagioclásio e feldspato alcalino ocorrem como cristais euédricos a subédricos, por vezes com bordas lobadas, corroídas ou mesmo com baixo ângulo interfacial no contato com

quartzo (fig. 12A). Nos cristais de plagioclásio destaca-se a presença de inclusões retangulares de feldspato alcalino, e inclusões elipsoidais de quartzo. Biotita também ocorre como inclusões euédricas a subédricas no plagioclásio. Cristais de feldspato alcalino são euédricos a anédricos, este último preenchendo os interstícios dos cristais de plagioclásio. Quartzo ocorre como cristais anédricos preenchendo os interstícios dos cristais de feldspatos, por vezes intercrescidos com biotita. Forma feições do tipo filme (fig. 12B) e *string beads* entre os cristais bem formados de feldspatos. Na matriz a biotita forma placas orientadas segundo a foliação que é paralela ao bandamento composicional, exibe pleocroísmo nas cores verde-castanho a castanho-amarelada e apresenta inclusões de minerais opacos, por vezes com hábito acicular. Hornblenda ocorre como cristais subédricos, com bordas retas a irregulares, associada ao ortopiroxênio; exibe pleocroísmo nas cores verde-musgo a verde-musgo-amarelada, inclusões anédricas de quartzo e subédricas de apatita.

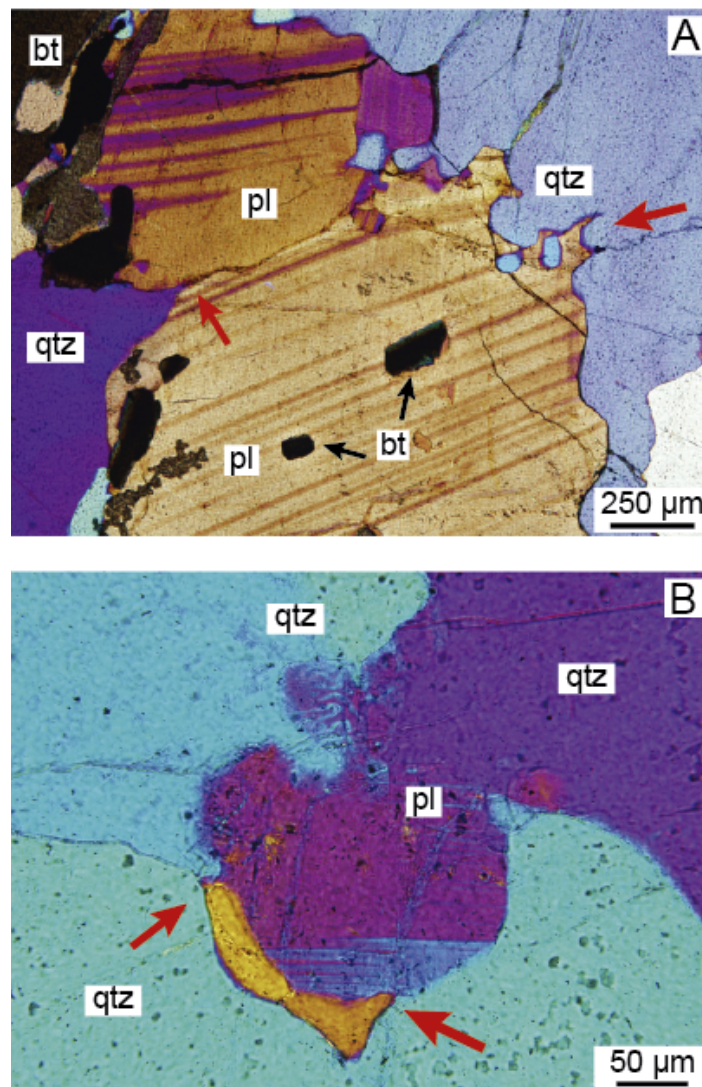


Figura 11: Fotomicrografias das feições texturais indicativas da ocorrência de fusão parcial, presença de resquícios de líquido anatótico e cristalização a partir do líquido anatótico no Bt granulito. Abreviações minerais utilizadas foram: bt (biotita), pl

(plagioclásio) e qtz (quartzo). (A) Limite irregular de cristal de plagioclásio com pequeno ângulo interfacial (setas) que são interpretados como resultado da infiltração do líquido anatóxico – nicóis cruzados e analisador. (B) Filme de quartzo (laranja) com setas indicando limites arredondados interpretados como resultado de reequilíbrio textural com aumento do ângulo interfacial – nicóis cruzados e analisador. Fonte: figura elaborada pelo autor.

Apatita ocorre como cristais alongados com bordas arredondadas, com razão axial entre 2:1 a 3:1, ricos em exsoluções lamelares. Determinações qualitativas foram feitas com EDS acoplado a EPMA e indicam que as exsoluções são de monazita. Zircão ocorre como cristais prismáticos a semi-arredondados, de coloração acinzentada, à luz transmitida, incluso em feldspatos e quartzo e seu tamanho é da ordem de 30 a 150  $\mu\text{m}$ .

O leucossoma exibe textura granoblástica, coloração cinza-creme, sendo constituído por feldspato alcalino, plagioclásio cinza escuro, quartzo, com ou sem ortopiroxênio e biotita, e os acessórios são minerais opacos e zircão (Apêndices C e D). Geralmente com granulometria superior aos demais litotipos, com cristais com tamanho entre 0,5 e 15 mm. Ortopiroxênio ocorre de forma restrita, com cristais subédricos parcialmente substituídos por aglomerado de cristais aciculares de coloração amarelada, possivelmente produto de alteração. Feldspato alcalino ocorre como cristais euédricos, com bordas sub-arredondadas a lobadas, com aspecto irregular ou corroídas. Muitos cristais exibem exsoluções lamelares finas do tipo lenticular (i.e. stringlets), zonamento composicional e quando em contato com plagioclásio é comum a formação de lobos de mirmequita. Plagioclásio também ocorre como cristais euédricos, retangulares, com bordas sub-arredondadas (fig. 13A) a corroídas. Exibe inclusões retangulares de feldspato alcalino e elipsoidais de quartzo (fig. 13B e C). Quartzo ocorre como cristais subédricos, com extinção tipo tabuleiro de xadrez. Zircão é o principal mineral acessório, formando cristais prismáticos a arredondados, de coloração acinzentada à luz transmitida, e ocorre incluso na biotita e plagioclásio; com tamanho da ordem de 20 a 150  $\mu\text{m}$ .

Dois feições características foram identificadas no plagioclásio: nas inclusões retangulares, comumente ocorrem cristais sub-arredondados, com tamanho inferior a 20  $\mu\text{m}$ , com relevo alto e incolores (figura 13C) e dados preliminares de EDS-EPMA indicaram tratar-se de zircão; a coloração cinza-escura do mineral (figs. 10B e 14A) é resultado da grande quantidade de inclusões pontuais presentes no mineral. Em alguns domínios dos cristais, essas inclusões são maiores e com aspecto acicular. Dados da literatura sugerem que essa feição corresponda a inclusões de óxidos de Fe-Ti (SMITH, 1974).



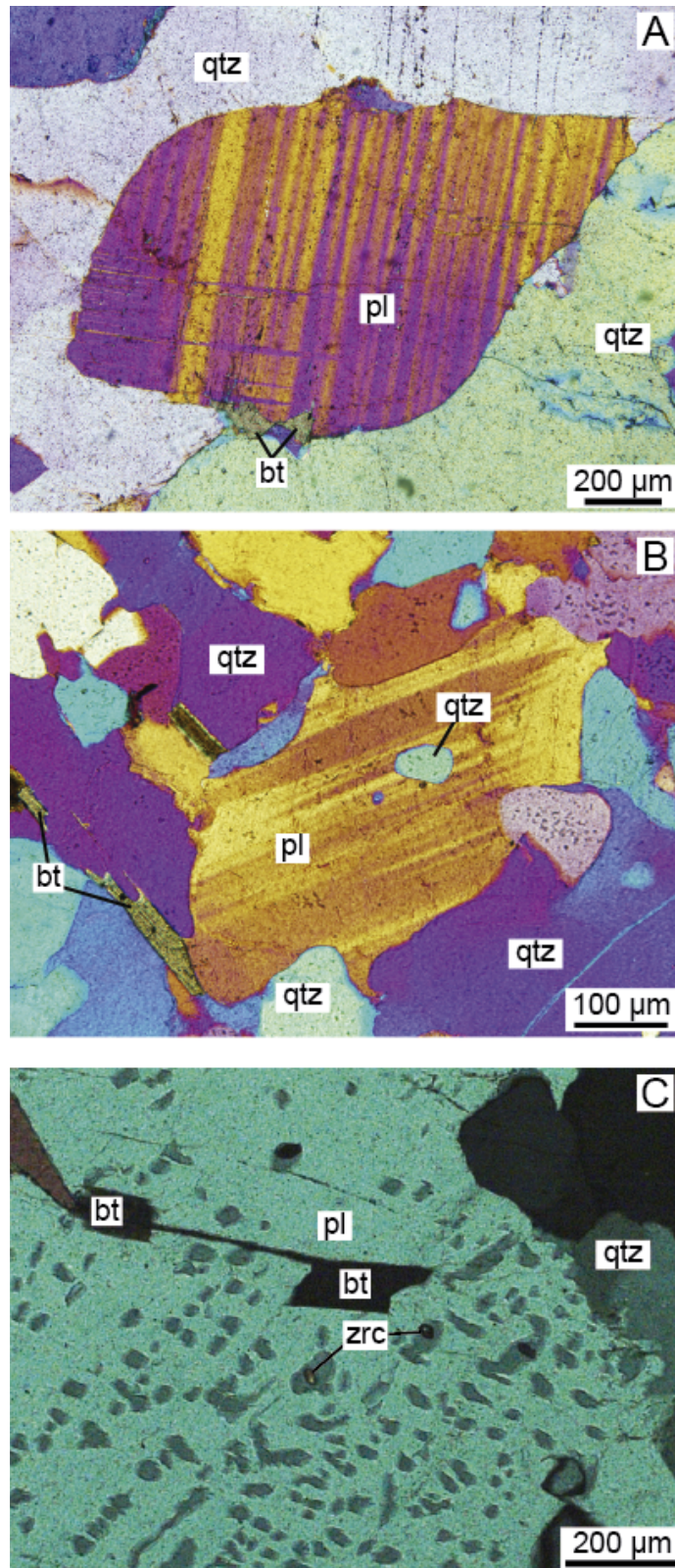


Figura 12: Feições texturais nos leucossomas do biotita granulito félsico. Abreviações minerais usadas foram: bt (biotita), pl (plagioclásio), qtz (quartzo) e zircão (zrn). (A) Cristal de plagioclásio com bordas arredondadas ao lado de quartzo; (B) Cristal de plagioclásio com bordas arredondadas (alto ângulo interfacial) e bordas pontiagudas (baixo ângulo interfacial) em contato com quartzo, indicando reequilíbrio textural parcial; (C) Cristais de zircão associados a inclusões/exsoluções de feldspato potássico no plagioclásio. Fonte: figura elaborada pelo autor.

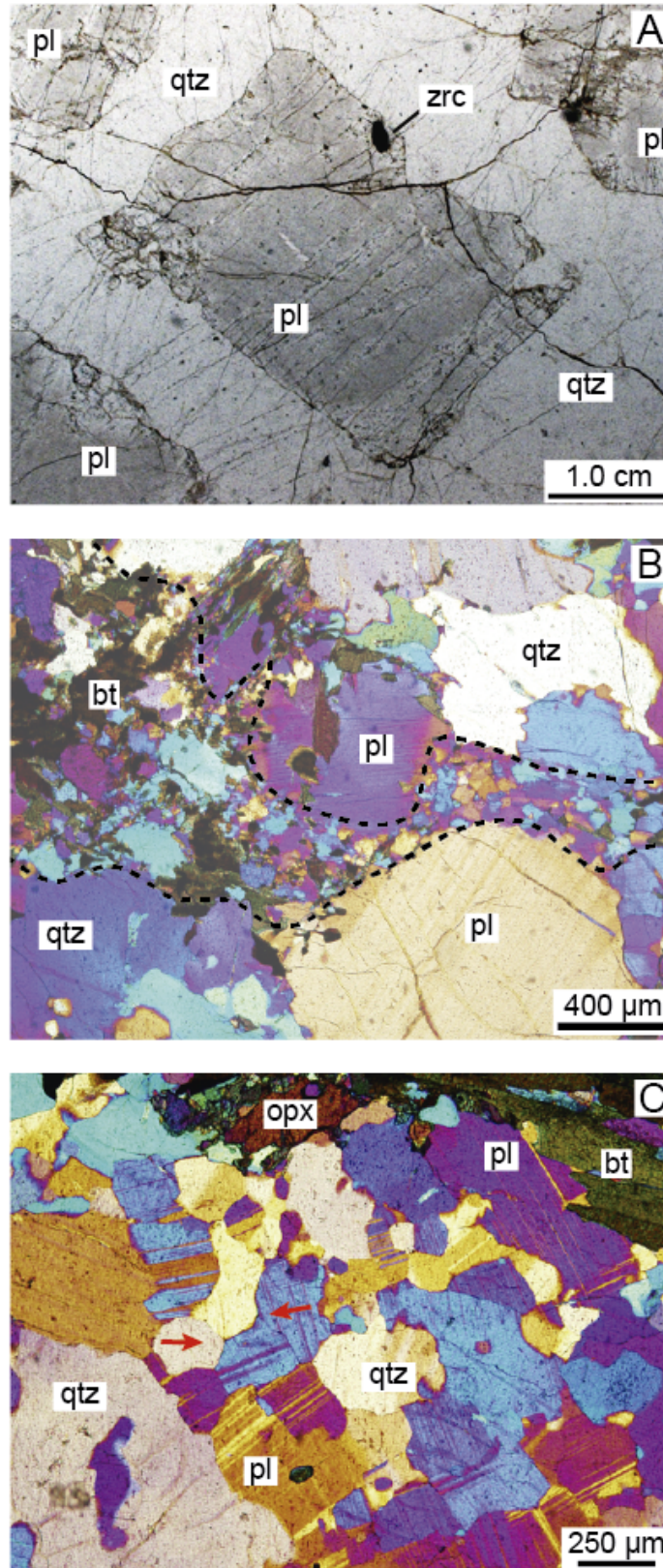


Figura 13: Feições texturais nos leucossomas do biotita granulito fêlsico. Abreviações minerais usadas foram: bt (biotita), pl (plagioclásio), opx (ortopiroxênio), qtz (quartzo) e zrn (zircão). (A) Cristal euédrico de plagioclásio cinza com grande quantidade de pequenas inclusões além de uma inclusão prismática de zircão; (B) Veios tonalíticos (marcados pelas linhas tracejadas em vermelho) composto por biotita + plagioclásio + quartzo, cortando leucossoma; (C) Bolsão de leucossoma de composição tonalítica onde cristais de plagioclásio e quartzo exibem diferentes formas; alguns são anédricos com bordas com embainhamento, enquanto outros exibem contatos retos indicando alto grau de reequilíbrio textural. Fonte: figura elaborada pelo autor

É comum tanto no litotipo dominante quanto nos leucossomas a presença de faixas com espessura fina, > 0,2 mm, cortando a rocha (fig. 14B), sendo compostas por cristais euédricos de plagioclásio e anédricos de quartzo. No contato entre estas faixas e os cristais de feldspato alcalino é comum a presença de lobos de mirmequita nas bordas de alguns cristais. Nestas faixas e em pequenos bolsões de leucossoma, os minerais exibem textura poligonal, a qual foi interpretada como cristalização a partir do líquido anatético (fig. 14C).

Os cristais de ortopiroxênio e clinopiroxênio são euédricos a subédricos, com placas de biotita esverdeada e cristais subédricos de hornblenda ocorrendo em contato. Ortopiroxênio exhibe pleocroísmo intenso nas tonalidades azulada a avermelhada, sendo comum a presença de lamelas de exsolução de clinopiroxênio. Plagioclásio ocorre como cristais subédricos, com muitas inclusões de feldspato alcalino e quartzo. Quartzo ocorre como cristais anédricos dispersos pela matriz.

#### PARAGNAISSE MIGMATÍTICO ESTROMÁTICO

A unidade de paragnaisse migmatítico estromático ocorre como lentes de extensão quilométrica junto ao biotita granulito félsico. O contato entre as duas unidades não foi reconhecido no campo pois nos locais onde seria possível reconhecer essa estrutura, ela foi obliterada pela presença de corpos decamétricos de diatexito hololeucocrático.

As principais exposições da unidade localizam-se na Cachoeira do Paraíso (CI-017) e extremo Sul da Prainha (CI-054) – Apêndice B.

A rocha é de cor cinza-esbranquiçada e verde-escura, exhibe bandamento bem definido pela alternância de ao menos três litotipos dispostos em leitos de espessura centimétrica a decimétrica (fig. 15A). O bandamento é ora regular, ora intensamente dobrado. Em algumas regiões predomina leucossoma com aspecto granular e heterogêneo. A orientação do leucossoma pode ser paralela a foliação, por vezes gerando domínios com acumulação do líquido anatético (fig. 15B). O leucossoma ocorre também na forma de diques hololeucocráticos de espessura decimétrica cortando a rocha bandada (figura 16A).

Devido à heterogeneidade litológica da unidade os litotipos que compõem cada camada serão descritos de forma separada.

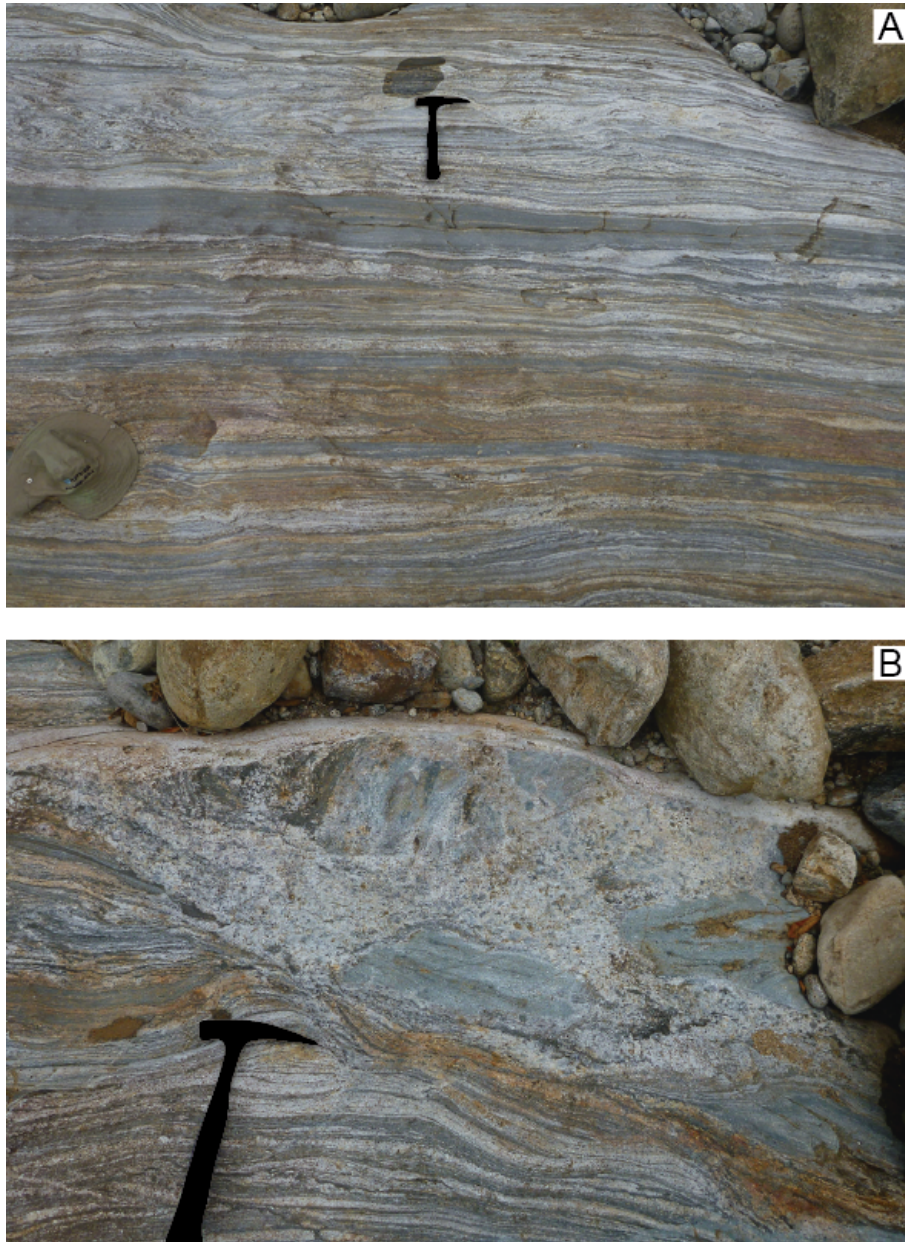


Figura 14: Feições de campo observadas no Paragnaisse migmatítico estromático. (CI-017). (A) Visão geral da estrutura bandada da rocha. (B) Região de acumulação de leucossoma com fragmentos do granulitos máfico. Fonte: figura elaborada pelo autor.

#### NEOSSOMA MESOCRÁTICO

Rocha de cor cinza-rosada a cinza-clara, foliada, textura grano-lepidoblástica porfiroblástica fina a grossa, 0,1 – 50 mm (figs. 15 e 16), pouco a moderadamente alterada, composta por granada, sillimanita, biotita, plagioclásio, feldspato alcalino, quartzo, biotita, minerais opacos, zircão, monazita, rutilo e com rara cordierita (Apêndice C e D). Granada ocorre como cristais euédricos a subédricos, por vezes fraturados, com bordas arredondadas a corroídas, substituídas por quartzo ou pela associação biotita + sillimanita + quartzo ± cordierita

(fig. 17A) ou plagioclásio + biotita + sillimanita + opacos + espinélio (fig. 17C). Exibe padrão heterogêneo de inclusões, com formas retangulares, alongadas, elipsoidais e eúdricas. Os minerais que ocorrem inclusos na granada são: quartzo, sillimanita, feldspato, opacos, rutilo, zircão e monazita. Em um cristal foi identificada uma inclusão polifásica, constituída por sillimanita + quartzo (fig. 17B).

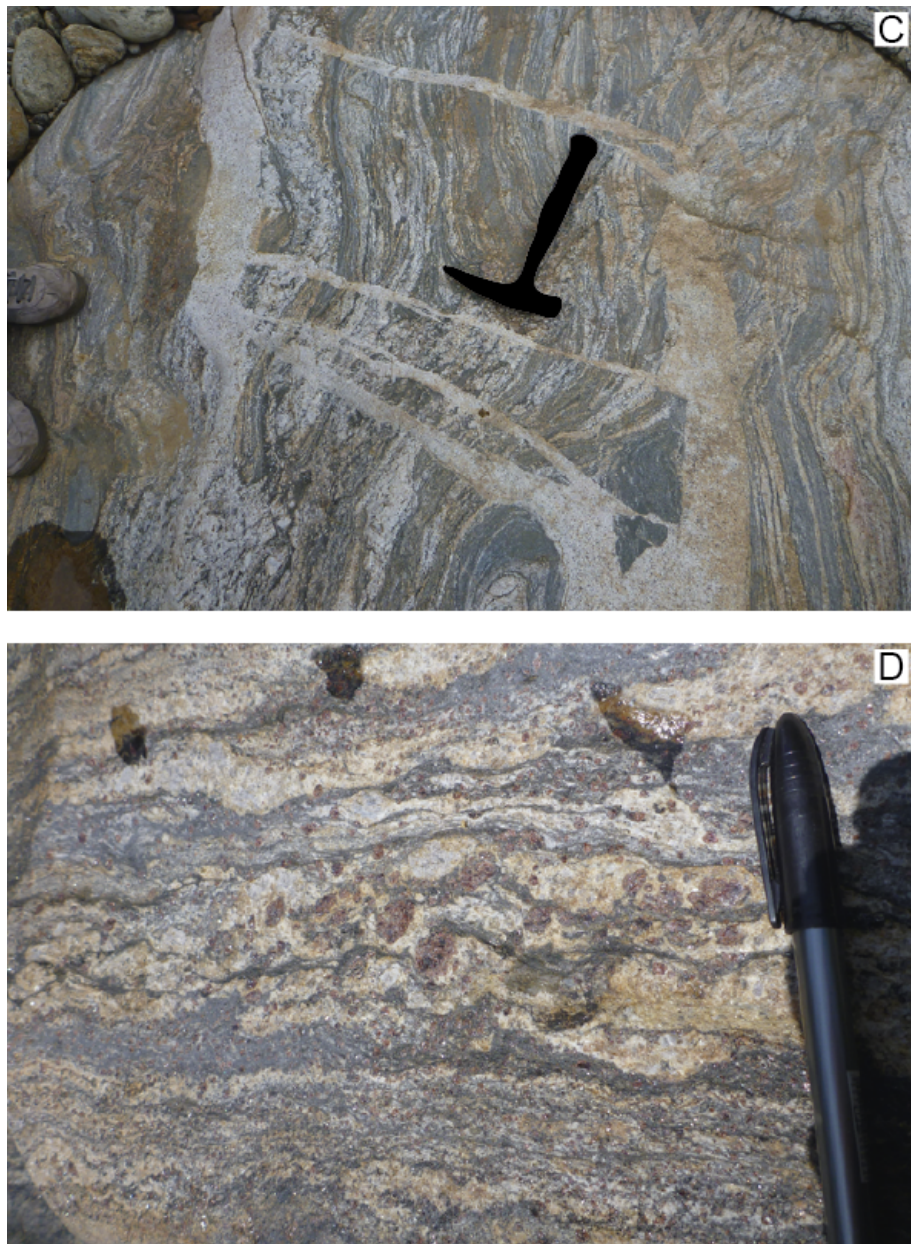


Figura 15: Feições de campo observadas no Sillimanita-granada-biotita diatexito. (A) Diques hololeucocráticos intrusivos no diatexito, exibindo feições indicativas de colocação em condição dúctil-rúptil. (B) Detalhe de região composta por leucossoma e neossoma residual constituído por porfiroblastos de granada envolvidos biotita + sillimanita. Fonte: figura elaborada pelo autor.

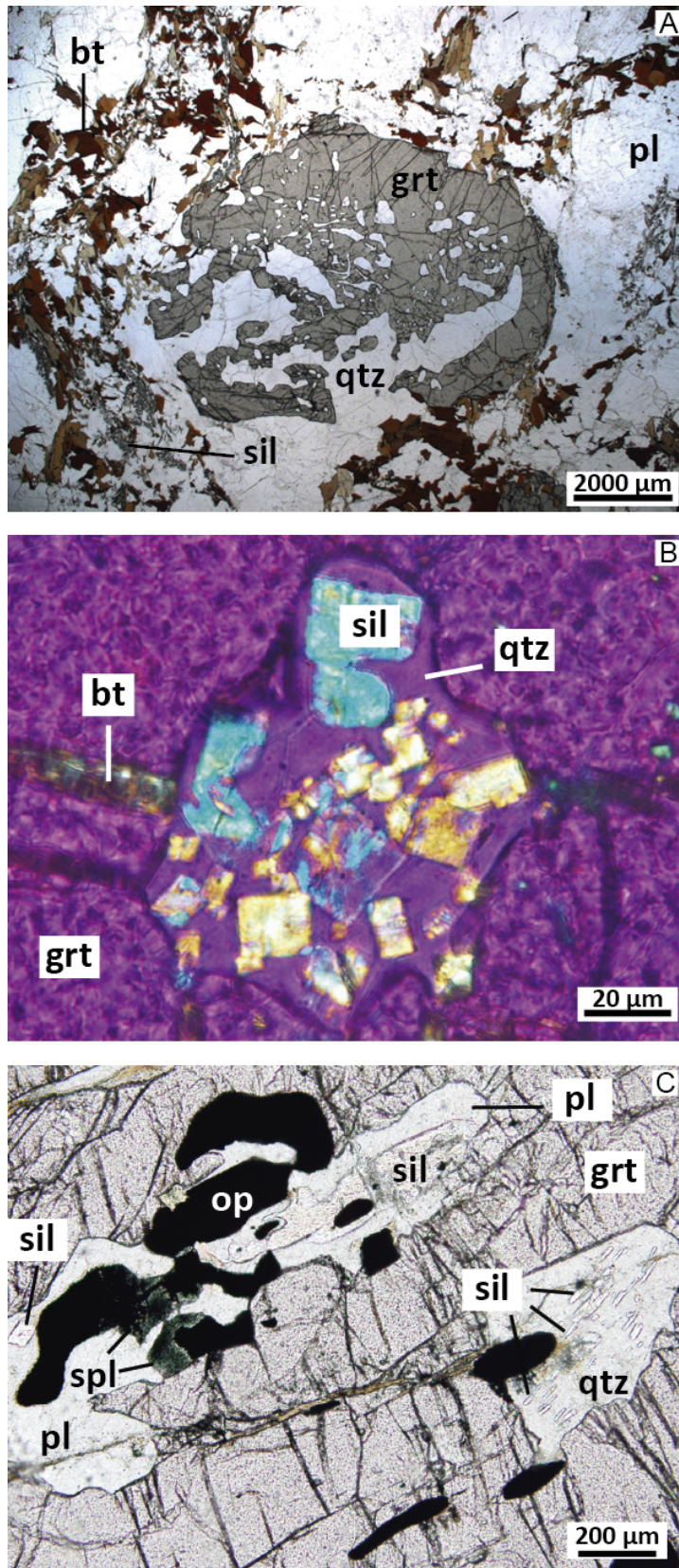


Figura 16: Feições texturais observadas em porfiroblastos de granada. (A) Aspecto geral de porfiroblasto de granada, rico em inclusões elipsoidais de quartzo com a associação quartzo + biotita + sillimanita envolvendo o cristal – nicóis paralelos. (B) Inclusão em granada constituída por quartzo e cristais prismáticos de sillimanita – nicóis cruzados e analisador. (C) Associação retrometamórfica composta por plagioclásio + quartzo + sillimanita + opacos + espinélio, substituindo cristal de granada. – nicóis paralelos. Fonte:figura elaborada pelo autor.

Biotita ocorre como placas orientadas segundo a foliação, distribuídas preferencialmente ao redor da granada, em conjunto com cristais prismáticos de sillimanita. Exibe pleocroísmo nas cores vermelho-amarronzado a marrom-amarelado. Plagioclásio e feldspato alcalino ocorrem como cristais euédricos a subédricos com contatos retos e lobados, com feições de exsolução, respectivamente, retangular e lenticular. Na borda do feldspato alcalino é comum o desenvolvimento de mirmequita, distribuídas ao longo de estreitas faixas cortando os grãos. Quartzo ocorre como cristais subédricos a anédricos, com bordas arredondadas e lobadas, por vezes formando contatos em cúspide com feldspatos. Ocorre também como finos cristais anédricos margeando granada e feldspatos ou intercrescido com biotita. Esse aspecto do quartzo é descrito na literatura como filmes de quartzo e interpretado como o mineral mimetizando o líquido final aprisionado (SAWYER, 2001; HOLNESS; CESARE; SAWYER, 2010). Cristais de minerais opacos estão associados à biotita, formando aglomerados finos (<0,1mm). Zircão ocorre como cristais prismáticos a arredondados, de cor cinza-clara, à luz transmitida, inclusos em quartzo, plagioclásio, biotita, apatita e granada. O tamanho dos cristais varia entre 20 e 110  $\mu\text{m}$ . Monazita forma cristais euédricos a anédricos, com cor amarela, geralmente associada à apatita ou borda de granada.

Ortopiroxênio ocorre de forma restrita nas porções melanocráticas. Ocorre como cristais subédricos, com pleocroísmo nas cores azul a vermelhado, fraturados, fortemente substituídos por tremolita + clinopiroxênio + hornblenda. Nas rochas em que o mineral está presente, não se observa sillimanita. Quando há coexistência de ortopiroxênio e granada, este último geralmente exibe aspecto xenoblástico, com intensa corrosão nas bordas.

Na amostra coletada no afloramento CI-046 (Granada-biotita diatexito com cordierita) ocorrem diversos porfiroblastos de granada com graus variados de substituição por paragênese de temperatura mais baixa. Essa substituição é representada por: (i) coroas constituídas por compostas por plagioclásio (mais próximo da granada) e biotita (fig. 18A); (ii) pseudomorfos do porfiroblasto constituídos pela associação cordierita + biotita + opacos + plagioclásio + quartzo (figs. 18B e C). Essa feição sugere como reação da granada com líquido anatótico que interagiu com as fases residuais presentes nas porções melanocráticas do diatexito.

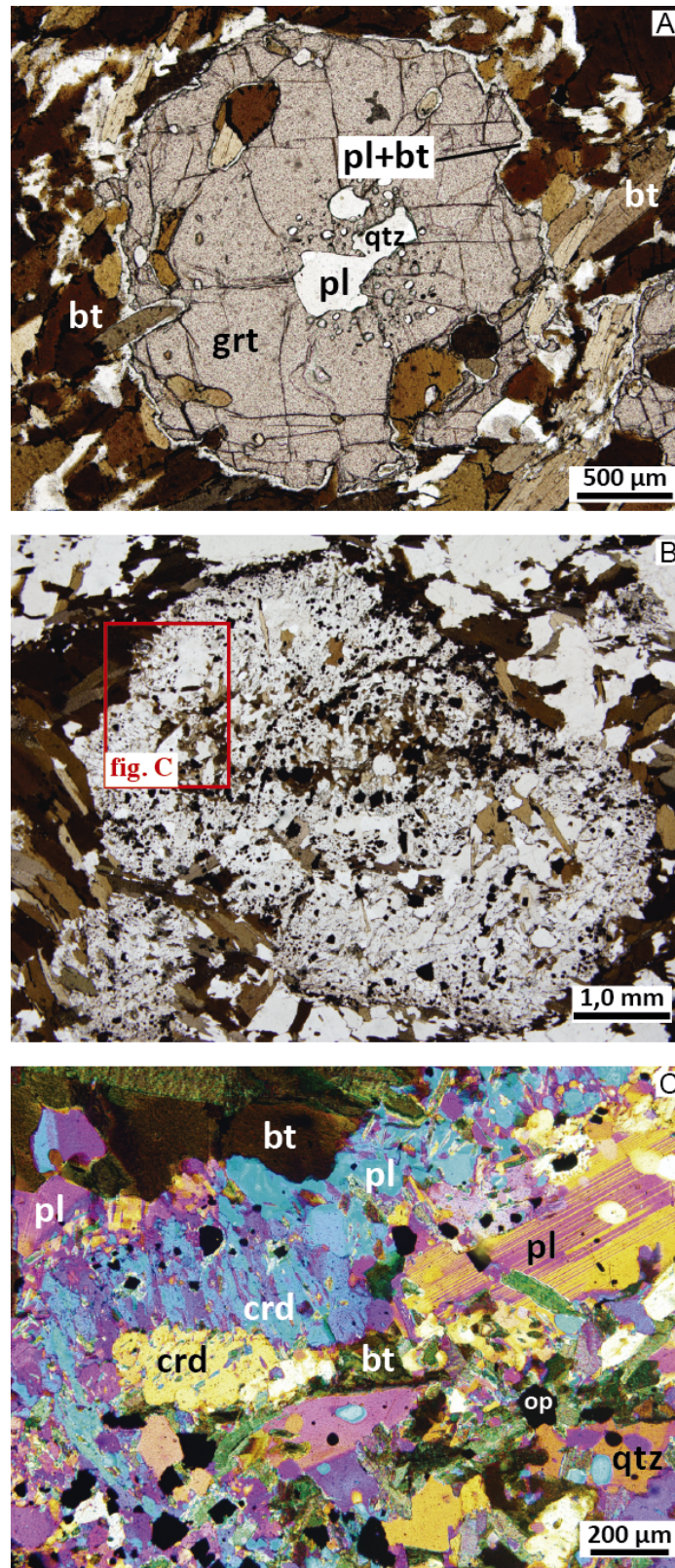


Figura 17: feições texturais em granada da amostra CI-046. (A) Visão geral de porfiroblasto de granada com inclusões de quartzo, plagioclásio e biotita. Ao redor do cristal ocorre uma fina coroa composta por plagioclásio e biotita – nicóis paralelos. (B) Visão geral do pseudomorfo de granada – nicóis paralelos. (C) Detalhe de pseudomorfo de granada constituído pela associação cordierita + biotita + opacos + plagioclásio + quartzo – nicóis cruzados e analisador. Fonte: figura elaborada pelo autor.



## LEUCOSSOMA

Rocha de cor cinza-esbranquiçada, foliada, textura granoblástica fina a média (0,1 a 3,0 mm), pouco a moderadamente alterada, composta por plagioclásio, feldspato alcalino, quartzo, biotita, minerais opacos, zircão, monazita, apatita, com quantidades menores de granada, sillimanita ou ortopiroxênio (Apêndices C e D). Plagioclásio e feldspato alcalino ocorrem como cristais euédricos a subédricos, com contatos retos, lobados e em cúspide, por vezes formando ângulos interfaciais inferiores a  $60^\circ$  com cristais de quartzo. No plagioclásio são frequentes as inclusões com hábito retangular ou elipsoidais. Alguns cristais apresentam inclusões de espinélio verde (fig. 19A) ou sillimanita bordejada por quartzo (fig. 19B).

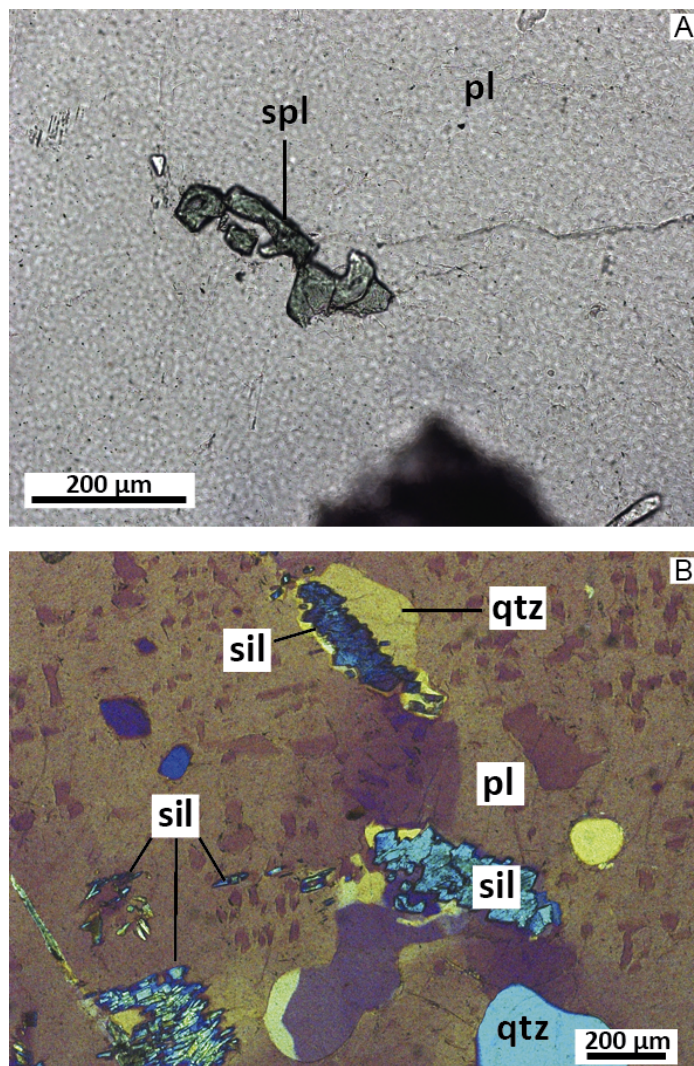


Figura 18: Fotomicrografias de seções delgadas da unidade de diatexito. (A) Detalhe de inclusão de espinélio esverdeado (spl) em cristal de plagioclásio (pl) – nicóis paralelos. (B) detalhe das inclusões de sillimanita (sil) e quartzo (qtz) em cristal de plagioclásio (pl) – nicóis cruzado e analisador. Figura elaborada pelo autor.

Feldspato alcalino é pertítico, com grande quantidade de exsoluções em forma de bolhas (blebs) ou lenticulares. Na borda é comum o desenvolvimento de mirmequita quando em contato com plagioclásio. Biotita ocorre como placas orientadas segundo a foliação. Exibe pleocroísmo nas cores verde-musgo pálido a verde-amarelada e forma texturas de intercrescimento com quartzo. O quartzo ocorre como cristais subédricos a anédricos, com contatos retos ou em cúspide e exibe extinção ondulante. Ao redor dos cristais de feldspato pode formar finos cristais alongados, na forma de filmes. Os minerais traços desse litotipo são representados por zircão, apatita e monazita. O zircão ocorre como cristais prismáticos a arredondados, de coloração acinzentada-clara, à luz transmitida, inclusos em quartzo, plagioclásio e biotita e seu tamanho varia entre 20 e 110  $\mu\text{m}$ . Monazita ocorre como cristais subédrico a anédrico, com tamanho superior ao do zircão. Apatita forma cristais subédricos a anédricos, estando predominantemente associada à biotita. Ocorre como cristais alongados com bordas arredondadas, com razão axial 2 a 3/1, ricos em exsoluções lamelares. Granada, sillimanita ou ortopiroxênio ocorrem como cristais incorporados das porções meso e melanocráticas, e exibem as mesmas características descritas no item anterior.

#### NEOSSOMA MELANOCRÁTICO

Este litotipo apresenta características texturais similares às dos schölen observados na unidade de biotita granulito félsico e sua descrição consta no item subsequente.

#### GRANULITO MÁFICO

Como esta rocha ocorre em ambas as unidades e apresenta características mineralógicas similares, sua descrição será feita em conjunto destacando as feições que sejam singulares em cada unidade.

No biotita granulito félsico, as rochas máficas ocorrem como enclaves angulosos ou com aspecto plástico dependendo da sua dimensão (fig.20A e B). No Paragnaisse migmatítico estromático ocorrem como camadas contínuas de extensão decamétrica e espessura centimétrica a decimétrica (fig. 20C). Em ambos os casos possuem coloração verde-escura a verde-clara, são foliadas, com textura nemato-granoblástica e granulometria muito fina a média (0,01 – 2,0 mm). São constituídos por ortopiroxênio, hornblenda, clinopiroxênio, plagioclásio, biotita, quartzo e minerais opacos, podendo conter granada (Apêndices C e D).



Figura 19: Visão geral das ocorrências de granulito máfico no biotita granulito félsico (A e B) e no paragnaisse migmatítico estromático (C). O leucossoma pode intrudir partes dos *rafts* de granulito máfico (A) ou fragmentá-lo (B). Em (C) observa-se granulito máfico formando camadas de espessura decimétrica no migmatitos paraderivado.

Hornblenda é a fase máfica mais comum nesta rocha, formando cristais euédricos a subédricos, com contatos retos a curvos com os demais minerais. Pode apresentar inclusões elipsoidais de quartzo e euédricas de minerais opacos (fig. 21A). A associação hornblenda + ortopiroxênio + clinopiroxênio forma uma trama ao longo da rocha, envolvendo cristais de plagioclásio. O contato entre cristais subédricos a anédricos de orto ou clinopiroxênio (fig. 21B), associados com plagioclásio e biotita, marcam a quebra do anfibólio e entrada na fácies granulito. Ortopiroxênio ocorre de forma similar a observada no biotita granulito félsico, envolvendo cristais de plagioclásio junto à hornblenda (fig. 21C). Cristais de plagioclásio são subédricos, com contatos curvos a irregulares com minerais máficos (fig. 21C).

Nas rochas associadas ao paragnaisse migmatítico estromático, o plagioclásio é rico em inclusões/exsoluções retangulares, elipsoidais ou lamelares (fig. 22A). Minerais opacos ocorrem associados aos piroxênios e à biotita. O mineral micáceo ocorre como placas de tamanho variado, com coloração vermelha-escura, associada ao piroxênio em contato com hornblenda. Ocorre também junto a minerais opacos, orientada ao longo de micro-fraturas que cortam a rocha.

Quartzo ocorre como cristais subédricos a anédricos, com distribuição restrita pela rocha. É comum ocorrer ao redor de minerais máficos, formando filmes ou preenchendo vazios (fig. 22B), exibindo ângulos interfaciais baixos.

No afloramento CI-010 (Prainha), a rocha está associada ao biotita granulito félsico e possui cristais anédricos de granada, com tamanho aproximado de 1,0 mm, com bordas corroídas e parcialmente substituído por coroa de reação constituída por plagioclásio + clinopiroxênio + minerais opacos + hornblenda ± ortopiroxênio (fig. 22C).

No afloramento CI-017 (Cachoeira do Paraíso), algumas lentes de granulitos máfico no sillimanita-granada-biotita diatexito apresentam granulometria média. Nessas amostras o plagioclásio é anédrico e rico em exsoluções, distribuindo-se na matriz, junto à hornblenda e formando faixas leucocráticas, interpretadas como o leucossoma das rochas máficas.

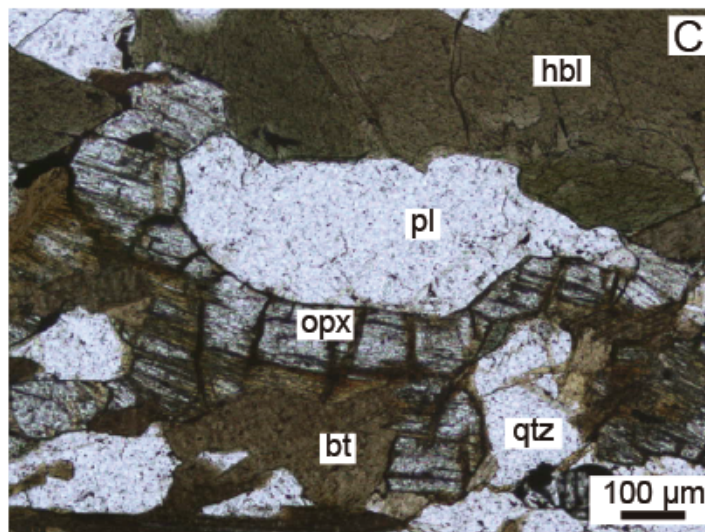
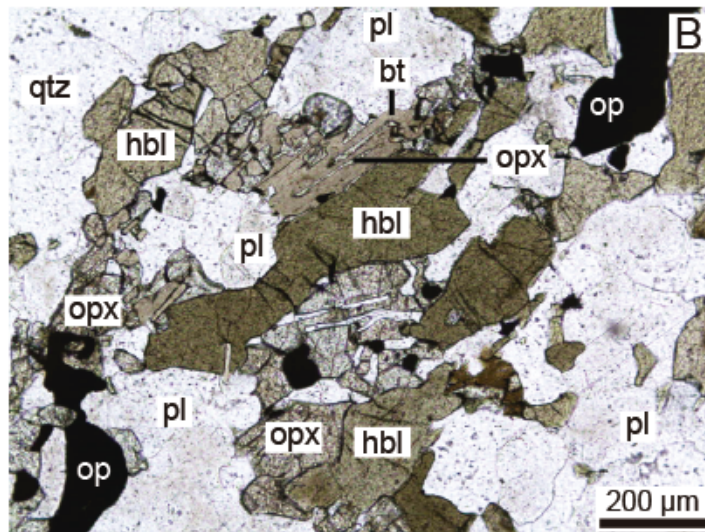
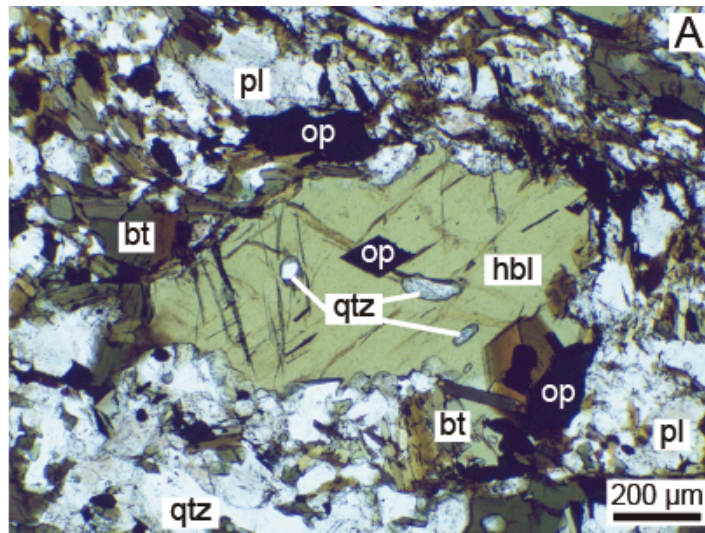


Figura 20: Feições texturais do granulitos máfico. (A) Cristal de hornblenda com inclusões elipsoidais de quartzo e prismática de mineral opaco – nicóis paralelos. (B) Cristal de hornblenda sendo substituído por biotita + ortopiroxênio. Notar o crescimento de ortopiroxênio na clivagem da biotita – nicóis paralelos. (C) Cristal de ortopiroxênio com contatos retos a curvos, envolvendo parcialmente plagioclásio. Notar o contato parcialmente irregular entre hornblenda e plagioclásio- nicóis paralelos. Fonte: figura elaborada pelo autor.

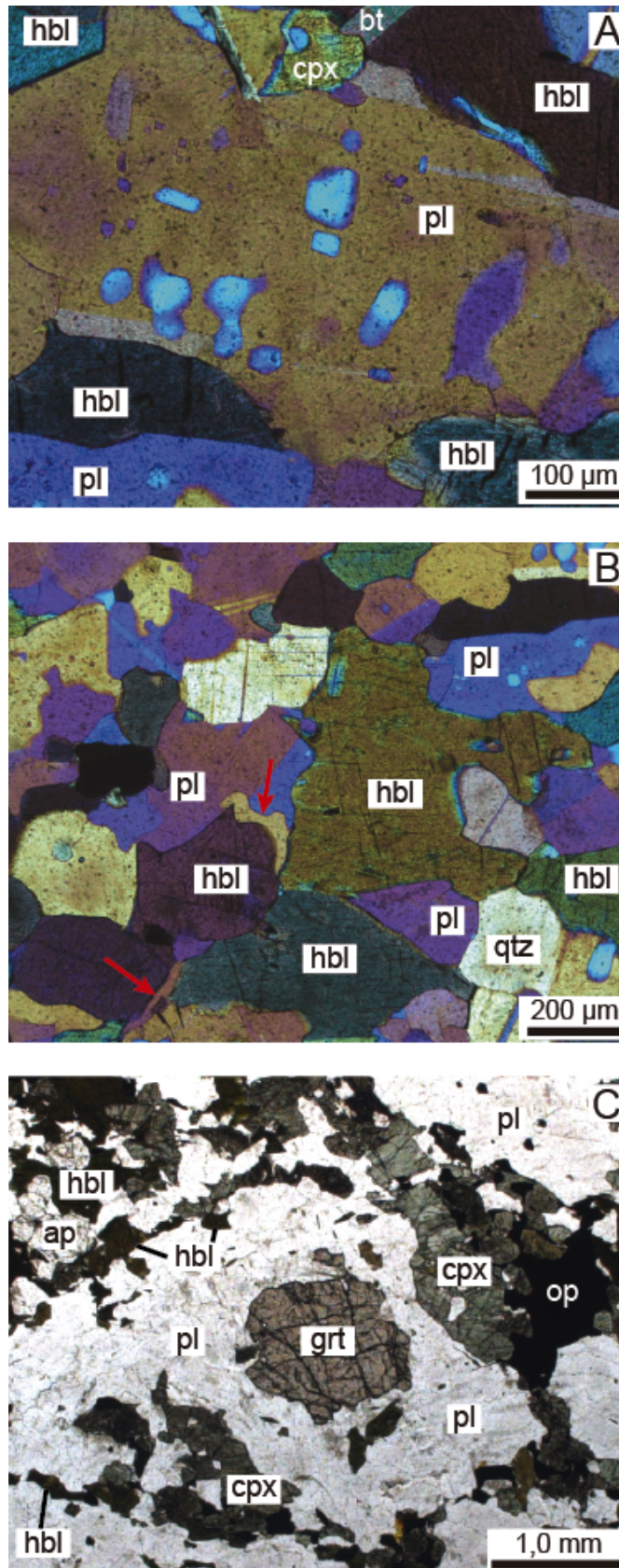


Figura 21: Feições texturais do granulitos máfico. (A) Cristal de plagioclásio com exsoluções/incluições elipsoidais e retangulares – nicóis cruzados e analisador. (B) Detalhe para filmes de quartzo (indicados pelas setas vermelhas) no limite dos cristais de hornblenda. Notar baixo ângulo interfacial, sugerindo cristalização a partir do líquido anatótico – nicóis cruzados e analisador. (C) Cristal de granada parcialmente substituído com coroa de plagioclásio (interna) e clinopiroxinênio + hornblenda + opacos (externa) – nicóis paralelos. Fonte: figura elaborada pelo autor.

## 5 MODELAGEM METAMÓRFICA E TERMOBAROMETRIA

### MODELAGEM METAMÓRFICA

A modelagem metamórfica com pseudosseções permite o estudo das associações minerais estáveis ao longo de um intervalo  $P$ - $T$  definido. Para tanto, é necessária a escolha de uma composição química que represente o litotipo a ser estudado. Para rochas das fácies xisto-verde a anfibolito médio, pode-se utilizar na modelagem a composição de rocha total, desde que se assuma que a modificação da composição química original tenha sido pequena ou não tenha sido significativa. No caso de rochas das fácies anfibolito alto ou granulito, nas quais se identificam feições de fusão parcial, essa tarefa se torna mais complexa já que na maioria das vezes não é possível recuperar a composição original da rocha, especialmente nos casos envolvendo remoção de parte do fundido.

Uma das opções para se modelar rochas que sofreram fusão parcial seria a escolha de uma composição química ideal, modelo ou média, para o tipo de rocha que possa representar o protolito do objeto de estudo. A abordagem mais tradicional parte do princípio de que composição química da rochas deve ser usada para calcular as condições de metamorfismo. Koblinger & Pattison (2017) apresentam discussão sobre como as condições de metamorfismo podem ser preservadas em rochas que apresentam distintos graus de modificação química associada com a extração do líquido anatético. Através da modelagem metamórfica e geotermobarometria clássica (Granada-Ortopiroxênio) os autores mostram que as condições  $P$ - $T$  são mais bem preservadas em rochas que sofreram maior retirada do líquido anatético, ou seja, com composição mais próxima do resíduo.

Porém ao se utilizar a composição de rochas residuais para o cálculo de pseudosseções, os resultados obtidos permitem a interpretação da evolução metamórfica pós pico metamórfico, assumindo que o sistema se mantenha fechado. Desta forma a técnica não poderia ser aplicada para modelar a progressão do metamorfismo.

Visando “contornar” essa situação, a modelagem metamórfica neste trabalho foi feita procurando identificar padrões de modificação do sistema químico (*i.e.* composição da rocha), dentro de cenários pré-estabelecidos de forma a estimar as composições do líquido anatético e do resíduo correspondente, e assim reconhecer padrões de variação composicional que possam ser comparados com as composições das amostras do biotita granulito félsico. Com a modelagem foi possível estabelecer as condições  $P$ - $T$ - $X$  as quais os migmatitos do Complexo Itatins foram submetidos.

A modelagem foi então feita de forma segmentada. Em um primeiro momento avaliou-se como a composição dos produtos da fusão parcial (líquido anatético e resíduo) de protolitos sedimentares (grauvaca e folhelho) se modificam ao longo de um processo de aquecimento isobárico em sistemas aberto e fechado. O resultado desta modelagem consta no ANEXO I, manuscrito submetido ao *Journal of Metamorphic Geology*, intitulado: “*The composition of anatetic melt and its complementary residue by forward modelling of closed and open-system melting using THERMOCALC*”.

Partiu-se então para a modelagem metamórfica das rochas ortoderivadas do Complexo Itatins. Foi escolhida composição representativa para o possível protolito do biotita granulito félsico (granodiorito – material de referência JG1 – tab. 1). A modelagem do granodiorito faz parte do manuscrito apresentado no ANEXO II: “*The partial melting of granodiorite: insights from granulite-facies metamorphism in the Itatins Complex, Brazil*”, a ser submetido ao *Journal of Petrology*.

O intervalo *P-T* escolhido foi baseado nas associações minerais reconhecidas nas rochas do Complexo Itatins. A determinação da composição do líquido anatético foi feita através da utilização da linha de comando *read-bulk-info* (rbi) do THERMOCALC. Os resultados obtidos foram plotados em diagramas binários e ternários para avaliar se existe correlação entre os valores obtidos e as composições de leucossoma obtidas neste trabalho e aquelas determinadas por Azevedo Sobrinho (1995) para as rochas na região do Rio do Azeite (Apêndice – B, detalhe A). A abordagem adotada nesta atividade foi baseada nos trabalhos de Johnson, White e Powell (2008) e Grant (2009).

Utilizou-se o programa THERMOCALC, versão 3.33 e 3.40, com os bancos de dados ds55 (HOLLAND; POWELL, 1998) e ds62 (WHITE *et al.*, 2014). Ao utilizar o banco de dados ds62 na modelagem da composição JG-1 os resultados obtidos não foram consistentes, sendo necessária a adoção do banco de dados ds55, já consagrado na literatura. O sistema químico escolhido para a modelagem foi NCKFMASHTO (Na<sub>2</sub>O-CaO-K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>-O), que contempla o maior número de óxidos possível

A estimativa da concentração inicial de H<sub>2</sub>O em migmatitos e seu papel na fusão parcial são temas importantes, sendo alvo de trabalhos na literatura (*e.g.* DZIGGEL *et al.*, 2012; WEINBERG; HASALOVÁ, 2015). Em rochas que evoluíram em sistema aberto, com migração de líquido anatético, uma das maneiras de estimar a concentração de H<sub>2</sub>O no sistema via pseudosseções parte do cálculo de diagramas com variação na atividade de H<sub>2</sub>O, para determinar qual intervalo *P-T* em que as associações minerais hidratadas são estáveis



(DZIGGEL *et al.*, 2012). Ao se determinar a pressão ou temperatura mínima onde essas fases são estáveis, estima-se os valores mínimos de água para a composição estudada.

Nos diagramas feitos para este estudo as fases minerais e fases fluidas presentes são representadas utilizando-se abreviações de Whitney & Evans (2010) e Kretz (1983), com letras minúsculas. Segue lista das abreviações em ordem alfabética: andalusita (and), aluminossilicato (als), biotita (bt), cianita (ky), clinopiroxênio (cpx), cordierita (crd), espinélio (spl), granada (grt), hornblenda (hbl), ilmenita (ilm), magnetita (mnt), ortopiroxênio (opx), plagioclásio (pl), quartzo (qtz), sillimanita (sil) e água (H<sub>2</sub>O). Exceção se aplica às abreviações de feldspato alcalino (ksp) e líquido anatético (liq), de Holland & Powell (1998).

Tabela 1: Composições dos litotipos usados na modelagem metamórfica em % peso (dado original) e % molar normalizada a 100% usada no THERMOCALC (Condie, 1993 e Imai *et al.*, 1994).

| <b>Litotipo</b>                    | <b>Grauvaca</b>   |               | <b>Folhelho</b> |               | <b>Granodiorito</b> |               |              |
|------------------------------------|-------------------|---------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------|--------------|
|                                    | <b>Composição</b> | <b>% peso</b> | <b>% mol</b>    | <b>% peso</b> | <b>% mol</b>        | <b>% peso</b> | <b>% mol</b> |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             |                   | 72,3          | 77,36           | 63,10         | 68,26               | 72,3          | 77,36        |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             |                   | 0,26          | 0,21            | 0,64          | 0,52                | 0,26          | 0,21         |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> |                   | 14,24         | 8,98            | 17,50         | 11,15               | 14,24         | 8,98         |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> |                   | 0,38          | -               | -             | -                   | 0,38          | -            |
| <b>FeO</b>                         |                   | 1,61          | 1,44            | 5,65          | 4,99                | 1,61          | 1,44         |
| <b>MgO</b>                         |                   | 0,74          | 1,18            | 2,20          | 3,55                | 0,74          | 1,18         |
| <b>CaO</b>                         |                   | 2,20          | 2,52            | 0,71          | 0,82                | 2,20          | 2,52         |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             |                   | 3,38          | 3,51            | 1,06          | 1,11                | 3,38          | 3,51         |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              |                   | 3,98          | 2,72            | 3,62          | 2,50                | 3,98          | 2,72         |
| <b>H<sub>2</sub>O</b>              |                   | 0,54          | 1,93            | -             | 7,00                | 0,54          | 1,93         |
| <b>O<sub>2</sub></b>               |                   | -             | 0,10            | -             | 0,10                | -             | 0,15         |
| <b>Total</b>                       |                   | 99,63         | 100,00          | 94,6          | 100,00              | 99,63         | 100,00       |

A partir das composições da tab. 1, foram construídas as pseudosseções para as três composições no intervalo *P-T* de 0,3 a 1,0 GPa e 650 a 950 °C. A apresentação da metodologia adotada na modelagem metamórfica das composições ideais de grauvaca e folhelho e do material de referência JG-1 (granodiorito), os resultados obtidos e a discussão de seu significado na modelagem e no entendimento do metamorfismo granulítico do biotita granulito félsico, são feitas nos ANEXOS I e II.



# CAPÍTULO IV – CONSIDERAÇÕES FINAIS

## 1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### MODELAGEM DA FUSÃO PARCIAL

A necessidade de se compreender com mais clareza os processos petrogenéticos atuantes em rochas metamórficas afetadas por fusão parcial, seja na fácies anfíbolito ou granulito, tem guiado um número considerável de trabalhos nos últimos anos. O tema tem sido discutido na comunidade científica pelo menos desde 1914 com o trabalho pioneiro de Bowen (1914), mas foi só a partir das décadas de 1950 e 1960 que os trabalhos experimentais começaram a demonstrar a conexão entre fusão parcial de rochas crustais com a gênese dos granitos (TUTTLE; BOWEN, 1958; LUTH; TUTTLE, 1966; WINKLER, 1957). A consolidação dos bancos de dados termodinâmicos internamente consistentes usados com programas que conseguem manipular esses dados de forma relativamente simples, a abordagem do problema tem seguido em uma direção, de certo modo, revolucionária, permitindo, de maneira relativamente rápida, gerar dados de curvas de fusão para composições diversas, em condições  $P$ - $T$  diversas e, ainda, avaliando a influência da presença e quantidade de fluidos, principalmente  $H_2O$  e  $CO_2$  (GROPPO *et al.*, 2013; WEBB; POWELL; MCLAREN, 2015). Com a ajuda de programas como THERMOCALC, PERPLE\_X, Theriak-Domino, é possível estimar condições de  $P$ - $T$ - $X$  para diferentes tipos de rochas, ou de composições químicas (REBAY; POWELL; DIENER, 2010; TAYLOR *et al.*, 2014; JOHNSON; BENEDIX-BLAND; BLAND, 2016; PALIN *et al.*, 2016).

A modelagem metamórfica utiliza diagramas binários, pseudosseções ou diagramas isoquímicos, para representar as associações de minerais metamórficos em um determinado intervalo de pressão e temperatura ou composicional, permitindo assim observar como as associações minerais se comportam nesse(s) intervalo(s). Além disso, é possível estender ao estudo o detalhamento da variação composicional das fases presentes nos diagramas, sejam elas minerais ou líquido anatético, por exemplo.

O enfoque dos estudos mais recentes tem sido a caracterização dos produtos gerados pela fusão parcial, em especial o líquido anatético (PALIN *et al.*, 2016), e a reintegração da

composição do protolito através da inclusão de quantidades variadas de líquido anatótico na rocha residual (YAKYMCHUK *et al.*, 2014; ALESIO *et al.*, 2017; BARTOLI, 2017).

As modelagens feitas com cálculos baseadas em banco de dados termodinâmicos tem algumas vantagens sobre a petrologia experimental clássica. É possível examinar mudanças na composição original, adicionando ou subtraindo componentes, e verificar qual a sua influência. Não existem problemas de nucleação de fases, de reatividade dos componentes, seja a composição original muito fértil ou extremamente refratária, problemas de mudanças ou variação no potencial de oxidação em virtude da reação entre o material do experimento com as paredes da cápsula que o contém, e mesmo problemas com a fase fluida, como gerar, conservar ou perder. Outra vantagem do método em relação à petrologia experimental clássica é a ausência de reequilíbrio químico entre as fases geradas nos experimentos, ou mesmo provar que as fases envolvidas nos experimentos alcançaram o equilíbrio químico entre si, o que é clássico com a razão Fe/Mg dos minerais, como descrito por Pattison (1994).

Como a modelagem metamórfica utiliza bancos de dados para efetuar os cálculos termodinâmicos, a confiabilidade dos resultados depende das informações inseridas nos bancos de dados e na abordagem estatística dos cálculos. As modelagens são baseadas em dados termodinâmicos, a maior parte dos quais é gerada a partir de experimentos e deste modo, os resultados estão associados à extrapolações feitas a partir das propriedades termodinâmicas dos minerais gerados nos experimentos. Dessa forma, a qualidade das modelagens está atrelada, de algum modo, à qualidade dos experimentos, bem como na relação entre variação composicional e os modelos de atividade das fases envolvidas. Assim, a qualidade das modelagens termodinâmicas dependem das informações dos bancos de dados e dos modelos de atividade dos minerais, que se não forem precisos, fazem com que os resultados obtidos possam se afastar da realidade petrológica, foco dos trabalhos. Mais um problema inerente aos bancos de dados termodinâmicos está relacionado com a influência de componentes menores no campo de estabilidade das fases, sejam cátions que participam da solução sólida ou ânions da fase fluida, tais como Ti, Mn, P ou F e Cl, componentes que têm notória influência na estabilidade de fases como biotita, ilmenita, granada, piroxênios, anfibólios e filossilicatos, mas que acabam sendo desprezados nas modelagens por não existirem bons modelos de atividade que levem em conta esses elementos, bem como dados precisos de sua partição entre as diversas fases presentes nas rochas (PETERSON; CHACKO; KUEHNER, 1991; SYMMES; FERRY, 1992; WHITE *et al.*, 2000).

Partindo do pressuposto que a modelagem metamórfica, usando o programa THERMOCALC com seus bancos de dados ds55 e ds62, reproduz resultados compatíveis com a natureza, uma série de composições químicas para o líquido anatético e o resíduo correspondente foram calculadas a partir de duas composições ideais de rochas sedimentares, grauvaca e folhelho, ao longo de um intervalo de aquecimento isobárico. A fusão parcial foi modelada admitindo-se dois cenários: (i) sistema aberto, onde a composição usada para a modelagem varia de acordo com a retirada de quantidades determinadas de líquido anatético, e (ii) sistema fechado, onde não há modificação da composição modelada, ou seja o líquido anatético não é segregado do seu resíduo. Esse trabalho está descrito no manuscrito apresentado como anexo I, intitulado: “*The composition of anatetic melt and its complementary residue by forward modelling of closed and open-system melting using THERMOCALC*”.

Na modelagem do sistema aberto admitiu-se o limiar de fração de fusão em 0,05, o que equivale ao líquido anatético totalizando 5 % do volume total da rocha. Quando esse valor é atingido, a composição química equivalente de líquido anatético é removida da composição total e a modelagem é reiniciada.

A composição dos líquidos anatéticos gerados é granítica, peraluminosa e cálcio-alcalina, com teor de SiO<sub>2</sub> variando entre 63,32-70,97 % em peso para aqueles gerados a partir da composição da grauvaca e 63,43-72,38 % em peso, para aqueles do folhelho. Os valores de índice de saturação de alumina (ASI = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O), variam entre 1,05 e 1,45, aumentando com a redução da pressão e da temperatura. A razão FeO/MgO diminui com o aumento da temperatura. Um ponto importante reside em como as composições variam ao longo do intervalo de temperatura, e não em suas composições químicas especificamente. Observa-se que as composições do líquido anatético exibem tendências de variação composicional similares nos sistemas aberto e fechado, havendo diferenças de acordo com o protólito. O aumento da concentração de K<sub>2</sub>O ao longo do intervalo de temperatura ocorre enquanto K-feldspato e biotita são consumidos pelas reações de fusão. A concentração de FeO+MgO no líquido anatético, gerado da grauvaca, tende a aumentar continuamente após o aparecimento de K-feldspato peritético, acima de 700 °C. Essa tendência pode ser correlacionada com o início da quebra da biotita antes da entrada de ortopiroxênio.

O resíduo gerado da composição da grauvaca é constituído predominantemente por quartzo e plagioclásio, com teores variados de biotita, granada, ortopiroxênio, K-feldspato, sillimanita e ilmenita. Para a composição do folhelho, a associação mineral residual é constituída por quartzo, K-feldspato, plagioclásio, granada, cordierita, sillimanita e ilmenita.

Na modelagem foi possível observar como as associações minerais estáveis em fácies granulito variam de acordo com o protolito. No intervalo *P-T* onde ocorre ortopiroxênio para a composição da grauvaca, as fases Fe-Mg estáveis na associação mineral para a composição do folhelho são granada e/ou cordierita, dependendo da pressão (fig. 1 e 5 do ANEXO I).

Nota-se que a proporção modal de K-feldspato na rocha aumenta conforme o líquido anatético é removido e por consequência o teor de K<sub>2</sub>O no líquido anatético aumenta proporcionalmente ao seu consumo. O volume do líquido anatético gerado também é controlado pelo caráter do sistema adotado. No sistema aberto a proporção de líquido anatético é 20 a 25 mol. % inferior ao sistema fechado.

Adotando-se esse método é possível utilizar uma composição “geral” ou “ideal” para modelar os produtos da fusão parcial e comparar o resultado às rochas naturais, cuja separação do líquido, com sua perda parcial ou total, e o resíduo, impedem a modelagem realística. De uma forma geral, as composições de líquido anatético e resíduo determinadas na modelagem podem fornecer informações importantes sobre como a fusão parcial atua nas rochas.

## MODELAGEM DA FUSÃO PARCIAL NO COMPLEXO ITATINS

Uma vez que uma metodologia para a modelagem da fusão parcial foi estabelecida, de acordo com o que é apresentado no ANEXO I, ela foi aplicada no estudo das rochas ortoderivadas do Complexo Itatins, na Faixa Ribeira Meridional, SE do Estado de São Paulo. O manuscrito gerado a partir desse estudo é apresentado no ANEXO II, com o título:

*“Partial melting of granodiorite, a common igneous rock: insights from Ediacaran granulite-facies metamorphism in the Itatins Complex, Ribeira Belt, Brazil”.*

A rocha possui suas melhores exposições nos costões rochosos da região entre a cidade de Peruíbe e o Bairro do Guaraú. É representada por biotita granulito félsico, de coloração cinza, foliada, granulação fina a média, composta por ortopiroxênio, biotita, K-feldspato, ilmenita-magnetita, plagioclásio, quartzo, com apatita, monazita, zircão, hornblenda e clinopiroxênio como minerais acessórios. Sua estrutura é caracterizada por foliação bem definida com orientação ENE-WSW a NE-SW e mergulho subvertical. A rocha sofreu fusão parcial e seu leucossoma forma estruturas variadas dentre elas: bolsões milimétricos (“*melt pockets*”) em meio à foliação, lentes paralelas à foliação, veios cortando a estrutura da rocha, diques e domínios onde houve acumulação do leucossoma. Quando analisadas em conjunto,

essa série de estruturas corresponde ao processo de desenvolvimento, segregação, coleta e acumulação do líquido anatético, de modo similar à documentada por Sawyer (2008). Fato a ser destacado é a orientação dos cristais de plagioclásio em algumas das estruturas do leucossoma que é oblíqua à foliação (fig. 10B). Os veios onde o leucossoma é coletado possuem orientação aproximada N-S a NNE-SSW.

Em lâmina observa-se que o biotita granulito félsico apresenta alternância de níveis leucocráticos, constituídos por plagioclásio, quartzo e algum K-feldspato e níveis, que muitas vezes não são contínuos, compostos por biotita avermelhada, ortopiroxênio e ilmenita-magnetita. Essa associação de minerais ferro-magnesianos corresponde à parte das fases da reação de fusão pela quebra da biotita:

biotita + plagioclásio + quartzo  $\pm$  K-feldspato  $\pm$  H<sub>2</sub>O = líquido anatético + ortopiroxênio + ilmenita-magnetita.

Os contatos entre as principais fases minerais são frequentemente curvados e com terminações em cúspide, formando ângulos menores que 60°. Essas feições indicam que parte dos minerais foi consumida pela reação descrita acima e, que em alguns casos, os cristais se formaram mimetizando o líquido aprisionado ou não segregado que envolvia a matriz sólida da rocha.

Análises de microsonda eletrônica indicam que a maioria das fases minerais presentes no biotita granulito félsico e no leucossoma possuem composições regulares, ou seja, com mínimo zonamento composicional: ortopiroxênio (En<sub>40-47</sub>FS<sub>51-58</sub>Wo<sub>0,2-3</sub>), clinopiroxênio (Fs<sub>33-34</sub>En<sub>19-25</sub>Wo<sub>41-48</sub>), biotita ( $X_{Fe} = 0,48-0,55$ ) e K-feldspato (Or<sub>82</sub>). O plagioclásio (An<sub>28-38</sub>), apresenta aumento de Ca do centro para a borda. A concentração de Fe<sup>+2</sup> e Ti corresponde à diferença mais marcante entre os dois tipos de rochas analisadas. Como descrito no item 16 – Caracterização Petrográfica, uma característica específica do plagioclásio presente no leucossoma é a presença de inclusões de óxidos de Fe-Ti, o que lhe confere uma coloração cinza escura (fig. 10B e 14A). No diagrama Fe<sup>+3</sup>+Ti vs. Al<sub>total</sub> (fig. 23), nota-se que o plagioclásio das amostras CI-012-RB e CI-013-RB apresenta teores máximos de Fe<sup>+3</sup>+Ti até seis vezes maiores que as amostras de biotita granulito félsico (CI-011-RD e CI-019-RA). A incorporação de Fe<sup>3+</sup> é comentada na literatura, mas pouco discutida, no entanto a presença de Ti parece ser comum e pouco entendida. Isso pode ser investigado e explorado, pois deve ter caráter termobarométrico interessante.

A modelagem metamórfica para o biotita granulito félsico e leucossoma foi feita admitindo-se que a composição do JG-1 fosse equivalente ao protolito. Essa condição foi assumida já que as rochas do Complexo Itatins tiveram sua composição química modificada pela fusão parcial, segregação e perda de parte do líquido, assim a reintegração da composição do protolito não é trivial. Mesmo com a aproximação assumida, foi necessária uma modificação na composição do JG-1 em relação à  $X_{Fe}$  da rocha, uma vez que o valor de 0.550 não permite gerar na modelagem, biotita e ortopiroxênio com valores de  $X_{Fe}$  similares aqueles determinados pelas análises de EPMA. Dessa forma, através de um diagrama  $T$ - $X_{Fe}$  foi determinado um valor  $X_{Fe} = 0.649$  para modificar a composição JG-1 de modo que a modelagem gere resultados na composição química dos minerais compatíveis com o que foi analisado.

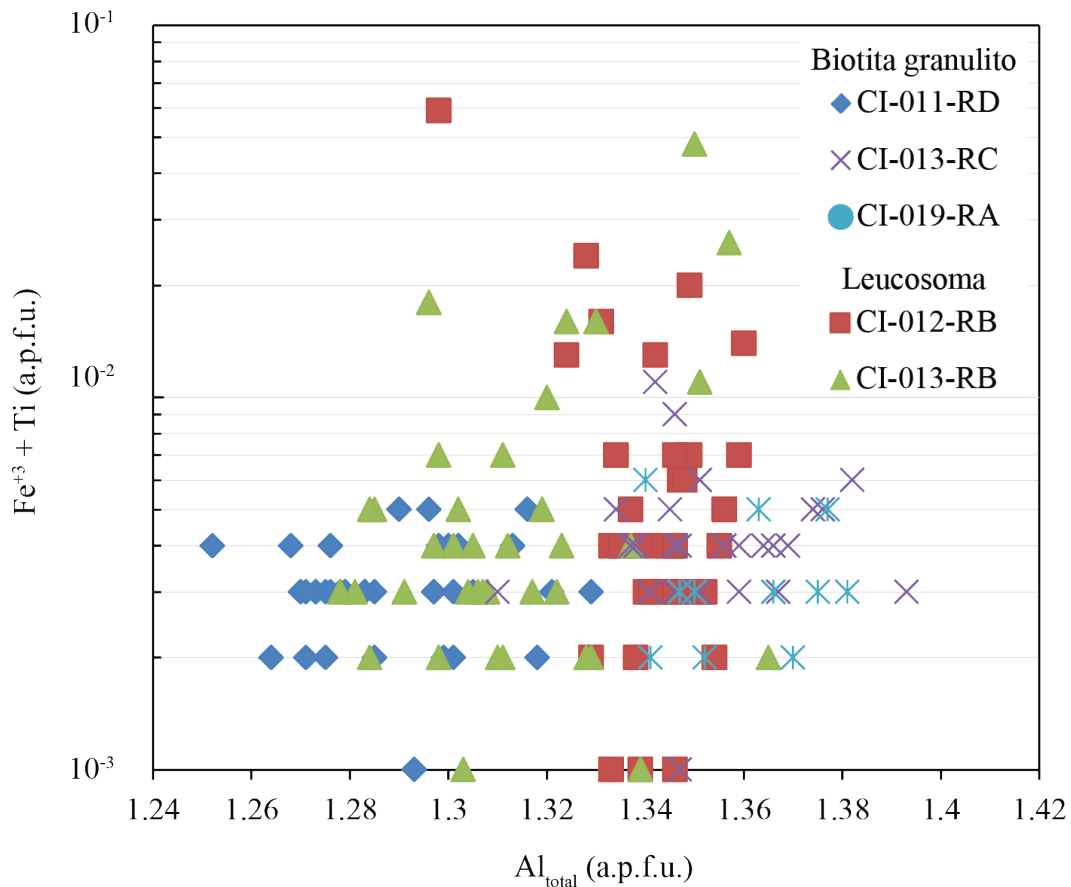


Figura 22: Diagrama de variação de  $Fe^{+3} + Ti$  vs.  $Al_{total}$  dos cristais de plagioclásio do biotita granulito félsico e do leucossoma. As análises com maiores valores de  $Fe^{+3}+Ti$  correspondem aos cristais de coloração cinza-escuro, ricos em inclusões opacas. Fonte: figura elaborada pelo autor.



Na pseudosseção  $P$ - $T$  calculada para a composição JG-1 modificada ocorre campo com associação mineral compatível com a estável na rocha. Através da termobarometria via isopletras, foi possível determinar que os valores de  $X_{Fe}$  de biotita e ortopixorênio e  $X_{An}$  de plagioclásio se interceptam dentro do campo de estabilidade correspondente à associação mineral descrita no biotita granulito félsico, em intervalo  $P$ - $T$  entre 0,7 e 1,0 GPa e 845 e 872 °C.

Porém, a proporção de líquido anatético gerada na modelagem no intervalo determinado é de 10 mol. %, valor muito abaixo da quantidade necessária para gerar a quantidade de leucossoma observada nos afloramentos, que pode chegar a 50 %. Avaliou-se então a possibilidade da entrada de água condicionar o aumento da fertilidade da composição JG-1 através de um diagrama  $T$ - $X_{H_2O}$ . No diagrama construído para  $P = 0,8$  GPa, observa-se que o aumento de  $H_2O$  no sistema permite a geração de proporções de líquido anatético muito superiores ao que foi modelado a partir da composição JG-1. Nas condições  $P$ - $T$  determinadas através da termobarometria via isopletras, o aumento de 7,21 mol. % na concentração de  $H_2O$  na composição JG-1, equivalente a aproximadamente 2,0 % em peso, é suficiente para gerar em torno de 60 mol. % de líquido anatético, sem que todo o K-feldspato seja consumido.

As composições do líquido anatético e do resíduo correspondente foram calculadas a partir da composição JG-1 para sistema fechado e aberto. Os dados obtidos a partir da modelagem indicam que:

- As composições do líquido anatético mostram aumento contínuo na concentração de  $K_2O$  em sistema fechado e aberto;
- Em sistema fechado,  $X_{Fe}$  do líquido anatético aumenta até a formação de ortopiroxênio, quando o mineral começa a reter  $FeO$ , aumentando a proporção  $MgO/FeO$  no líquido anatético;
- A variação composicional do resíduo é mais ampla no sistema fechado do que no aberto, com redução de  $K_2O$  e  $X_{Fe}$  e aumento de  $CaO + Na_2O$  com aumento do grau de fusão parcial.
- Em um sistema aberto, com entrada de  $H_2O$ , a variação modal de K-feldspato no resíduo é sensível a proporção de líquido anatético, sendo a principal fonte de  $K_2O$  e  $Na_2O$ . Após o K-feldspato ser totalmente consumido, o plagioclásio é enriquecido em  $CaO$ , devido ao fracionamento de  $Na_2O$  para o líquido produzido.

Ao se comparar as composições de rocha total do biotita granulito félsico e do leucossoma com as composições do líquido anatético e do resíduo obtidas na modelagem foi possível observar tendências de variação similares. As composições do leucossoma são mais

enriquecidas em  $K_2O$  e empobrecidas em  $CaO+Na_2O$  do que o líquido anatótico. Essa diferença deve estar relacionada com processo de cristalização fracionada, responsável pelo fracionamento destes elementos na formação de feldspatos.

As composições do biotita granulito félsico mostram tendência de enriquecimento em  $CaO+Na_2O$  similar ao que foi modelado em sistema fechado, porém com valores máximos acima do que o estimado.

Para avaliar se há variação nos padrões de elementos terras raras (ETRs) das amostras analisadas, foi feita a comparação dos dados obtidos com a composição do material de referência JG-1, um granodiorito, que pode corresponder ao protolito para o biotita granulito félsico do Complexo Itatins. Em comparação ao JG-1 o biotita granulito félsico é empobrecido em ETRs pesados e o leucossoma exibe ampla variação nas concentrações dos ETRs leves e também caráter empobrecido dos ETRs pesados (fig. 7– ANEXO II). Esses padrões indicam que a fusão parcial pode ter removido parte dos minerais acessórios presentes no protolito (*e.g.* zircão) e que o aumento de ETRs leves no leucossoma seja correlacionado com o aumento de feldspatos ou apatita no fundido que os gerou, devido à cristalização fracionada que deve ter atuado no líquido anatótico.

Complementando o estudo do biotita granulito félsico, foi feita a análise de ETRs e datação de cristais de zircão. Os cristais ocorrem em duas modas: prismáticos, com bordas sobrecrescidas arredondadas, e (ii) subarredondados, tipo *soccer-ball*. Os dados de ETRs foram normalizados pela concentração de condrito com a composição de McDonough & Sun (1995).

As análises mostraram que os núcleos zonados de zircão exibem padrão ETRs com enriquecimento em ETRs pesados e idades U-Pb de  $2.137,4 \pm 4,6$  Ma (idade concórdia na amostra CI-013-RC) e idades de intercepto superior entre  $2.158 \pm 11$  Ma e  $2.139 \pm 14$  Ma. As bordas sobrecrescidas e cristais subarredondados exibem enriquecimento em ETRs pesados e ausência de valores normalizados de Pr e Nd inferiores a Ce e Sm, o que corresponde à comportamento de cristais formados em ambientes afetados por fusão parcial (Hoskins & Schaltegger, 2003). As datações U-Pb forneceram idades de  $628,2 \pm 4$  Ma (idade concórdia na amostra CI-011-RD) e idades de intercepto inferior entre  $625 \pm 19$  Ma e  $594 \pm 19$  Ma.

O intervalo de idades de intercepto inferior é de no máximo 69 Ma, o qual é considerado como correspondente ao período de metamorfismo, fusão parcial e recristalização dos minerais registrado no biotita granulito félsico e cristalização do seu leucossoma. Um evento similar com

essa duração é descrito para as rochas da porção intermediária da *Nappe* Socorro-Guaxupé (ROCHA *et al.*, 2017).

A distribuição dos dados utilizados para o cálculo da idade concórdia na amostra CI-011-RD pode corresponder a mais de um período de cristalização de zircão. Dessa forma foi feita a reavaliação destes dados e eles foram separados em três grupos, cada um com uma idade concórdia:  $639,8 \pm 4,9$  Ma,  $625,1 \pm 5,6$  Ma e  $614,6 \pm 6,0$  Ma. Não se descarta a validade da idade concórdia obtida para todo o grupo, mas pode-se questionar se apenas uma idade pode ser atribuída para de formação das bordas de sobrecrecimento do zircão ao invés de um período mais longo, com mais de um estágio de crescimento de zircão durante o resfriamento e cristalização do leucossoma.

## IMPLICAÇÕES GEOTECTÔNICAS

A Faixa Ribeira Meridional é composta por diversos terrenos tectono-estratigráficos (HOWELL, 1995), cada qual representando um ambiente tectônico específico e com histórias evolutivas distintas, até sua colagem durante a formação do Gondwana Oriental (BRITO NEVES *et al.*, 1999). Os dados da literatura e os aqui coligidos mostram que as rochas ortoderivadas do Complexo Itatins foram geradas durante o Paleoproterozoico, *ca.* 2.200 Ma, e afetadas por metamorfismo de fácies granulito no Neoproterozoico, entre 630 e 600 Ma. A história evolutiva destas rochas entre esses dois períodos é desconhecida até o momento, uma vez que o metamorfismo da fácies granulito e a fusão parcial podem ter apagado qualquer indício presente na rocha de um evento anterior ao do Neoproterozoico.

A modelagem termodinâmica da fusão parcial das rochas do Complexo Itatins indica a necessidade de influxo de água para que a quantidade de líquido gerada, inferida pela quantidade de leucossoma observado em campo, seja alcançada. As duas zonas de cisalhamento que limitam o Complexo Itatins, Lancinha-Cubatão e Itariri, são consideradas as estruturas mais promissoras para o processo de influxo de água e hidratação das rochas, necessário para produção da quantidade mínima de líquido anatético compatível com o volume de leucossoma observado nos afloramentos. As rochas metassedimentares do complexo, representadas pela unidade de paragneisse bandado estromático, poderia contribuir como fonte de água, ou mesmo fornecer a quantidade estimada via pseudosseção  $T-X_{H_2O}$  de aproximadamente 2,0 % em peso.

Após determinadas as condições *P-T* do metamorfismo que afetou o Complexo Itatins, as idades atribuídas ao protolito e ao evento responsável pela fusão parcial, torna-se necessário comparar os dados com as demais unidades gnáissico-migmatíticas da região.

A região onde o Complexo Itatins ocorre é constituída pelos terrenos Embu, Costeiro e Curitiba (fig. 3), e em todos é comum a presença de migmatitos. O Terreno Embu é composto por migmatitos orto- e paraderivados da fácies anfibolito e intrusões graníticas neoproterozoicas. Análises geocronológicas feitas em ortognaisse e paragnaisse forneceram respectivamente idades de  $811 \pm 13$  Ma, determinadas em grãos de zircão de ortognaisse (CORDANI; NUTMAN; COUTINHO, 2002) e em torno de 790 Ma, a partir da análise, por vários métodos, de cristais metamórficos de zircão e monazita (VLACH, 2001; NEGRI; VLACH; TEIXEIRA, 2004; FALEIROS *et al.*, 2014).

No Terreno Costeiro afloram migmatitos ortoderivados atribuídos ao Complexo Itariri (PASSARELLI *et al.*, 2014). Dados geocronológicos indicam períodos de cristalização dos protolitos ígneos entre 745 Ma, biotita ortognaisse tonalítico e 603 Ma, biotita monzogranito (Passarelli *et al.*, 2004, 2007, 2011, 2014, 2016). Os núcleos herdados dos cristais de zircão forneceram idades de 2.2-2.1 Ga, 1.8 Ga, 1.2-1.1 Ga e 790 Ma, sendo que este último período ocorre no biotita ortognaisse tonalítico (PASSARELLI *et al.*, 2014). Análises em cristais de zircão de corpos intrusivos, representados pelos granitos Areado e Ribeirão do Óleo, forneceram idades de  $576 + 12$  Ma e  $561 + 8$  Ma, respectivamente (PASSARELLI *et al.*, 2016). O padrão de núcleos herdados das rochas do Complexo Itariri é mais complexo do que é observado nas rochas ortoderivadas do Complexo Itatins. Apenas as idades de cristalização de 2,2 e 2,1 Ga estão presentes em ambas as unidades, mas o Complexo Itariri apresenta acervo mais variado em seu registro geocronológico, mostrando que suas rochas possuem um registro de evolução crustal mais complexo do que do Complexo Itatins.

No Terreno Curitiba, os migmatitos ortoderivados constituem o Complexo Atuba (SIGA JÚNIOR, 1995) e nos arredores da região de estudo a unidade é representada pelo Gnaisse Bandado Serra do Azeite (SILVA *et al.*, 1981). Trata-se de migmatito estromático com intercalações de leitos mesocráticos e leucossoma rosado (FALEIROS; PAVAN, 2013). A moda dos leitos mesocráticos, o seu resíduo, é constituída por biotita, hornblenda, plagioclásio, K-feldspato e quartzo, com titanita, minerais opacos, apatita e zircão. Dados isotópicos Sm-Nd e datações U-Pb em zircão apresentados por Sato *et al.* (2003) em rochas coletadas na região de Curitiba, PR, indicam que as rochas do Complexo Atuba foram geradas no Arqueano, entre 3,1 e 2,7 Ga. Há registro de dois eventos de fusão parcial, um no Paleoproterozoico, entre 1,9

e 2,2 Ga, e outro no Neoproterozoico, entre 560 e 600 Ma, ambos determinados pelo método U-Pb em zircão. A ausência de ortopiroxênio nas rochas do Complexo Atuba, as idades arqueanas obtidas em cristais de zircão e o padrão de  $\epsilon\text{Nd}$  sugerem que os complexos Atuba e Itatins de fato sejam unidades distintas.

A unidade granulítica mais próxima geograficamente é o Complexo Serra Negra (SILVA; ALGARTE, 1981a; 1981b) que representa o Cráton Luis Alves (KAUL, 1979). Em trabalhos anteriores, os terrenos granulíticos da Faixa Ribeira Meridional eram correlacionados, atribuindo mesma origem e evolução petrológica (HASUI; CARNEIRO; COIMBRA, 1975, BASEI *et al.*, 1992, DANTAS *et al.*, 1987a). No entanto essas correlações eram feitas de uma maneira mais generalista, sem a sustentação de uma base de dados mais completa. Por conta disso a confiabilidade dessa correlação foi questionada no item 13, onde se argumentou que tratar o Complexo Itatins como uma unidade individual, sem ligação genética com qualquer outra, seria mais seguro do ponto de vista científico.

Outras unidades granulíticas apresentam características similares ao Complexo Itatins, como o Complexo Juiz de Fora (DUARTE, 1998 e HEILBRON *et al.*, 2010). No entanto, o fato da unidade ocorrer no lado noroeste da Zona de Cisalhamento Lancinha-Cubatão, sugere que ambas, mesmo podendo corresponder a ambientes similares, estão em blocos tectônicos distintos e podem ter tido gênese em contextos tectônico-geográficos diferentes.

Com o suporte dos dados aqui apresentados, a correlação do Complexo Itatins com as rochas do Cráton Luis Alves, em especial do Complexo Serra Negra, se torna mais robusta. O Complexo Serra Negra é representado por rochas tonalíticas a graníticas, metamorfizadas em fácies granulito e com idade concórdia em  $2.155 \pm 10$  Ma (FALEIROS; PAVAN, 2013). Dados Sm-Nd dos complexos Atuba, Itatins e Serra Negra foram plotados em diagrama  $\epsilon\text{Nd}(t)$  vs. T (Ma) para comparação dos padrões de evolução isotópica de Nd (fig. 24). Os resultados obtidos para as rochas do Complexo Itatins indicam dois padrões de evolução, cada um possivelmente associado a um dos dois tipos de rocha descritos, convergindo em aproximadamente 600 Ma, quando ocorreu o metamorfismo granulítico. Como no biotita granulito félsico não houve separação completa do leucossoma, as linhas de tendência indicam mistura dos dois tipos de rocha, com predominância ora do biotita granulito félsico, ora do leucossoma. Apesar da sobreposição dos campos dos complexos Serra Negra e Atuba, nota-se uma maior correlação dos dados do biotita granulito félsico com as rochas do Complexo Serra Negra.

Observa-se a existência de sobreposição dos dados referentes às rochas com idade estimada para o Paleoproterozoico dos complexos Itatins, Serra Negra e Atuba. Para as rochas

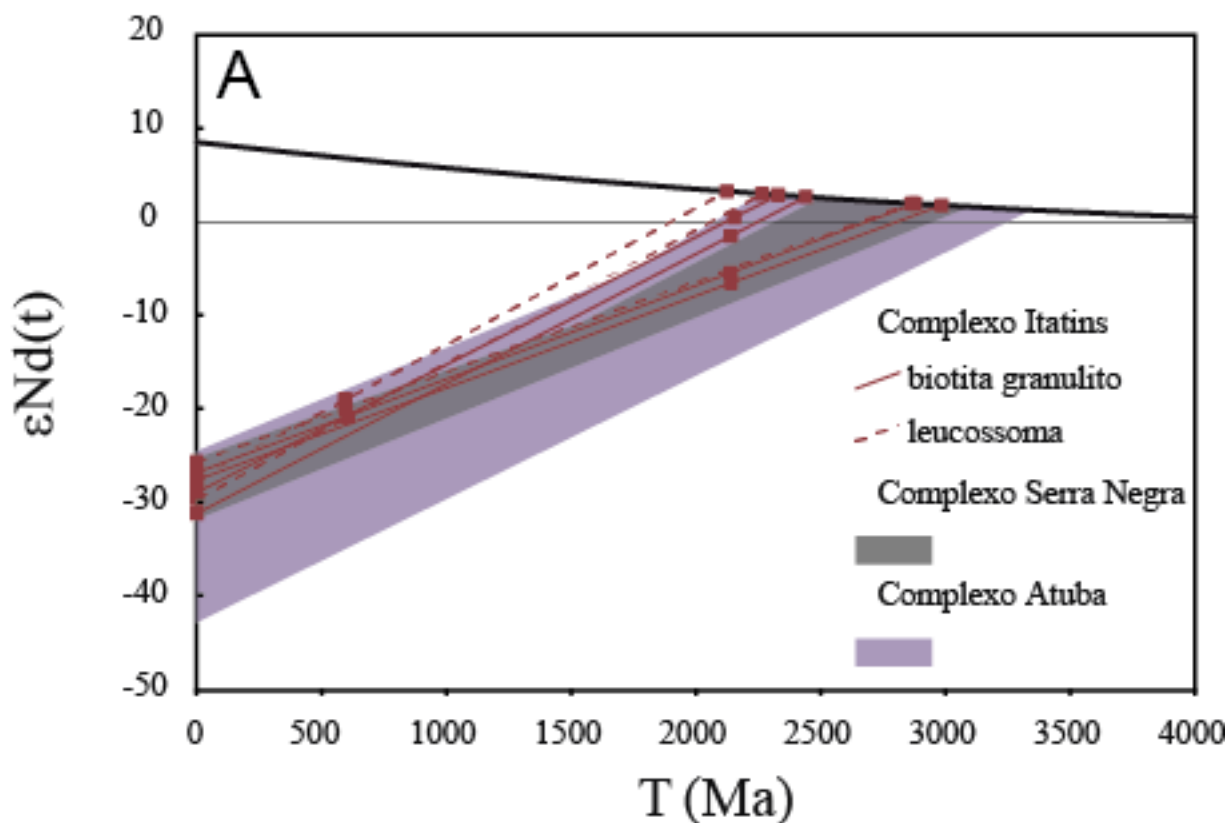


Figura 23: Diagramas  $\epsilon Nd(t)$  vs.  $T$  (Ma) das rochas migmatíticas da Faixa Ribeira Meridional. No diagrama nota-se a sobreposição dos campos dos dados do Complexo Atuba (roxo) e Serra Negra (cinza) e tendência de evolução de Nd similar entre o biotita granulito fêlsico e as rochas do com do Complexo Serra Negra. Fonte de dados: Complexo Atuba (SATO *et al.*, 2003; FALEIROS; MORAIS; COSTA, 2012 e FALEIROS; PAVAN, 2013); Complexo Serra Negra (FALEIROS; PAVAN, 2013). Fonte: figura elaborada pelo autor.

Com base nas informações obtidas até o presente momento (petrográficas e químicas e estimativas de condições de metamorfismo), sugere-se que as rochas dos complexos Itatins e Serra Negra podem ter uma origem comum. Nesse cenário o Complexo Itatins poderia representar a margem do Cráton Luís Alves afetada durante o Neoproterozoico, que culminou com a formação do Gondwana Ocidental. A ausência de metamorfismo Neoproterozoico no Complexo Serra Negra pode ser explicada pela sua posição no cráton, a qual atenuaria os efeitos da colagem de terrenos, enquanto na borda retrabalhada estão as rochas do Complexo Itatins.

## 2 CONCLUSÕES

O estudo de rochas metamórficas afetadas pela fusão parcial avançou significativamente nos últimos anos com a aplicação da modelagem baseada em bancos de dados termodinâmicos internamente consistentes. Esta ferramenta tem sido amplamente utilizada na determinação das condições de metamorfismo, aliando dados de rocha total, química mineral e petrografia. Através dela são construídos diagramas nos quais se pode avaliar desde a variação modal ou composicional de um mineral, até quanto a concentração de um determinado óxido afeta as associações minerais e seus campos de estabilidade.

Ao se utilizar a modelagem para estimar a composição dos produtos gerados pela fusão parcial durante o metamorfismo, surge uma nova forma de se estudar os migmatitos e granulitos. A metodologia descrita no ANEXO I, mostra que para rochas paraderivadas o líquido anatético gerado é granítico, peraluminoso e cálcio-alcálico. A concentração de SiO<sub>2</sub> varia entre 62-73 % peso e a proporção de líquido gerado varia entre 20 a 25 mol % entre os sistemas aberto e fechado. O teor de K<sub>2</sub>O do líquido anatético aumenta gradativamente com a quebra de K-feldspato e biotita. Em sistemas abertos, a remoção do líquido anatético leva junto a maior parte de H<sub>2</sub>O do sistema, estabilizando o K-feldspato, o que condicionaria o aumento do teor de K<sub>2</sub>O no líquido até  $T \sim 950$  °C.

As associações minerais do resíduo, ou seja, a rocha gerada pela segregação sólido-líquido da fusão parcial variam de acordo com o protólito e se o sistema é aberto ou fechado. Ortopiroxênio ocorre apenas na modelagem baseada na composição da grauwaca, enquanto que as fases Fe-Mg estáveis na fácies granulito para a composição do folhelho são granada e/ou cordierita.

O Complexo Itatins é uma unidade litoestratigráfica constituída por duas rochas migmatíticas principais, biotita granulito félsico e paragnaisse estromático bandado, ambos apresentando enclaves de rocha máfica, descrita como granulito máfico. O complexo está localizado na região Sudeste do Estado de São Paulo e representa um fragmento de crosta continental de origem paleoproterozoica, afetado durante o Neoproterozoico por metamorfismo de fácies granulito.

Uma vez que as rochas do Complexo Itatins mostram elevado grau de fusão parcial, a composição das rochas coletadas no campo não corresponderia à composição do protólito, inviabilizando a modelagem. Dessa forma foi escolhida a composição do material de referência JG-1, um granodiorito, para a modelagem via pseudosseções. As estimativas das condições de

pico metamórfico para o biotita granulito félsico foram feitas através da modelagem das associações minerais estáveis no intervalo  $P-T$  de 0,3-1,0 GPa e 650-950 °C, e pela termobarometria de distribuição catiônica de minerais. Os resultados indicaram valores de  $0,86 \pm 0,14$  GPa e  $858,5 \pm 13,5$  °C. A proporção de líquido anatético prevista na modelagem para esse intervalo  $P-T$  é inferior ao mínimo necessário para gerar a quantidade de leucossoma observado no campo.

Foi avaliado o comportamento da composição JG-1 com entrada de H<sub>2</sub>O utilizando um diagrama  $T-X_{H_2O}$  e os resultados indicaram que o aumento de aproximadamente 2,0 % em peso de H<sub>2</sub>O na composição seria suficiente para aumentar a proporção de líquido anatético gerado no intervalo  $P-T$  determinado, de 10 mol. % para cerca de 60 mol. %.

O aumento de H<sub>2</sub>O no sistema também influencia a composição do líquido anatético e de algumas fases minerais, uma vez que desestabiliza o K-feldspato em temperaturas gradativamente menores, fazendo com que o plagioclásio se torne a fonte principal de Na<sub>2</sub>O para o líquido e aumentando o teor de anortita no mineral.

Admite-se que o metamorfismo do biotita granulito félsico ocorreu em sistema aberto, com entrada de H<sub>2</sub>O, possivelmente através das grandes estruturas que limitam o Complexo Itatins, Zona de Cisalhamento Lancinha-Cubatão e Zona de Cisalhamento Itariri.

As composições do líquido anatético e do resíduo gerados na modelagem foram comparados com as análises químicas do biotita granulito félsico e do leucossoma. Os resultados mostram uma tendência na qual as composições modeladas possuem concentrações de K<sub>2</sub>O e valores de  $X_{Fe}$  maiores do que seus correspondentes no Complexo Itatins e valores mais baixos de CaO+Na<sub>2</sub>O. Essa diferença entre as composições pode estar relacionada a cristalização fracionada do líquido anatético, gerando leucossomas mais ricos em K<sub>2</sub>O.

As análises de U-Pb em zircão forneceram idades paleoproterozoicas, 2.158-2.139 Ga, para os núcleos zonados dos cristais e neoproterozoicas, 594-625 Ma para as bordas sobrecrescidas. Correlacionando as condições de metamorfismo, idade do protolito e assinatura Sm-Nd, pode-se correlacionar as rochas do Complexo Itatins com o Complexo Serra Negra, e por consequência, sugerir que o Complexo Itatins represente a borda retrabalhada do Cráton Luis Alves, durante a formação do Gondwana Ocidental no Neoproterozoico.

A modelagem de composições de rochas para- ou ortoderivadas mostrou que os resultados são correlacionáveis com dados experimentais presentes na literatura e com dados



obtidos em rochas “reais”, auxiliando no entendimento dos processos envolvidos na fusão parcial.

No entanto, cabe ressaltar, que os resultados obtidos da modelagem de uma composição ideal ou geral são estimativas aproximadas de composições geradas na natureza. Como os modelos são calculados a partir de simplificações dos processos naturais, a variação dos resultados em comparação com os dados de rochas decorre de processos que não foram considerados, como por exemplo a cristalização fracionada.

Mesmo havendo algumas limitações, a modelagem metamórfica é uma ferramenta que deve fazer parte do estudo de migmatitos e granulitos, não sendo utilizada de forma isolada, permitindo a compreensão mais clara dos processos envolvidos na fusão parcial decorrente do metamorfismo.

Para estimar as condições de metamorfismo que atuaram na formação do biotita granulito félsico, aplicou-se a modelagem metamórfica através de pseudosseções e termobarometria via isopletras de distribuição catiônica em minerais. A determinação das composições do líquido anatético e resíduo gerados pela fusão parcial em uma composição ideal foram comparadas com as análises químicas do biotita granulito félsico e do leucossoma.

Os protolitos do Complexo Itatins foram cristalizados no Paleoproterozoico, em 2.137 Ma e submetidos à metamorfismo e fusão parcial no Neoproterozoico, entre 630 e 600 Ma. O biotita granulito félsico foi gerado a partir de metamorfismo e fusão parcial de protólito ígneo de composição de granodiorito, com razão  $X_{Fe}$  superior ao JG-1, em condições de  $0,86 \pm 0,14$  GPa e  $858,5 \pm 13,5$  °C. Influxo de H<sub>2</sub>O ocorreu concomitante ao metamorfismo, o que possibilitou a geração de até 60% em volume de fundido granítico, sendo que parte significativa está cristalizada na forma de leucossoma. A Zona de Cisalhamento Lancinha-Cubatão e Zona de Cisalhamento Itariri serviram como condutos por onde a H<sub>2</sub>O teve acesso e invadiu as rochas durante o metamorfismo, possibilitando, então, o aumento da fertilidade das rochas do Complexo Itatins. A correlação entre as idades da formação dos protolitos e tendência de evolução do sistema isotópico Sm-Nd permite interpretar o Complexo Itatins como equivalente ao Complexo Serra Negra, parte do Craton Luis Alves. No entanto a deformação, metamorfismo e fusão parcial que afetou o primeiro no Neoproterozoico, colocam essa unidade como borda retrabalhada desse craton. Esse evento tectônico está relacionado com o Ciclo Brasileiro-Pan Africano e ocorreu durante a amalgamação do Gondwana.

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALESIO, K. L. Et al. Melt reintegration modelling: testing against a subsolidus reference assemblage. *Geosciences*, vol. 7, n 3: 21pp. 2017.
- ALMEIDA F. F. M. et al.. The Precambrian evolution of South American cratonic margin, South of Amazon River. In: Nairs, A. E. M & Stehli, F. G. (eds.) *The ocean basins and margins*. v. 1, 1973. p. 411 – 446.
- ALMEIDA, F. F. M.; et al. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8, 1977. Campina Grande. Atas..., Recife: Núcleo Nordeste da Sociedade Brasileira de Geologia, 1977. p. 363 - 392.
- ALMEIDA, F. F. M. et al. Brazilian Structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.*, v. 17, nº 3, p. 1 - 29, 1981.
- ALMEIDA, V. V. et al. Mapa Geológico da Folha Registro (SF.23-X-A-I), Estado de São Paulo, Escala 1:100.000. 2014.
- ASHWORTH, J. R. *Migmatites*. Glasgow: Blackie, Glasgow, 1985. 302 p.
- AZEVEDO SOBRINHO, J. M. *Petrologia dos Charnockitos da Região de Itariri (SP)*. 1995. 112 f. Dissertação (Mestrado em Petrologia Ígnea e Metamórfica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- AZEVEDO SOBRINHO, J. M.; GIRARDI, V. A. V. Geologia do Bloco Itatins na região de Itariri (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 4, 1995. Águas de São Pedro. *Boletim de Resumos*, São Paulo: Núcleo São Paulo da Sociedade Brasileira de Geologia, 1995. v. 1, p. 135.
- BALDWIN, J. A. et al. Geochronological constraints on the evolution of high-pressure felsic granulites from an integrated electron microprobe and ID-TIMS geochemical study. In:

- JOINT ASSEMBLY OF THE AGU-CGU, 2004. Montreal: Elsevier Science BV, Canada, 2004. p. 173 – 200.
- BASEI, M. A. S. et al. Evolução tectônica dos Terrenos entre os Cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 22, nº 2, p. 216 - 221, 1992.
- BASEI, M. A. S. et al. Paleoproterozoic granulitic belts of the Brazilian Southern Region (PR-SC). *In: SOUTHAMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY II*, Cordoba, Argentina. Extended Abstracts, p. 291–294.1999.
- BARTOLLI, O. Phase equilibria modelling of residual migmatites and granulites: An evaluation of the melt-reintegration approach. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 35, n 8: 919-942. 2017.
- BOWEN, N. L. Crystallization of certain pyroxene-bearing artificial melts (abstract). *Geol. Soc. America, Bull.*, vol 25, n 1 : p. 1. 1914.
- BRITO NEVES, B. B.; CAMPOS NETO, M. C.; FUCK, R. A. From Rodinia to Western Gondwana: an approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. *Episodes*, Beijing, v. 22, nº 3, p. 155 - 166, 1999.
- CAMPANHA, G. A. C. & SADOWSKI, G. R. Tectonics of the southern portion of the Ribeira Belt (Apiá Domain). *Precambrian Research*, v. 98, nº 1 – 2, p. 31 – 51. 1999.
- CAMPANHA, G. A. C. et al. Geologia da Folhas Iporanga (SG.22-X-B-V-2) e Gruta do Diabo (SG.22-X-B-VI-1), Estado de São Paulo. São Paulo. Contrato IPT/Pró-Minério (IPT, Relatório 22.352), inédito. 1985.
- CAMPANHA, G. A. C. et al. Geocronologia do Terreno Apiá no sul de Estado de São Paulo. *In: 45 Anos de Geocronologia no Brasil*, 2009. São Paulo. Boletim de Resumos Expandidos, p. 220-222

- CAMPOS NETO, M. C.; FIGUEIREDO, M. C. H. The Rio Doce Orogeny, Southeastern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 8, nº 2, p. 143 – 162, 1995.
- CONDIE, K. C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, v. 104, nº 1-4, p. 1 – 37, 1993.
- CONNOLLY, J. A. D. Multivariable phase diagrams: an algorithm based on generalized thermodynamics. *American Journal of Sciences*, v. 290, nº 6, p. 666 - 718. 1990.
- CORDANI, U. G.; NUTMAN, A. P.; COUTINHO, J. M. V. Geochronological constraints on the evolution of the Embu Complex. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, nº 8, p. 903 – 910. 2002.
- COUTINHO, J. M. V. O Falhamento do Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, 1971. São Paulo. Boletim Especial nº 1, Resumo das Comunicações, São Paulo: Núcleo de São Paulo da Sociedade Brasileira de Geologia, 1971a. p. 130 – 131.
- COUTINHO, J. M. V. Excursão nº5 – Pré-Cambriano paulista. Parte 1 – Pré-cambriano ao sul da cidade de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, 1971. São Paulo. Boletim Especial nº 2, São Paulo: Núcleo de São Paulo da Sociedade Brasileira de Geologia, 1971b. p. 53 – 62.
- COUTINHO, J. M. V. Petrologia do pré-cambriano em São Paulo e arredores. *Boletim IG-USP – Série Científica*, São Paulo, v. 3, p. 5 – 99. 1972.
- CURY, L. F. Geologia do Terreno Paranaguá. 2009. 188 p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- DAITX, E. C. Origem e evolução dos depósitos sulfetados tipo-Perau (Pb-Zn-Ag), com base nas jazidas Canoas e Perau (Vale do Ribeira, PR). 1996. 253 p. Tese (Doutorado em

- Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), Rio Claro, São Paulo.
- DANTAS, A. S. L. et al. Geologia das folhas Juquiá (SG.23-V-A-I-4) e Miracatu (SG.23-V-A-II-3), Estado de São Paulo. São Paulo, SCT/IPT, 5v. (IPT Relatório, 25.371).1987a
- DANTAS, A. S. L. et al. Evolução geológica e estrutural da faixa costeira nas regiões de Juquiá e Miracatu, Sul do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 6, 1987. Rio Claro. Atas..., Rio Claro: Núcleo São Paulo da Sociedade Brasileira de Geologia. v. 1, 1987b. p. 173 – 189.
- De PAOLO, D. J. Neodymium isotopes in the Colorado Front Range and crust-mantle evolution in the Proterozoic. *Nature*, v. 29,n. 1, p. 193-196. 1981
- DIAS NETO, C. M. Evolução tectono-termal do Complexo Costeiro (Faixa de Dobramentos Ribeira) em São Paulo. 2001. 160 p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.
- DIAS NETO, C. M. et al. Litoquímica dos Granitóides da Estrutura em Flor de São Sebastião, São Paulo. *Geologia USP – Série Científica*, São Paulo, v. 8, nº 2, p. 101 – 114. 2008.
- DIAS NETO, C. M. et al. Os anfíbolitos do complexo costeiro na região de São Sebastião, SP. *Geologia USP – Série Científica*, São Paulo, v. 9, nº 3, p. 71 – 87. 2009.
- DIETRICH, R. V.; MEHNERT K. R. Proposal for the nomenclature of migmatites and associated rocks. Report of the International Geological Congress, XXI. Session, Norden. 1960.
- DUARTE, B. P. evolução tectônica dos ortognaisses dos Complexos Juiz de Fora e Mantiqueira na região de Juiz de Fora, MG: *Geologia, Petrologia e Geoquímica*. 1998. 340 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

- DZIGGEL, A.; et al. The role of H<sub>2</sub>O in the formation of garnet coronas during near-isobaric cooling of mafic granulites: the Tasiusarsuaq terrane, southern West Greenland. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 30, n° 9, p. 957 – 972. 2012.
- EGYDIO-SILVA, M. Análise Estrutural das faixas ectiníticas associadas ao falhamento de Cubatão entre Juquiá e Pedro Barros - Estado de São Paulo. 1981. 118p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1981.
- EGYDIO-SILVA, M.; TROMPETTE, R. Análise estrutural dos metassedimentos associados ao falhamento de Cubatão na região de Pedro Barros e Juquiá - SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32, 1982. Salvador. Anais..., Salvador: Núcleo Nordeste da Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v.1, p. 39 - 46.
- ENGLAND, P. C.; THOMPSON, A. B. Pressure-Temperature-time path of regional metamorphism I. Heat transfer during evolution of regions of thickened continental crust. *Journal of Petrology*, v. 25, n° 4. p. 894 – 928. 1984.
- FALEIROS, F. M. Evolução dos terrenos tectono-metamórficos da serra da Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR). 2008. 306 p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.
- FALEIROS, F. M.; PAVAN, M. Capítulo 4 – Litoestratigrafia. In: FALEIROS, F. M. & PAVAN, M. Geologia e Recursos Minerais da Folha Eldorado Paulista - SG.22-X-B-VI - Estados de São Paulo e Paraná, escala 1:100.000. São Paulo: Programa Geologia do Brasil, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, 2013.
- FALEIROS, F. M. et al. Ediacaran high-pressure collision metamorphism and tectonics of the southern Ribeira Belt (SE Brazil): evidence for terrane accretion and dispersion during Gondwana assembly. *Precambrian Research*, v. 189, n° 3-4, p. 263-291. 2011.

- FALEIROS, F. M.; MORAIS, S. M.; COSTA, V. S. Geologia e Recursos Minerais da Folha Apiaí - SG.22-X-B-V - Estados de São Paulo e Paraná, escala 1:100.000 (1. ed), vol. 1, Programa Geologia do Brasil, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, São Paulo 107 pp. 2012.
- FALEIROS, F. M. et al. Mapa Geológico da Folha Capão Bonito (SG.22-X-B-III), Estado de São Paulo, Escala 1:100.000. 2014
- FALEIROS, F. M. et al. Short-lived polyphaser deformation during crustal thickening and exhumation of a collisional orogeny (Ribeira Belt, Brazil). *Journal of Structural Geology*, v. 93: p. 106-130. 2016.
- FERNANDES, A. J. O Complexo Embu no Leste do Estado de São Paulo: Contribuição ao conhecimento da litoestratigrafia e da evolução estrutural e metamórfica. 1991. 120 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
- FIGUEIREDO, M. C. H et al. Contribuição à petrografia e litoquímica de rochas granito-gnáissicas da faixa costeira na região Sul-sudeste do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, 1988. Belém. Anais..., Belém: Núcleo Nordeste da Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. v.3, p. 1080 - 1092.
- FUCK, R. A. et al. As Faixas de Dobramentos Marginais do Craton do São Francisco: Síntese dos Conhecimentos. In: DOMINGUEZ, J. M. L.; MISI, A. (Org.). O Craton do São Francisco. Salvador: SGM/CNPQ/Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, 1993. p. 161-185.
- GIMENEZ FILHO, A. et al. Geologia da Folha Miracatu, Sul-sudeste do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 6, 1987. Rio Claro. Atas..., Rio Claro: Núcleo São Paulo da Sociedade Brasileira de Geologia, 1987. v.1, p. 225 – 241.

- GIRARDI, V. A. V.; MADUREIRA FILHO, J. B.; HYPOLITO, R. 1971. Granadas em gnaisses de Peruíbe, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, 1971. São Paulo. Anais..., São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1971. v. 1, p. 235 - 239.
- GRANT, J. A. Thermocalc and experimental modelling of melting of pelite, Morton Pass, Wyoming. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 27, nº 8, p. 571 – 578. 2009.
- GROPPO, C. et al. Metamorphic CO<sub>2</sub> production from calc-silicate rocks via garnet-forming reactions in the CFAS-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> system. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 166, nº 6: 1655 – 1675. 2013
- HARKER, A. The natural history of igneous rocks. New York: Macmillan, 1909. 384 p.
- HASUI, Y. Geologia da Folha São Roque. *Boletim do IG-USP*, São Paulo, v. 6, p. 157 – 183, 1975.
- HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; COIMBRA, A. M. The Ribeira Folded Belt. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 5, p. 257-266. 1975.
- HASUI, Y.; SADOWSKI, G. R. Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 6, p. 187-200, 1976.
- HASUI, Y.; OLIVEIRA, M. A. F. Província Mantiqueira - Setor central. In: ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. (Org.). *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo: Editora Edgard Blucher, v.1, 1984. p. 308 – 344.
- HENKES, L.; JOHANNES, W. The petrology of a migmatite (Arkiva, Vämmland, Western Sweden). *Neues Jb. Miner. Abh* 141, p. 113-133. 1981.
- HEILBRON, M. et al. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.). *Geologia do Continente Sul-*



- Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, v 1, 2004. p. 203 – 235.
- HEILBRON, M. et al. Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U/Pb geochronology: Implications for paleogeographic reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent. *Precambrian Research*, v. 178, p. 136 – 148. 2010.
- HOLNESS, M.; CESARE, B.; SAWYER, E. W. Melted rocks under the Microscope: Microstructures and their Interpretation. *Elements*, v. 7, nº 4, p. 247 – 252, 2010.
- HOLLAND, T. J. B.; POWELL, R. An internally-consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 16, nº 3, p. 309 – 344. 1998.
- HOWELL, G. H. Principles of Terrane Analysis – New applications for global tectonics. 2nd Edition. London – Glasgow – Weinheim – New York – Tokyo – Melbourne – Madras: Chapman & Hall, 1995. 254 p.
- HUTTON, J. Theory of the Earth with proofs and illustrations (with 2 volumes). Edinburgh, UK. 1795.
- Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. Compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, "igneous rock series". 1994. *Geostandards Newsletter*, v. 19, nº 2, p. 135 – 213.
- INSTITUTO FLORESTAL. Mosaico Juréia – Itatins. São Paulo, SP: SMA. 2009

- JAMIESON, R.A et al. Crustal channel flows: 2. Numerical models with implications for metamorphism in the Himalayan–Tibetan orogen. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, B06406. 2004.
- JAMIESON, R. A.; BEAUMONT, C. Coeval thrusting and extension during lower crustal ductile flow – implications for exhumation of high-grade metamorphic rocks. *Journal of Metamorphic Geology*. Special Issue: Granulites, Partial Melting and the Rheology of the Lower Crust, v. 29, nº 1, p. 33 – 51. 2011.
- JOHANNES, W. The significance of experimental studies for the formation of migmatites. In: Ashworth, J.R., (Ed), *Migmatites*. Blackie, Glasgow, UK. 1985.
- JOHNSON, T. E.; BENEDIX-BLAND, G. K.; BLAND, P. A. Metamorphism and partial melting of ordinary chondrites: Calculated phase equilibria. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 433, p. 21 – 30. 2016.
- JOHNSON, T. E.; BROWN, M. Quantitative Constraints on Metamorphism in the Variscides of Southern Brittany — a Complementary Pseudosection Approach. *Journal of Petrology*, v. 45, nº 6, p. 1237 - 1259. 2004.
- JOHNSON, T. E.; WHITE, R. W.; POWELL, R. Partial melting of a graywacke: a calculated mineral equilibria study. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 26, nº 8, p. 837 – 853. 2008.
- KAUL, P. F. T. Pré-Cambriano e eopaleozoico do Nordeste de Santa Catarina e Leste do Paraná: reavaliação de dados e correlações com a África. In: SIMP. REG. GEOL., 2, 1979. Rio Claro. Atas..., Rio Claro: Sociedade Brasileira de Geologia - SP, 1979. v.1, p. 1 – 15.

- KAUL, P. F. T.; TEIXEIRA, W. Archean and Early Proterozoic Complexes of Santa Catarina, Paraná and São Paulo States, South-Southeastern, Brazil: an outline of their geological evolution. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 12, n° 1 – 3, p. 172 – 182. 1982.
- KELLY, N. M.; HARLEY, S. L. An integrated microtextural and chemical approach to zircon geochronology: refining the Archaean history of the Napier Complex, east Antarctica. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 149, n° 1, p. 57 – 84. 2005.
- KOBLINGER, B. M.; PATTISON, D. R. M. Crystallization of heterogeneous pelitic migmatites: insights from thermodynamic modelling. *Journal of Petrology*, v. 58: p. 297 – 326. 2017.
- KOŠLER, J. Laser-ablation ICPMS study of metamorphic minerals and processes. In: Sylvester, P. *Laser-Ablation-ICPMS in the Earth Sciences – Principles and Applications: Short Course Series*, v. 29. St Johns, Newfoundland: Mineralogical Association of Canada. 2001.
- KRETZ, R. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, v. 68, n° 1 – 2, p. 277 – 279. 1983.
- LEONARDOS JÚNIOR, O. H.; FYFE, W. S. Ultrametamorphism and melting of a continental margin: The Rio de Janeiro Region, Brazil. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v.46, n° 3, p. 201 – 214. 1974.
- LYELL, C. *Manual of elementary geology*. (5th Edition). London, 1885.
- LUDWIG, K. R. *Isoplot 3.00 – A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center. Special Publication n° 4. 2003.
- LUTH, W. C.; TUTTLE, O. F. The alkali-feldspar solvus in the system Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O. *American Mineralogist*, v.51, p. 1359 – 1373. 1966.

- MEIRA, V. T. Evolução tectono-metamórfica neoproterozoica dos Complexos Embu e Costeiro no contexto da formação do Gondwana Ocidental (Leste do Estado de São Paulo). 2014. 266 p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.
- MEIRA, V. T. et al. The role of intracontinental deformation in supercontinent assembly: insights from the Ribeira Belt, Southeastern Brazil (Neoproterozoic West Gondwana). *Terra Nova*, v. 27, p. 206 – 217. 2015.
- MEHNERT, K. R. *Migmatites and the origin of Granitic Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 1968.
- MÖLLER, A.; MEZGER, K. & SCHENK, V., U-Pb dating of metamorphic minerals: Panafrican metamorphism and prolonged slow cooling of high pressure granulites in Tanzania, East Africa. *Precambrian Research*, v. 104, nº 3 – 4, p. 123 - 146. 2000.
- MONTEL, J. -M. et al. Electron microprobe dating of monazite. *Chemical Geology*, v. 131, nº 1 – 4, p. 37 – 53. 1996.
- MORI, P. E. et al. Development of a fused glass disc XRF facility and comparison with pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, São Paulo University. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 29, nº 3, p. 441 – 446. 1999.
- NAVARRO, M. S. et al. The Direct Determination of Rare Earth Elements in Basaltic and Related Rocks using ICP-MS: Testing the Efficiency of Microwave Oven Sample Decomposition Procedures. *Geostandards and Geoanalytical Research*, v. 32, nº 2, p. 167 – 180. 2008.
- NEGRI, F. A.; VLACH, S. R. F.; TEIXEIRA, A. L. Química mineral, geotermobarometria e geocronologia Th-U-PbT em monazita de sillimanita-granada-biotita gnaisses do Complexo Embu, Setor Centro-Sul do Cinturão Ribeira, SP. In: CONGRESSO

- BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 43, 2004. Araxá. Anais..., Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, 2004, v.1.
- PALIN, R. M. et al. High-grade metamorphism and partial melting of basic and intermediate rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 34, nº 9, p. 871 – 892. 2016.
- PASSARELLI C. R. Caracterização estrutural e geocronológica dos domínios tectônicos da porção sul-oriental do Estado de São Paulo. 2001. 254 p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- PASSARELLI, C. R. et al. Geocronologia e geologia isotópica dos terrenos pré-cambrianos da porção sul-oriental do Estado de São Paulo. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, v. 4 , nº 1, p. 55 – 74, 2004.
- PASSARELLI, C. R. et al. Caracterização estrutural das fases de deformação identificadas no sistema de cisalhamento Cubatão – Itariri, SE do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 10, 2005, Curitiba. Boletim de Resumos Expandidos, X SNET e IV IST, 2005. p. 349 - 352.
- PASSARELLI, C. R. et al. Structural and geochronological constraints on the evolution of the Juréia Massif, Registro Domain, State of São Paulo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 79, nº 3, p. 441 – 455, 2007.
- PASSARELLI, C. R. et al. Major shear zones of southern Brazil and Uruguay: escape tectonics in the eastern border of Rio de La plata and Paranapanema cratons during the Western Gondwana amalgamation, *International Journal of Earth Sciences* ,v. 100, nº 2-3, p.391-414. 2011.
- PASSARELLI, C. R. et al. Geochronology of the granitic rocks of the Itariri Complex – Mongaguá Domain – Coastal Terrane – State of São Paulo. In: SOUTH AMERICAN

SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 9, São Paulo. Abstracts, São Paulo, Brazil. 2014.

PASSARELLI, C. R. et al. New U-Pb LA-ICP-MS ages from granitic and migmatitic rocks of the Costeiro Terrane, Mongaguá Domain, Southeastern Brazil: Some petrogenetic implications. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 10, Puerto Vallarta. Abstracts, Puerto Vallarta, Mexico. 2016.

PASSCHIER, C. W.; MYERS, J. S.; KRÖNER, Geologia de campo de terrenos gnáissicos de alto grau. São Paulo: EDUSP, 1993. 188 p.

PATTISON, D. R. M. Are reversed Fe-Mg exchange and solid solution experiments really reversed?. *American Mineralogist*, v. 79, p. 938 – 950. 1994.

PATTISON, D. R. M. et al. Temperatures of granulite-facies metamorphism: constraints from experimental phase equilibria and thermobarometry corrected for retrograde exchange. *Journal of Petrology*, v. 44, nº 5, p. 867-900. 2003.

PERROTTA, M. M. et al. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, CPRM, São Paulo. 2005.

PETTERSON, J. W.; CHACKO, T.; KUEHNER, S. M. The effects of fluorine on the vapor-absent melting of phlogopite + quartz; implications for deep-crustal processes. *American Mineralogist*, v. 76, nº 3-4, p. 470 – 476. 1991.

PATTON, C. et al. Iolite: freeware for the visualization and processing of mass spectrometry data. *Journal of Analytical Atomic Spectroscopy*, v. 26, p. 2508 – 2518. 2011.

PICANÇO, J. L. Aplicação das sistemáticas Sm/Nd e Rb/Sr no Maciço de Itatins (SP). 1994. 140 p. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

- PICANÇO J. L. et al. Idades U-Pb (SHRIMP), Sm-Nd e Rb-Sr em rochas do Maciço de Itatins (SP): Evidências de Evolução Policíclica. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 70, nº 1, p. 139 – 150. 1998.
- POWELL, R. & HOLLAND, T. J. B. Optimal geothermometry and geobarometry. *American Mineralogist*, v. 79, nº 1 – 2, p. 120 – 133. 1994.
- POWELL, R.; HOLLAND, T. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest *Journal of Metamorphic*, v. 16, nº 3, p. 309 – 343, 1998.
- POWELL, R.; GUIRAUD, M.; WHITE, R. W. Truth and beauty in metamorphic mineral equilibria: conjugate variables and phase Diagrams. *Canadian Mineralogist*, v. 43, nº 1, p. 21 – 33, 2005.
- REBAY, G.; POWELL, R.; DIENER, J. F. A. Calculated phase equilibria for a MORB composition in a *P-T* range, 450-650 °C and 18-28 kbar: the stability of eclogite. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 28, nº 6, p. 635 -645. 2010.
- RICHARD, L. Mineralogical and Petrological Data Processing System. MINPET for Windows. Version 2.02, 1995. Copyright 1988-1995.
- ROCHA, B. C. et al. Timing of anatexis and melt crystallization in the Socorro-Guaxupe Nappe, SE Brazil: insights from trace element composition of zircon, monazite and garnet coupled to U-Pb geochronology. *Lithos*, v. 277, p. 337 – 355. 2017.
- SADOWSKI, G. R. Tectônica do Complexo migmatítico da Serra Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974. Porto Alegre. Boletim Especial. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia, 1974. v. 1, p. 557 - 561.
- SADOWSKI, G. R.; DIAS NETO, C. M.; EGYDIO-SILVA, M. 1978. Análise do faturamento do Maciço de Itatins, Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

- GEOLOGIA, 30, 1978. Recife. Boletim nº 1 – Resumo das Comunicações, Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978, v.1, p. 60.
- SATO, K. et al. O método geocronológico Sm-Nd no IG/USP e suas aplicações. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 67, p. 316-336. 1995
- SATO, K. et al. The Atuba Complex, Southern South American Platform: Archean Components and Paleoproterozoic to Neoproterozoic Tectonothermal Events. Gondwana Research, v. 6, nº 2, p. 251 – 263. 2003.
- SAWYER, E. W. Melt segregation in the continental crust: distribution and movement of melt in anatectic rocks. Journal of Metamorphic Geology, v. 19, nº 3, p. 291 – 309, 2001.
- SAWYER, E. W. Atlas of Migmatites. The Canadian Mineralogist, Special Publication 9. Ottawa: NRC Research Press, 2008, 371 p.
- SEDERHOLM, J. J. Selected works: granites and migmatites. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1967.
- SIGA JÚNIOR, O. Domínios tectônicos do sudeste do Paraná e nordeste de Santa Catarina: geocronologia e evolução crustal. 1995. 212 p. Tese (Doutorado de Geoquímica e Geotectônica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- SIGA JUNIOR, O.; BASEI, M. A. S.; MACHIAVELLI, A. Evolução Geotectônica da Porção Nordeste de Santa Catarina e Sudeste do Paraná com base em Interpretações Geocronológicas. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 23, nº 3, p. 215 – 223, 1993.
- SIGA JÚNIOR, O. et al. O Complexo Atuba: Um Cinturão Paleoproterozóico Intensamente Retrabalhado no Neoproterozóico. Geologia USP – Série Científica, São Paulo, v. 26, p. 69 – 98. 1995.



- SILVA, A. T. S. F.; ALGARTE, J. P. Contribuição à geologia da sequência Turvo-Cajati entre o rio Pardo e Pariquera-Açu, Estado de São Paulo. I – Litologia e petrografia. In: SIMP. REG. GEOL., 3, 1981, Curitiba. *Atas...*Curitiba: Soc. Bras. Geol., 1981a, v. 1, p. 109 – 111.
- SILVA, A. T. S. F.; ALGARTE, J. P. Contribuição à geologia da sequência Turvo-Cajati entre o rio Pardo e Pariquera-Açu, Estado de São Paulo. II – Estrutura, metamorfismo e evolução tectônica. In: SIMP. REG. GEOL., 3, 1981, Curitiba. *Atas...*Curitiba: Soc. Bras. Geol., 1981b, v. 1, p. 121 – 132.
- SILVA, A. T. S. F. et al. D. Projeto Santos – Iguape. DNPM-CPRM. Relatório Inédito, São Paulo, v. 1, 640p. 1977.
- SILVA, A. T. S. F. et al. Geologia integrada das folhas Iguape e Cananéia, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978. Recife. *Anais...*, Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, 1978, v.1, p. 208 – 221.
- SILVA, A. T. S. F. et al. Projeto Integração e Detalhe Geológica no Vale do Ribeira. DNPM-CPRM. Relatório Inédito, São Paulo, v. 1, 273 p. 1981.
- SILVA, L. C. et al. The neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: a zircon-based U Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens. *Precambrian Research*, v. 136, p. 203 – 240, 2005.
- SMITH, J. V. Feldspar Minerals. Volume 2: Chemical and Textural properties. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg and New York. pp. 690. 1974.
- SORZE, V. D. & TASSINARI, C. C. G. Evolução Geocronológica e Termocronológica do Maciço Itatins. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 20, 2011. Resumos..., São Paulo: Universidade de São Paulo, 2011.

- SOUZA, S. L. Métodos radiométricos Rb-Sr e Sm-Nd no CPGEO IGc-USP. *In:* Simpósio de 45 anos de Geocronologia no Brasil, 2009, São Paulo, Boletim de resumos expandidos, p. 137-139. 2009.
- SOUZA, A. M. Fusão, geração e preservação de rochas da fácies granulito. 2014. X p. Dissertação (Mestrado em Petrologia Ígnea e Metamórfica). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- SPEAR, F. S. & CHENEY, J. T. A petrogenetic grid for pelitic schists in the system SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO-MgO-K<sub>2</sub>O-H<sub>2</sub>O. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 101, n° 2, p. 149 – 164, 1989.
- STEIGER, R. H.; JÄEGER, E. Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmo-chronology. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 36, p. 359-362. 1978.
- SYMMES, G. H.; FERRY, J. M. The effect of whole-rock MnO content on the stability of garnet in pelitic schists during metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 10, n° 2, p. 221 – 237. 1992.
- TAYLOR, J. et al. The processes that control leucosome compositions in metasedimentary granulites: perspectives from the Southern Marginal Zone migmatites, Limpopo Belt, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 32, n° 7, p. 713 – 742. 2014.
- TORQUATTO, J.; KAWASHITA, W. *Geologia Nuclear V – O método Rb-Sr*. *Revista de Geologia*, 46 pp. 1994.
- THOMPSON, JR, J.B. The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic schists. *The American Mineralogist*, v. 42, p. 842 – 858. 1957

- THOMPSON, A. B. & ENGLAND, P. C. Pressure-Temperature-time paths of regional metamorphism II. Their inference and interpretation using mineral assemblages in metamorphic rocks. *Journal of Petrology*, v. 25, nº 4, p. 929 – 955. 1984.
- TROMPETTE, R. R. Et al. Amalgamação do Gondwana Ocidental no Panafricano-Brasiliano e O Papel da Geometria do Cráton do São Francisco na Arquitetura da Faixa Ribeira. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 23, nº 3, p. 187 – 193, 1993.
- TUTTLE, O. F.; BOWEN, N. L. Origin of granite in the light of experimental studies in the system  $\text{NaAlSi}_2\text{O}_8\text{-KAlSi}_3\text{O}_8\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . *Mem. Geol. Soc. America*, v. 74. 1958.
- VLACH, S. R. F. Microprobe monazite constraints for an early (ca. 790 Ma) Brasiliano orogeny: the Embu Terrane, Southeastern Brazil. In: SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY, 3, Pucón. Extended Abstracts, Pucón, 2001. v.1, p. 265–268.
- VLACH, S. R. F. Th-U-Pb<sub>T</sub> Dating by Electron Probe Microanalysis, Part I. Monazite: Analytical Procedures and Data Treatment. *Geologia USP – Série Científica*, São Paulo, v. 10, nº 1, p. 61 – 85. 2010.
- WEBB, G.; POWELL, R.; McLAREN, S. Phase equilibria constraints on the melt fertility of crustal rocks: the effect of subsolidus water loss. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 33, nº 2, p. 147 – 165. 2015.
- WEINBERG, R. F.; HASALOVÁ, P. Water-Fluxed Melting of the Continental Crust: a Review, *Lithos*, v. 212, p. 158 – 188. 2015.
- WINKLER, H. G. F. Experimentelle Gesteinsmetamorphose—I Hydrothermale metamorphose karbonatfreier Tone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 13, nº 1, p. 42 – 54. 1957.

- WHITE, R. W. et al. The effect of  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  on metapelitic assemblages at greenschist and amphibolite facies conditions: mineral equilibria calculations in the system  $\text{K}_2\text{O}$ – $\text{FeO}$ – $\text{MgO}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{SiO}_2$ – $\text{H}_2\text{O}$ – $\text{TiO}_2$ – $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . *Journal of Metamorphic Geology*, v. 18, n° 5, p. 497 – 511. 2000.
- WHITE, R. W. et al. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 32, n° 3, p. 261 – 286. 2014.
- WHITNEY, D. L.; EVANS, B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, v. 95, n° 1, p. 185 – 187, 2010.
- YAKYMCHUK, C. et al. Decoding polyphase migmatites using geochronology and phase equilibria modelling. *Journal of Metamorphic Geology*, v. 33, n° 2, p. 203 – 230. 2014.

# CAPÍTULO V – ANEXOS

## MANUSCRITOS CIENTÍFICOS

ANEXO I – *“The composition of anatetic melt and its complementary residue by forward modelling of closed and open-system melting using THERMOCALC”*. Submitted to *Journal of Metamorphic Geology*.

ANEXO II – *“The partial melting of granodiorite: insights from granulite-facies metamorphism in the Itatins Complex, Brazil”*. To be submitted to *Journal of Petrology*.



## ANEXO I

### **The composition of anatectic melt and its complementary residue by forward modelling of closed-system and open-system melting using THERMOCALC**

M. Pavan<sup>1,2,3\*</sup>; R. Moraes<sup>2</sup>, E. W. Sawyer<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CPRM – Geological Survey of Brazil, Rua Costa 55, Consolação, CEP 01304-010, São Paulo SP, Brazil.

<sup>2</sup>Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago 562, CEP 05508-080, São Paulo SP, Brazil.

<sup>3</sup>UQAC - Université du Québec à Chicoutimi, 555 Boulevard de l'Université, Chicoutimi, QC, G7H 2B1, Canada

\* Corresponding author: mauriciopsilva@gmail.com

E-mail addresses: mauriciopsilva@gmail.com; rmoraes@usp.br; ewsawyer@uqac.ca

#### **Abstract**

This paper presents results from forward modelling of graywacke and shale average bulk compositions assuming two partial melting processes, closed-system and open-system melting. For each process, several compositions of anatectic melt and corresponding solid residue have been calculated, and the results are compared in binary, ternary and normative diagrams to evaluate how their compositions evolved during an isobaric heating path. Melt compositions are peraluminous, calc-alkaline and with SiO<sub>2</sub> contents that vary from 63.32 to 70.97 wt. % for the graywacke bulk composition and 63.43 to 71.38 wt. % for the shale bulk composition. Aluminium saturation index (ASI) values range from 1.05 to 1.45, increasing as P and T decrease. The #mg ranges from 0.23 to 0.35, increasing with consumption of biotite and other Fe-Mg phases by melting reactions as T rises. Compositions plotted in FeO+MgO, CaO+Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O ternary, K<sub>2</sub>O vs. Na<sub>2</sub>O binary and chemical normative diagrams displays trends with an increase in the K<sub>2</sub>O content of melt as T rises, with an increase in FeO+MgO content after the complete consumption of biotite. An increase in orthoclase component along the heating path, followed by an increase in the proportion of quartz component after K-feldspar/plagioclase breakdown is observed on the mesonorm diagrams. Total melt volume produced for graywacke bulk compositions are within 33-53 mol % in closed-system and 21-33 mol % in open-system melting. For shale bulk

composition the volumes are within 50-70 mol % during closed-system and 30-45 mol % during open-system melting. The rate of melt production varies with the type of melting reaction and is between 0.19–4.73 mol % °C<sup>-1</sup> for water-present melting and 0.01–6.82 mol % °C<sup>-1</sup> for hydrate-breakdown melting. Retrograde metamorphic assemblages can be formed even with the chemical depletion caused by melt extraction, but an external source of water and other components could make the consumption of the high-T assemblages more efficient. The correlation between data from this study plotted on the diagrams indicates that the melt compositions produced by THERMOCALC could be used as a guide for the study of how leucosome compositions and their mineral assemblages evolve.

*Keywords:* melting processes; forward modelling; pseudosections; melt composition

## **1. Introduction**

One of the main issues related to high-grade metamorphic rocks is how to determine the initial composition of anatectic melt produced by anatexis of crustal rocks that serve as a starting material for the formation of granite magmas. Methods used for this task are based on experimental petrology (Vielzeuf & Holloway, 1988; Vielzeuf & Montel, 1994; Montel & Vielzeuf, 1997; Stevens, Clemens, Droop, 1997; Patiño-Douce & Johnston, 1997; Patiño-Douce & Harris, 1998), melt inclusions (Cesare *et al.*, 2007; Cesare *et al.*, 2009; Ferrero *et al.*, 2012; Bartolli *et al.*, 2013; Bartolli *et al.*, 2014; Cesare *et al.*, 2015) mass-balance calculations based on stoichiometry of melt-forming reactions (Hasalová *et al.*, 2008), chemical analysis of leucosome (Sawyer, 2008; Carvalho *et al.*, 2016) and using thermodynamic calculations (White *et al.*, 2011 and 2016). Nonetheless, results provided by the methods above may not represent the “true” composition of anatectic melt, as melt produced by experiments involves very small volumes of material, including natural starting materials, in a closed-system and a very short time-scale for melting. Furthermore, several processes may change the original melt composition, (1) mineral-fluid interactions can occur after the melting reaction(s) stop, (2) segregation coupled with fraction crystallization and (3) loss of melt (e.g. Sawyer, 1987, Ellis & Obata, 1992, White, 2008). Some authors argue that melt compositions provided by experimental petrology could have been affected by late chemical diffusion of peritectic minerals (Gardien *et al.*, 1995). Other problems associated with the determination of melt compositions lie in the question of what do leucosomes represent. Leucosome is a product of partial melting and crystallization processes, and in some cases, its composition could represent the anatectic melt (e.g. “in-situ” leucosome – Sawyer, 2008).

However, processes such as partial segregation from source, fractional crystallization, contamination by peritectic and refractory minerals, and melt loss are possible and likely to modify the original anatectic melt composition (Taylor & Stevens, 2010; White & Powell, 2010, Sawyer, 2014 and Taylor *et al.*, 2014). Thus, all approaches used to recognize the “true” melt compositions have their limitations.



Assuming all these caveats in the study of partial melting processes, it is still not straightforward to establish a connection between the products of high-grade metamorphism and partial melting, such as migmatites and granulites, and their protoliths, as well as with the composition of the melt generated and its related residue (*e.g.* Sawyer, 1998). During the formation of these rocks, deformation plays an important role, driving the anatectic melt around or promoting segregation from its source. The result reflects an increase of chemical and structural heterogeneity of migmatites and granulites, which can make it impossible to select rock samples for which the relation between the various parts are unambiguously known, or the extent of exchange between them is broken (Hamilton & Pattison, in press). As a consequence, the interpretation of chemical data from these rocks also requires careful consideration of the processes that may occur, such as the degree of partial melting and “in-source” contamination (Garcia-Arias & Stevens, 2016).

Thermodynamic modelling can produce a general view of the partial melting process, and with programs such as THERMOCALC (Holland & Powell, 1998), it is possible to calculate melt compositions and link them to several different protolith bulk compositions, the residue, peritectic phases or pressure and temperature, as well as the reactions involved (White *et al.*, 2011). This approach also allows tracking the changes in the melt and residue composition along a  $P$ - $T$  path during the partial melting and retrogression process.

Many studies of crustal melting refer to an “initial” melt composition and, others have pointed out that, on the prograde path, the metamorphic melt-producing reactions change either because a new combinations of reactant minerals or through the progressive change in mineral compositions up temperature. Of particular interest is the effect that appearance and disappearance of K-bearing phases (*i.e.* K-feldspar and biotite respectively) may have on the composition of a “granitic” anatectic melt. Therefore, the aim of this study is to investigate how the composition of the melt changes as temperature increases and various phases disappear or appear. In other words, to investigate whether an “initial” melt composition might actually exist.

This paper presents results from the forward modelling of the partial melting processes based on pseudosections calculated for two representative bulk compositions of metasedimentary rocks from the compilation of Condie (1993) using THERMOCALC. The calculations established the composition and proportion of melt and the associated residues that were produced. We examined two scenarios for the partial melting processes: (i) closed-system, where no changes in the content of chemical components occurs, and the whole volumes of melt and residue equilibrate with each other along the rising temperature path, and (ii) open-system melting, where the melt is systematically removed from the original whole rock bulk composition, which continues to undergo partial melting and loss of melt with increasing temperature. The melting processes will hereafter be referred to as closed and open-system.

## 2. Metamorphism and partial melting modelling

Two average bulk compositions of metasedimentary rocks were selected from Condie (1993), as starting materials: a mesoproterozoic graywacke and a proterozoic cratonic shale (Table 1). Hereafter they will be referred to as “graywacke bulk composition” and “shale bulk composition”.

Pseudosections were constructed using THERMOCALC, version 3.40, in the Na<sub>2</sub>O-CaO-K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-TiO<sub>2</sub>-O (NCKFMASHTO) model system, using the internally consistent thermodynamic dataset – ds62 (Holland & Powell, 2011). Activity models are the ones described in White et al. (2014). Parameters defined for the calculations are: pressure ranges between 0.2 and 1.0 GPa, temperature from 650 to 950 °C and H<sub>2</sub>O content of 7.0 mol % (~2.5 % wt) for the shale composition and 3.66 mol % (~1.0 % wt) for the graywacke composition. The water content used for the shale composition is close to values proposed by Yardley (2009) as typical for pelites at  $T \sim 650$  °C. For the graywacke composition, we assumed the lowest amount of H<sub>2</sub>O (0.005 mol. proportion. at 1.0 GPa) necessary for the diagram to display a water saturated solidus along the pressure range. With this amount of water, it is possible to model and determine changes in the melt composition and proportion via sequential water-present and hydrate-breakdown melting reactions.

In the original data of Condie (1993), iron content is presented as Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>, which was converted to FeO<sub>t</sub> and a value of 0.1 mol % for “O” component is assumed. This choice is made based on Johnson et al., (2008), where the authors argue that using a higher value in the modelling would allow the formation of iron oxide phases in the subsolidus portion of the pseudosection. The value adopted is important for modelling purposes, as the activity model for melt does not include Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, the value chosen allows evaluation of whether iron-oxide minerals become stable during rising temperature or not.

Excess phases in the pseudosections are quartz, plagioclase, and ilmenite when required. Mineral abbreviations adopted in diagrams are as follows: muscovite (ms), biotite (bt), plagioclase (pl), K-feldspar (ksp), quartz (qtz), andalusite (and), kyanite (ky), sillimanite (sil), aluminosilicate (als), garnet (grt), cordierite (crd), orthopyroxene (opx), ilmenite (ilm), rutile (rt) and spinel (spl).

The open-system model was constructed assuming the condition described by Yakymchuk & Brown (2014), in which melt extraction is considered to be a regular cyclic process during which the chemical system will act as a closed-system as melt accumulates. Once the melt volume has attained the threshold at which extraction can occur, the system will be “open” allowing melt to escape. To model this situation, pseudosections and the respective melt compositions produced were calculated following several increments of melt extraction from the bulk composition using the “read-bulk-info” (rbi) script from THERMOCALC. We calculated the intersection between the 5.0 mol % isopleth of the liquid in the diagram and the pressure value selected. The data from this intersection was used with the script to modify the molar proportion of the phases modelled (i.e. mol % of liquid). After each step of melt extraction, a whole pseudosection was calculated, in this way it is possible to examine the evolution of

each residue produced and the possible retrograde mineral assemblages that develop in it. Further information about the "rbi" script can be found at <http://www.metamorph.geo.uni-mainz.de/thermocalc/tutorials/index.html>.

Several papers discuss the potential thresholds that affect the rheological behaviour of rocks during partial melting. The changes can be correlated with the amount of melt distributed throughout the rock. Rosenberg & Handy (2005) suggests that at melt fraction ( $\Phi$ ) of  $\sim 0.07$  the aggregate strength of rock sample is reduced by about 90%. They indicate that at melt fraction values between 0.03 and 0.07, sufficient melt interconnectivity will be established along grain boundaries and along micro-faults that the partially melted rock becomes permeable and melt can be extracted. Assuming an average threshold of  $\Phi = 0.05$ , which agrees with the values proposed by Rabinowickz & Vigneresse (2004), an open-system model is constructed, in which melt is removed from the bulk composition immediately it attains 5 mol % of melt, i.e. reaches 5 mol % melt since the last extraction episode. The modelling is stopped arbitrarily at the last 5 mol % melt batch produced below 950 °C.

Melt compositions and their respective residues are calculated at each 5 mol % of produced melt, for both closed- and open-system models, at  $P$  of 0.45, 0.7 and 0.9 GPa (Tables 2-3 and Supplementary data S1-S4). Produced compositions of melt and residue are examined using binary and ternary diagrams, such as those in Solar & Brown (2001) and Sawyer (2008), to evaluate their relationships, and mainly, the compositional evolution of all batches of melt produced.

### 3. Pseudosection modelling

#### *Graywacke - Closed-System Melting*

The pseudosection constructed for the graywacke composition comprises 38 stability fields, with the variance between three and six (Fig. 1). Muscovite, biotite, K-feldspar, andalusite/kyanite/sillimanite, garnet, cordierite, and orthopyroxene are the stable mineral phases within the investigated  $P$ - $T$  window that are not in excess. Fluid phases are represented by water ( $H_2O$ ) and melt (liq).

The solidus is shown as a thick dashed line and the water-saturation limit as thick dark line, both are positioned within a short temperature interval in the high-pressure part of the diagram. As pressure rises, the solidus line moves from 666 °C at 0.2 GPa to a maximum temperature of 694 °C at 0.41 GPa, followed by a reduction of 20 °C in the fields without cordierite. In the pressure range where muscovite and melt coexist, the solidus line is slightly curved with its maximum temperature where aluminosilicate and garnet are stable.

The temperature increase of the solidus between 0.3–0.4 GPa is similar, but with a smaller temperature interval, to the one described by White & Powell (2002) as an effect of the increase in the modal proportion of cordierite at the expense of melt. For the pseudosection in Fig. 1, the change in slope of

the solidus is directly affected by the appearance of cordierite in water-bearing assemblages, with decreasing pressure.

The limit of water-saturation moves from 675 °C at 1.0 GPa to 705 °C at 0.2 GPa in fields with garnet, sillimanite and/or cordierite. Mineral assemblages can be separated into zones, depending on which metamorphic reaction takes place. At 650 °C the stable assemblage varies between biotite + cordierite + andalusite + H<sub>2</sub>O at 0.2 GPa and muscovite + biotite + garnet + H<sub>2</sub>O at 0.9 GPa. After the total disappearance of muscovite, K-feldspar is formed between 749 °C at 0.87 GPa and 770 °C at 0.49 GPa by the consumption of biotite and aluminosilicate. After the aluminosilicate breaks down, K-feldspar is formed with an increase in pressure at the expense of the mineral assemblage biotite + garnet + cordierite + liquid. Aluminosilicate displays a steep limit between 0.2 and 0.48 GPa associated with the formation of cordierite on the lower *P* side. The temperature limit for the presence of aluminosilicate is about 655 °C at 0.2 GPa and 800 °C at 1.0 GPa. At *T* below 690 °C garnet is stable only at *P* > 0.68 GPa and with increasing temperature, its stability field expands to around 0.3 GPa. Garnet breakdown at *T* > 700 °C is partially controlled by pressure indicated by its coexistence with cordierite + orthopyroxene, or just orthopyroxene. Cordierite occurs at pressures lower than 0.57 GPa, by heating or decompression of mineral assemblages with biotite and/or garnet and the final breakdown of sillimanite, or the total consumption of water. At *T* > 750 °C, orthopyroxene is formed by total consumption of biotite in presence of garnet + plagioclase + quartz + ilmenite + melt, between 760 °C at 0.3 GPa and 884 °C at 0.98 GPa.

In summary, at granulite facies conditions *T* > 770 to 950 °C, and *P* between 0.2 and 1.0 GPa, the residuum consists of different amounts of biotite, garnet, cordierite, K-feldspar, orthopyroxene and melt, in addition to excess phases, ilmenite, plagioclase, and quartz. At *T* > 800 °C, cordierite breakdown in the presence of garnet is a good pressure indicator between 0.51-0.52 GPa. At the beginning of the granulite facies at 0.2 GPa (774 °C) about 20 mol % melt is predicted to be present in the graywacke composition. It reaches ~67 mol %, at the highest temperature, but low pressures (Fig. 1). As stated in previous work, for a rock undergoing closed-system melting to keep its highest temperature mineral assemblage more than 40% of generated melt must be lost (White & Powell, 2002).

### *Open-system Melting*

#### 0.45 GPa

Melt extraction at 0.45 GPa is examined using six pseudosections constructed for a *P-T* window of 0.3–0.6 GPa and 650–950 °C (Supplementary data S6). The diagrams are identified as A, B, D and E (Fig. 2), and they display from 10 to 24 stability fields, with a variance between 3 and 7. During the first three steps of melt extraction (sections A, B and C in Supplementary data S6), the topology of the suprasolidus domain in the sections does not present any major differences. The main ones lie on the subsolidus

portion of the diagram with the modification of the shape of the solidus limit around cordierite-bearing assemblages. In the second section (B), K-feldspar becomes stable at 650 °C, due to biotite-breakdown in the presence, or absence, of sillimanite. The reaction for biotite-breakdown (1) could be represented by a variation of that described by Hoffer (1976):



The coexistence of cordierite, garnet, and orthopyroxene is a good pressure indicator, as it defines almost an isobaric field between 0.4 and 0.5 GPa, where cordierite is consumed at higher and garnet at lower pressures, independent of the amount of lost melt (Fig. 2 from A to E).

In section D (Fig. 2), after the third step of melt extraction, with approximately 15 mol % melt previously extracted, the solidus rises to a maximum T of 838 °C at 0.6 GPa. In this situation the bulk composition reaches a level of depletion that influences the subsequent residual mineral assemblages, (e.g. section E and F) and the retrometamorphic mineral assemblages. The residue mineral assemblages up to 950 °C will consist of garnet and/or cordierite, orthopyroxene, K-feldspar, ilmenite, plagioclase, and quartz. During an isobaric retrometamorphic path, changes in mineral assemblage will be controlled by melt consumption via the reverse of the biotite hydrate-breakdown melting reaction, forming the assemblage biotite + garnet  $\pm$  cordierite + K-feldspar + orthopyroxene + plagioclase + quartz. During this cooling path, the residue gains some biotite, but the high-*T* mineral assemblage (with stable orthopyroxene) is preserved at temperatures below 800 °C if, at least 15 mol % of total melt mode was lost (Supplementary data S6).

Mineral assemblages formed along the heating path are mainly associated with the breakdown of biotite and, subsequently, garnet and cordierite. After biotite breakdown and removal of 15 mol % of melt, orthopyroxene becomes stable along the whole calculated temperature range (section D). After six steps of melt extraction, which sums to an amount of ~25 mol % of melt removed, the system cannot generate another step of 5 mol % of melt before 950 °C is attained.

#### 0.7 GPa

For melt extraction at 0.7 GPa four pseudosections (Fig. 3.A-D) were constructed in the *P-T* window of 0.6 – 0.8 GPa and 650 – 950 °C. Diagrams display 4 to 9 fields, with a variance between 3 and 6. Initially, K-feldspar is stable only at temperatures higher than 756 and 771 °C, before the first step of melt extraction (Fig. 3A). K-feldspar develops a larger stability field that grows after the second step of melt extraction (Fig. 3B). The third melt extraction step, with ~15 mol % of melt removed, marks a significant change in the mineral assemblages stability fields. After this extraction step aluminosilicate

is no longer stable along the whole subsolidus temperature range. Kyanite is stable only at temperatures <700 °C. After the following step of melt extraction (Fig. 3D) orthopyroxene is not destroyed in subsolidus fields below 846 °C, indicating the amount of removed melt necessary to make the bulk composition non-reactant.

#### 0.9 GPa

For melt extraction at 0.9 GPa three pseudosections (Fig. 4A-C) were constructed for the *P-T* window 0.8 to 1.0 GPa and 650 – 950 °C. Diagrams contain 6 to 13 stability fields, with a variance between 3 and 7. After the first step of melt extraction (Fig. 4A) the muscovite-breakdown displays a flat limit in the subsolidus domain, turning to steep after the solidus, in the presence of kyanite.

Orthopyroxene is stable only at temperatures higher than 860 °C within the pressure range. After five steps of melt extraction muscovite is only stable at *P* > 0.8 GPa. The modelling was stopped after removal of ~30 mol % of melt, as the system was unable to produce another 5 mol % of melt before 950 °C.

#### *Shale composition - Closed-system Melting*

The pseudosection constructed for shale bulk composition contains 71 stability fields (Fig. 5A), with a variance between 2 and 9. Stable mineral phases, the “not in excess phases”, along the investigated *P-T* range are muscovite, biotite, K-feldspar, kyanite, sillimanite, garnet, cordierite, orthopyroxene, rutile, and liquid (anatectic melt). Fluid phase is represented by H<sub>2</sub>O. Solidus (thick dashed line) and water-saturation limit (thick dark line) occur within a small temperature range, 5 °C apart along the whole pressure range of the diagram. The same occurs for the formation of K-feldspar and muscovite breakdown. As described for the graywacke bulk composition, the pseudosection displays zones for both water-present melting and hydrate-breakdown melting reactions. Melting starts in the water-present region between 673 and 700 °C. At pressure lower than 0.43 GPa, melt is produced by consumption of quartz + feldspars + H<sub>2</sub>O (reaction 2) and by a biotite breakdown reaction (3), as muscovite has been previously consumed by the hydrate-breakdown reaction (4):



Above 0.43 GPa melt formation occurs first by the muscovite breakdown reaction:



Garnet-stable fields first occur between 650 and 744 °C and a pressure higher than 0.7 GPa, as temperature increases the mineral is stable to lower pressures, down to 0.24 GPa, at  $T \sim 784$  °C. In the fields without garnet, ilmenite is completely consumed increasing the Ti content of biotite between 725 and 780 °C and 0.4 and 0.87 GPa. This condition creates an area where K-feldspar is also consumed (Fig. 5B). Up temperature, ilmenite is produced, after the appearance of garnet due to biotite breakdown. At pressure above 0.8 GPa rutile becomes stable in the presence of ilmenite, which is consumed in a narrow pressure interval of 0.02 GPa. Biotite is stable between 757 and 856 °C and is consumed by reaction (3). Orthopyroxene is stable in a small  $P$ - $T$  range, 779 °C at 0.2 GPa and 849 °C at 0.28 GPa. Plagioclase breakdown occurs at 806 and 901 °C for 1.0 and 0.2 GPa, respectively. K-feldspar is stable up to 786 °C at 0.2 GPa and 941 °C at 1.0 GPa, disappearing at pressures below 0.7 GPa after the breakdown of biotite. At the high-temperature/low-pressure limit of the diagram, quartz is completely consumed at temperatures above 870 °C. In this closed system situation, the maximum amount of melt produced is a little higher than 70%, at the temperature of 880 °C at 0.2 GPa and 950 °C at 0.5 GPa (Fig. 5A).

### *Open-system Melting*

#### 0.45 GPa

For melt extraction, at 0.45 GPa nine pseudosections were constructed in the  $P$ - $T$  window 0.3 to 0.6 GPa and 650 to 950 °C (Supplementary data S7). To optimize the presentation, only five pseudosections are displayed in Fig. 6. Diagrams show 6 to 19 fields, with a variance between 3 and 7. For the first three steps of melt extraction, garnet occurs only after the breakdown of ilmenite at temperatures higher than 755 °C. After 15 mol % of melt has been removed (section C), muscovite is no longer stable in the subsolidus domain of the diagrams. Biotite-breakdown occurs at the temperature close to the solidus line and is represented by the reaction:



After 20 mol % melt extraction, biotite is completely consumed. From this step forward, the subsolidus assemblages will be similar to those in the melt-bearing domain.

#### 0.7 GPa

For melt extraction at 0.7 GPa, five pseudosections were constructed between 0.6-0.8 GPa and 650 to 950 °C (Fig. 7). Diagrams contain 5 to 18 fields with a variance between 3 and 7. The significant modification in the topology of the sections occurs after the extraction of 15 mol %, with the disappearance of the fields without ilmenite. The decrease in temperature, after the extraction of 15 mol % of melt does not effectively change the mineral assemblages in the subsolidus domain. Across the whole process of melt extraction, the lower temperature limit for solidus increases from 656 to 804 °C.

#### 0.9 GPa

For melt extraction at 0.9 GPa, five pseudosections were constructed between 0.8 and 1.0 GPa and 650 and 950 °C (Fig. 8). Diagrams contain 12 to 31 fields with variance between 2 to 7. In the first pseudosection (Fig. 8.A), the wet-solidus domain lies between 0.8 to 0.86 GPa and 662 to 686 °C. The solidus line exhibits a positive slope in presence of muscovite and the absence of aqueous fluid (H<sub>2</sub>O). K-feldspar is produced by the reaction:



After removal of ~15 mol % melt, muscovite breakdown at the solidus displays low  $\partial P/\partial T$  values (Fig. 8.C). Fields with ilmenite and rutile have their pressure interval increased in the subsolidus domain as melt is removed and when muscovite is no longer a stable phase. The lower temperature limit for plagioclase breakdown at 1.0 GPa has a range of just 5 °C from 5 to 30 mol % of melt extracted, between 806 and 811 °C. The limit of garnet-K-feldspar-sillimanite-ilmenite-liquid field, with plagioclase and quartz in excess, which corresponds to plagioclase breakdown is almost isobaric, at 0.82 GPa, extending from 852 to 949 °C (Section D), and limits the K-feldspar breakdown at  $P$  higher than 0.82 GPa. In the last step of melt extraction (Section E), plagioclase breakdown develops a positive slope.

#### 4. Melt and residue compositions

The compositions of melt and residue are presented in wt. % on tables 2 and 3 (and Supplementary data S1, S2, S3, and S4). The compositions and melt proportion for the closed-system and open-system models are plotted in binary and ternary diagrams (Fig. 9 and 10). These diagrams allow evaluation of



how much the melt and residue compositions change during isobaric heating, with continuous melt extraction processes and how they correlate along heating and cooling paths. Geochemical classification and normative analysis were done using the Geochemical Data Toolkit (GCDkit) package for R (Janousek, Farrow & Erban, 2006) to evaluate primary melt composition.

### *Residue composition*

Residue compositions, after melt extraction, from both graywacke and shale, exhibit trends with shorter ranges when compared to the melt compositions, particularly in open-system models (Figs. 9 and 10). The compositional trends show that after the first increment of melt forms, the residue compositions have an increase in K<sub>2</sub>O between 1 wt. % (at 0.45 GPa) and 2.5 wt. % (at 0.9 GPa), associated with a decrease in Na<sub>2</sub>O between 0.8–1.0 wt. %

This change in trend orientation is a response to muscovite and plagioclase breakdown and K-feldspar production, which are pressure dependent. At higher temperature, within the melt-bearing fields, biotite starts to be consumed, leading to a decrease in the K<sub>2</sub>O available to the residue. After the complete consumption of biotite melting reactions consume plagioclase, reducing the content of Na<sub>2</sub>O in the residue (Fig. 9A). The K<sub>2</sub>O content in the melt decreases after total consumption of plagioclase from the residue, due to dilution by other components such as CaO and Na<sub>2</sub>O.

For open-system (Fig. 9B and D), residue compositions exhibit still shorter variation trends. The amount of K<sub>2</sub>O in the residue also shows minor pressure dependence. Graywacke and shale bulk compositions display minor variations with residues from 0.9 GPa melting process being less depleted in K<sub>2</sub>O than at 0.45 GPa.

In the K<sub>2</sub>O-FeO+MgO-Na<sub>2</sub>O+CaO diagrams (Fig. 10 - modified from Solar and Brown, 2001), residue displays similar trends to the ones from previous diagrams. However, in this case, residue compositions formed from shale bulk composition after the closed-system model move toward FeO+MgO vertex, reaching close to 100% of FeO+MgO (Fig. 10C). This indicates that for any given pressure, a shale bulk composition that underwent closed-system may become develop a mineral assemblage constituted by Fe-Mg phases and quartz, almost without any trace of plagioclase or K-feldspar. This condition agrees with experiments, which discuss consumption of feldspars over different pressure intervals generating melts with different SiO<sub>2</sub>-saturation levels (Johannes & Holtz, 1996). Models calculated in our work show that for closed-system, plagioclase and K-feldspar (when present) are completely consumed before 950 °C. This condition generates residues richer in SiO<sub>2</sub> as pressure rise, as is observed in experiments (Johannes & Holtz, 1996). On the other hand, melts produced at the lower pressure intervals display higher concentrations of SiO<sub>2</sub> (Table 2 and 3 and Supplementary data S1 and S3).

Residue compositions from open-system (Fig. 10B and D) display a shorter trend as described for the K<sub>2</sub>O vs. Na<sub>2</sub>O diagram (Fig.9B and D). Residues from graywacke bulk compositions exhibit a slight

change in direction towards the Na<sub>2</sub>O+CaO-FeO+MgO vertex during hydrate-breakdown melting. For shale bulk composition (Fig. 10D) residue trends move towards the FeO+MgO apex. Between 0.45 and 0.7 GPa the residue trends move slightly towards the K<sub>2</sub>O-FeO+MgO side, indicating that at higher pressures K<sub>2</sub>O content of residue decreases compared to Na<sub>2</sub>O+CaO.

### *Melt composition*

For both graywacke and shale bulk compositions, models produced melts of granite composition, which are calc-alkaline and peraluminous. They exhibit overlapping values for SiO<sub>2</sub> content, ranging from 63.32 to 71.38 wt. %, ASI (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) varies from 1.05 to 1.45 and *mg#* from 0.28 to 0.39. ASI parameter tends to decrease as temperature and pressures rise. The SiO<sub>2</sub> content increases with pressure and temperature, but the range decreases as pressure is increased. The range of *mg#* increase as temperature and pressure rise.

In the K<sub>2</sub>O vs. Na<sub>2</sub>O diagram, melt trends exhibit a general negative correlation, with K<sub>2</sub>O increasing as Na<sub>2</sub>O decreases (Fig. 9). This occurs up to final consumption of biotite and K-feldspar by melting reactions, when K<sub>2</sub>O content starts to decline due to compositional dilution by other oxides (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, MgO, and CaO) during garnet and plagioclase breakdown. As the modal proportion of garnet and plagioclase do not change significantly after biotite breakdown during open-system and K-feldspar continues to be stable, some of the K<sub>2</sub>O trends do not display an inflection after biotite is eliminated. The increase in K<sub>2</sub>O content as temperature rises, is a factor of 3.7, from 1.86 to 7.20 wt. % at 0.9 GPa, (Fig. 9C) for shale bulk composition undergoing closed-system (Fig. 9C). Melt compositions from the graywacke display a change in trend with decreasing K<sub>2</sub>O content during its evolution, which correlates with the total consumption of K-bearing minerals, i.e. biotite and K-feldspar (Fig. 9A).

During water-present melting reactions for both compositions, and sillimanite consumption in the graywacke bulk composition, melt compositions do not exhibit significant changes and form a cluster at the beginning of the composition trends for both types of partial melting model (Fig. 9A and C). For melts generated from the graywacke bulk composition in the range of 10 to 15 mol % of melt loss, there is a small increase, at 0.9 GPa, or decrease, at 0.45 GPa, in K<sub>2</sub>O content (Fig. 9A). At  $P < 0.5$  GPa this change in K<sub>2</sub>O content marks the sillimanite breakdown and formation of garnet in the presence of cordierite. It also marks the beginning of biotite-dehydration melting, which causes an increase in the K<sub>2</sub>O content of melt during the first increment of 5 mol % of melt generated (Fig. 9A and B).

Melt compositions from both partial melting processes plotted in the ternary diagram K<sub>2</sub>O, FeO+MgO, Na<sub>2</sub>O+CaO (Fig. 10A – D), display similar trends to those previously described. K<sub>2</sub>O content is sensitive to melting reactions, especially biotite-dehydration melting and the disappearance of biotite. For graywacke bulk compositions the melt trends, at 0.45 and 0.7 GPa display a change in direction after

the total consumption of K-bearing minerals. Melt compositions move towards FeO+MgO vertex, indicating that major hydrate phases are consumed to produce melt and anhydrous Fe-Mg minerals.

For the shale bulk composition the melt compositions for 0.9 GPa in closed-system melting does not show any change in trend direction. When the composition trend reaches the biotite-absent fields, at 0.9 GPa and temperature higher than 771 °C, the melt is produced at the expense of K-feldspar and plagioclase via reaction:



Thereafter, its composition becomes richer in K<sub>2</sub>O content, without a significant increase in FeO+MgO. Upon crystallization the melt could become a leucocratic- to hololeucocratic granite. This also indicates that at *P* below 0.5 GPa, most or all FeO and MgO remain in residual phases, such as ilmenite, cordierite, garnet, and orthopyroxene.

#### *Mesonorm diagrams*

Normative mineralogy data were calculated to compare melt composition trends to a set of bulk rock analysis from metatexite leucosomes taken from Sawyer (2008; Fig. 11). From the original diagram, leucosome compositions from mafic protoliths were excluded to make comparison an easier task.

In the diagrams presented in Fig. 11, trends of melt compositions in Ab-Or-Qtz (albite-orthoclase-quartz) diagrams exhibit good agreement with leucosome composition field from Sawyer (2008). Melts produced from graywacke bulk composition in a closed-system present an increase in orthoclase content without a change in quartz proportion during temperature rise to biotite-breakdown. Then, the compositions move toward Ab-Qtz edge, with slight increase in albite content at higher pressure. After biotite breakdown, at 0.9 GPa in the closed system the proportion of orthoclase remains the same up to 950 °C at ~ 40 modal %. In the 0.45 and 0.7 GPa models, melt compositions trend towards an increase in orthoclase content up to sillimanite breakdown, and is followed by an increase in Ab and Qtz contents. The melt compositions plotted in fig.11 show a superposition with the field from the compositions of the melt inclusions given by Cesare *et al.*, (2015). This correlation indicates that melt produced with peritectic phases, either garnet or cordierite, from hydrate-breakdown melting, displays compositions close to those analysed from natural samples.

Melts from shale bulk compositions exhibit trends reaching higher orthoclase content (>50 modal %) in closed-systems. In the 0.45 and 0.7 GPa models the melts produced after K-feldspar breakdown have increased quartz contents without major changes in albite content (Fig. 11C). In contrast, melt compositions from the open-system model show a continuous increase in orthoclase content during heating for all the three pressures.

### *Melt fractions produced*

As predicted by previous theoretical studies (Clemens and Vielzeuf, 1987), melt proportion isopleths point to an increase of melt at lower pressure conditions (Fig. 1 and 5). The amount of melt produced is plotted against temperature (Fig. 12 – values presented in Supplementary data S5), to compare closed and open-system processes and the effect at different pressures. For the investigated temperature range a near constant rate of melt production is observed, but specific steps in increasing melt productivity are associated with changes in the availability of reactants for the melting reactions. The rate of melt production is strongly controlled by the presence of fluid and peritectic phases. Besides the melt, the fluid phase considered in these models is pure H<sub>2</sub>O which can be modelled with the present activity models and thermodynamic data set during melting reactions (Table 4). Its participation is strictly confined to the very early steps of partial melting in closed-system, where a steep step is observed when melt starts to be produced until all muscovite is consumed in both compositions for both partial melting models (Fig. 12). The amount of produced melt by the graywacke bulk composition, at 950 °C, varies between 33 and 53 mol % at 0.9 and 0.45 GPa, respectively. For the open-system model, the amount of generated melt at 950 °C is 21 mol % at 0.9 GPa and 33 mol % at 0.45 GPa. For the shale bulk composition, the amount of melt generated at 950°C is 50 mol % at 0.9 GPa and 70 mol % at 0.45 GPa in the closed-system and 30 mol % at 0.9 GPa and 45 mol % at 0.45 GPa in open-system.

The melt production rates are presented in table 4. It decreases from water-present melting (0.19-4.73 mol % °C<sup>-1</sup>) to biotite hydrate-breakdown melting (0.19-3.93 mol % °C<sup>-1</sup>) as pressure and temperature rises. As the mineral assemblage becomes more residual and refractory, typically composed of garnet + orthopyroxene + K-feldspar + plagioclase + quartz + ilmenite, the rate of melt increase is lower than 0.01 mol % °C<sup>-1</sup>.

During muscovite hydrate-breakdown melting the rate of melt production reaches the highest values, with a maximum of 6.82 mol % °C<sup>-1</sup> at 0.9 GPa for the graywacke bulk composition (Table 4). For both muscovite and biotite dehydration melting reactions the highest values for rate of melt production occurs in fields where the assemblages are composed of muscovite + K-feldspar and biotite + cordierite ± orthopyroxene (Figs. 1 to 7).

The decrease in the rate of melt production during water-present melting at lower pressure presented by the graywacke bulk composition is a response to the reduction in the muscovite stability field. As muscovite modal proportion reduces, the maximum value for the rate of melt production drops by a factor of 2 to 10 in both bulk compositions. This condition is similar to results from experimental data for hydrate-breakdown melting, where rocks with muscovite are more fertile than those without it (Gardien et al., 1995).

In Fig. 12B and 12D cumulative melt trends for melting processes at the same pressure are compared. During the first stages of heating, when muscovite-bearing melting is the main source of melt, the volumes produced by both processes are similar. The melt proportions produced by the two processes starts to differ during dehydration melting. For the graywacke, the volume trends drift apart after biotite is completely consumed (between 800 and 850°C), and 10-20 mol % of melt has been produced. For shale, separation of the trends occurs at a lower melt proportion, around 10 mol %, but the trends evolve close to each other up to 750 °C. Only when K-feldspar becomes a stable phase in the residual assemblage (from 750–800 °C) and melt volume reach values around 20 mol % does the difference in melt proportion for the two partial melting processes becomes significant (Fig. 12B and D).

## 5. Final remarks

### *Forward Modelling*

The method applied in this study aimed to determine the composition and evolution trends of the melt and residue generated during partial melting processes from average bulk compositions of proterozoic sedimentary rocks, specifically graywacke, and shale. Results were compared using binary and ternary diagrams to assess: (1) whether there is a correlation between the compositional trends of both products of partial melting, melt and residue, as calculated with THERMOCALC, (2) if these results replicate, or reflect, what is observed in natural rocks, and (3) if it is possible to unfold primary melt compositions varying bulk composition, pressure and temperature. For this modelling, arbitrary conditions of pressure and temperature were selected to investigate the partial melting processes and the chemical compositions of the anatectic melt and residue generated, with both closed and open systems. Those choices are critical to the metamorphic modelling via pseudosections.

Several papers in the literature approach the study of the evolution of migmatites using THERMOCALC (Štípská, Schulmann & Powell, 2008; White & Powell, 2010; Korhonen *et al.*, 2011; Droop & Brodie, 2012; Yakymchuck *et al.*, 2015). However, the approach is usually based on solving a particular geological problem mainly using pseudosections to determine the metamorphic conditions and possible *P-T* paths (Johnson & Brown, 2004; Lasalle & Indares, 2014; Palin *et al.*, 2012). Here, a more general view is sought, via the analysis of chemical compositions of anatectic melts and their corresponding residual counterpart; it seems to be a very promising field in assessing how the partial melting processes work and what changes should be expected.

### *Melt and residue compositions*

All the compositions produced by partial melting processes investigated in this work were calculated with THERMOCALC using the activity-model for anatectic melts from Holland & Powell (2001),

White *et al.* (2001) and White *et al.* (2007), in the system NCKFMASHTO. These results do not, therefore, take into account the presence of TiO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in the melt compositions or in the complementary residue, neither do they account for the chemical differences as arise between each batch of anatectic melt segregated from its residue. The process of mineral entrapment has been considered to explain the amount of TiO<sub>2</sub> and other components present in melt compositions (Stevens, Villaros & Moyer, 2007; Villaros, Stevens & Buick, 2009; Taylor & Stevens, 2010). Therefore, a complete activity model for anatectic melts is necessary for a broader evaluation of how TiO<sub>2</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> will behave during melting.

The melt compositions obtained are peraluminous, calc-alkaline as the temperature rises from 650 to 900 °C. ASI values display a *P-T* dependence with lower values correlating with higher pressure and temperature. The inverse is observed in *mg#* due to the increase in the consumption of biotite and garnet by melting reactions. Melt compositions trends in mesonorm diagrams plot over the anticipated areas, when compared with leucosome compositions from metasedimentary protoliths from Sawyer (2008). It also shows that the melt produced, after accumulation or extraction of 15 mol %, with garnet or cordierite stable in residual assemblage, has similar compositions to melt inclusions trapped in garnet or cordierite reported by Cesare *et al.* (2015). This indicates that melt inclusions reflect not the composition of the “initial” melt, but the composition of the melt generated with a particular peritectic phase, as was proposed by Cesare *et al.*, (2015). In our study the composition of the first increments of melt have lower contents of all oxides, except Na<sub>2</sub>O, than the melt trapped in garnet or cordierite (Tables 2-3 and Supplementary data S1 and S3).

The melt and residue compositions produced at 0.7 GPa were normalized to their respective initial bulk compositions (Fig. 13). Diagrams for 0.45 and 0.9 GPa are presented in Supplementary data S8 and S9. Melt produced from both protoliths shows depletion of FeO, MgO, and CaO compared to the original bulk composition and differences decreases as the liquid becomes more potassic and the degree of partial melting is higher. The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O contents are 1 to 4 times higher in melt than in the protolith. Their contents decline during the partial melting process. For open-systems the K<sub>2</sub>O content becomes close to the initial value in the final steps of melt extraction. Residue compositions display increases in FeO, MgO, and CaO, as the melt is produced and extracted at higher temperatures. Both Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O contents are depleted, as expected, with the latter being ten times lower than in the initial composition.

Although these variations are more subtle during open-system process than the closed-system, when partial melting starts in both the FeO (0.07-0.28 wt. %) and MgO (0.02-0.08 wt. %) are 96 to 98% lower than in the initial bulk composition. Even at very low amounts of melt it already has some of these elements dissolved in it, although it can only produce minor amounts of biotite by crystallisation directly from this melt.

The amount of melt produced during the partial melting processes indicates that both bulk compositions can generate between 53–70 mol % of melt during closed-system and 21–45 mol % during open-system behaviour. The differences in the amount of melt produced from each bulk compositions arise from two factors. The first is the minimum temperature at which the melt trends for both melting processes drift apart. For graywacke, trends are separated at  $<725$  °C, when muscovite is completely consumed, and for shale at  $\sim 750$  °C, after K-feldspar becomes stable in the residual mineral assemblage. The second is the temperature at which the fertility of the modified bulk composition is reduced by compositional depletion in the open-system. For shale and graywacke bulk compositions, the temperature for this is  $\sim 850$  and  $900$  °C, respectively.

The evolution of the composition and amount of melt is highly dependent on the amount of water available in the system. Melting reactions occurring in the wet-solidus domain produce small amounts of melt ( $\sim 5$  mol %), with similar compositions, but at a fast rate of  $1$  to  $4$  mol % °C<sup>-1</sup>. After water-present melting, the breakdown of muscovite, biotite, and K-feldspar, when available, is reflected in melt composition by increasing K<sub>2</sub>O content. Biotite- and K-feldspar-free residues then produce melts with increasing Fe-Mg contents due to garnet breakdown (Fig. 14 and Supplementary data S10), depending on the pressure range, but only at very high temperatures.

The amount of CaO and Na<sub>2</sub>O in the melt depends upon how much plagioclase is consumed by the hydrate-breakdown melting reactions. Plagioclase consumption increases after muscovite breakdown for all the modelled situations (Fig. 14), but especially for open-system at 0.45 GPa in the shale bulk composition. In this specific case, the consumption of K-feldspar is more pronounced than plagioclase, which increases the K<sub>2</sub>O content of melt as seen in ternary diagram FeO+MgO-Na<sub>2</sub>O+CaO-K<sub>2</sub>O (Fig. 10).

For the graywacke partial melting displays different rates determined by the reaction involved and its phases. During water-present melting, muscovite breakdown, associated with the formation of K-feldspar, and biotite breakdown with the formation of orthopyroxene, are the main reactions responsible for significant increases in the melt proportion over a narrow range of temperature of  $< 25$  °C (Fig. 14). These reactions affect not only the amount of melt generated, but also its composition. Depending on what the reactants are for the melting reaction, the melt will be enriched in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, and Na<sub>2</sub>O compared to the initial bulk rock composition, and depleted in other components. In fact, variation in the K<sub>2</sub>O content of melt is very sensitive to the reactions occurring during partial melting. Water-present melting reactions generate anatectic melts with K<sub>2</sub>O contents of 2.55 to 4.00 wt. % from graywacke and  $\sim 1.86$  to 5.12 wt. % from shale. On the her hand hydrate-breakdown melting reactions will generate melts with K<sub>2</sub>O contents up to 6.26 wt. % and 7.56 wt. % for, respectively, graywacke and shale bulk compositions.

Extraction of melt during open-system makes the bulk composition more refractory as the process evolves. The absence of a fluid phase, water or melt, even a small amount, becomes an important factor to the development of retrometamorphic assemblages during cooling (White & Powell, 2002). This situation can be evaluated using pseudosections constructed for the open-system process. Assuming an isobaric heating-cooling path, all compositions generate retrometamorphic assemblages in the subsolidus domain, composed of different proportions of biotite, garnet, cordierite, orthopyroxene, K-feldspar, aluminosilicate, ilmenite, plagioclase and quartz. In general, if the open-system process stops after the removal of ~15 mol % of melt for graywacke or shale bulk composition, the melt and residue do not have the compositions necessary to consume the high- $T$  mineral assemblage entirely. If the system has reached temperatures higher than 750 °C an external source of water, and other components, will be necessary to develop a complete retrometamorphic assemblage with biotite or plagioclase.

## 6. Conclusion

The results presented in this work demonstrate that phase-equilibria modelling via THERMOCALC make it possible to calculate the evolving paths of melt and residue compositions during closed-system and open-system processes. By doing these calculations, we can predict how the melt composition will change, and estimate the melt composition and volume produced from a protolith. The compositions determined in this paper can be correlated with the observed composition of melt inclusions and *in-situ* leucosomes in migmatites, which were not chemically modified by melt-rock interaction along the cooling path. However, the comparison of the results presented here with rocks such as diatexites and granites that result from the accumulation of many batches of melt should be avoided, or at least taken very cautiously. Furthermore, these rocks were possibly subjected to processes that changed their original bulk composition such as fractional crystallization, wall-rock contamination, influx of other batches of melt and so will not reflect the initial composition of the melt.

The modifications that melt compositions calculated in this study display during the partial melting processes as temperature rises show that the chemical change has a strong dependence on protolith composition. Melts from shale and graywacke bulk compositions have similar contents for SiO<sub>2</sub> (63-71 wt. %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13-16 wt. %) and CaO (0.3-1.3 wt. %), but FeO and MgO contents are higher in melts from the graywacke bulk composition. On the other hand, melts from the shale bulk composition show higher Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O contents (Supplementary data S1 and S3). The similarities and differences between oxide contents in melts from the two initial bulk composition are consistent throughout all the batches of melt calculated.

For each bulk composition modelled in this study, both the closed and open-systems display similar trends before the complete loss of K-bearing phases. This means that consumption of muscovite, biotite and K-feldspar controls the “granitic aspect” of the melt composition. It also indicate that the most



important increase in K<sub>2</sub>O and Na<sub>2</sub>O contents in anatectic melts occurs when muscovite is consumed and K-feldspar becomes a stable phase in the residual rock.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support was provided by FAPESP, grant #2013/04007-0 to R.M. and the Sciences without Borders Program, grant #206521/2014-6 to M.P.

## REFERENCES

Bartoli, O., Cesare, B., Poli, S., Acosta-Vigil, A., Esposito, R., Turina, A., Bodnar, R.J., Angel, R.J. & Hunter, J. 2013. Nanogranite inclusions in migmatitic garnet: behaviour during piston-cylinder remelting experiments. *Geofluids*, **13**, 405-420.

Bartoli, O., Cesare, B., Remusat, L. & Acosta-Vigil, A. 2014. The H<sub>2</sub>O content of granite embryos. *Earth and Planetary Science Letters*, **395**, 281-290.

Carvalho, B.B., Sawyer, E.W. & Janasi, V.A. 2016. Crustal reworking in a shear zone: transformation of metagranite to migmatite. *Journal of Metamorphic Geology*, **34**, 237-264

Cesare, B., Acosta-Vigil, A., Bartoli, O. & Ferrero, S. 2015. What can we learn from melt inclusions in migmatites and granulites? *Lithos*, **239**, 186-216.

Cesare, B., Maineri, C., Baron Toaldo, A., Pedron, D. & Acosta Vigil, A. 2007. Immiscibility between carbonic fluids and granitic melts during crustal anatexis: A fluid and melt inclusion study in the enclaves of the Neogene Volcanic Province of SE Spain. *Chemical Geology*, **237**, 433-449.

Cesare, B., Ferrero, S., Salvioli-Mariani, E., Pedron, D. & Cavallo, A. 2009. "Nanogranite" and glassy inclusions: The anatectic melt in migmatites and granulites. *Geology*, **37**, 627-630.

Clemens, J.D. & Vielzeuf, D. 1987. Constraints on melting and magma production in the crust. *Earth and Planetary Science Letters*, **86**, 287-306.

Condie, K.C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology*, **104**, 1-37.

Droop, G.T.R. & Brodie, K.H., 2012. Anatectic melt volumes in the thermal aureole of the Etive Complex, Scotland: the roles of fluid-present and fluid-absent melting. *Journal of Metamorphic Geology*, **30**, 843-864.

Ellis, D.J. & Obata, M. 1992. Migmatite and melt segregation at Cooma, New South Wales. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, **83**, 95-106.

Ferrero, S., Bartoli, O., Cesare, B., Salvioli-Mariani, E., Acosta-Vigil A., Cavallo A, Groppo, C. & Battiston, S. 2012. Microstructures of melt inclusions in anatectic metasedimentary rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, **30**, 303-322.

García-Arias, M., Stevens, G. 2016. Phase equilibrium modelling of granite petrogenesis: A. An evaluation of the magma compositions produced by crystal entrainment in the source. *Lithos* (in press).

Gardien, V., Thompson, A.B., Grujic, D. & Ulmer, P. 1995. Experimental melting of biotite + plagioclase + quartz  $\pm$  muscovite assemblages and implications for crustal melting. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, **100**, 15581-15591.

Grant, J. A. 2009. Thermocalc and experimental modelling of melting of pelite, Morton Pass, Wyoming. *Journal of Metamorphic Geology*, **27**, 571-578.

Hamilton, B.M. & Pattison, D.R.M. 2016. Crystallization of heterogeneous pelitic migmatites: insights from thermodynamic modelling. *Journal of Petrology*. Accepted with revisions Sept, 2015.

Hoffer, E. 1976. The reaction Sillimanite + Biotite + Quartz = Cordierite + K-Feldspar + H<sub>2</sub>O and partial melting in the system K<sub>2</sub>O – FeO – MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **55**, 127-130.

Holland, T.J.B. & Powell, R., 1998. An internally-consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 309-344.

Holland, T.J.B. & Powell, R. 2001. Calculation of phase relations involving haplogranitic melts using an internally consistent thermodynamic dataset. *Journal of Petrology*, **42**, 673-683.

Holland, T.J.B. & Powell, R. 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *Journal of Metamorphic Geology*, **29**, 333-383.

Janoušek, V., Farrow, C.M. & Erban, V., 2006. Interpretation of whole-rock geochemical data in igneous geochemistry: introducing Geochemical Data Toolkit (GCDkit). *Journal of Petrology*, **47**, 1255-1259.

Johannes, W. & Holtz, F. 1996. Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks. Minerals and Rocks, Vol. 22 (Editors; P. J. Wyllie, A. El Goresy, W. von Engelhardt and T. Hahn). Berlin, Springer-Verlag. 355 pp.

Johnson, T.E. & Brown, M., 2004. Quantitative Constraints on Metamorphism in the Variscides of Southern Brittany – a Complementary Pseudosection Approach. *Journal of Petrology*, **45**, 1237-1259.

Johnson, T.E., White, R.W. & Powell, R., 2008. Partial melting of a graywacke: a calculated mineral equilibria study. *Journal of Metamorphic Geology*, **26**, 837-853.

Korhonen, F.J., Brown, M., Grove, M., Siddoway, C.S., Baxter, E.F. & Inglis, J.D., 2011. Separating metamorphic events in the Fosdick migmatite–granite complex, West Antarctica. *Journal of Metamorphic Geology*, **30**, 165-192.

Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **68**, 277-279.

Lasalle, L. & Indares, A. 2014. Anatectic record and contrasting P– T paths of aluminous gneisses from the central Grenville Province. *Journal of Metamorphic Geology*, **32**, 627-646.

Palin, R.M., Searle, M.P., Water, D.J., Horstwood, M.S.A. & Parrish, R.R. 2012. Combined thermobarometry and geochronology of peraluminous metapelites from the Karakoram metamorphic complex, North Pakistan; New insight into the tectonothermal evolution of the Baltoro and Hunza Valley regions. *Journal of Metamorphic Geology*, **30**, 793-820.

Patiño-Douce, A. E. & Harris, N. 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis. *Journal of Petrology*, **39**, 689-710.

Patiño-Douce, A. E. & Johnston, A. D. 1997. Phase equilibria and melt productivity in pelitic system: implications for the origins of peraluminous granitoids and aluminous granitoids. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **107**, 202-218.

Montel, J-M. & Vielzeuf, D. 1997. Partial melting of metagreywackes, Part II. Compositions of minerals and melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **128**, 176-196.

Rabinowicz, M. & Vigneresse, J-L., 2004. Melt segregation under compaction and shear channeling: Application to granitic magma segregation in a continental crust. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, **109**, B04407.

Rosenberg, C.L. & Handy, M.R., 2005. Experimental deformation of partially melted granite revisited: implications for the continental crust. *Journal of Metamorphic Geology*, **23**, 19-28.

Sawyer, E.W. 1987. The role of partial melting and fractional crystallization in determining discordant migmatite leucosome compositions. *Journal of Petrology*, **28**, 445-473.

Sawyer, E.W. 1998. Formation and evolution of granite magmas during crustal reworking: the significance of diatexites. *Journal of Petrology*, **39**, 1147-1167.

Sawyer, E.W. 2008. *Atlas of Migmatites*. . The Canadian Mineralogist, Special Publication 9, NRC Research Press, Ottawa, Ontario. 371p.

Solar, G.S. & Brown, M. 2001. Petrogenesis of Migmatites in Maine, USA: Possible Source of Peraluminous Leucogranite in Plutons? *Journal of Petrology*, **42**, 789-823.

Stevens, G., Clemens, J.D. & Droop, G.T.R. 1997. Melt production during granulite-facies anatexis: experimental data from “primitive” metasedimentary protoliths. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **128**, 352-370.

Stevens, G. S., Villaros, A. & Moyen, J.F. 2007. Selective peritectic garnet entrainment as the origin of geochemical diversity in S-type granites. *Geology*, **35**, 9-12.

Štípská, P., Schulmann, K. & Powell, R., 2008. Contrasting metamorphic histories of lenses of high-pressure rocks and host migmatites with a flat orogenic fabric (Bohemian Massif, Czech Republic): a result of tectonic mixing within horizontal crustal flow? *Journal of Metamorphic Geology*, **26**, 623-646.

Taylor, J. & Stevens, G. 2010. Selective entrainment of peritectic garnet into S-type granitic magmas: Evidence from Archaean mid-crustal anatexites. *Lithos*, **120**, 277-292.

Taylor, J., Nicoli, G., Stevens, G., Frei, D. & Moyen, J.-F. 2014. The processes that control leucosome compositions in metasedimentary granulites: perspectives from the Southern Marginal Zone migmatites, Limpopo Belt, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology*, **32**, 713-742.

Vielzeuf, D. & Holloway, J.R., 1988. Experimental determination of the fluid-absent melting reactions in the pelitic system: consequences for crustal differentiation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **98**, 257-276.

Vielzeuf, D. & Montel, J.-M., 1994. Partial melting of metagreywackes, Part I. Fluid-absent experiments and phase relationships. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **117**, 375-393.

Villaros, A., Stevens, G. & Buick, I. A. 2009. Tracking S-type granite from source to emplacement: Clues from garnet in the Cape Granite Suite. *Lithos*, **112**, 217-235.

White, R.W. 2008. Insights into crustal melting and the formation of migmatites gained from the petrological modeling of migmatites. *In: Working with Migmatites* (Sawyer, E.W and Brown, M Eds). *Mineralogical Association of Canada, Short Course* **38**, , 77 – 96.

White, R.W., Palin, R.M., Green, E.C.R., 2016. High-grade metamorphism and partial melting in Archaean composite grey gneiss complexes. *Journal of Metamorphic Geology*, in press.

White, R. W. & Powell, R. 2002. Melt loss and preservation of granulite facies mineral assemblages. *Journal of Metamorphic Geology*, 20, 621-632.

White, R. W. & Powell, R. 2010. Retrograde melt–residue interaction and the formation of near-anhydrous leucosomes in migmatites. *Journal of Metamorphic Geology*, 28, 579-597.

White, R.W., Powell, R. & Holland, T.J.B. 2001. Calculation of partial melting equilibria in the system Na<sub>2</sub>O-CaO-K<sub>2</sub>O-FeO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (NCKFMASH). *Journal of Metamorphic Geology*, 19, 139-153.

White, R.W., Powell, R. & Holland, T.J.B., 2007. Progress relating to calculation of partial melting equilibria for metapelites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25, 511-527.

White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B, Johnson, T.E. & Green, E.C.R., 2014. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology*, 32, 261-286.

White, R.W., Stevens, G. & Johnson, T.E. 2011. Is the crucible reproducible? Reconciling melting experiments with thermodynamic calculations. *Elements*, 7, 241-246.

Whitney, D.L. & Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95, 185-187.

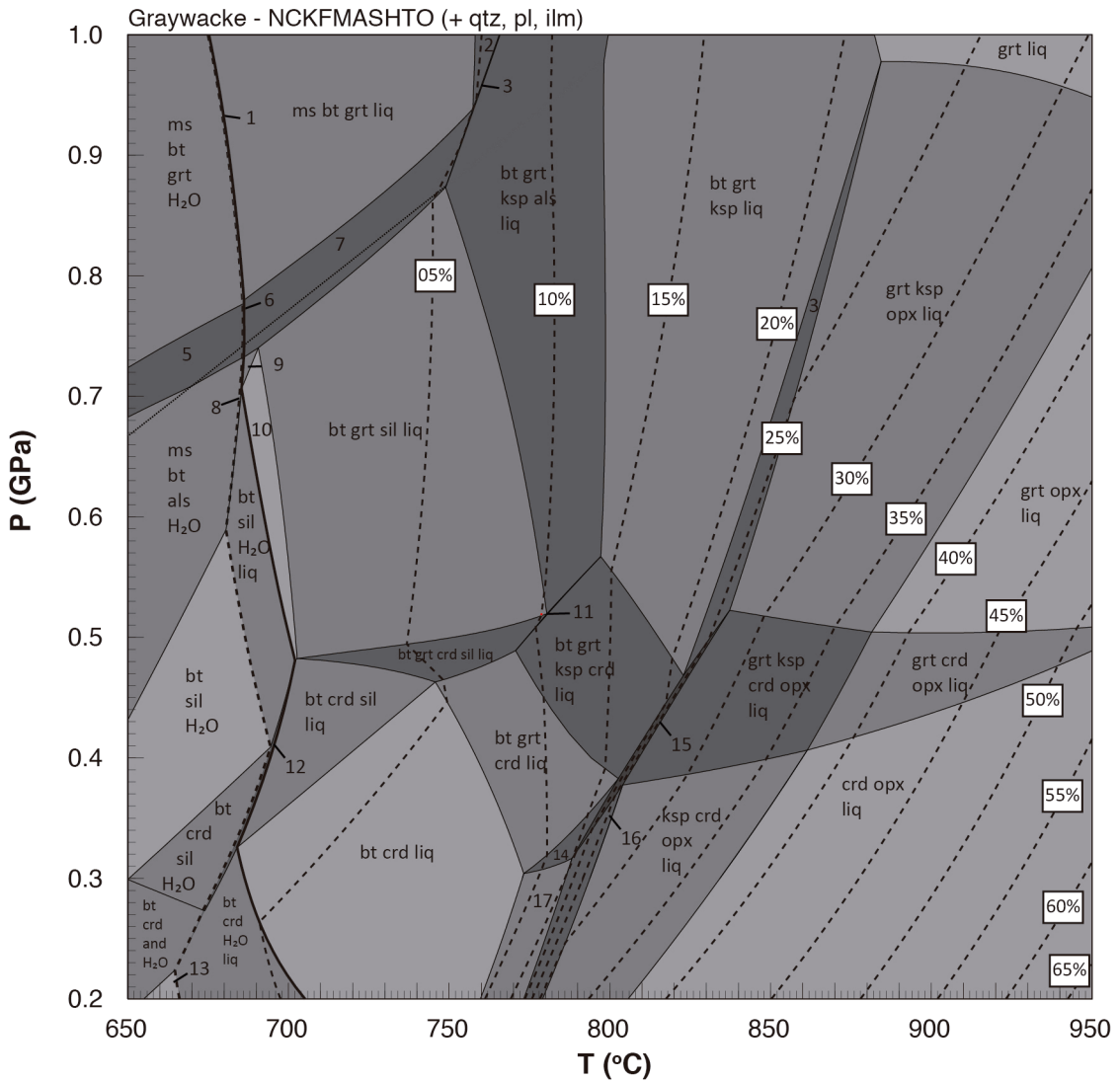
Yakymchuk, C. & Brown, M., 2014. Consequences of open-system in tectonics. *Journal of the Geological Society*, **171**, 21-40.

Yakymchuk, C., Brown, M., Clark, M., Korhonen, F.J., Piccolli, P.M., Siddoway, C.S., Taylor, R.J.M. & Vevoort, J.D., 2015. Decoding polyphase migmatites using geochronology and phase equilibria modelling. *Journal of Metamorphic Geology*, **33**, 203-230.

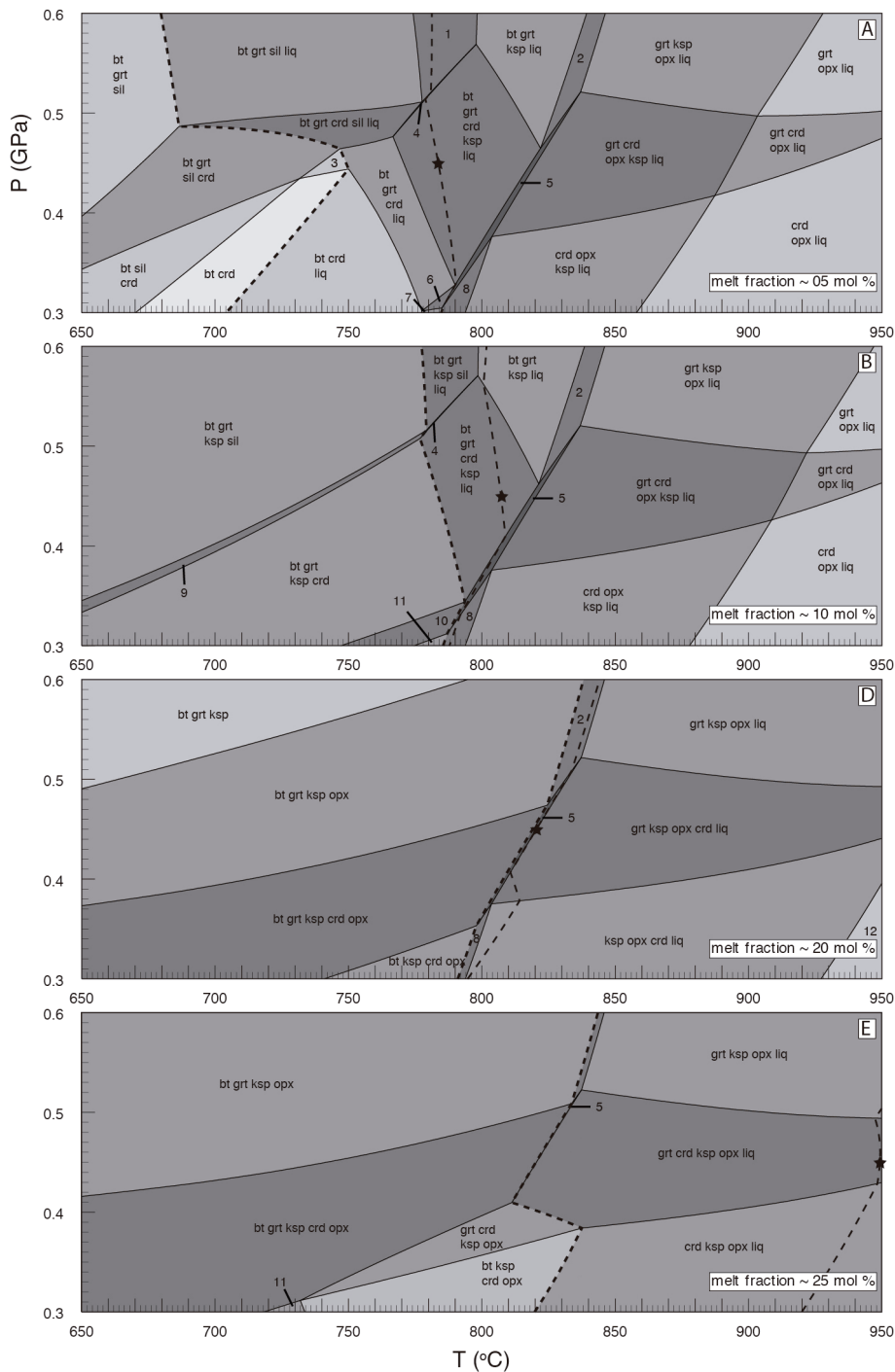
Yardley, B.W.D., 2009. The role of water in the evolution of the continental crust. *Journal of the Geological Society*, **166**, 585-600.



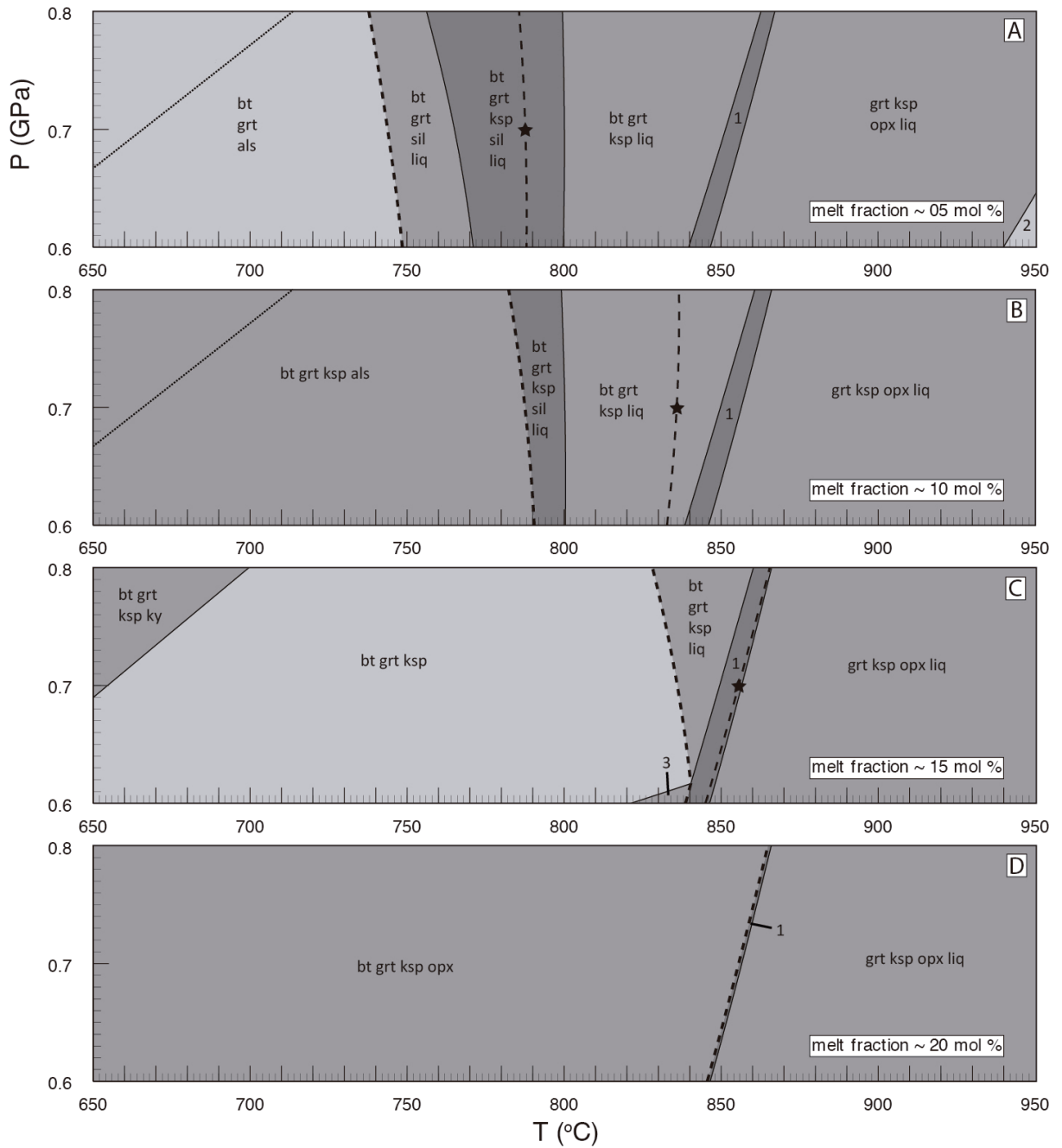
## FIGURES



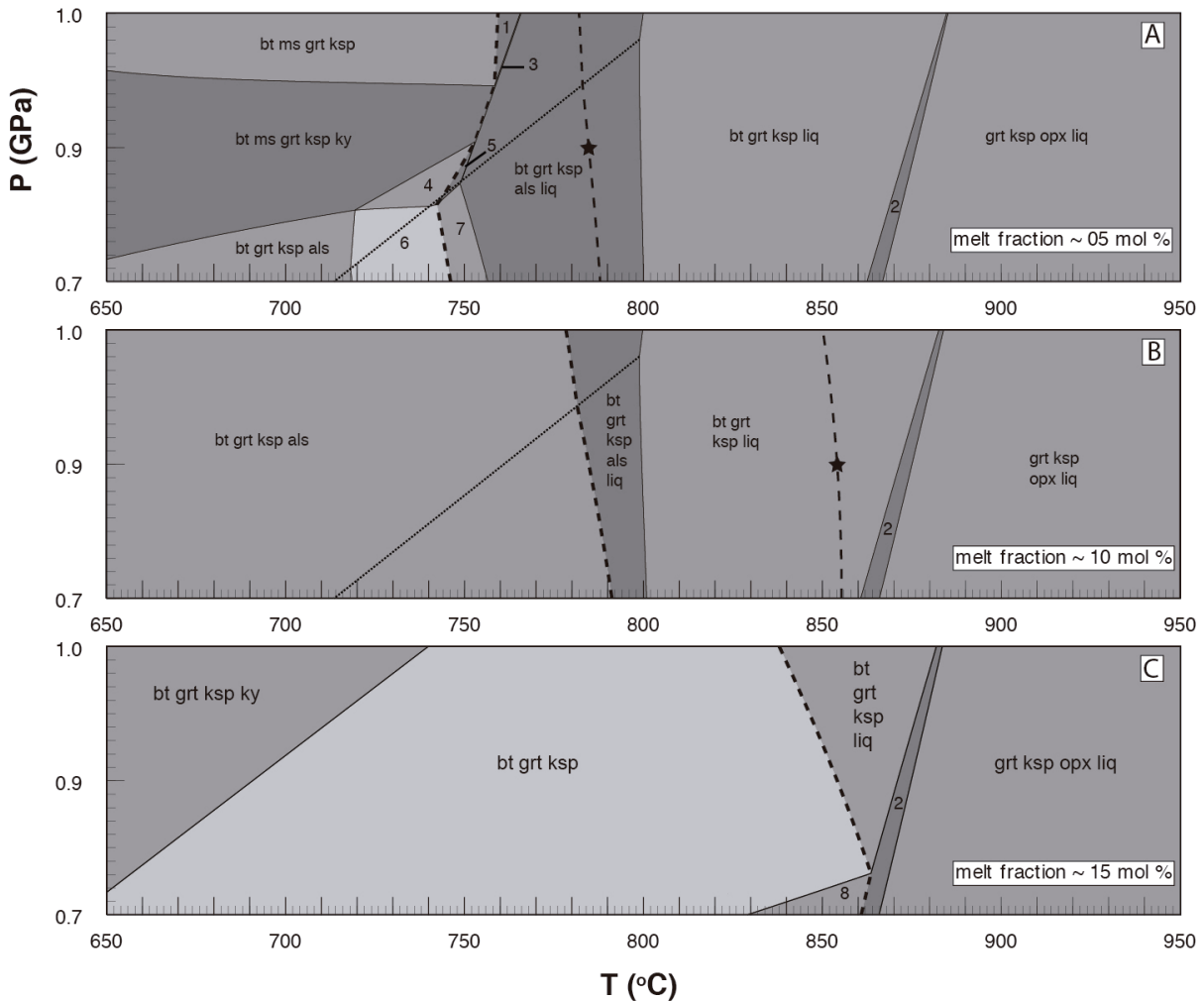
**Figure 1:** Pseudosection of graywacke sample for closed-system model with 5.0 mol % melt isopleths plotted. Thick dashed line: – Solidus; Thick solid line – wet-subsolidus limit. Dotted black line: kyanite-sillimanite transition. Mineral assemblages for numbered fields are: 1 – ms bt grt ksp liq; 2 – ms bt grt ksp ky liq; 3 – bt grt ksp opx liq; 4 – ms bt grt als H<sub>2</sub>O; 5 – ms bt grt als H<sub>2</sub>O liq; 6 – ms bt grt als liq; 7 – ms bt sil H<sub>2</sub>O liq; 8 – bt sil H<sub>2</sub>O liq; 9 – bt sil liq; 10 – bt grt crd ksp sil liq; 11 – bt crd sil H<sub>2</sub>O liq; 12 – bt crd H<sub>2</sub>O liq; 13 – bt grt crd opx liq; 14 – bt grt crd ksp opx liq; 15 – bt crd ksp opx liq; 16 – bt crd opx liq.



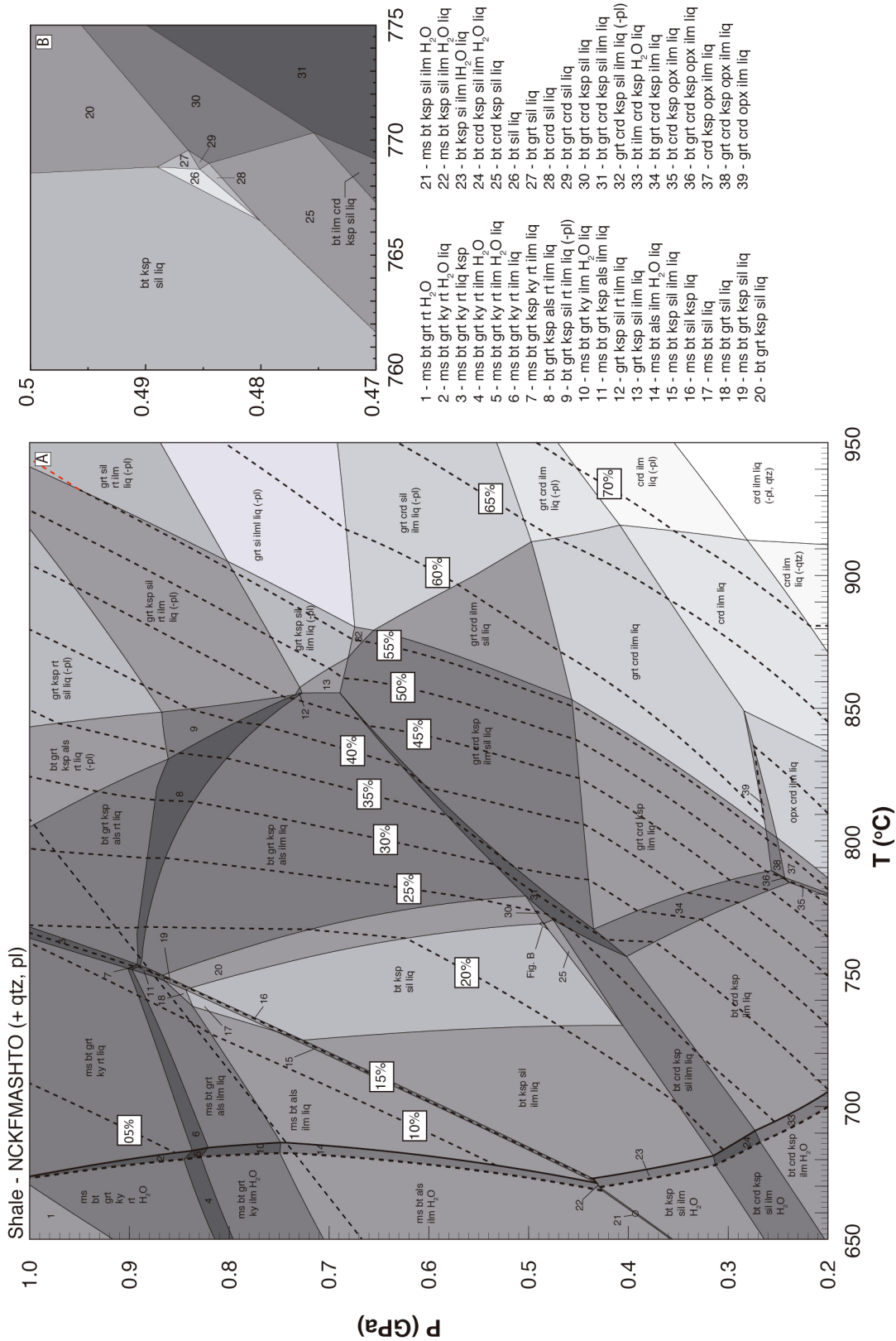
**Figure 2:** Pseudosections of graywacke sample for open-system model at 0.45 GPa. Melt fraction removed in each diagram is indicated in respective section. Complete sequence of pseudosections is presented in Supplementary data S7. Thick dashed line: – Solidus; Thick solid line – wet-subsolidus limit. Dark star indicates the  $P$ - $T$  position from where the melt composition were calculated and removed from equilibrium volume. Mineral assemblages of numbered fields are: 1- bt grt ksp sil liq; 2 – bt grt ksp opx liq; 3 – bt grt crd; 4 – bt grt crd ksp sil liq; 5 – bt grt crd ksp opx liq; 6 – bt grt crd opx liq; 7 – bt crd opx liq; 8 – bt crd ksp opx liq; 9 – bt grt crd ksp sil; 10 – bt grt crd ksp opx; 11- bt crd ksp opx; 12 – crd opx liq.



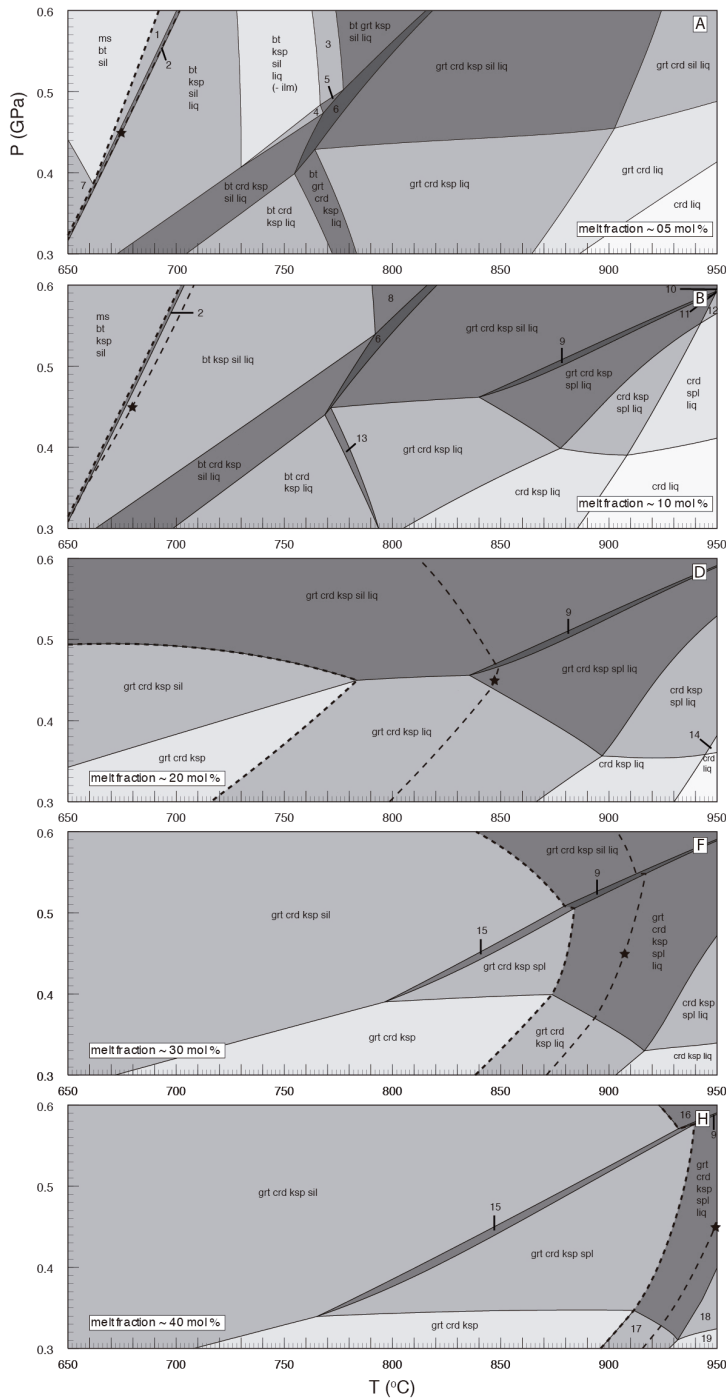
**Figure 3:** Pseudosections of graywacke sample for open-system model at 0.7 GPa. Melt fraction removed between each diagram is ~5 mol. Thick dashed line: – Solidus; Thick solid line – wet-subsolidus limit. Dashed black line: kyanite-sillimanite transition. Dark star indicates the  $P$ - $T$  position from where melt composition were calculated and removed from equilibrium volume. Mineral assemblages of numbered fields are: 1 – bt grt ksp opx liq; 2 – grt opx liq; 3 – bt grt ksp opx.



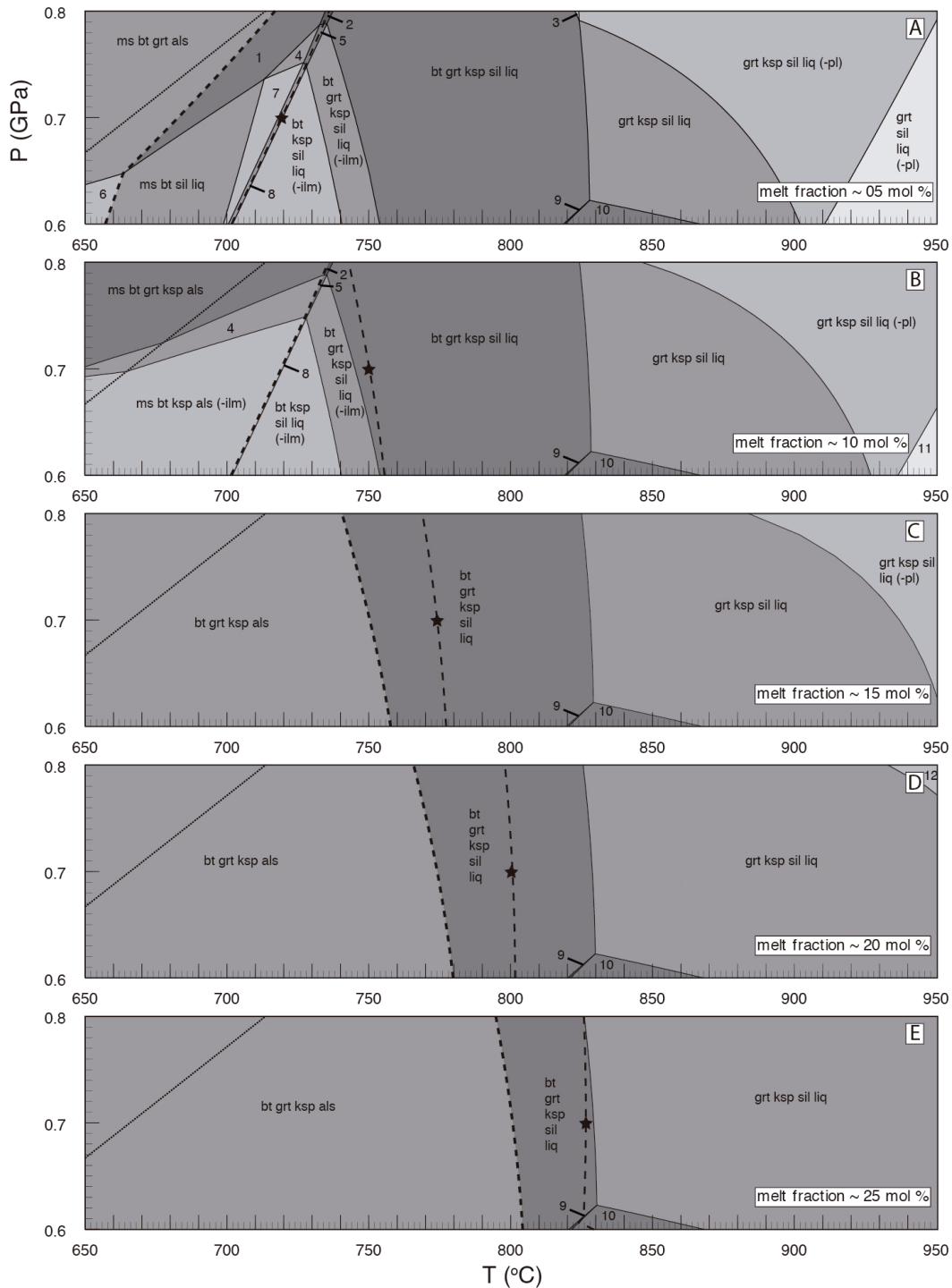
**Figure 4:** Pseudosections of graywacke sample for open-system model at 0.9 GPa. Melt fraction removed between each diagram is ~5 mol %. Thick dashed line: – Solidus; Thick solid line – wet-subsolidus limit. Dotted black line: kyanite-sillimanite transition. Dark star indicates the  $P$ - $T$  position from where melt composition were calculated and removed from equilibrium volume. Mineral assemblages of numbered fields are: 1 – ms bt grt ksp liq; 2 – bt grt ksp opx liq; 3 – ms bt grt ksp ky liq; 4 – ms bt grt ky; 5 – ms bt grt ky liq; 6 – bt grt als; 7 – bt grt als liq; 8 – bt grt ksp opx.



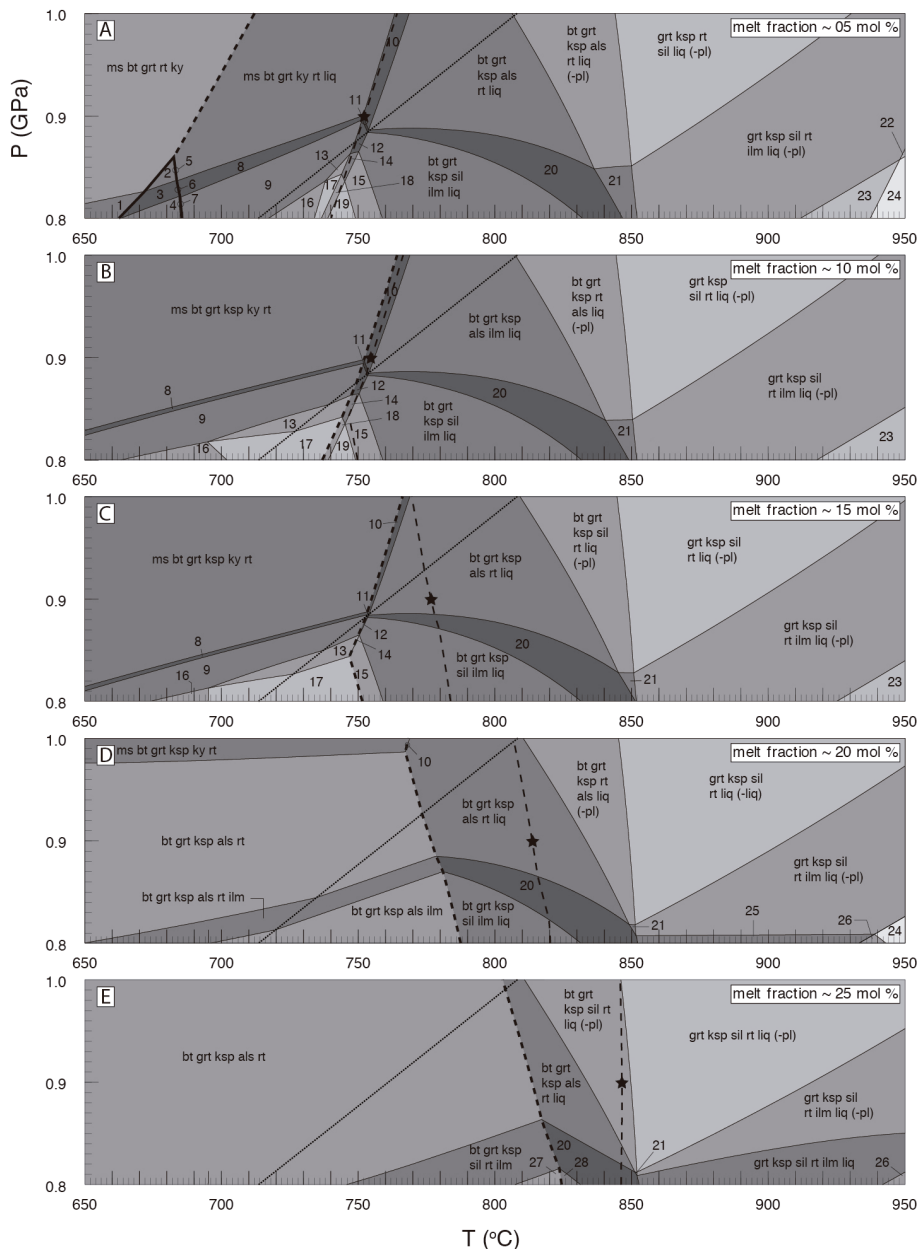
**Figure 5:** Pseudosection (A) of shale sample for closed-system model with 5 mol % melt isopleths plotted. Thick dashed line: – Solidus; Thick solid line – wet-subsolidus limit. Dotted black line: kyanite-sillimanite transition. Figure B: detailed area of the diagram (A) showing K-feldspar-absent fields.



**Figure 6:** Pseudosections of shale sample for open-system model at 0.45 GPa. Melt fraction removed in each diagram is indicated in the text. Complete sequence of pseudosections is presented in supplementary data S7. Thick dashed line: – Solidus; Thick solid line – wet-subsolidus limit. Dark star indicates the  $P$ - $T$  position from where the melt composition were calculated and removed from equilibrium volume. Mineral assemblage of the fields numbered are: 1 - ms bt sil liq; 2 – ms bt ksp sil liq; 3 – bt grt ksp sil liq (-ilm); 4 – bt ksp crd sil liq (-ilm); 5 – bt grt ksp crd sil liq (-ilm); 6 – bt grt ksp crd sil liq; 7 – ms bt ksp sil; 8 – bt grt ksp sil liq; 9 – grt ksp crd sil spl liq; 10 – grt crd sil liq; 11 – grt crd sil spl liq; 12 – grt crd spl liq; 13 – bt grt ksp crd liq; 14 – crd spl liq; 15 – grt ksp crd sil spl; 16 – grt ksp crd sil liq; 17 – grt crd ksp liq; 18 – ksp crd spl liq; 19 – ksp crd liq.

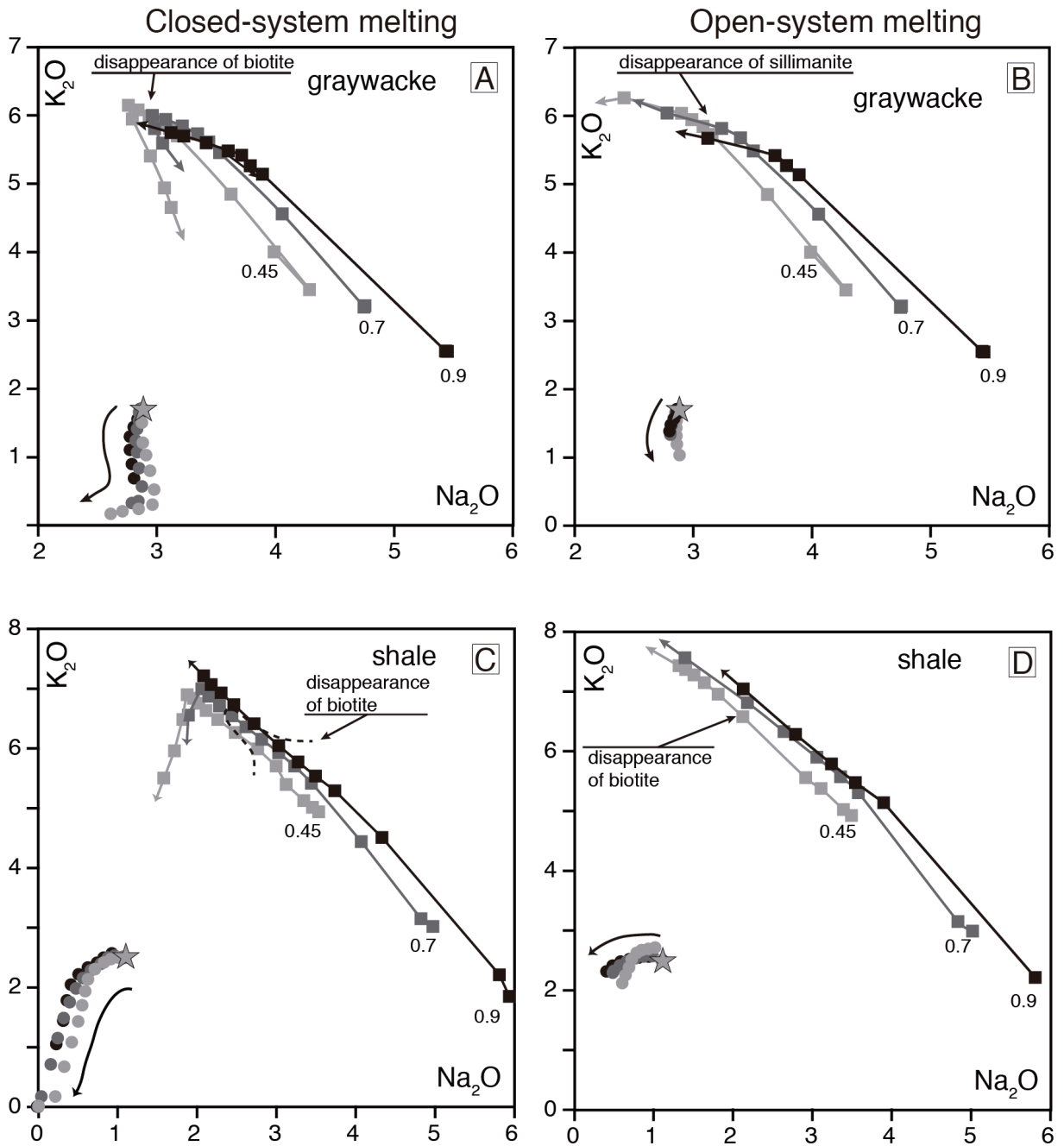


**Figure 7:** Pseudosections of shale sample for open-system model at 0.7 GPa. Melt fraction removed between each diagram is ~5 mol %. Thick dashed line: – Solidus; Thick solid line – wet-subsolidus limit. Dotted black line: kyanite-sillimanite transition. Dark star indicates the P-T position from where melt composition were calculated and removed from equilibrium volume. Mineral assemblage of the fields numbered are: 1 – ms bt grt sil liq; 2 – ms bt grt ksp sil liq; 3 – bt grt ksp sil liq (-pl); 4 – ms bt grt sil liq (-ilm); 5 – ms bt grt ksp sil liq (-ilm); 6 – ms bt sil; 7 – ms bt sil liq (-ilm); 8 – ms bt ksp sil liq (-ilm); 9 – bt grt ksp crd sil liq; 10 – grt ksp crd sil liq; 11 – grt sil liq (-pl); 12 – grt ksp sil liq (-pl).

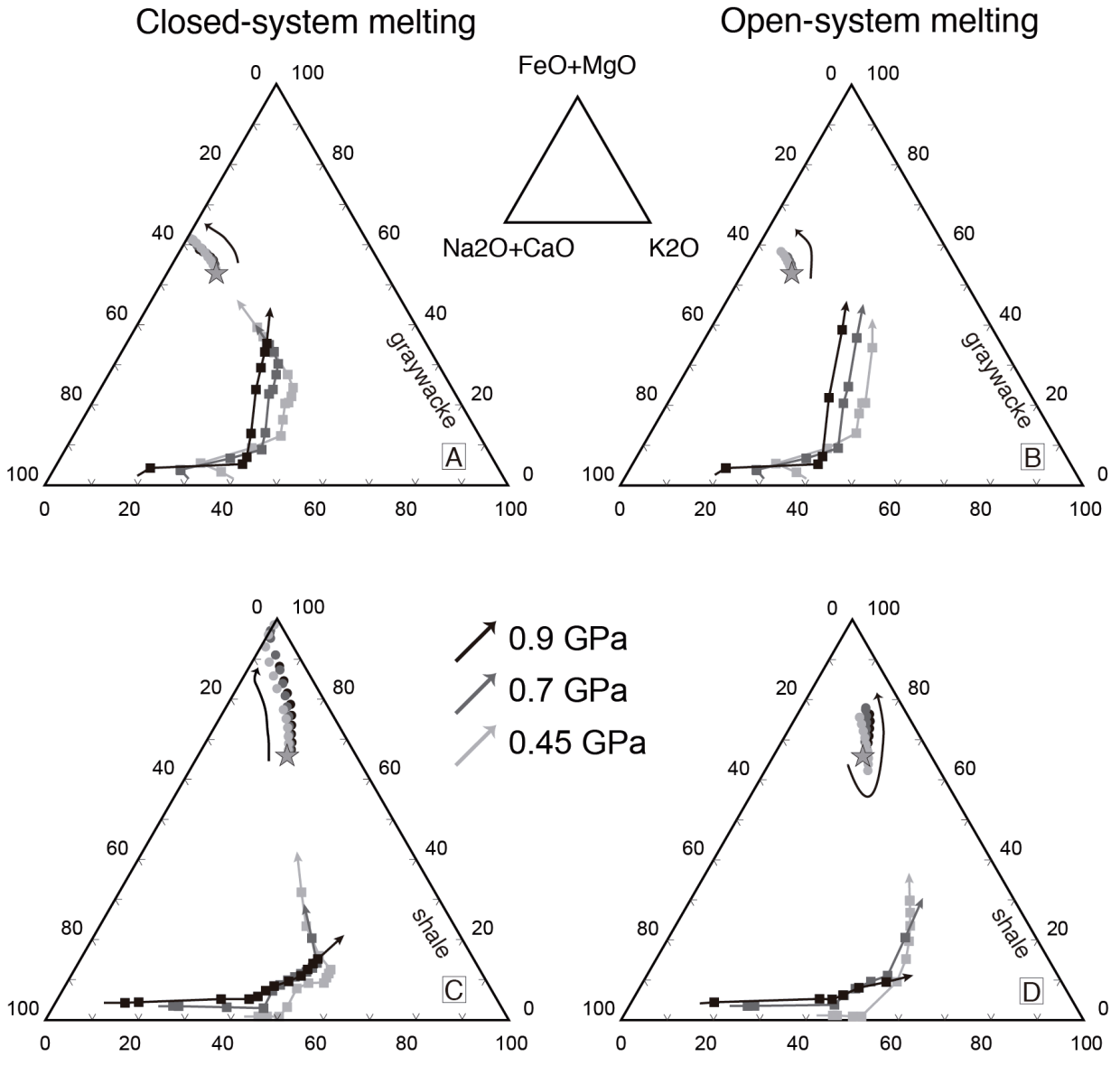


**Figure 8:** Pseudosections of shale sample for open-system model at 0.9 GPa. Melt fraction removed between each diagram is ~5 mol %. Thick dashed line: – Solidus; Thick solid line – wet-subsolidus limit. Dotted black line: kyanite-sillimanite transition. Dark star indicates the  $P$ - $T$  position from where melt composition were calculated and removed from equilibrium volume. Mineral assemblage of the fields numbered are: 01 - ms bt grt ky rt; 02 - ms bt grt ky rt H<sub>2</sub>O (-ilm); 03 - ms bt grt ky rt H<sub>2</sub>O; 04 - ms bt ky H<sub>2</sub>O; 05 - ms bt grt ky rt H<sub>2</sub>O liq (-ilm); 06 - ms bt grt ky rt H<sub>2</sub>O liq; 07 - ms bt grt ky H<sub>2</sub>O liq; 08 - ms bt grt ksp ky rt; 09 - ms bt grt ksp als; 10 - ms bt grt ksp ky rt liq (-ilm); 11 - ms bt grt ksp ky rt liq; 12 - ms bt grt ksp als liq; 13 - ms bt grt ksp als (-ilm); 14 - ms bt grt ksp sil liq (-ilm); 15 - bt grt ksp sil liq (-ilm); 16 - ms bt sil liq; 17 - ms bt sil liq (-ilm); 18 - ms bt ksp sil liq (-ilm); 19 - bt ksp sil liq (-ilm); 20 - bt grt ksp sil rt liq; 21 - bt grt ksp sil rt liq (-pl); 22 - grt sil rt liq (-pl); 23 - grt ksp sil liq (-pl); 24 - grt sil liq (-pl); 25 - grt ksp sil liq; 26 - grt sil liq; 27 - bt grt ksp sil; 28 – bt grt ksp sil liq.

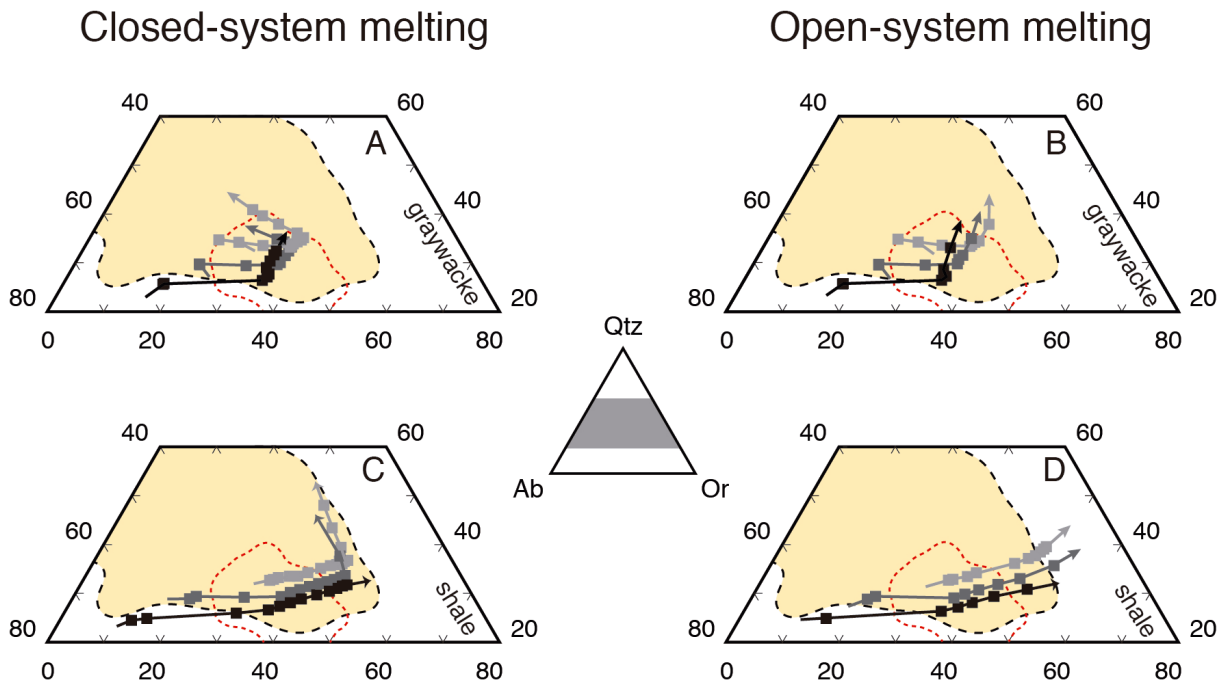




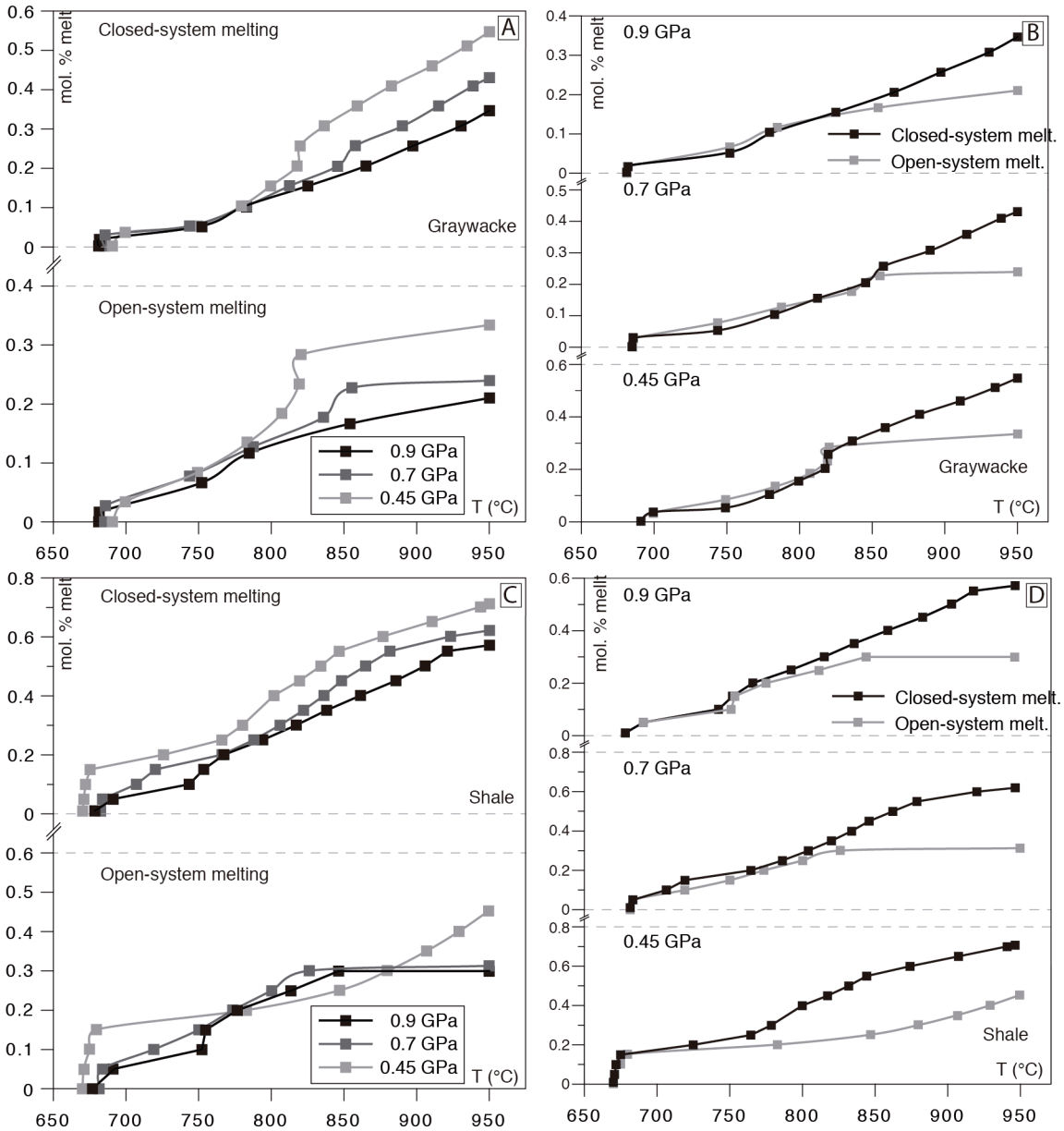
**Figure 9:**  $K_2O$  (wt. %) vs.  $Na_2O$  (wt. %) diagrams for melt and residue compositions from graywacke (A and B) and shale (C and D) samples as results from isobaric heating in closed-system and open-system processes. Symbols: circles – residuum; square – melt, star – initial composition. Colours: light grey - 0.45 GPa; dark grey - 0.7 GPa; and black - 0.9 GPa.



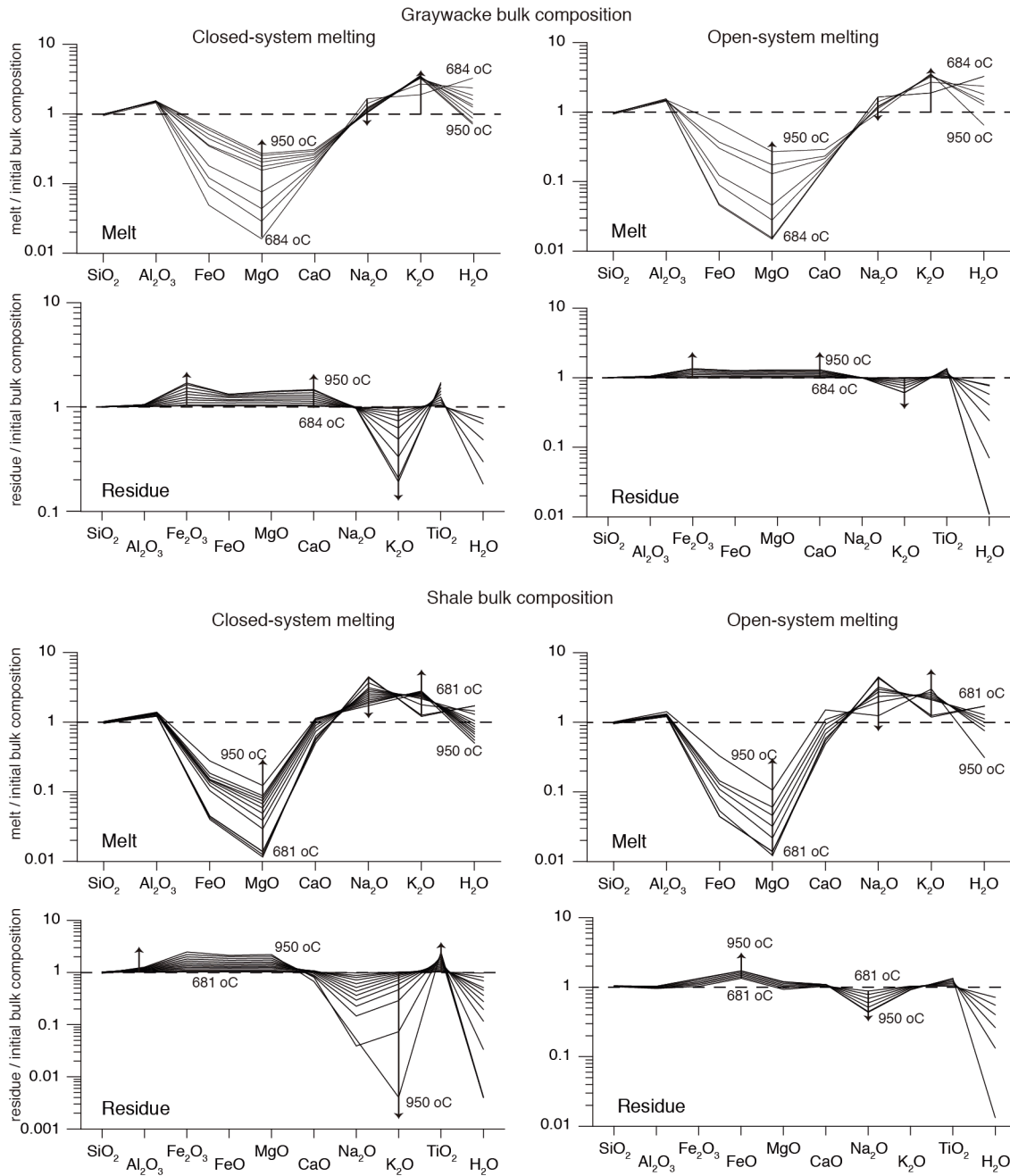
**Figure 10:** FeO+MgO-CaO+Na<sub>2</sub>O-K<sub>2</sub>O (mol %) ternary diagram for melt and residuum compositions from graywacke (A and B) and shale (C and D) samples as results from isobaric heating in closed-system and open-system processes. Symbols: circles – residue; square – melt. Colours: light grey - 0.45 GPa; dark grey - 0.7 GPa; and black - 0.9 GPa.



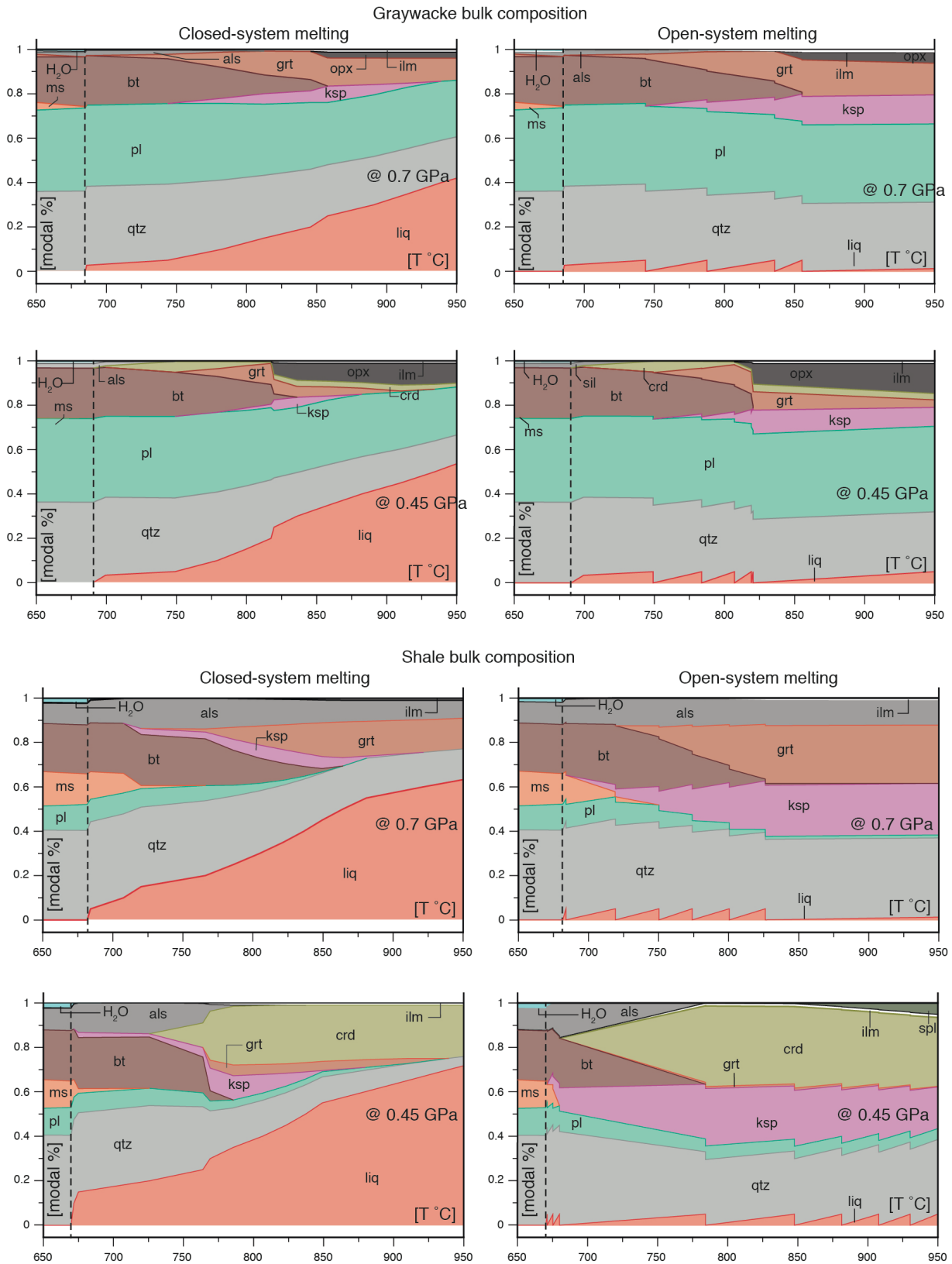
**Figure 11:** Normative mesonorm diagram (Ab-Or-Qtz) for melt and residue compositions from graywacke (A and B) and shale (C and D) bulk composition as results from isobaric heating in closed-system (A and C) and open-system (B and D) processes. Yellow area represent field of leucosome compositions from Sawyer (2008) and red traced area represents field of melt-inclusions compositions from Cesare *et al.* (2015). Symbols: circles – residue; square – melt. Colours: light grey - 0.45 GPa; dark grey - 0.7 GPa; and black - 0.9 GPa.



**Figure 12:** Binary diagrams of mol % of melt produced vs. T (°C), comparing the fertility of both samples between pressure intervals and melting processes.



**Figure 13:** Binary diagram of melt and residue compositions generated at 0.7 GPa normalized by initial bulk composition. Black arrows indicate compositional variation as melt fraction increase.



**Figure 14:** Binary diagram of modal proportion of mineral phases and melt vs. T (°C) for 0.45 and 0.7 GPa. Black dashed line indicates the position of the *solidus*.

## TABLES

**Table 1:** Chemical composition of samples used in this work. Values in wt. % were extracted from Condie (1993), converted to mol. % and simplified to NCKFMASHTO chemical system to run the calculations in THERMOCALC. FeOt\* corresponds to values converted from Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>t.

| Samples                        | Graywacke composition |        | bulk | Shale bulk composition |        |
|--------------------------------|-----------------------|--------|------|------------------------|--------|
|                                | wt. %                 | mol. % |      | wt. %                  | mol. % |
| SiO <sub>2</sub>               | 66.10                 | 70.22  | 63.1 | 68.26                  |        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.77                  | 0.61   | 0.64 | 0.52                   |        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.00                 | 9.39   | 17.5 | 11.15                  |        |
| FeO <sub>T</sub> *             | 5.80                  | 5.15   | 5.65 | 4.99                   |        |
| MgO                            | 2.10                  | 3.32   | 2.2  | 3.55                   |        |
| CaO                            | 2.60                  | 2.96   | 0.71 | 0.82                   |        |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.80                  | 2.88   | 1.06 | 1.11                   |        |
| K <sub>2</sub> O               | 2.50                  | 1.70   | 3.62 | 2.50                   |        |
| H <sub>2</sub> O               | -                     | 3.67   | -    | 7.00                   |        |
| O <sub>2</sub>                 | -                     | 0.10   | -    | 0.10                   |        |
| Sum                            | 97.67                 | 100.00 | 94.6 | 100.00                 |        |





**Table 3:** Chemical composition (in wt. %) of residue and melt produced by isobaric heating from shale bulk composition at 0.45, 0.7 and 0.9 GPa, from 650 to 950 °C. Complete data is available under supplementary data S3.

| Closed-system<br>Melting       | P (GPa)                        | T (°C)                         | 0.45   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0.7    |        |        |        |        |        |        |        |        |  |  |  | 0.9 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|                                |                                |                                | 670.19 | 672.07 | 725.81 | 780.20 | 801.78 | 834.05 | 876.80 | 943.88 | 681.95 | 707.13 | 766.02 | 805.96 | 836.13 | 864.81 | 923.28 | 678.53 | 743.46 | 767.38 | 817.15 | 861.33 | 905.75 |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| residue                        | SiO <sub>2</sub>               | 65.32                          | 65.02  | 64.36  | 63.35  | 62.00  | 60.01  | 57.33  | 52.96  | 48.33  | 44.12  | 40.15  | 36.46  | 33.06  | 29.81  | 26.71  | 23.74  | 20.91  | 18.21  | 15.64  | 13.20  | 10.87  |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | TiO <sub>2</sub>               | 0.67                           | 0.72   | 0.80   | 0.91   | 1.05   | 1.26   | 1.57   | 2.07   | 2.73   | 3.56   | 4.58   | 5.80   | 7.23   | 8.87   | 10.71  | 12.74  | 14.96  | 17.37  | 20.00  | 22.82  | 25.84  |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.16                          | 18.57  | 19.04  | 19.61  | 20.35  | 21.25  | 22.22  | 24.73  | 28.46  | 33.46  | 39.81  | 47.81  | 57.46  | 68.76  | 81.71  | 96.31  | 112.56 | 130.81 | 150.06 | 170.31 | 191.56 |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.28                           | 0.31   | 0.34   | 0.38   | 0.45   | 0.53   | 0.66   | 0.88   | 1.20   | 1.63   | 2.16   | 2.88   | 3.80   | 4.91   | 6.21   | 7.71   | 9.41   | 11.31  | 13.41  | 15.71  | 18.21  |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | FeO                            | 5.76                           | 6.23   | 6.88   | 7.62   | 8.69   | 10.09  | 11.80  | 14.25  | 17.46  | 21.51  | 26.51  | 32.51  | 39.51  | 47.51  | 56.51  | 66.51  | 77.51  | 89.51  | 102.51 | 116.51 | 131.51 |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | MgO                            | 2.30                           | 2.49   | 2.76   | 3.10   | 3.56   | 4.20   | 5.11   | 6.21   | 7.51   | 9.01   | 10.71  | 12.61  | 14.71  | 17.01  | 20.51  | 25.01  | 30.51  | 37.01  | 44.51  | 53.01  | 62.51  |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | CaO                            | 0.74                           | 0.77   | 0.81   | 0.81   | 0.80   | 0.59   | 0.26   | 0.74   | 1.26   | 1.91   | 2.66   | 3.51   | 4.46   | 5.51   | 6.76   | 8.21   | 9.86   | 11.61  | 13.51  | 15.51  | 17.61  |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | Na <sub>2</sub> O              | 1.08                           | 0.89   | 0.69   | 0.57   | 0.48   | 0.31   | 0.08   | 0.00   | 1.07   | 1.76   | 2.51   | 3.36   | 4.31   | 5.36   | 6.51   | 7.76   | 9.11   | 10.56  | 12.11  | 13.76  | 15.51  |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | K <sub>2</sub> O               | 3.74                           | 3.63   | 3.34   | 2.80   | 2.05   | 0.97   | 0.02   | 0.02   | 3.76   | 3.70   | 3.35   | 2.87   | 2.14   | 1.02   | 0.01   | 3.77   | 3.69   | 3.39   | 2.94   | 2.06   | 1.50   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | H <sub>2</sub> O               | 1.96                           | 1.38   | 0.98   | 0.85   | 0.56   | 0.57   | 0.62   | 0.61   | 1.94   | 1.36   | 0.88   | 0.53   | 0.22   | 0.01   | 1.92   | 1.31   | 0.86   | 0.26   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | Total                          | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | anaectic melt                  | SiO <sub>2</sub>               | 68.95  | 69.05  | 70.02  | 70.66  | 71.02  | 71.23  | 71.16  | 65.70  | 66.77  | 68.12  | 68.70  | 69.09  | 69.47  | 69.77  | 63.43  | 65.87  | 66.52  | 67.37  | 68.23  | 68.81  | 69.11  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                | 13.23                          | 13.19  | 13.77  | 14.19  | 14.34  | 14.65  | 15.12  | 15.02  | 13.58  | 13.83  | 14.36  | 14.72  | 14.98  | 15.19  | 13.67  | 14.35  | 14.55  | 15.02  | 15.18  | 15.45  | 15.45  |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| FeO                            |                                | 0.07                           | 0.07   | 0.22   | 0.67   | 0.67   | 0.86   | 1.25   | 2.65   | 0.22   | 0.21   | 0.52   | 0.68   | 0.75   | 0.82   | 0.26   | 0.37   | 0.41   | 0.56   | 0.70   | 0.96   | 0.96   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| MgO                            |                                | 0.02                           | 0.02   | 0.05   | 0.12   | 0.12   | 0.15   | 0.20   | 0.44   | 0.05   | 0.04   | 0.10   | 0.17   | 0.24   | 0.29   | 0.43   | 0.08   | 0.08   | 0.09   | 0.17   | 0.24   | 0.30   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| CaO                            |                                | 0.27                           | 0.30   | 0.39   | 0.52   | 0.60   | 0.66   | 0.84   | 0.95   | 0.41   | 0.48   | 0.60   | 0.74   | 0.85   | 0.90   | 0.94   | 0.46   | 0.60   | 0.76   | 0.94   | 0.94   | 0.94   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Na <sub>2</sub> O              |                                | 3.55                           | 3.35   | 3.01   | 2.49   | 2.14   | 1.97   | 1.84   | 1.61   | 4.98   | 4.08   | 3.25   | 2.84   | 2.46   | 2.17   | 6.06   | 4.34   | 3.51   | 3.05   | 2.48   | 2.20   | 2.20   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| K <sub>2</sub> O               |                                | 4.94                           | 4.94   | 5.12   | 5.70   | 6.27   | 6.64   | 6.84   | 6.49   | 5.50   | 3.02   | 4.43   | 5.70   | 6.14   | 6.54   | 1.86   | 4.50   | 5.52   | 6.03   | 6.72   | 7.06   | 7.06   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| H <sub>2</sub> O               |                                | 8.99                           | 8.90   | 8.83   | 5.08   | 4.46   | 3.60   | 3.03   | 2.66   | 12.04  | 10.16  | 7.36   | 6.02   | 5.09   | 4.29   | 3.51   | 14.18  | 9.88   | 8.63   | 6.87   | 5.51   | 4.28   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Total                          |                                | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Open-system<br>Melting         |                                | SiO <sub>2</sub>               | 670.97 | 675.32 | 770.63 | 863.27 | 913.95 | 950.00 | 950.00 | 683.85 | 721.00 | 809.58 | 857.53 | 950.00 | 691.08 | 754.88 | 813.58 | 846.39 | 65.41  | 65.34  | 65.19  | 65.07  | 65.07  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.69   | 0.75   | 0.82   | 0.90   | 1.00   | 1.09   | 1.09   | 0.69   | 0.75   | 0.82   | 0.90   | 0.91   | 0.69   | 0.75   | 0.82   | 0.85   | 18.29  | 18.63  | 18.98  | 19.15  | 19.15  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                |                                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.29   | 0.32   | 0.35   | 0.38   | 0.42   | 0.46   | 0.46   | 0.29   | 0.32   | 0.35   | 0.38   | 0.38   | 0.29   | 0.32   | 0.35   | 0.36   | 0.29   | 0.32   | 0.35   | 0.36   | 0.36   |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | FeO                            | 5.96                           | 6.49   | 7.04   | 7.63   | 8.22   | 8.73   | 8.73   | 5.94   | 6.45   | 6.98   | 7.57   | 7.64   | 5.93   | 6.42   | 6.95   | 7.24   | 0.28   | 0.37   | 0.53   | 0.59   | 0.59   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | MgO                            | 2.38                           | 2.59   | 2.83   | 3.09   | 3.37   | 3.62   | 3.62   | 2.37   | 2.58   | 2.80   | 3.05   | 3.07   | 2.37   | 2.57   | 2.79   | 2.90   | 0.08   | 0.08   | 0.16   | 0.21   | 0.21   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | CaO                            | 0.75                           | 0.79   | 0.82   | 0.83   | 0.83   | 0.82   | 0.74   | 0.77   | 0.77   | 0.77   | 0.75   | 0.74   | 0.74   | 0.75   | 0.73   | 0.71   | 0.50   | 0.50   | 0.74   | 1.01   | 1.12   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | Na <sub>2</sub> O              | 0.99                           | 0.79   | 0.63   | 0.53   | 0.44   | 0.37   | 0.37   | 0.94   | 0.72   | 0.52   | 0.39   | 0.38   | 0.91   | 0.66   | 0.45   | 0.37   | 0.28   | 0.37   | 0.53   | 0.59   | 0.59   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | K <sub>2</sub> O               | 3.70                           | 3.56   | 3.30   | 2.94   | 2.48   | 2.03   | 1.78   | 3.64   | 3.41   | 3.06   | 3.01   | 3.01   | 3.81   | 3.68   | 3.47   | 3.31   | 0.08   | 0.08   | 0.16   | 0.21   | 0.21   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | H <sub>2</sub> O               | 1.70                           | 1.07   | 0.66   | 0.39   | 0.21   | 0.11   | 0.11   | 1.60   | 0.93   | 0.43   | 0.02   | 0.00   | 1.55   | 0.88   | 0.28   | 0.03   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | Total                          | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                | anaectic melt                  | SiO <sub>2</sub>               | 68.99  | 69.21  | 70.65  | 71.37  | 71.47  | 71.36  | 65.76  | 67.38  | 68.76  | 69.35  | 69.75  | 63.88  | 66.25  | 67.30  | 67.88  | 65.41  | 65.34  | 65.19  | 65.07  | 65.07  | 65.07  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|                                |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.21  | 13.19  | 14.01  | 14.67  | 14.64  | 14.59  | 13.56  | 13.93  | 14.72  | 15.12  | 16.03  | 13.80  | 14.43  | 14.97  | 15.15  | 13.67  | 14.35  | 14.55  | 15.02  | 15.18  | 15.45  |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| FeO                            |                                | 0.07                           | 0.07   | 0.61   | 1.31   | 2.02   | 2.61   | 2.61   | 0.22   | 0.20   | 0.68   | 0.75   | 1.30   | 0.28   | 0.37   | 0.53   | 0.59   | 0.28   | 0.37   | 0.53   | 0.59   | 0.59   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| MgO                            |                                | 0.02                           | 0.02   | 0.11   | 0.21   | 0.37   | 0.52   | 0.05   | 0.04   | 0.18   | 0.28   | 0.40   | 0.08   | 0.08   | 0.16   | 0.21   | 0.21   | 0.08   | 0.08   | 0.16   | 0.21   | 0.21   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| CaO                            |                                | 0.28                           | 0.33   | 0.56   | 0.75   | 0.86   | 0.94   | 0.45   | 0.54   | 0.80   | 1.04   | 1.29   | 0.50   | 0.50   | 0.74   | 1.01   | 1.12   | 0.50   | 0.50   | 0.74   | 1.01   | 1.12   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Na <sub>2</sub> O              |                                | 3.47                           | 3.13   | 2.26   | 1.61   | 1.35   | 1.19   | 4.83   | 3.34   | 2.59   | 1.76   | 1.24   | 5.80   | 3.54   | 2.78   | 2.12   | 2.22   | 3.54   | 2.78   | 2.12   | 2.12   | 2.12   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| K <sub>2</sub> O               |                                | 5.02                           | 5.40   | 6.46   | 7.18   | 7.45   | 7.58   | 3.15   | 5.54   | 6.38   | 7.27   | 7.78   | 2.22   | 5.48   | 6.29   | 7.05   | 2.22   | 5.48   | 6.29   | 7.05   | 7.05   | 7.05   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| H <sub>2</sub> O               |                                | 8.95                           | 8.66   | 5.36   | 2.89   | 1.84   | 1.21   | 11.98  | 9.04   | 5.89   | 4.42   | 2.20   | 13.43  | 9.11   | 6.95   | 5.86   | 13.43  | 9.11   | 6.95   | 5.86   | 5.86   | 5.86   |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| Total                          |                                | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |  |  |  |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

**Table 4:** Rate of melt production during water-present and hydrate-breakdown melting for both samples during equilibrium and fractional Melting.

| Graywacke<br>composition | bulk | Pressure<br>(GPa) | mol % melt/°C            |                        |
|--------------------------|------|-------------------|--------------------------|------------------------|
|                          |      |                   | water-present<br>melting | dehydration<br>melting |
|                          |      | 0.45              | 4.73                     | 0.19 – 3.86            |
| Closed-system<br>Melting |      | 0.7               | 2.05                     | 0.07 – 2.66            |
|                          |      | 0.9               | 1.92                     | 0.10 – 2.47            |
|                          |      | 0.45              | -                        | 0.04 – 5.16            |
| Open-system<br>Melting   |      | 0.7               | -                        | 0.01 – 2.14            |
|                          |      | 0.9               | -                        | 0.08 – 1.94            |

| Shale<br>composition     | bulk | Pressure<br>(GPa) | mol % melt/°C            |                        |
|--------------------------|------|-------------------|--------------------------|------------------------|
|                          |      |                   | water-present<br>melting | dehydration<br>melting |
|                          |      | 0.45              | 0.19 – 3.72              | 0.17 – 3.65            |
| Closed-system<br>Melting |      | 0.7               | 0.309                    | 0.01 – 6.07            |
|                          |      | 0.9               | 4.02                     | 0.03 – 6.82            |
|                          |      | 0.45              | -                        | 0.01 – 3.93            |
| Open-system<br>Melting   |      | 0.7               | -                        | 0.08 – 0.25            |
|                          |      | 0.9               | -                        | 0.07 – 0.15            |

## SUPPORTING INFORMATION

Supplementary Data 1 (S1) – Table with chemical composition (in wt. %) of residue and melt produced by closed-system and open-system processes from graywacke bulk composition.

Supplementary Data 2 (S2) – Table with chemical composition (in mol %) of residuum residue and melt produced by equilibrium and fractional melting processes from graywacke bulk composition.

Supplementary Data 3 (S3) – Table with chemical composition (in wt. %) of residue and melt produced by closed-system and open-system processes from shale bulk composition.

Supplementary Data 4 (S4) – Table with chemical composition (in mol %) of residue and melt produced by closed-system and open-system processes from shale bulk composition.

Supplementary Data 5 (S5) – Table with the volume of melt produced under closed-system and open-system for graywacke and shale bulk compositions.

Supplementary Data 6 (S6) – Pseudosections of graywacke bulk composition for open-system model at 0.45 GPa. Compositions used in calculation of each section are presented below the diagrams

Supplementary Data 7 (S7) – Pseudosections of shale bulk composition for open-system model at 0.45 GPa. Compositions used in calculation of each section are presented below the diagrams.

Supplementary Data 8 (S8) – Binary diagram of melt and residue compositions generated at 0.45 GPa normalized by initial bulk composition. Black arrows indicate compositional variation as melt fraction increase.

Supplementary Data 9 (S9) – Binary diagram of melt and residue compositions generated at 0.9 GPa normalized by initial bulk composition. Black arrows indicate compositional variation as melt fraction increase.

Supplementary Data 10 (S10) – Binary diagram of modal proportion of mineral phases and melt vs. T (°C) for 0.9 GPa. Black dashed line indicates the position of the *solidus*.

Supplementary Data 1

Supplementary data - table 1a: Residuum and melt compositions. Temperature and volume of melt produced. Result: calculated by forward modeling from graywacke protolith under closed and open-system partial melting. All compositions are in wt. %.

| Closed-system<br>Melting | P (GPa)                        |                                | T (°C)  |         | Φ (%)  |         | 0.45   |         |         |         |         |         |        |        |        |        |        |        | 0.5    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                          | 690.62                         | 699.522                        | 749.115 | 779.378 | 799.52 | 817.684 | 819.77 | 838.433 | 859.021 | 882.598 | 910.586 | 934.623 | 950    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |       |
| residuum                 | SiO <sub>2</sub>               | 64.79                          | 64.73   | 64.65   | 64.42  | 64.16   | 63.53  | 62.12   | 60.43   | 58.28   | 55.79   | 52.97   | 50.84  | R0     | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R6     | R7     | R8     | R9     | R10    | R11    | R12    |        |        |        |        |       |
|                          | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.78                           | 0.80    | 0.81    | 0.82   | 0.80    | 0.78   | 0.75    | 0.72    | 0.69    | 0.65    | 0.61    | 0.57   | M0     | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7     | M8     | M9     | M10    | M11    | M12    |        |        |        |        |       |
|                          | FeO                            | 15.16                          | 15.30   | 15.21   | 15.27  | 15.37   | 15.50  | 15.62   | 15.71   | 15.78   | 15.84   | 15.85   | 15.88  | 15.89  | 15.90  | 15.91  | 15.92  | 15.93  | 15.94  | 15.95  | 15.96  | 15.97  | 15.98  | 15.99  | 16.00  | 16.01  | 16.02  | 16.03  |        |        |       |
|                          | MgO                            | 0.26                           | 0.27    | 0.27    | 0.29   | 0.30    | 0.34   | 0.36    | 0.39    | 0.42    | 0.46    | 0.51    | 0.55   | 0.59   | 0.63   | 0.67   | 0.71   | 0.75   | 0.79   | 0.83   | 0.87   | 0.91   | 0.95   | 0.99   | 1.03   | 1.07   | 1.11   | 1.15   |        |        |       |
|                          | CaO                            | 5.86                           | 6.02    | 6.10    | 6.35   | 6.60    | 6.84   | 7.16    | 7.48    | 7.80    | 8.05    | 8.08    | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   | 8.09   |        |       |
|                          | Na <sub>2</sub> O              | 2.12                           | 2.18    | 2.21    | 2.31   | 2.41    | 2.63   | 2.77    | 2.93    | 3.11    | 3.27    | 3.44    | 3.65   | 3.88   | 4.11   | 4.37   | 4.56   | 4.76   | 4.96   | 5.16   | 5.36   | 5.56   | 5.76   | 5.96   | 6.16   | 6.36   | 6.56   | 6.76   | 6.96   |        |       |
|                          | K <sub>2</sub> O               | 2.83                           | 2.79    | 2.79    | 2.80   | 2.78    | 2.80   | 2.83    | 2.78    | 2.80    | 2.86    | 2.85    | 2.74   | 2.51   | 2.24   | 1.97   | 1.71   | 1.45   | 1.19   | 0.93   | 0.67   | 0.41   | 0.15   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |        |       |
|                          | H <sub>2</sub> O               | 2.53                           | 2.50    | 2.43    | 2.22   | 2.02    | 1.78   | 1.50    | 1.16    | 0.76    | 0.44    | 0.26    | 0.15   | 0.08   | 0.04   | 0.03   | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |        |       |
|                          | Total                          | 100.00                         | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |       |
|                          | anatic melt                    | SiO <sub>2</sub>               | 68.95   | 68.43   | 68.29  | 68.56   | 68.82  | 69.82   | 70.98   | 72.22   | 73.54   | 74.91   | 76.33  | 77.80  | 79.31  | 80.86  | 82.44  | 84.06  | 85.72  | 87.43  | 89.18  | 90.97  | 92.80  | 94.67  | 96.57  | 98.50  | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |       |
|                          |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.39    | 3.46    | 3.49   | 3.97    | 4.30   | 4.58    | 4.82    | 5.02    | 5.18    | 5.31    | 5.41   | 5.48   | 5.52   | 5.54   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55   | 5.55  |
|                          |                                | FeO                            | 0.20    | 0.24    | 0.27   | 0.30    | 0.32   | 0.34    | 0.35    | 0.36    | 0.37    | 0.38    | 0.39   | 0.40   | 0.41   | 0.42   | 0.43   | 0.44   | 0.45   | 0.46   | 0.47   | 0.48   | 0.49   | 0.50   | 0.51   | 0.52   | 0.53   | 0.54   | 0.55   | 0.56   | 0.57  |
| MgO                      |                                | 0.33                           | 0.35    | 0.37    | 0.38   | 0.41    | 0.45   | 0.47    | 0.50    | 0.52    | 0.55    | 0.57    | 0.60   | 0.63   | 0.66   | 0.69   | 0.72   | 0.75   | 0.78   | 0.81   | 0.84   | 0.87   | 0.90   | 0.93   | 0.96   | 0.99   | 1.02   | 1.05   | 1.08   | 1.11   |       |
| CaO                      |                                | 3.99                           | 4.29    | 4.63    | 5.17   | 5.81    | 6.54   | 7.36    | 8.26    | 9.23    | 10.27   | 11.37   | 12.52  | 13.72  | 14.97  | 16.28  | 17.64  | 19.05  | 20.51  | 22.02  | 23.58  | 25.19  | 26.85  | 28.56  | 30.31  | 32.10  | 33.93  | 35.80  | 37.71  | 39.66  |       |
| Na <sub>2</sub> O        |                                | 4.00                           | 4.45    | 4.85    | 5.70   | 6.84    | 8.14   | 9.59    | 11.17   | 12.88   | 14.71   | 16.65   | 18.69  | 20.82  | 23.04  | 25.35  | 27.74  | 30.21  | 32.75  | 35.36  | 38.03  | 40.76  | 43.54  | 46.37  | 49.24  | 52.15  | 55.10  | 58.09  | 61.12  | 64.19  |       |
| K <sub>2</sub> O         |                                | 9.09                           | 9.18    | 9.18    | 9.18   | 9.18    | 9.18   | 9.18    | 9.18    | 9.18    | 9.18    | 9.18    | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   | 9.18   |       |
| Total                    |                                | 100.00                         | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |       |
| residuum                 |                                | SiO <sub>2</sub>               | 66.79   | 66.82   | 66.76  | 66.65   | 66.48  | 66.27   | 66.05   | 65.75   | 65.42   | 65.13   | 64.82  | 64.50  | 64.18  | 63.86  | 63.54  | 63.22  | 62.90  | 62.58  | 62.26  | 61.94  | 61.62  | 61.30  | 60.98  | 60.66  | 60.34  | 60.02  | 59.70  | 59.38  |       |
|                          |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.78    | 0.79    | 0.81   | 0.85    | 0.89   | 0.95    | 1.00    | 1.07    | 1.16    | 1.25    | 1.30   | 1.35   | 1.40   | 1.45   | 1.50   | 1.55   | 1.60   | 1.65   | 1.70   | 1.75   | 1.80   | 1.85   | 1.90   | 1.95   | 2.00   | 2.05   | 2.10   | 2.15   |       |
|                          |                                | FeO                            | 15.16   | 15.19   | 15.20  | 15.21   | 15.27  | 15.44   | 15.52   | 15.59   | 15.66   | 15.70   | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70  | 15.70 |
|                          |                                | MgO                            | 0.26    | 0.27    | 0.27   | 0.29    | 0.30   | 0.32    | 0.34    | 0.36    | 0.39    | 0.42    | 0.44   | 0.46   | 0.48   | 0.50   | 0.52   | 0.54   | 0.56   | 0.58   | 0.60   | 0.62   | 0.64   | 0.66   | 0.68   | 0.70   | 0.72   | 0.74   | 0.76   | 0.78   |       |
|                          | CaO                            | 5.86                           | 5.98    | 6.09    | 6.36   | 6.61    | 6.76   | 7.05    | 7.25    | 7.47    | 7.62    | 7.82    | 8.04   | 8.27   | 8.51   | 8.75   | 9.00   | 9.25   | 9.50   | 9.75   | 10.00  | 10.25  | 10.50  | 10.75  | 11.00  | 11.25  | 11.50  | 11.75  | 12.00  |        |       |
|                          | Na <sub>2</sub> O              | 2.12                           | 2.16    | 2.21    | 2.31   | 2.40    | 2.47   | 2.57    | 2.68    | 2.80    | 2.91    | 2.95    | 2.12   | 2.14   | 2.16   | 2.18   | 2.20   | 2.22   | 2.24   | 2.26   | 2.28   | 2.30   | 2.32   | 2.34   | 2.36   | 2.38   | 2.40   | 2.42   | 2.44   |        |       |
|                          | K <sub>2</sub> O               | 2.83                           | 2.67    | 2.72    | 2.82   | 2.93    | 3.06   | 3.19    | 3.32    | 3.45    | 3.57    | 3.70    | 3.82   | 3.94   | 4.06   | 4.18   | 4.30   | 4.42   | 4.54   | 4.66   | 4.78   | 4.90   | 5.02   | 5.14   | 5.26   | 5.38   | 5.50   | 5.62   | 5.74   |        |       |
|                          | H <sub>2</sub> O               | 2.53                           | 2.52    | 2.44    | 2.26   | 2.06    | 1.83   | 1.56    | 1.22    | 0.85    | 0.52    | 0.25    | 0.10   | 0.04   | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |        |       |
|                          | Total                          | 100.00                         | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |       |
|                          | anatic melt                    | SiO <sub>2</sub>               | 67.78   | 67.79   | 67.48  | 68.33   | 68.85  | 69.19   | 69.33   | 69.52   | 69.69   | 69.81   | 69.88  | 69.94  | 69.99  | 70.04  | 70.08  | 70.12  | 70.15  | 70.18  | 70.21  | 70.24  | 70.27  | 70.30  | 70.33  | 70.36  | 70.39  | 70.42  | 70.45  | 70.48  |       |
|                          |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.55    | 3.55    | 3.50   | 3.47    | 3.45   | 3.38    | 3.32    | 3.27    | 3.22    | 3.17    | 3.12   | 3.07   | 3.02   | 2.97   | 2.92   | 2.87   | 2.82   | 2.77   | 2.72   | 2.67   | 2.62   | 2.57   | 2.52   | 2.47   | 2.42   | 2.37   | 2.32   | 2.27   |       |
|                          |                                | FeO                            | 0.24    | 0.25    | 0.26   | 0.27    | 0.28   | 0.29    | 0.30    | 0.31    | 0.32    | 0.33    | 0.34   | 0.35   | 0.36   | 0.37   | 0.38   | 0.39   | 0.40   | 0.41   | 0.42   | 0.43   | 0.44   | 0.45   | 0.46   | 0.47   | 0.48   | 0.49   | 0.50   | 0.51   |       |
| MgO                      |                                | 0.33                           | 0.35    | 0.37    | 0.38   | 0.41    | 0.45   | 0.47    | 0.50    | 0.52    | 0.55    | 0.57    | 0.60   | 0.63   | 0.66   | 0.69   | 0.72   | 0.75   | 0.78   | 0.81   | 0.84   | 0.87   | 0.90   | 0.93   | 0.96   | 0.99   | 1.02   | 1.05   | 1.08   |        |       |
| CaO                      |                                | 4.76                           | 4.75    | 4.66    | 4.53   | 4.44    | 4.35   | 4.26    | 4.17    | 4.08    | 4.00    | 3.92    | 3.84   | 3.76   | 3.68   | 3.60   | 3.52   | 3.44   | 3.36   | 3.28   | 3.20   | 3.12   | 3.04   | 2.96   | 2.88   | 2.80   | 2.72   | 2.64   | 2.56   |        |       |
| Na <sub>2</sub> O        |                                | 3.21                           | 3.19    | 3.19    | 3.19   | 3.19    | 3.19   | 3.19    | 3.19    | 3.19    | 3.19    | 3.19    | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   | 3.19   |        |       |
| K <sub>2</sub> O         |                                | 11.95                          | 11.94   | 11.94   | 11.94  | 11.94   | 11.94  | 11.94   | 11.94   | 11.94   | 11.94   | 11.94   | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  | 11.94  |        |       |
| Total                    |                                | 100.00                         | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |       |

Φ = melt fraction (%)

Supplementary Data 1

Supplementary data - table 1b: Residue and Melt compositions. Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modeling from graywacke protolith under closed and open-system partial melting. All compositions are in wt. %.

|                     |                                | 0.45                           |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |        |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| Open-system Melting |                                | 690.62                         | 699.522 | 749.115 | 783.664 | 807.1   | 819.087 | 820.362 | 949.351 | 950     |         |         |         |         |        |
|                     |                                | T (°C)                         | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  |         |         |         |         |        |
|                     |                                | Φ (%)                          | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   |         |         |         |         |        |
| residuum            | id                             | R1                             | R2      | R3      | R4      | R5      | R6      | R7      | R8      | R9      |         |         |         |         |        |
|                     | SiO <sub>2</sub>               | 67.00                          | 68.55   | 68.55   | 69.73   | 70.79   | 71.83   | 72.93   | 73.02   | 73.03   |         |         |         |         |        |
|                     | TiO <sub>2</sub>               | 0.44                           | 0.46    | 0.47    | 0.50    | 0.54    | 0.57    | 0.61    | 0.65    | 0.65    |         |         |         |         |        |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.28                           | 5.42    | 5.43    | 5.56    | 5.69    | 5.83    | 5.97    | 6.02    | 6.02    |         |         |         |         |        |
|                     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.04                           | 0.04    | 0.04    | 0.04    | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.05    |         |         |         |         |        |
|                     | FeO                            | 4.11                           | 4.32    | 4.39    | 4.65    | 4.91    | 5.18    | 5.47    | 5.65    | 5.65    |         |         |         |         |        |
|                     | MgO                            | 4.72                           | 4.97    | 5.05    | 5.37    | 5.69    | 6.02    | 6.38    | 6.65    | 6.65    |         |         |         |         |        |
|                     | CaO                            | 3.02                           | 3.17    | 3.22    | 3.41    | 3.61    | 3.83    | 4.05    | 4.24    | 4.24    |         |         |         |         |        |
|                     | Na <sub>2</sub> O              | 2.67                           | 2.69    | 2.70    | 2.74    | 2.77    | 2.81    | 2.86    | 2.89    | 2.89    |         |         |         |         |        |
|                     | K <sub>2</sub> O               | 1.03                           | 1.05    | 1.02    | 0.97    | 0.91    | 0.85    | 0.78    | 0.68    | 0.68    |         |         |         |         |        |
| H <sub>2</sub> O    | 11.68                          | 9.31                           | 9.13    | 7.02    | 5.02    | 3.03    | 0.89    | 0.14    | 0.14    |         |         |         |         |         |        |
| Total               | 100.00                         | 100.00                         | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  |         |         |         |         |        |
| analectic melt      | id                             | M1                             | M2      | M3      | M4      | M5      | M6      | M7      | M8      | M9      |         |         |         |         |        |
|                     | SiO <sub>2</sub>               | 68.95                          | 68.83   | 69.89   | 70.63   | 70.89   | 71.00   | 71.04   | 70.97   | 70.97   |         |         |         |         |        |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.39                          | 13.49   | 13.97   | 13.93   | 13.73   | 13.63   | 13.61   | 14.55   | 14.55   |         |         |         |         |        |
|                     | FeO                            | 0.20                           | 0.34    | 0.64    | 0.93    | 1.31    | 1.51    | 1.51    | 3.21    | 3.23    |         |         |         |         |        |
|                     | MgO                            | 0.04                           | 0.07    | 0.12    | 0.19    | 0.32    | 0.40    | 0.40    | 0.67    | 0.67    |         |         |         |         |        |
|                     | CaO                            | 0.33                           | 0.35    | 0.37    | 0.40    | 0.43    | 0.46    | 0.48    | 0.64    | 0.65    |         |         |         |         |        |
|                     | Na <sub>2</sub> O              | 3.99                           | 4.29    | 3.63    | 3.16    | 3.08    | 2.99    | 2.89    | 2.42    | 2.42    |         |         |         |         |        |
|                     | K <sub>2</sub> O               | 4.00                           | 3.45    | 4.85    | 5.73    | 5.84    | 5.94    | 6.03    | 6.26    | 6.26    |         |         |         |         |        |
|                     | H <sub>2</sub> O               | 9.09                           | 9.18    | 6.53    | 5.03    | 4.39    | 4.08    | 4.04    | 1.28    | 1.27    |         |         |         |         |        |
|                     | Total                          | 100                            | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     |         |         |         |        |
| Open-system Melting |                                |                                | 0.7     |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |        |
|                     | Open-system Melting            |                                | 684.755 | 685.797 | 743.689 | 787.497 | 835.799 | 855.329 | 950     | 681.146 | 681.555 | 752.034 | 784.681 | 854.075 | 950    |
|                     |                                |                                | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C)  | T (°C) |
|                     |                                |                                | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)   | Φ (%)  |
|                     | residuum                       | id                             | R1      | R2      | R3      | R4      | R5      | R6      | R7      | R8      | R9      | R10     |         |         |        |
|                     |                                | SiO <sub>2</sub>               | 67.00   | 68.68   | 69.24   | 71.08   | 72.62   | 74.10   | 74.28   | 71.78   | 69.45   | 68.16   | 73.65   | 74.63   |        |
|                     |                                | TiO <sub>2</sub>               | 0.44    | 0.46    | 0.48    | 0.51    | 0.55    | 0.58    | 0.59    | 0.51    | 0.48    | 0.45    | 0.55    | 0.58    |        |
|                     |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.28    | 5.42    | 5.47    | 5.63    | 5.79    | 5.94    | 5.97    | 5.67    | 5.48    | 5.38    | 5.85    | 5.95    |        |
|                     |                                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.04    | 0.04    | 0.04    | 0.04    | 0.05    | 0.05    | 0.05    | 0.04    | 0.04    | 0.04    | 0.05    | 0.05    |        |
|                     |                                | FeO                            | 4.11    | 4.30    | 4.42    | 4.73    | 5.00    | 5.28    | 5.33    | 4.11    | 4.23    | 4.43    | 4.76    | 5.05    |        |
| MgO                 |                                | 4.72                           | 4.94    | 5.08    | 5.44    | 5.78    | 6.12    | 6.18    | 4.72    | 4.86    | 5.10    | 5.48    | 5.83    |         |        |
| CaO                 |                                | 3.02                           | 3.15    | 3.23    | 3.44    | 3.65    | 3.86    | 3.90    | 3.02    | 3.11    | 3.23    | 3.45    | 3.65    |         |        |
| Na <sub>2</sub> O   |                                | 2.67                           | 2.69    | 2.71    | 2.75    | 2.78    | 2.82    | 2.83    | 2.67    | 2.68    | 2.72    | 2.77    | 2.82    |         |        |
| K <sub>2</sub> O    |                                | 1.03                           | 1.05    | 1.03    | 1.00    | 0.95    | 0.90    | 0.88    | 1.03    | 1.05    | 1.02    | 1.00    | 0.97    |         |        |
| H <sub>2</sub> O    | 11.68                          | 9.26                           | 8.29    | 5.37    | 2.83    | 0.34    | 0.00    | 0.00    | 11.68   | 10.05   | 4.52    | 1.61    |         |         |        |
| Total               | 100.00                         | 100.00                         | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  |         |         |        |
| analectic melt      | id                             | M1                             | M2      | M3      | M4      | M5      | M6      | M7      | M8      | M9      | M10     |         |         |         |        |
|                     | SiO <sub>2</sub>               | 65.78                          | 65.79   | 67.48   | 68.40   | 69.12   | 69.26   | 69.38   | 63.62   | 63.63   | 66.21   | 66.88   | 67.90   |         |        |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.55                          | 13.55   | 14.20   | 14.62   | 13.96   | 13.84   | 14.07   | 13.44   | 13.45   | 14.42   | 14.73   | 13.93   |         |        |
|                     | FeO                            | 0.24                           | 0.25    | 0.46    | 0.64    | 1.56    | 1.91    | 3.58    | 0.28    | 0.28    | 0.38    | 0.50    | 1.73    |         |        |
|                     | MgO                            | 0.05                           | 0.05    | 0.09    | 0.15    | 0.43    | 0.58    | 0.90    | 0.07    | 0.07    | 0.08    | 0.13    | 0.52    |         |        |
|                     | CaO                            | 0.47                           | 0.48    | 0.51    | 0.56    | 0.63    | 0.69    | 0.66    | 0.70    | 0.64    | 0.70    | 0.81    | 1.03    |         |        |
|                     | Na <sub>2</sub> O              | 4.76                           | 4.75    | 4.06    | 3.51    | 3.40    | 3.24    | 2.78    | 5.45    | 5.43    | 3.89    | 3.78    | 3.69    |         |        |
|                     | K <sub>2</sub> O               | 3.21                           | 3.19    | 4.56    | 5.48    | 5.68    | 5.81    | 6.04    | 2.54    | 2.55    | 5.14    | 5.27    | 5.42    |         |        |
|                     | H <sub>2</sub> O               | 11.95                          | 11.94   | 8.63    | 6.65    | 5.22    | 4.67    | 2.39    | 14.01   | 14.00   | 9.24    | 8.01    | 5.83    |         |        |
|                     | Total                          | 100                            | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     |         |        |

Φ = melt fraction (%)



Supplementary Data 2

Supplementary data - table 2b: Residue and Melt compositions. Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modeling from graywacke protolith under closed and open-system melting. All compositions are in mol. %

| Open-system Melting |  | 690.62  | 699.522 | 749.115 | 783.664 | 807.1   | 819.087 | 820.362 | 940.351 | 950     |
|---------------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                     |  | 0.00    | 0.03    | 0.08    | 0.13    | 0.18    | 0.23    | 0.28    | 0.33    | 0.33    |
|                     |  | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    |
|                     |  | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    | 0.45    |
|                     |  | R1      | R2      | R3      | R4      | R5      | R6      | R7      | R8      | R9      |
|                     |  | 70.22   | 70.66   | 70.74   | 70.61   | 70.68   | 70.73   | 70.77   | 70.55   | 70.55   |
|                     |  | 0.61    | 0.63    | 0.65    | 0.68    | 0.71    | 0.75    | 0.79    | 0.83    | 0.83    |
|                     |  | 9.39    | 9.47    | 9.48    | 9.56    | 9.65    | 9.74    | 9.83    | 9.87    | 9.87    |
|                     |  | 0.10    | 0.11    | 0.11    | 0.12    | 0.12    | 0.13    | 0.13    | 0.14    | 0.14    |
|                     |  | 5.15    | 5.32    | 5.39    | 5.63    | 5.86    | 6.10    | 6.35    | 6.53    | 6.53    |
|                     |  | 3.32    | 3.43    | 3.48    | 3.65    | 3.81    | 3.98    | 4.15    | 4.31    | 4.31    |
|                     |  | 2.96    | 3.05    | 3.09    | 3.23    | 3.37    | 3.52    | 3.67    | 3.82    | 3.82    |
|                     |  | 2.88    | 2.86    | 2.86    | 2.86    | 2.86    | 2.86    | 2.86    | 2.88    | 2.88    |
|                     |  | 1.70    | 1.69    | 1.64    | 1.54    | 1.43    | 1.32    | 1.19    | 1.03    | 1.03    |
|                     |  | 3.67    | 3.87    | 3.81    | 2.13    | 1.50    | 0.89    | 0.26    | 0.04    | 0.04    |
|                     |  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  |
|                     |  | 0.392   | 0.392   | 0.392   | 0.393   | 0.394   | 0.395   | 0.395   | 0.398   | 0.398   |
|                     |  | M1      | M2      | M3      | M4      | M5      | M6      | M7      | M8      | M9      |
|                     |  | 60.37   | 60.09   | 64.93   | 68.01   | 69.23   | 69.84   | 69.95   | 75.08   | 75.10   |
|                     |  | 6.91    | 6.94    | 7.65    | 7.91    | 7.90    | 7.90    | 7.90    | 9.06    | 9.07    |
|                     |  | 0.15    | 0.25    | 0.50    | 0.75    | 1.07    | 1.24    | 1.24    | 2.84    | 2.85    |
|                     |  | 0.06    | 0.09    | 0.16    | 0.28    | 0.46    | 0.58    | 0.58    | 1.05    | 1.05    |
|                     |  | 0.31    | 0.33    | 0.37    | 0.41    | 0.45    | 0.48    | 0.50    | 0.73    | 0.73    |
|                     |  | 3.39    | 3.63    | 3.27    | 2.95    | 2.92    | 2.85    | 2.76    | 2.48    | 2.48    |
|                     |  | 2.24    | 1.92    | 2.87    | 3.52    | 3.64    | 3.73    | 3.79    | 4.22    | 4.23    |
|                     |  | 26.38   | 26.74   | 20.24   | 16.18   | 14.32   | 13.38   | 13.27   | 4.53    | 4.49    |
|                     |  | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     |
|                     |  | 1.165   | 1.180   | 1.175   | 1.150   | 1.128   | 1.119   | 1.119   | 1.219   | 1.220   |
|                     |  | 0.279   | 0.274   | 0.246   | 0.270   | 0.302   | 0.318   | 0.319   | 0.269   | 0.269   |
|                     |  | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     | 0.7     |
|                     |  | 684.755 | 685.797 | 743.689 | 787.497 | 835.799 | 855.329 | 950     | 681.146 | 681.555 |
|                     |  | 0.00    | 0.03    | 0.08    | 0.13    | 0.18    | 0.23    | 0.24    | 0.00    | 0.02    |
|                     |  | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     |
|                     |  | 784.681 | 784.681 | 784.681 | 784.681 | 784.681 | 784.681 | 784.681 | 784.681 | 784.681 |
|                     |  | 950     | 950     | 950     | 950     | 950     | 950     | 950     | 950     | 950     |
|                     |  | 0.17    | 0.17    | 0.17    | 0.17    | 0.17    | 0.17    | 0.17    | 0.17    | 0.17    |
|                     |  | R1      | R2      | R3      | R4      | R5      | R6      | R7      | R8      | R9      |
|                     |  | 70.22   | 70.66   | 70.74   | 71.11   | 71.36   | 71.57   | 71.57   | 70.22   | 70.54   |
|                     |  | 0.61    | 0.63    | 0.65    | 0.68    | 0.71    | 0.75    | 0.76    | 0.61    | 0.62    |
|                     |  | 9.39    | 9.47    | 9.49    | 9.57    | 9.65    | 9.74    | 9.76    | 9.39    | 9.44    |
|                     |  | 0.10    | 0.11    | 0.11    | 0.12    | 0.12    | 0.13    | 0.13    | 0.10    | 0.11    |
|                     |  | 5.15    | 5.29    | 5.40    | 5.65    | 5.88    | 6.10    | 6.14    | 5.15    | 5.24    |
|                     |  | 3.32    | 3.41    | 3.49    | 3.65    | 3.81    | 3.96    | 3.99    | 3.32    | 3.37    |
|                     |  | 2.96    | 3.03    | 3.08    | 3.21    | 3.34    | 3.48    | 3.51    | 2.96    | 3.00    |
|                     |  | 2.88    | 2.86    | 2.85    | 2.84    | 2.82    | 2.81    | 2.81    | 2.88    | 2.86    |
|                     |  | 1.70    | 1.70    | 1.65    | 1.57    | 1.47    | 1.36    | 1.33    | 1.70    | 1.70    |
|                     |  | 3.67    | 3.85    | 3.54    | 1.61    | 1.00    | 0.00    | 0.00    | 3.67    | 3.12    |
|                     |  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  |
|                     |  | 0.392   | 0.392   | 0.392   | 0.393   | 0.394   | 0.394   | 0.394   | 0.392   | 0.392   |
|                     |  | M1      | M2      | M3      | M4      | M5      | M6      | M7      | M8      | M9      |
|                     |  | 54.33   | 54.35   | 59.94   | 63.65   | 66.26   | 67.21   | 67.21   | 50.42   | 50.44   |
|                     |  | 6.60    | 6.60    | 7.43    | 8.02    | 7.88    | 7.91    | 8.31    | 6.28    | 6.28    |
|                     |  | 0.16    | 0.17    | 0.34    | 0.50    | 0.75    | 1.07    | 1.35    | 0.19    | 0.19    |
|                     |  | 0.06    | 0.06    | 0.12    | 0.21    | 0.32    | 0.44    | 0.50    | 0.08    | 0.08    |
|                     |  | 0.41    | 0.42    | 0.48    | 0.56    | 0.65    | 0.71    | 0.85    | 0.50    | 0.50    |
|                     |  | 3.81    | 3.80    | 3.49    | 3.16    | 3.16    | 3.05    | 2.76    | 4.19    | 4.18    |
|                     |  | 1.69    | 1.68    | 2.58    | 3.26    | 3.47    | 3.60    | 3.95    | 1.29    | 1.29    |
|                     |  | 32.93   | 32.91   | 25.60   | 20.64   | 16.71   | 15.12   | 8.19    | 37.06   | 37.05   |
|                     |  | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     |
|                     |  | 1.115   | 1.117   | 1.133   | 1.149   | 1.083   | 1.075   | 1.110   | 1.052   | 1.053   |
|                     |  | 0.273   | 0.273   | 0.264   | 0.300   | 0.350   | 0.352   | 0.308   | 0.300   | 0.302   |
|                     |  | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     |
|                     |  | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 |
|                     |  | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    |
|                     |  | R1      | R2      | R3      | R4      | R5      | R6      | R7      | R8      | R9      |
|                     |  | 70.22   | 70.66   | 70.74   | 71.11   | 71.36   | 71.57   | 71.57   | 70.22   | 70.54   |
|                     |  | 0.61    | 0.63    | 0.65    | 0.68    | 0.71    | 0.75    | 0.76    | 0.61    | 0.62    |
|                     |  | 9.39    | 9.47    | 9.49    | 9.57    | 9.65    | 9.74    | 9.76    | 9.39    | 9.44    |
|                     |  | 0.10    | 0.11    | 0.11    | 0.12    | 0.12    | 0.13    | 0.13    | 0.10    | 0.11    |
|                     |  | 5.15    | 5.29    | 5.40    | 5.65    | 5.88    | 6.10    | 6.14    | 5.15    | 5.24    |
|                     |  | 3.32    | 3.41    | 3.49    | 3.65    | 3.81    | 3.96    | 3.99    | 3.32    | 3.37    |
|                     |  | 2.96    | 3.03    | 3.08    | 3.21    | 3.34    | 3.48    | 3.51    | 2.96    | 3.00    |
|                     |  | 2.88    | 2.86    | 2.85    | 2.84    | 2.82    | 2.81    | 2.81    | 2.88    | 2.86    |
|                     |  | 1.70    | 1.70    | 1.65    | 1.57    | 1.47    | 1.36    | 1.33    | 1.70    | 1.70    |
|                     |  | 3.67    | 3.85    | 3.54    | 1.61    | 1.00    | 0.00    | 0.00    | 3.67    | 3.12    |
|                     |  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  |
|                     |  | 0.392   | 0.392   | 0.392   | 0.393   | 0.394   | 0.394   | 0.394   | 0.392   | 0.392   |
|                     |  | M1      | M2      | M3      | M4      | M5      | M6      | M7      | M8      | M9      |
|                     |  | 54.33   | 54.35   | 59.94   | 63.65   | 66.26   | 67.21   | 67.21   | 50.42   | 50.44   |
|                     |  | 6.60    | 6.60    | 7.43    | 8.02    | 7.88    | 7.91    | 8.31    | 6.28    | 6.28    |
|                     |  | 0.16    | 0.17    | 0.34    | 0.50    | 0.75    | 1.07    | 1.35    | 0.19    | 0.19    |
|                     |  | 0.06    | 0.06    | 0.12    | 0.21    | 0.32    | 0.44    | 0.50    | 0.08    | 0.08    |
|                     |  | 0.41    | 0.42    | 0.48    | 0.56    | 0.65    | 0.71    | 0.85    | 0.50    | 0.50    |
|                     |  | 3.81    | 3.80    | 3.49    | 3.16    | 3.16    | 3.05    | 2.76    | 4.19    | 4.18    |
|                     |  | 1.69    | 1.68    | 2.58    | 3.26    | 3.47    | 3.60    | 3.95    | 1.29    | 1.29    |
|                     |  | 32.93   | 32.91   | 25.60   | 20.64   | 16.71   | 15.12   | 8.19    | 37.06   | 37.05   |
|                     |  | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     | 100     |
|                     |  | 1.115   | 1.117   | 1.133   | 1.149   | 1.083   | 1.075   | 1.110   | 1.052   | 1.053   |
|                     |  | 0.273   | 0.273   | 0.264   | 0.300   | 0.350   | 0.352   | 0.308   | 0.300   | 0.302   |
|                     |  | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     | 0.9     |
|                     |  | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 | 854.075 |
|                     |  | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    | 0.21    |
|                     |  | R1      | R2      | R3      | R4      | R5      | R6      | R7      | R8      | R9      |
|                     |  | 70.22   | 70.66   | 70.74   | 71.11   | 71.36   | 71.57   | 71.57   | 70.22   | 70.54   |
|                     |  | 0.61    | 0.63    | 0.65    | 0.68    | 0.71    | 0.75    | 0.76    | 0.61    | 0.62    |
|                     |  | 9.39    | 9.47    | 9.49    | 9.57    | 9.65    | 9.74    | 9.76    | 9.39    | 9.44    |
|                     |  | 0.10    | 0.11    | 0.11    | 0.12    | 0.12    | 0.13    | 0.13    | 0.10    | 0.11    |
|                     |  | 5.15    | 5.29    | 5.40    | 5.65    | 5.88    | 6.10    | 6.14    | 5.15    | 5.24    |
|                     |  | 3.32    | 3.41    | 3.49    | 3.65    | 3.81    | 3.96    | 3.99    | 3.32    | 3.37    |
|                     |  | 2.96    | 3.03    | 3.08    | 3.21    | 3.34    | 3.48    | 3.51    | 2.96    | 3.00    |
|                     |  | 2.88    | 2.86    | 2.85    | 2.84    | 2.82    | 2.81    | 2.81    | 2.88    | 2.86    |
|                     |  | 1.70    | 1.70    | 1.65    | 1.57    | 1.47    | 1.36    | 1.33    | 1.70    | 1.70    |
|                     |  | 3.67    | 3.85    | 3.54    | 1.61    | 1.00    | 0.00    | 0.00    | 3.67    | 3.12    |
|                     |  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  |
|                     |  | 0.392   | 0.392   | 0.392   | 0.393   | 0.394   | 0.394   | 0.394   | 0.392   | 0.392   |
|                     |  | M1      | M2      | M3      | M4      | M5      | M6      | M7      | M8      | M9      |
|                     |  | 54.33   | 54.35   | 59.94   | 63.65   | 66.26   | 67.21   | 67.21   | 50.42   | 50.44   |
|                     |  | 6.60    | 6.60    | 7.43    | 8.02    | 7.88    | 7.91    | 8.31    | 6.28    | 6.28    |
|                     |  | 0.16    | 0.17    | 0.34    | 0.50    | 0.75    | 1.07    | 1.35    | 0.19    | 0.19    |
|                     |  | 0.06    | 0.06    | 0.12    | 0.21    | 0.32    | 0.44    | 0.50    | 0.08    | 0.08    |
|                     |  | 0.41    | 0.42    | 0.48    | 0.56    | 0.65    | 0.71    | 0.85    | 0.50    | 0.50    |
|                     |  | 3.81    | 3.80    | 3.49    | 3.16    | 3.16    | 3.05    | 2.76    | 4.19    | 4.18    |
|                     |  | 1.69    | 1.68    | 2.58    | 3.26    | 3.47    | 3.60    | 3.95    | 1.29    | 1.29    |
|                     |  | 32.93   |         |         |         |         |         |         |         |         |

Supplementary Data 3

Supplementary data - table 3a. Pseudis and melt compositions, Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modelling from shale proorth under closed-system and open-system melting. All compositions are in wt. %.

| Closed-system<br>Melting       | P (GPa)                        |                  | T (°C) |        | 725.81 |        | 780.20 |        | 788.65 |        | 801.78 |        | 819.35 |        | 846.61 |        | 876.80 |        | 910.55 |        | 948.88 |        |        |        |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                | 5                              | 10               | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 65     | 70     | 75     | 80     | 85     | 90     | 95     | 100    | 100.00 | 100.00 |        |        |
| residuum                       | SiO <sub>2</sub>               | 65.32            | 65.19  | 65.02  | 64.80  | 64.36  | 63.86  | 63.35  | 62.73  | 62.00  | 61.09  | 60.01  | 58.71  | 57.33  | 55.96  | 54.54  | 53.07  | 51.54  | 50.00  | 48.43  | 46.84  | 45.22  | 43.58  |        |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.16            | 18.33  | 18.57  | 18.83  | 19.04  | 19.29  | 19.61  | 19.97  | 20.35  | 20.76  | 21.25  | 21.84  | 22.32  | 22.73  | 23.08  | 23.38  | 23.63  | 23.84  | 24.01  | 24.15  | 24.26  | 24.33  | 24.37  |
|                                | FeO                            | 0.28             | 0.29   | 0.31   | 0.32   | 0.34   | 0.41   | 0.45   | 0.48   | 0.51   | 0.55   | 0.59   | 0.66   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   |
|                                | MgO                            | 2.30             | 2.38   | 2.49   | 2.63   | 2.78   | 2.92   | 3.10   | 3.31   | 3.56   | 3.85   | 4.20   | 4.63   | 5.11   | 5.61   | 6.11   | 6.61   | 7.11   | 7.61   | 8.11   | 8.61   | 9.11   | 9.61   | 10.11  |
|                                | CaO                            | 0.74             | 0.75   | 0.77   | 0.79   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   | 0.81   |
|                                | Na <sub>2</sub> O              | 1.08             | 1.09   | 1.09   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   |
|                                | K <sub>2</sub> O               | 3.74             | 3.70   | 3.63   | 3.52   | 3.34   | 3.10   | 2.80   | 2.45   | 2.05   | 1.58   | 0.97   | 0.25   | 0.02   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
|                                | H <sub>2</sub> O               | 1.96             | 1.71   | 1.38   | 1.05   | 0.88   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.85   |
|                                | Total                          | 100.00           | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
|                                | anorthic melt                  | SiO <sub>2</sub> | 68.95  | 68.99  | 69.05  | 69.20  | 70.02  | 70.46  | 70.66  | 70.84  | 71.02  | 71.17  | 71.27  | 71.35  | 71.33  | 71.33  | 71.33  | 71.33  | 71.33  | 71.33  | 71.33  | 71.33  | 71.33  | 71.33  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                | 12.23            | 12.21  | 12.19  | 12.19  | 12.17  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  | 12.13  |        |
| FeO                            |                                | 0.07             | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   |        |
| MgO                            |                                | 0.02             | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   |        |
| CaO                            |                                | 0.17             | 0.18   | 0.20   | 0.23   | 0.30   | 0.33   | 0.39   | 0.46   | 0.57   | 0.60   | 0.65   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   | 0.68   |
| Na <sub>2</sub> O              |                                | 3.55             | 3.47   | 3.35   | 3.14   | 3.01   | 2.78   | 2.49   | 2.28   | 2.14   | 2.04   | 1.97   | 1.90   | 1.84   | 1.74   | 1.61   | 1.48   | 1.34   | 1.20   | 1.06   | 0.92   | 0.78   | 0.64   | 0.50   |
| K <sub>2</sub> O               |                                | 4.84             | 5.02   | 5.12   | 5.40   | 5.70   | 5.99   | 6.27   | 6.49   | 6.64   | 6.76   | 6.84   | 6.91   | 6.94   | 6.94   | 6.94   | 6.94   | 6.94   | 6.94   | 6.94   | 6.94   | 6.94   | 6.94   | 6.94   |
| H <sub>2</sub> O               |                                | 8.99             | 8.95   | 8.90   | 8.86   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   | 8.83   |
| Total                          |                                | 100.00           | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| Closed-system<br>Melting       |                                | 5                | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 65     | 70     | 75     | 80     | 85     | 90     | 95     | 100    | 100.00 | 100.00 |        |
|                                | 681.95                         | 683.85           | 707.13 | 720.13 | 766.02 | 787.93 | 805.94 | 822.09 | 836.13 | 848.26 | 864.81 | 881.57 | 923.28 | 678.53 | 691.08 | 743.46 | 753.37 | 767.38 | 794.04 | 817.15 | 837.98 | 861.33 | 885.59 |        |
|                                | 5                              | 10               | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 65     | 70     | 75     | 80     | 85     | 90     | 95     | 100    | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |
|                                | 681.95                         | 683.85           | 707.13 | 720.13 | 766.02 | 787.93 | 805.94 | 822.09 | 836.13 | 848.26 | 864.81 | 881.57 | 923.28 | 678.53 | 691.08 | 743.46 | 753.37 | 767.38 | 794.04 | 817.15 | 837.98 | 861.33 | 885.59 |        |
|                                | 5                              | 10               | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 65     | 70     | 75     | 80     | 85     | 90     | 95     | 100    | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |
|                                | 681.95                         | 683.85           | 707.13 | 720.13 | 766.02 | 787.93 | 805.94 | 822.09 | 836.13 | 848.26 | 864.81 | 881.57 | 923.28 | 678.53 | 691.08 | 743.46 | 753.37 | 767.38 | 794.04 | 817.15 | 837.98 | 861.33 | 885.59 |        |
|                                | 5                              | 10               | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 65     | 70     | 75     | 80     | 85     | 90     | 95     | 100    | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
|                                | 681.95                         | 683.85           | 707.13 | 720.13 | 766.02 | 787.93 | 805.94 | 822.09 | 836.13 | 848.26 | 864.81 | 881.57 | 923.28 | 678.53 | 691.08 | 743.46 | 753.37 | 767.38 | 794.04 | 817.15 | 837.98 | 861.33 | 885.59 |        |
|                                | 5                              | 10               | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 65     | 70     | 75     | 80     | 85     | 90     | 95     | 100    | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
|                                | 681.95                         | 683.85           | 707.13 | 720.13 | 766.02 | 787.93 | 805.94 | 822.09 | 836.13 | 848.26 | 864.81 | 881.57 | 923.28 | 678.53 | 691.08 | 743.46 | 753.37 | 767.38 | 794.04 | 817.15 | 837.98 | 861.33 | 885.59 |        |
| residuum                       | SiO <sub>2</sub>               | 65.33            | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  | 65.33  |        |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.16            | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  | 18.16  |        |
|                                | FeO                            | 0.28             | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   | 0.28   |        |
|                                | MgO                            | 2.30             | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   | 2.30   |        |
|                                | CaO                            | 0.74             | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   | 0.74   |        |
|                                | Na <sub>2</sub> O              | 1.08             | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.08   |        |
|                                | K <sub>2</sub> O               | 3.74             | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   | 3.74   |        |
|                                | H <sub>2</sub> O               | 1.96             | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   |
|                                | Total                          | 100.00           | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
|                                | anorthic melt                  | SiO <sub>2</sub> | 65.70  | 65.76  | 66.77  | 67.36  | 68.12  | 68.44  | 68.70  | 68.91  | 69.09  | 69.24  | 69.47  | 69.67  | 69.77  | 69.83  | 69.83  | 69.83  | 69.83  | 69.83  | 69.83  | 69.83  | 69.83  | 69.83  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                | 13.58            | 13.56  | 13.53  | 13.54  | 14.36  | 14.56  | 14.72  | 14.86  | 14.98  | 15.09  | 15.19  | 15.29  | 15.49  | 15.69  | 15.89  | 16.09  | 16.29  | 16.49  | 16.69  | 16.89  | 17.09  | 17.29  |        |
| FeO                            |                                | 0.05             | 0.05   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   |        |
| CaO                            |                                | 0.41             | 0.45   | 0.48   | 0.51   | 0.60   | 0.67   | 0.74   | 0.80   | 0.85   | 0.90   | 0.90   | 0.89   | 0.84   | 0.78   | 0.72   | 0.66   | 0.60   | 0.54   | 0.48   | 0.42   | 0.36   | 0.30   |        |
| Na <sub>2</sub> O              |                                | 4.88             | 4.83   | 4.68   | 4.48   | 4.25   | 3.65   | 3.05   | 2.64   | 2.31   | 2.17   | 2.07   | 1.92   | 1.82   | 1.68   | 1.54   | 1.40   | 1.26   | 1.12   | 0.98   | 0.84   | 0.70   | 0.56   |        |
| K <sub>2</sub> O               |                                | 3.02             | 3.15   | 4.43   | 5.42   | 5.70   | 5.92   | 6.14   | 6.35   | 6.54   | 6.70   | 6.86   | 6.99   | 6.56   | 5.58   | 4.50   | 3.42   | 2.34   | 1.26   | 0.18   | 0.10   | 0.02   | 0.00   |        |
| H <sub>2</sub> O               |                                | 12.04            | 11.98  | 10.16  | 9.07   | 7.36   | 6.61   | 6.02   | 5.52   | 5.09   | 4.74   | 4.39   | 3.86   | 3.31   | 2.76   | 2.21   | 1.66   | 1.11   | 0.56   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |        |
| Total                          |                                | 100.00           | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |
| Closed-system<br>Melting       |                                | 5                | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     | 65     | 70     | 75     | 80     | 85     | 90     | 95     | 100    | 100.00 | 100.00 |        |
|                                |                                | 681.95           | 683.85 | 707.13 | 720.13 | 766.02 | 787.93 | 805.94 | 822.09 | 836.13 | 848.26 | 864.81 | 881.57 | 923.28 | 678.53 | 691.08 | 743.46 | 753.37 | 767.38 | 794.04 | 817.15 | 837.98 |        |        |



Supplementary Data 3

Supplementary data - table 3b: Residuum and Melt compositions. Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modeling from shale protolith under closed-system and open-system melting. All compositions are in wt. %.

|                     |                                | 0.45                           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Open-system Melting |                                | 5                              | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     |  |
|                     |                                | 670.97                         | 672.07 | 675.32 | 765.42 | 770.63 | 817.46 | 863.27 | 890.42 | 913.95 | 935.10 | 950.00 | 950.00 |  |
|                     |                                | T (°C)                         | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) |  |
|                     |                                | Φ (%)                          | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  |  |
| residuum            | id                             | R1                             | R2     | R3     | R4     | R5     | R6     | R7     | R8     | R9     | R10    | R11    |        |  |
|                     | SiO <sub>2</sub>               | 65.19                          | 65.02  | 64.84  | 64.58  | 64.30  | 63.98  | 63.62  | 63.23  | 62.82  | 62.39  | 62.06  |        |  |
|                     | TiO <sub>2</sub>               | 0.69                           | 0.72   | 0.75   | 0.79   | 0.82   | 0.86   | 0.90   | 0.95   | 1.00   | 1.05   | 1.09   |        |  |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.34                          | 18.56  | 18.79  | 19.01  | 19.24  | 19.47  | 19.71  | 19.96  | 20.22  | 20.50  | 20.72  |        |  |
|                     | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.29                           | 0.31   | 0.32   | 0.33   | 0.35   | 0.36   | 0.38   | 0.40   | 0.42   | 0.44   | 0.46   |        |  |
|                     | FeO                            | 5.96                           | 6.22   | 6.49   | 6.76   | 7.04   | 7.33   | 7.63   | 7.92   | 8.22   | 8.51   | 8.73   |        |  |
|                     | MgO                            | 2.38                           | 2.48   | 2.59   | 2.71   | 2.83   | 2.95   | 3.09   | 3.22   | 3.37   | 3.51   | 3.62   |        |  |
|                     | CaO                            | 0.75                           | 0.77   | 0.79   | 0.81   | 0.82   | 0.83   | 0.83   | 0.83   | 0.83   | 0.83   | 0.82   |        |  |
|                     | Na <sub>2</sub> O              | 0.99                           | 0.89   | 0.79   | 0.71   | 0.63   | 0.58   | 0.53   | 0.48   | 0.44   | 0.40   | 0.37   |        |  |
|                     | K <sub>2</sub> O               | 3.70                           | 3.64   | 3.56   | 3.44   | 3.30   | 3.13   | 2.94   | 2.72   | 2.48   | 2.23   | 2.03   |        |  |
|                     | H <sub>2</sub> O               | 1.70                           | 1.39   | 1.07   | 0.87   | 0.66   | 0.50   | 0.39   | 0.29   | 0.21   | 0.15   | 0.11   |        |  |
| Total               | 100.00                         | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |  |
| analetic melt       | id                             | M1                             | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7     | M8     | M9     | M10    | M11    |        |  |
|                     | SiO <sub>2</sub>               | 68.99                          | 69.05  | 69.21  | 70.46  | 70.65  | 71.12  | 71.37  | 71.47  | 71.43  | 71.47  | 71.36  |        |  |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.21                          | 13.19  | 13.19  | 14.07  | 14.01  | 14.41  | 14.67  | 14.66  | 14.64  | 14.64  | 14.59  |        |  |
|                     | FeO                            | 0.07                           | 0.07   | 0.07   | 0.61   | 0.61   | 0.88   | 1.31   | 1.67   | 2.02   | 2.35   | 2.61   |        |  |
|                     | MgO                            | 0.02                           | 0.02   | 0.02   | 0.11   | 0.11   | 0.14   | 0.21   | 0.29   | 0.37   | 0.46   | 0.52   |        |  |
|                     | CaO                            | 0.28                           | 0.30   | 0.33   | 0.48   | 0.56   | 0.66   | 0.75   | 0.81   | 0.86   | 0.91   | 0.94   |        |  |
|                     | Na <sub>2</sub> O              | 3.47                           | 3.35   | 3.13   | 2.66   | 2.26   | 1.87   | 1.61   | 1.47   | 1.35   | 1.25   | 1.19   |        |  |
|                     | K <sub>2</sub> O               | 5.02                           | 5.12   | 5.40   | 6.09   | 6.46   | 6.90   | 7.18   | 7.33   | 7.45   | 7.53   | 7.58   |        |  |
|                     | H <sub>2</sub> O               | 8.95                           | 8.90   | 8.66   | 5.52   | 5.36   | 4.01   | 2.89   | 2.31   | 1.84   | 1.46   | 1.21   |        |  |
|                     | Total                          | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |  |
|                     | Open-system Melting            |                                |        | 0.7    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |  |
| Open-system Melting |                                | 10                             | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 55     | 60     |        |  |
|                     |                                | 683.85                         | 717.65 | 721.00 | 782.90 | 809.58 | 835.21 | 857.53 | 950.00 | 950.00 | 754.88 | 846.39 |        |  |
|                     |                                | T (°C)                         | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) | T (°C) |        |  |
|                     |                                | Φ (%)                          | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  | Φ (%)  |        |  |
| residuum            |                                | id                             | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R6     | R7     | R8     | R9     | R10    | R11    |  |
|                     |                                | SiO <sub>2</sub>               | 65.34  | 65.25  | 65.16  | 65.02  | 64.85  | 64.65  | 64.43  | 64.37  | 65.41  | 65.38  | 65.34  |  |
|                     |                                | TiO <sub>2</sub>               | 0.69   | 0.72   | 0.75   | 0.78   | 0.82   | 0.86   | 0.90   | 0.91   | 0.69   | 0.72   | 0.75   |  |
|                     |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.31  | 18.50  | 18.69  | 18.88  | 19.07  | 19.26  | 19.45  | 19.49  | 18.29  | 18.46  | 18.63  |  |
|                     |                                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.29   | 0.30   | 0.32   | 0.33   | 0.35   | 0.36   | 0.38   | 0.38   | 0.29   | 0.30   | 0.32   |  |
|                     |                                | FeO                            | 5.94   | 6.19   | 6.45   | 6.71   | 6.98   | 7.27   | 7.57   | 7.64   | 5.93   | 6.17   | 6.42   |  |
|                     | MgO                            | 2.37                           | 2.47   | 2.58   | 2.69   | 2.80   | 2.92   | 3.05   | 3.07   | 2.37   | 2.47   | 2.57   |        |  |
|                     | CaO                            | 0.74                           | 0.76   | 0.77   | 0.77   | 0.77   | 0.76   | 0.75   | 0.74   | 0.74   | 0.75   | 0.75   |        |  |
|                     | Na <sub>2</sub> O              | 0.94                           | 0.82   | 0.72   | 0.61   | 0.52   | 0.45   | 0.39   | 0.38   | 0.91   | 0.78   | 0.66   |        |  |
|                     | K <sub>2</sub> O               | 3.78                           | 3.72   | 3.64   | 3.54   | 3.41   | 3.25   | 3.06   | 3.01   | 3.81   | 3.76   | 3.68   |        |  |
|                     | H <sub>2</sub> O               | 1.60                           | 1.27   | 0.93   | 0.67   | 0.43   | 0.22   | 0.02   | 0.00   | 1.55   | 1.22   | 0.88   |        |  |
| Total               | 100.00                         | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |  |
| analetic melt       | id                             | M1                             | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7     | M8     | M9     | M10    | M11    |        |  |
|                     | SiO <sub>2</sub>               | 65.76                          | 67.26  | 67.38  | 68.38  | 68.76  | 69.09  | 69.35  | 69.75  | 63.88  | 66.22  | 66.25  |        |  |
|                     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 13.56                          | 13.94  | 13.93  | 14.50  | 14.72  | 14.93  | 15.12  | 16.03  | 13.80  | 14.43  | 14.43  |        |  |
|                     | FeO                            | 0.22                           | 0.20   | 0.20   | 0.59   | 0.68   | 0.74   | 0.75   | 1.30   | 0.28   | 0.38   | 0.37   |        |  |
|                     | MgO                            | 0.05                           | 0.04   | 0.04   | 0.13   | 0.18   | 0.24   | 0.28   | 0.40   | 0.08   | 0.08   | 0.08   |        |  |
|                     | CaO                            | 0.45                           | 0.48   | 0.54   | 0.68   | 0.80   | 0.92   | 1.04   | 1.29   | 0.50   | 0.64   | 0.74   |        |  |
|                     | Na <sub>2</sub> O              | 4.83                           | 3.68   | 3.34   | 2.99   | 2.59   | 2.16   | 1.76   | 1.24   | 5.80   | 3.89   | 3.54   |        |  |
|                     | K <sub>2</sub> O               | 3.15                           | 5.17   | 5.54   | 5.97   | 6.38   | 6.84   | 7.27   | 7.78   | 2.22   | 5.15   | 5.48   |        |  |
|                     | H <sub>2</sub> O               | 11.98                          | 9.23   | 9.04   | 6.77   | 5.89   | 5.08   | 4.42   | 2.20   | 13.43  | 9.22   | 9.11   |        |  |
|                     | Total                          | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |  |

Φ = melt fraction (%)



Supplementary Data 4

Supplementary data - table 4b: Residue and Melt compositions. Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modeling from shale protolith under closed-system and open-system melting. All compositions are in mol. %

| P (GPa)                        | 0.45   |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0.9    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
| Open-system Melting            | 670.97 | 672.07 | 673.32 | 675.42 | 677.63 | 681.46 | 686.27 | 690.42 | 693.95 | 695.10 | 670.97 | 672.07 | 673.32 | 675.42 | 677.63 | 681.46 | 686.27 | 690.42 | 693.95 | 695.10 |
| T (°C)                         | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     | 5      | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 40     | 45     | 50     |
| Φ (%)                          | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.418  | 0.419  | 0.420  | 0.422  | 0.424  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.416  | 0.416  | 0.417  |
| id                             | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R6     | R7     | R8     | R9     | R10    | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R6     | R7     | R8     | R9     | R10    |
| SiO <sub>2</sub>               | 68.64  | 69.05  | 69.45  | 69.57  | 69.67  | 69.63  | 69.46  | 69.22  | 68.93  | 68.59  | 68.64  | 69.05  | 69.45  | 69.57  | 69.67  | 69.63  | 69.46  | 69.22  | 68.93  | 68.59  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.55   | 0.58   | 0.61   | 0.64   | 0.67   | 0.71   | 0.74   | 0.78   | 0.82   | 0.87   | 0.55   | 0.58   | 0.61   | 0.64   | 0.67   | 0.71   | 0.74   | 0.78   | 0.82   | 0.87   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.38  | 11.61  | 11.86  | 12.07  | 12.29  | 12.49  | 12.68  | 12.87  | 13.07  | 13.28  | 11.38  | 11.61  | 11.86  | 12.07  | 12.29  | 12.49  | 12.68  | 12.87  | 13.07  | 13.28  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.12   | 0.12   | 0.13   | 0.14   | 0.14   | 0.15   | 0.16   | 0.17   | 0.17   | 0.18   | 0.12   | 0.12   | 0.13   | 0.14   | 0.14   | 0.15   | 0.16   | 0.17   | 0.17   | 0.18   |
| FeO                            | 5.25   | 5.52   | 5.81   | 6.09   | 6.38   | 6.68   | 6.99   | 7.25   | 7.54   | 7.82   | 5.25   | 5.52   | 5.81   | 6.09   | 6.38   | 6.68   | 6.99   | 7.25   | 7.54   | 7.82   |
| MgO                            | 3.74   | 3.83   | 4.14   | 4.34   | 4.56   | 4.79   | 5.02   | 5.26   | 5.51   | 5.76   | 3.74   | 3.83   | 4.14   | 4.34   | 4.56   | 4.79   | 5.02   | 5.26   | 5.51   | 5.76   |
| CaO                            | 0.85   | 0.88   | 0.91   | 0.93   | 0.95   | 0.96   | 0.97   | 0.97   | 0.97   | 0.97   | 0.85   | 0.88   | 0.91   | 0.93   | 0.95   | 0.96   | 0.97   | 0.97   | 0.97   | 0.97   |
| Na <sub>2</sub> O              | 1.01   | 0.92   | 0.82   | 0.74   | 0.67   | 0.61   | 0.56   | 0.51   | 0.46   | 0.42   | 1.01   | 0.92   | 0.82   | 0.74   | 0.67   | 0.61   | 0.56   | 0.51   | 0.46   | 0.42   |
| K <sub>2</sub> O               | 2.48   | 2.46   | 2.43   | 2.37   | 2.28   | 2.17   | 2.04   | 1.90   | 1.74   | 1.56   | 2.48   | 2.46   | 2.43   | 2.37   | 2.28   | 2.17   | 2.04   | 1.90   | 1.74   | 1.56   |
| H <sub>2</sub> O               | 5.99   | 4.93   | 3.84   | 3.12   | 2.39   | 1.82   | 1.40   | 1.06   | 0.78   | 0.55   | 5.99   | 4.93   | 3.84   | 3.12   | 2.39   | 1.82   | 1.40   | 1.06   | 0.78   | 0.55   |
| Total                          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| #mg                            | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.417  | 0.418  | 0.419  | 0.420  | 0.422  | 0.424  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.416  | 0.416  | 0.417  | 0.417  |
| id                             | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7     | M8     | M9     | M10    | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7     | M8     | M9     | M10    |
| SiO <sub>2</sub>               | 60.73  | 60.86  | 61.35  | 61.21  | 61.70  | 62.50  | 63.28  | 63.98  | 64.86  | 65.54  | 60.73  | 60.86  | 61.35  | 61.21  | 61.70  | 62.50  | 63.28  | 63.98  | 64.86  | 65.54  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.85   | 6.85   | 6.89   | 7.91   | 7.91   | 8.42   | 8.82   | 8.94   | 9.03   | 9.11   | 6.85   | 6.85   | 6.89   | 7.91   | 7.91   | 8.42   | 8.82   | 8.94   | 9.03   | 9.11   |
| FeO                            | 0.05   | 0.05   | 0.05   | 0.49   | 0.49   | 0.73   | 1.12   | 1.44   | 1.77   | 2.08   | 0.05   | 0.05   | 0.05   | 0.49   | 0.49   | 0.73   | 1.12   | 1.44   | 1.77   | 2.08   |
| MgO                            | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.15   | 0.15   | 0.21   | 0.32   | 0.45   | 0.58   | 0.72   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.15   | 0.15   | 0.21   | 0.32   | 0.45   | 0.58   | 0.72   |
| CaO                            | 0.26   | 0.28   | 0.31   | 0.46   | 0.57   | 0.70   | 0.82   | 0.90   | 0.97   | 1.07   | 0.26   | 0.28   | 0.31   | 0.46   | 0.57   | 0.70   | 0.82   | 0.90   | 0.97   | 1.07   |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.96   | 2.87   | 2.69   | 2.46   | 2.10   | 1.79   | 1.59   | 1.47   | 1.37   | 1.28   | 2.96   | 2.87   | 2.69   | 2.46   | 2.10   | 1.79   | 1.59   | 1.47   | 1.37   | 1.28   |
| K <sub>2</sub> O               | 2.82   | 2.88   | 3.06   | 3.71   | 3.95   | 4.36   | 4.67   | 4.84   | 4.98   | 5.08   | 2.82   | 2.88   | 3.06   | 3.71   | 3.95   | 4.36   | 4.67   | 4.84   | 4.98   | 5.08   |
| H <sub>2</sub> O               | 26.30  | 26.18  | 25.63  | 17.59  | 17.13  | 13.28  | 9.83   | 7.97   | 6.45   | 5.16   | 26.30  | 26.18  | 25.63  | 17.59  | 17.13  | 13.28  | 9.83   | 7.97   | 6.45   | 5.16   |
| Total                          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| ASI                            | 1.135  | 1.136  | 1.137  | 1.189  | 1.196  | 1.227  | 1.244  | 1.240  | 1.235  | 1.229  | 1.135  | 1.136  | 1.137  | 1.189  | 1.196  | 1.227  | 1.244  | 1.240  | 1.235  | 1.229  |
| #mg                            | 0.295  | 0.297  | 0.295  | 0.237  | 0.237  | 0.225  | 0.225  | 0.236  | 0.247  | 0.257  | 0.295  | 0.297  | 0.295  | 0.237  | 0.237  | 0.225  | 0.225  | 0.236  | 0.247  | 0.257  |
| Open-system Melting            | 683.85 | 717.65 | 721.00 | 782.90 | 809.58 | 835.21 | 857.53 | 950.00 | 691.08 | 752.31 | 683.85 | 717.65 | 721.00 | 782.90 | 809.58 | 835.21 | 857.53 | 950.00 | 691.08 | 752.31 |
| T (°C)                         | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 5      | 10     | 15     | 20     | 10     | 15     | 20     | 25     | 30     | 35     | 5      | 10     | 15     | 20     |
| Φ (%)                          | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.416  | 0.416  |
| id                             | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R6     | R7     | R8     | R1     | R2     | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R6     | R7     | R8     | R1     | R2     |
| SiO <sub>2</sub>               | 68.98  | 69.50  | 70.03  | 70.37  | 70.64  | 70.83  | 70.96  | 70.94  | 69.15  | 69.72  | 68.98  | 69.50  | 70.03  | 70.37  | 70.64  | 70.83  | 70.96  | 70.94  | 69.15  | 69.72  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.55   | 0.58   | 0.61   | 0.64   | 0.67   | 0.71   | 0.74   | 0.75   | 0.55   | 0.58   | 0.55   | 0.58   | 0.61   | 0.64   | 0.67   | 0.71   | 0.74   | 0.75   | 0.55   | 0.58   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.39  | 11.61  | 11.84  | 12.04  | 12.24  | 12.44  | 12.63  | 12.66  | 11.40  | 11.60  | 11.39  | 11.61  | 11.84  | 12.04  | 12.24  | 12.44  | 12.63  | 12.66  | 11.40  | 11.60  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.12   | 0.12   | 0.13   | 0.14   | 0.14   | 0.15   | 0.16   | 0.16   | 0.12   | 0.12   | 0.12   | 0.12   | 0.13   | 0.14   | 0.14   | 0.15   | 0.16   | 0.16   | 0.12   | 0.12   |
| FeO                            | 5.25   | 5.51   | 5.79   | 6.07   | 6.36   | 6.66   | 6.98   | 7.05   | 5.24   | 5.50   | 5.25   | 5.51   | 5.79   | 6.07   | 6.36   | 6.66   | 6.98   | 7.05   | 5.24   | 5.50   |
| MgO                            | 3.73   | 3.83   | 4.13   | 4.34   | 4.55   | 4.77   | 5.00   | 5.05   | 3.73   | 3.92   | 3.73   | 3.83   | 4.13   | 4.34   | 4.55   | 4.77   | 5.00   | 5.05   | 3.73   | 3.92   |
| CaO                            | 0.84   | 0.86   | 0.88   | 0.89   | 0.90   | 0.89   | 0.88   | 0.88   | 0.84   | 0.85   | 0.84   | 0.86   | 0.88   | 0.89   | 0.90   | 0.89   | 0.88   | 0.88   | 0.84   | 0.85   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.97   | 0.85   | 0.75   | 0.65   | 0.55   | 0.48   | 0.41   | 0.41   | 0.93   | 0.81   | 0.97   | 0.85   | 0.75   | 0.65   | 0.55   | 0.48   | 0.41   | 0.41   | 0.93   | 0.81   |
| K <sub>2</sub> O               | 2.55   | 2.53   | 2.50   | 2.44   | 2.37   | 2.27   | 2.15   | 2.12   | 2.49   | 2.42   | 2.55   | 2.53   | 2.50   | 2.44   | 2.37   | 2.27   | 2.15   | 2.12   | 2.49   | 2.42   |
| H <sub>2</sub> O               | 5.63   | 4.51   | 3.35   | 2.43   | 1.58   | 0.80   | 0.09   | 0.00   | 5.48   | 4.35   | 5.63   | 4.51   | 3.35   | 2.43   | 1.58   | 0.80   | 0.09   | 0.00   | 5.48   | 4.35   |
| Total                          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| #mg                            | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.416  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.417  | 0.416  | 0.416  |
| id                             | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7     | M8     | M1     | M2     | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M6     | M7     | M8     | M1     | M2     |
| SiO <sub>2</sub>               | 54.28  | 59.06  | 59.46  | 63.52  | 65.25  | 66.90  | 68.31  | 72.81  | 51.20  | 58.26  | 54.28  | 59.06  | 59.46  | 63.52  | 65.25  | 66.90  | 68.31  | 72.81  | 51.20  | 58.26  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 6.60   | 7.22   | 7.24   | 7.94   | 8.23   | 8.52   | 8.78   | 9.86   | 6.52   | 7.48   | 6.60   | 7.22   | 7.24   | 7.94   | 8.23   | 8.52   | 8.78   | 9.86   | 6.52   | 7.48   |
| FeO                            | 0.15   | 0.15   | 0.15   | 1.13   | 1.13   | 1.60   | 2.02   | 2.54   | 0.19   | 0.28   | 0.15   | 0.15   | 0.15   | 1.13   | 1.13   | 1.60   | 2.02   | 2.54   | 0.19   | 0.28   |
| MgO                            | 0.06   | 0.05   | 0.05   | 0.18   | 0.26   | 0.34   | 0.41   | 0.63   | 0.10   | 0.10   | 0.06   | 0.05   | 0.05   | 0.18   | 0.26   | 0.34   | 0.41   | 0.63   | 0.10   | 0.10   |
| CaO                            | 0.40   | 0.40   | 0.45   | 0.68   | 0.81   | 0.96   | 1.10   | 1.45   | 0.43   | 0.60   | 0.40   | 0.40   | 0.45   | 0.68   | 0.81   | 0.96   | 1.10   | 1.45   | 0.43   | 0.60   |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.87   | 3.13   | 2.85   | 2.69   | 2.39   | 2.03   | 1.68   | 1.26   | 4.51   | 3.32   | 3.87   | 3.13   | 2.85   | 2.69   | 2.39   | 2.03   | 1.68   | 1.26   | 4.51   | 3.32   |
| K <sub>2</sub> O               | 1.66   | 2.90   | 3.12   | 3.54   | 3.86   | 4.22   | 4.57   | 5.18   | 1.14   | 2.89   | 1.66   | 2.90   | 3.12   | 3.54   | 3.86   | 4.22   | 4.57   | 5.18   | 1.14   | 2.89   |
| H <sub>2</sub> O               | 33.00  | 27.05  | 26.62  | 21.00  | 18.66  | 16.43  | 14.53  | 7.68   | 35.92  | 27.07  | 33.00  | 27.05  | 26.62  | 21.00  | 18.66  | 16.43  | 14.53  | 7.68   | 35.92  | 27.07  |
| Total                          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| ASI                            | 1.114  | 1.115  | 1.117  | 1.149  | 1.166  | 1.182  | 1.195  | 1.232  | 1.073  | 1.098  | 1.114  | 1.115  | 1.117  | 1.149  | 1.166  | 1.182  | 1.195  | 1.232  | 1.073  | 1.098  |
| #mg                            | 0.280  | 0.268  | 0.268  | 0.285  | 0.324  | 0.363  | 0.399  | 0.357  | 0.338  | 0.271  | 0.280  | 0.268  | 0.268  | 0.285  | 0.324  | 0.363  | 0.399  | 0.357  | 0.338  | 0.271  |

Supplementary Data 5

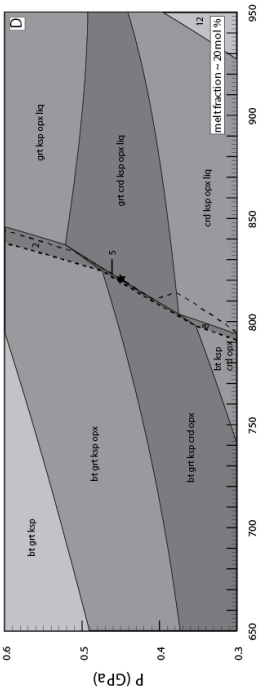
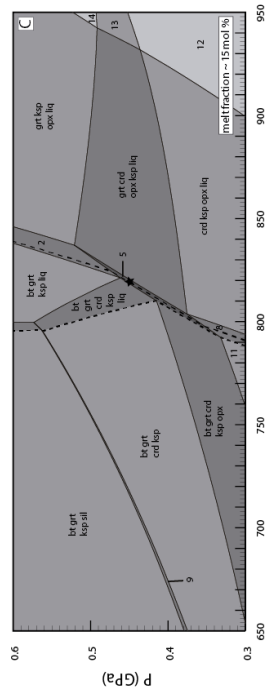
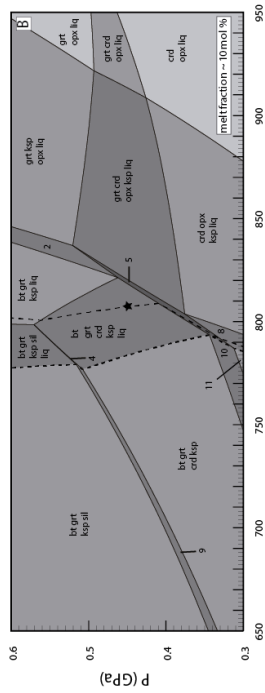
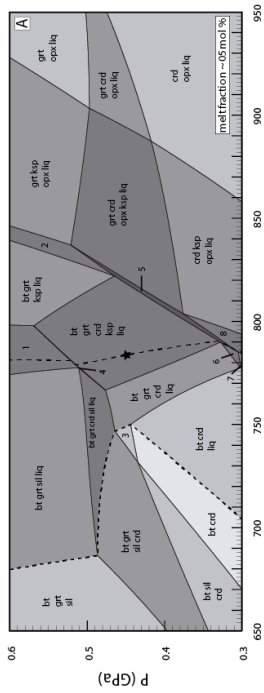
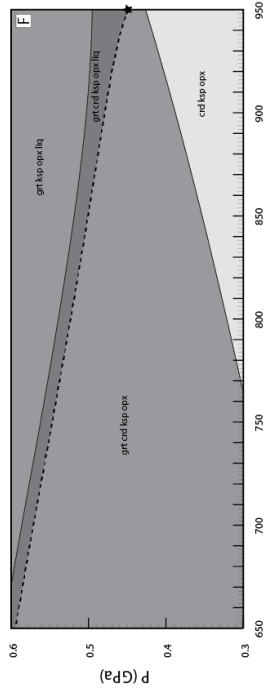
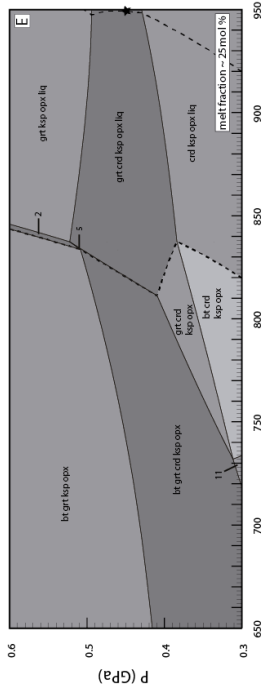
Supplementary data - table 5: Volume of melt produced under closed-system and open-system partial melting for graywacke and shale protoliths

|                |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
|----------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| Graywacke      |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Closed-system  |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Melting        |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.45 | 690.62  | 699.52 | 749.12 | 779.38 | 799.52 | 817.68 | 819.77 | 836.43 | 859.02 | 882.598 | 910.59 | 934.62 | 950.00 |
| T (°C)         | 5.00    | 5.00   | 5.00   | 10.00  | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 35.00  | 40.00   | 45.00  | 50.00  | 53.53  |
| Φ (mol. %)     | solidus | 3.39   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.7  | 684.755 | 685.80 | 743.69 | 782.53 | 812.51 | 845.60 | 857.81 | 890.52 | 915.06 | 938.794 | 950.00 |        |        |
| T (°C)         | 5.00    | 2.75   | 5.00   | 10.00  | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 35.00  | 40.00   | 42.06  |        |        |
| Φ (mol. %)     | solidus | 0.03   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.9  | 681.146 | 681.56 | 752.03 | 781.94 | 825.07 | 865.09 | 897.32 | 930.47 | 950.00 |         |        |        |        |
| T (°C)         | 5.00    | 1.64   | 5.00   | 1.00   | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 33.81  |         |        |        |        |
| Φ (mol. %)     | solidus | 1.64   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Open-system    |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Melting        |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.45 | 690.62  | 699.52 | 749.12 | 783.66 | 807.10 | 819.09 | 820.36 | 949.35 | 950.00 |         |        |        |        |
| T (°C)         | 5.00    | 3.39   | 8.39   | 13.39  | 18.39  | 23.39  | 28.39  | 33.39  | 33.40  |         |        |        |        |
| Φ (mol. %)     | solidus | 3.39   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.7  | 684.755 | 685.80 | 743.69 | 787.50 | 835.80 | 855.33 | 950.00 |        |        |         |        |        |        |
| T (°C)         | 5.00    | 0.03   | 0.08   | 0.13   | 0.18   | 0.23   | 0.24   |        |        |         |        |        |        |
| Φ (mol. %)     | solidus | 0.03   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.9  | 681.146 | 681.56 | 752.03 | 784.68 | 854.08 | 950.00 |        |        |        |         |        |        |        |
| T (°C)         | 5.00    | 0.02   | 0.07   | 0.12   | 0.17   | 0.21   |        |        |        |         |        |        |        |
| Φ (mol. %)     | solidus | 0.02   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Shale          |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Closed-system  |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Melting        |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.45 | 670.01  | 670.97 | 672.07 | 675.26 | 725.81 | 765.92 | 780.20 | 785.87 | 801.78 | 819.353 | 834.05 | 846.61 | 876.80 |
| T (°C)         | 5.00    | 5.00   | 10.00  | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 35.00  | 40.00  | 45      | 50.00  | 55.00  | 60.00  |
| Φ (mol. %)     | solidus | 5.00   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.7  | 681.538 | 683.85 | 707.13 | 720.13 | 766.02 | 787.93 | 805.96 | 822.09 | 836.13 | 848.258 | 864.81 | 881.57 | 923.28 |
| T (°C)         | 5.00    | 5.00   | 10.00  | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 35.00  | 40.00  | 45      | 50.00  | 55.00  | 60.00  |
| Φ (mol. %)     | solidus | 5.00   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.9  | 678.041 | 691.08 | 743.46 | 753.37 | 767.38 | 794.04 | 817.15 | 837.98 | 861.33 | 885.587 | 905.75 | 920.99 | 950.00 |
| T (°C)         | 5.00    | 5.00   | 10.00  | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 35.00  | 40.00  | 45      | 60.00  | 55.00  | 57.00  |
| Φ (mol. %)     | solidus | 5.00   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Open-system    |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| Melting        |         |        |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.45 | 670.01  | 670.98 | 675.09 | 679.72 | 783.82 | 847.23 | 880.75 | 907.24 | 929.63 | 949.123 | 950.00 |        |        |
| T (°C)         | 5.00    | 5.00   | 10.00  | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 35.00  | 40.00  | 45      | 45.22  |        |        |
| Φ (mol. %)     | solidus | 5.00   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.7  | 681.56  | 683.90 | 719.16 | 750.23 | 773.95 | 800.46 | 826.21 | 950.00 |        |         |        |        |        |
| T (°C)         | 0.00    | 5.00   | 10.00  | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 31.25  |        |         |        |        |        |
| Φ (mol. %)     | 0.00    | 5.00   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |
| P (GPa) = 0.9  | 678.04  | 691.08 | 752.31 | 754.88 | 776.60 | 813.58 | 846.39 | 950.00 |        |         |        |        |        |
| T (°C)         | 5.00    | 5.00   | 10.00  | 15.00  | 20.00  | 25.00  | 30.00  | 35.00  |        |         |        |        |        |
| Φ (mol. %)     | solidus | 5.00   |        |        |        |        |        |        |        |         |        |        |        |

# Supplementary Data 6

Supplementary Data 6 (S6) – Pseudosections of graywacke bulk composition for open-system melting model at 0.45 GPa. Compositions used in calculation of each section are presented below the diagrams

- Mineral assemblages  
(+ Qtz, pl and ilm)
- 01 – bt grt ksp sil liq;
  - 02 – bt grt ksp opx liq;
  - 03 – bt grt crd;
  - 04 – bt grt crd ksp sil liq;
  - 05 – bt grt crd ksp opx liq;
  - 06 – bt grt crd opx liq;
  - 07 – bt crd opx liq;
  - 08 – bt crd ksp opx liq;
  - 09 – bt grt crd ksp sil;
  - 10 – bt grt crd ksp opx;
  - 11 – bt crd ksp opx;
  - 12 – crd opx liq;
  - 13 – grt crd opx liq;
  - 14 – grt opx liq;



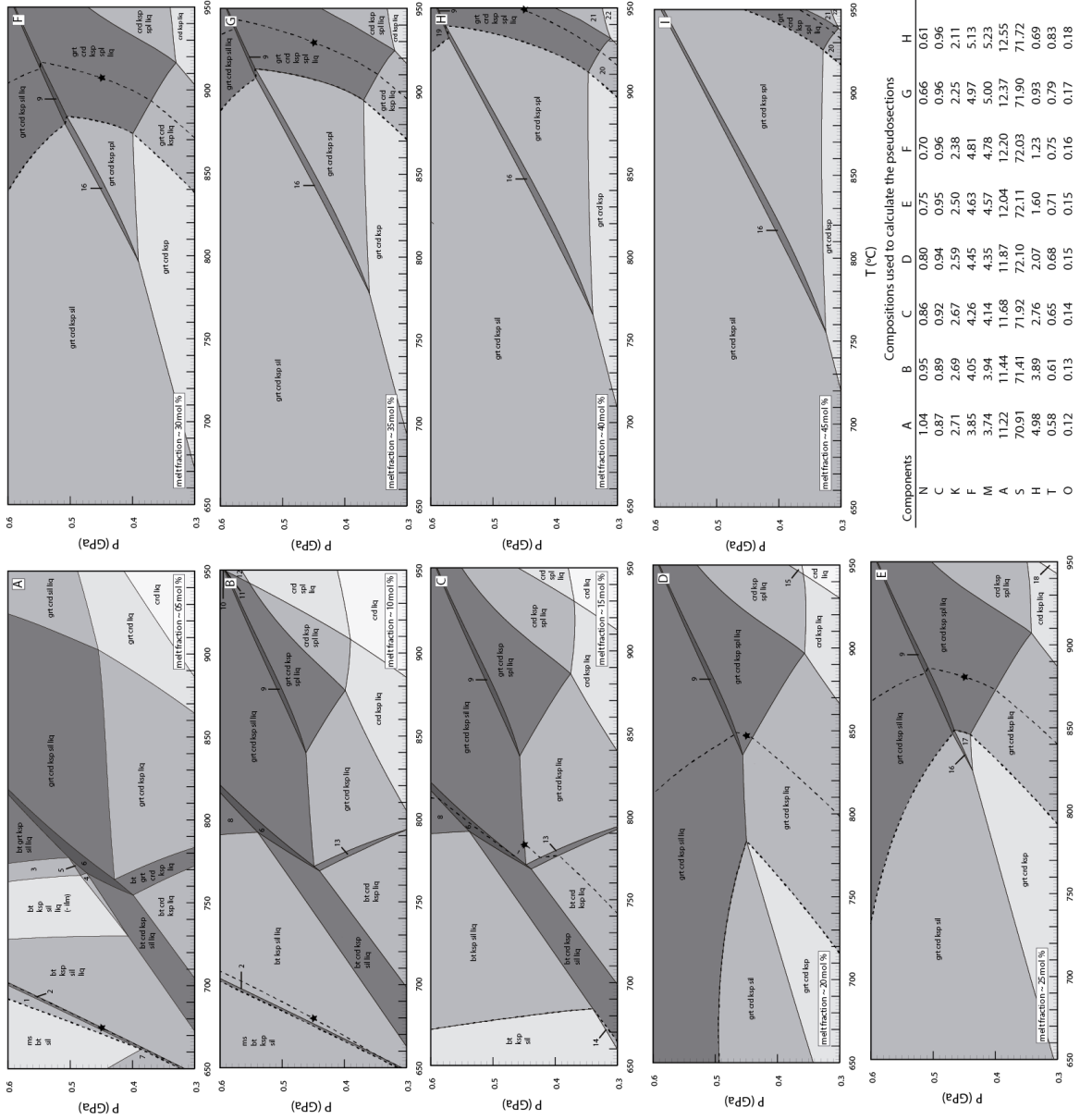
Compositions used to calculate the pseudosections

| Components | A     | B     | C     | D     | E     | F     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N          | 2.86  | 2.86  | 2.86  | 2.86  | 2.86  | 2.88  |
| C          | 3.09  | 3.23  | 3.37  | 3.52  | 3.67  | 3.82  |
| K          | 1.64  | 1.54  | 1.43  | 1.32  | 1.19  | 1.03  |
| F          | 5.39  | 5.63  | 5.86  | 6.10  | 6.35  | 6.35  |
| M          | 3.48  | 3.65  | 3.81  | 3.98  | 4.15  | 4.31  |
| A          | 9.48  | 9.56  | 9.65  | 9.74  | 9.83  | 9.87  |
| S          | 70.49 | 70.61 | 70.68 | 70.73 | 70.77 | 70.55 |
| H          | 2.81  | 2.13  | 1.50  | 0.89  | 0.26  | 0.04  |
| T          | 0.65  | 0.68  | 0.71  | 0.75  | 0.79  | 0.83  |
| O          | 0.11  | 0.12  | 0.12  | 0.13  | 0.13  | 0.14  |

# Supplementary Data 7

Supplementary Data 7 (S7) – Pseudosections of shale bulk composition for open-system melting model at 0.45 GPa. Compositions used in calculation of each section are presented below the diagrams.

- Mineral assemblages  
(+ qtz, pl and ilm)
- 1 - ms bt sill liq
  - 2 - ms bt ksp liq
  - 3 - bt grt ksp sill liq (-ilm)
  - 4 - bt crd ksp sill liq (-ilm)
  - 5 - bt grt crd ksp sill liq (-ilm)
  - 6 - bt grt crd ksp sill liq
  - 7 - ms bt ksp sill
  - 8 - bt grt ksp sill liq
  - 9 - grt crd ksp sill spl liq
  - 10 - grt crd sill liq
  - 11 - grt crd sill spl liq
  - 12 - grt crd spl liq
  - 13 - bt grt crd ksp liq
  - 14 - bt crd ksp sill
  - 15 - crd spl liq
  - 16 - grt crd ksp sill spl
  - 17 - grt crd ksp spl
  - 18 - crd liq
  - 19 - grt crd ksp sill liq
  - 20 - grt crd ksp liq
  - 21 - crd ksp spl liq
  - 22 - crd spl liq

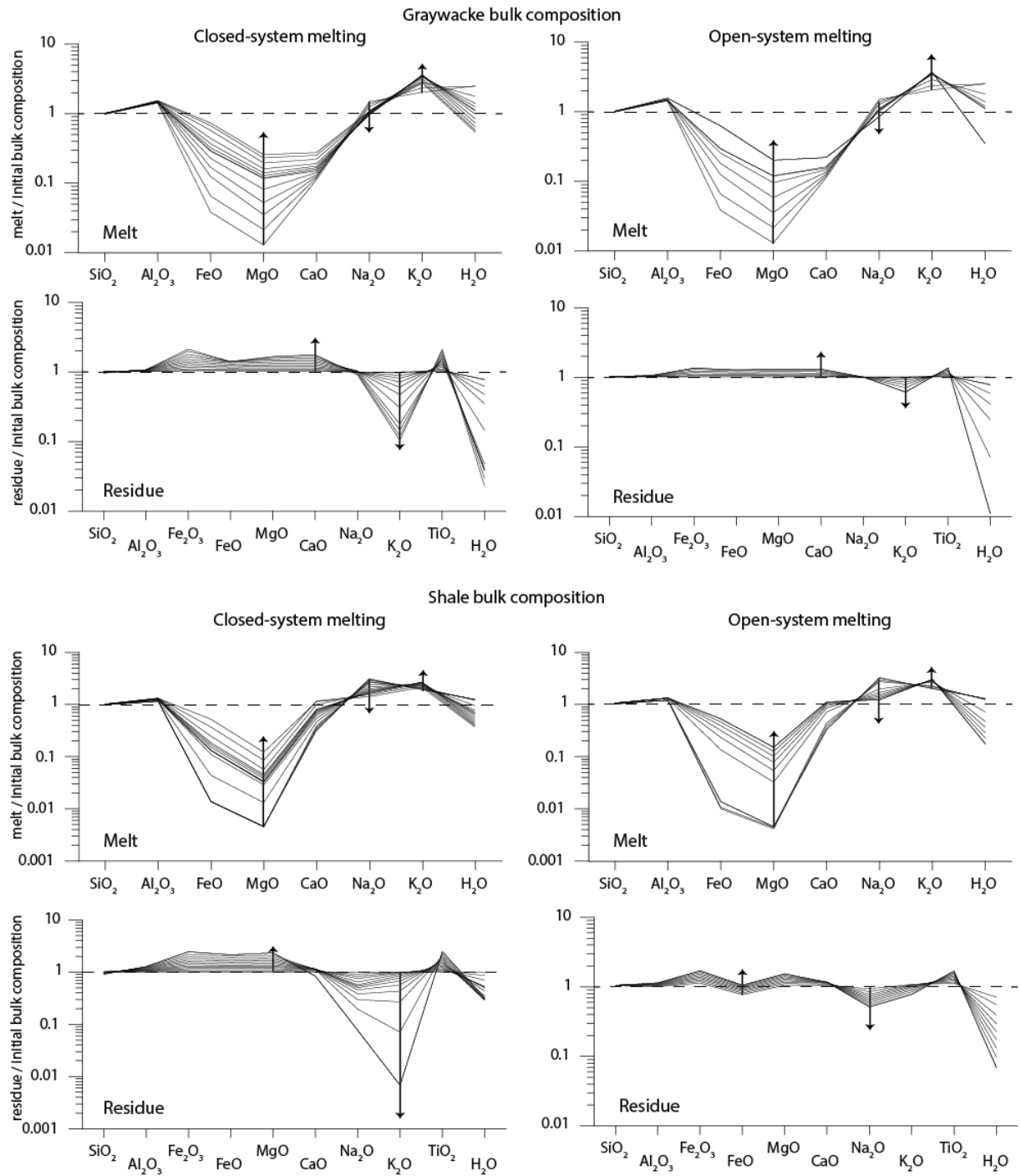


Compositions used to calculate the pseudosections

| Components | A     | B     | C     | D     | E     | F     | G     | H     | I     |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N          | 1.04  | 0.95  | 0.86  | 0.80  | 0.75  | 0.70  | 0.66  | 0.61  | 0.57  |
| C          | 0.87  | 0.89  | 0.92  | 0.94  | 0.95  | 0.96  | 0.96  | 0.96  | 0.96  |
| K          | 2.71  | 2.69  | 2.67  | 2.59  | 2.50  | 2.38  | 2.25  | 2.11  | 1.96  |
| F          | 3.85  | 4.05  | 4.26  | 4.45  | 4.63  | 4.81  | 4.97  | 5.13  | 5.27  |
| M          | 3.74  | 3.94  | 4.14  | 4.35  | 4.57  | 4.78  | 5.00  | 5.23  | 5.46  |
| S          | 11.22 | 11.44 | 11.68 | 11.87 | 12.04 | 12.20 | 12.37 | 12.55 | 12.72 |
| A          | 70.91 | 71.41 | 71.92 | 72.10 | 72.11 | 72.03 | 71.90 | 71.72 | 71.50 |
| H          | 4.98  | 3.89  | 2.76  | 2.07  | 1.60  | 1.23  | 0.93  | 0.69  | 0.49  |
| T          | 0.58  | 0.61  | 0.65  | 0.68  | 0.71  | 0.75  | 0.79  | 0.83  | 0.88  |
| O          | 0.12  | 0.13  | 0.14  | 0.15  | 0.15  | 0.16  | 0.17  | 0.18  | 0.19  |

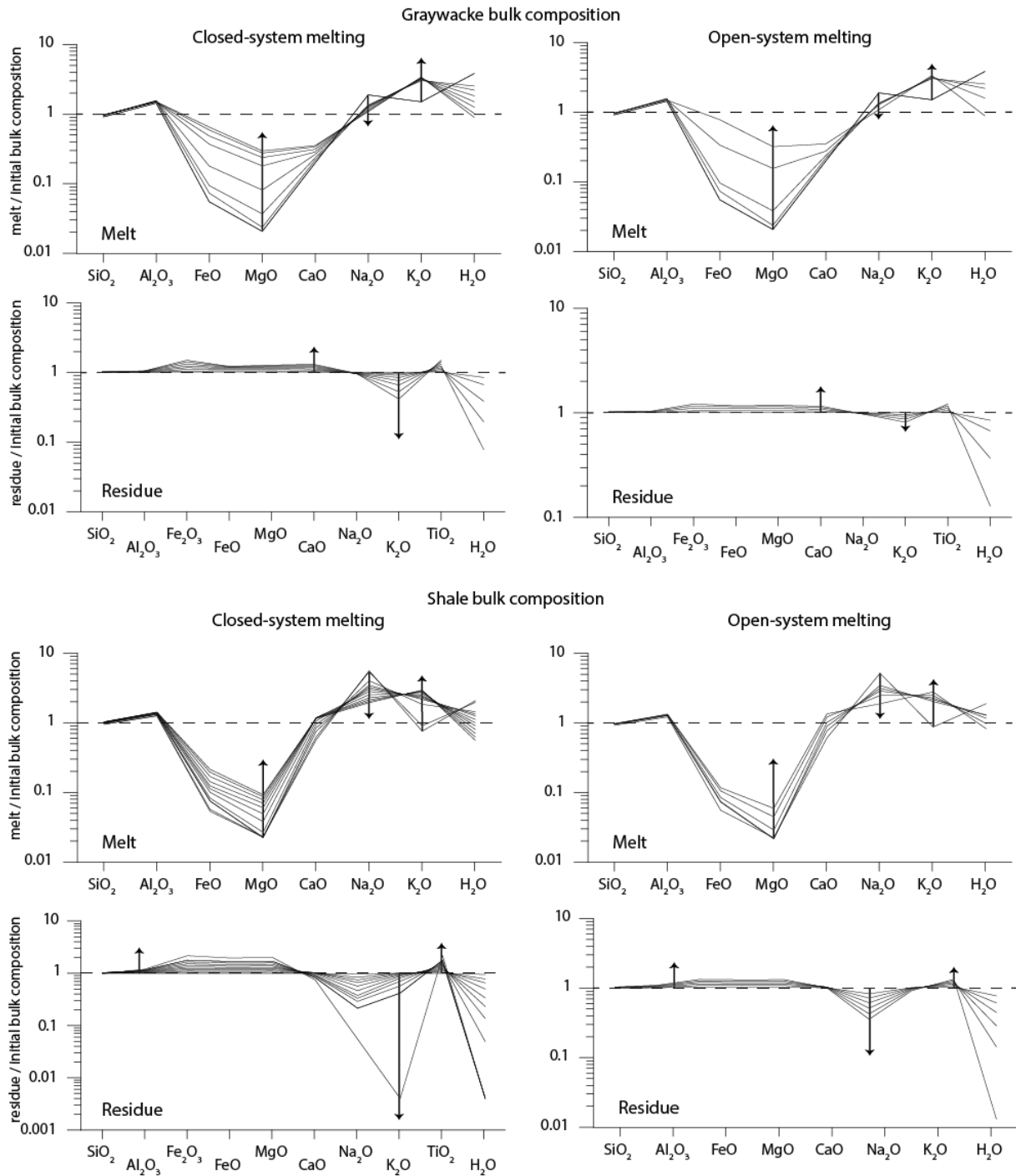
Supplementary Data 8

Supplementary Data 8 (S8) – Binary diagram of melt and residue compositions generated at 0.45 GPa normalized by initial bulk composition. Black arrows indicate compositional variation as melt fraction increase.



Supplementary Data 9

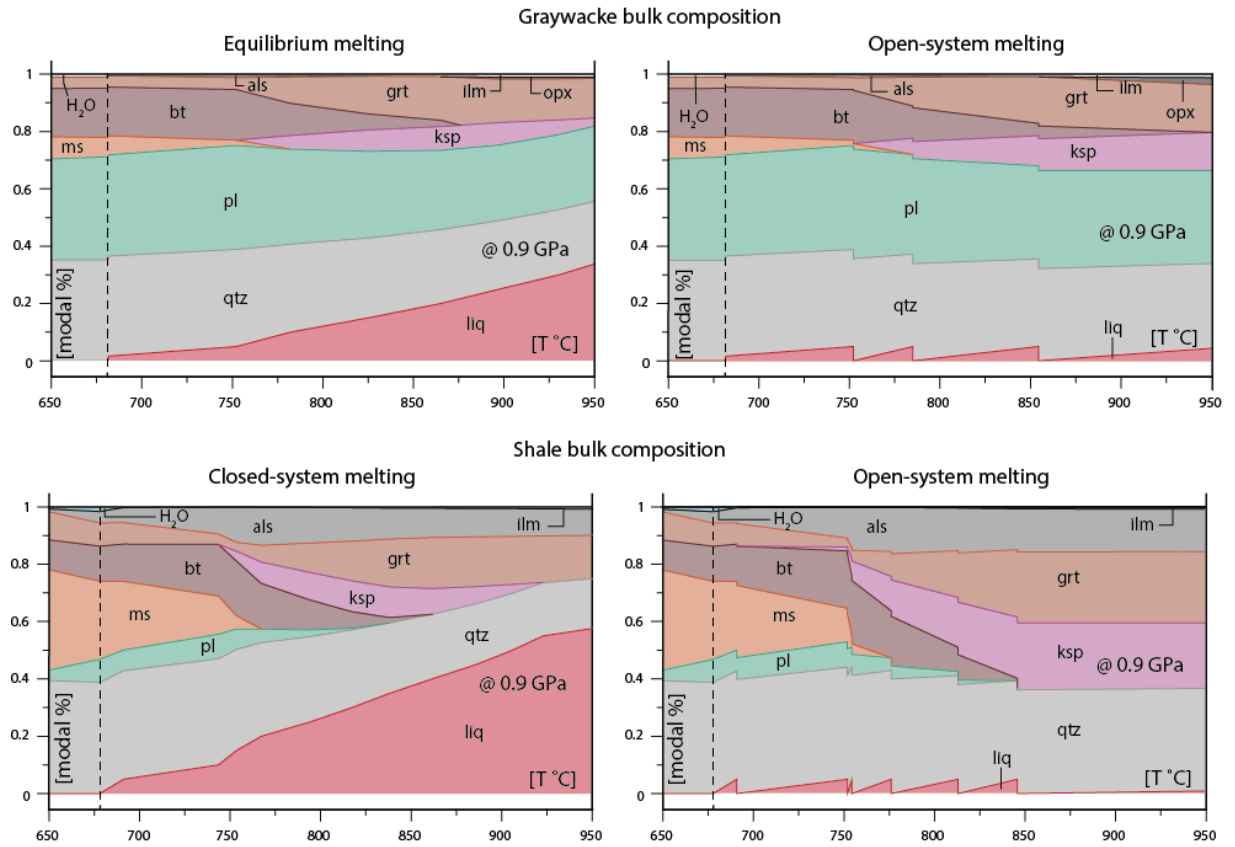
Supplementary Data 9 (S9) – Binary diagram of melt and residue compositions generated at 0.9 GPa normalized by initial bulk composition. Black arrows indicate compositional variation as melt fraction increase.





Supplementary Data 10

Supplementary Data 10 (S10) – Binary diagram of modal proportion of mineral phases and melt vs. T (°C) for 0.9 GPa.  
 Black dashed line indicates the solidus position





## ANEXO II

### **Partial melting of granodiorite, a common igneous rock: insights from Ediacaran granulite-facies metamorphism in the Itatins Complex, Ribeira Belt, Brazil**

M. Pavan<sup>1,2,3\*</sup>, E. W. Sawyer<sup>3</sup>, R. Moraes<sup>2</sup> and F. M. Faleiros<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CPRM – Geological Survey of Brazil, Rua Costa 55, Consolação, CEP 01304-010, São Paulo SP, Brazil.

<sup>2</sup>Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Rua do Lago 562, CEP 05508-080, São Paulo SP, Brazil.

<sup>3</sup>UQAC - Université du Québec à Chicoutimi, 555 Boulevard de l'Université, Chicoutimi, QC, G7H 2B1, Canada

\* Corresponding author: mauriciopsilva@gmail.com

E-mail addresses: mauriciopsilva@gmail.com; ewsawyer@uqac.ca; rmoraes@usp.br; ffalei@usp.br

#### **Abstract**

In the Southern Ribeira Belt (Brazil), the Itatins Complex, composed by migmatites ortho- and paraderived, records a granulite facies metamorphism. Our work focused the ortho-derived migmatite, which displays several features indicative of partial melting, grading from in-situ melting (veins and lenses) to accumulation of leucosome, forming diatexite pods. The unit is comprised by a residual neosome (with unsegregated leucosome), described as biotite felsic granulite, and a leucocratic neosome, referred to as leucosome. Phase equilibria modelling were used to evaluate if the bulk composition of a probable protolith (granodiorite) could replicate the mineral assemblage described in the biotite felsic granulite and the composition of melt and residue formed by partial melting. Isopleth thermobarometry of plagioclase, biotite and orthopyroxene gave *P-T* conditions of 0.7-1.0 GPa and 845-882 °C. The volume of melt generated by the bulk composition (10 mol %) was lower than the amount estimated in outcrops (around 50%). *T-X<sub>H2O</sub>* pseudosection shows that an increase in H<sub>2</sub>O content will improve the fertility of the bulk composition, to volumes similar to 50 mol %. The melt compositions determined for partial melting in open- and closed-system by THERMOCALC are granitic, calc-alkaline and peraluminous. The SiO<sub>2</sub> contents are between 52.02 mol % and 77.27 mol % and show *X<sub>Fe</sub>* values of 0.68 and 0.86. In K<sub>2</sub>O vs. Na<sub>2</sub>O+CaO, K<sub>2</sub>O vs. *X<sub>Fe</sub>* and K-FeO+MgO-Na<sub>2</sub>O+CaO samples from Itatins

Complex plot in the direction of the trends for melt and residue compositions from modelling. The variation between model composition and real rocks are interpreted as a result from interaction of melt with the residual counterpart. REE trends of the biotite felsic granulite shows depleted values of HREE to the JG-1 compositions (all normalized by chondritic composition), with leucosome enriched in LREE. Zircon REE patterns in rims analyses shows patterns interpreted as metamorphic recrystallization. U-Pb zircon Concordia ages mark the protolith formation during the Paleoproterozoic ( $2137.2 \pm 4.6$  Ma) and the metamorphic recrystallization during the Neoproterozoic ( $628.2 \pm 4.6$  Ma and  $605.1 \pm 4.0$  Ma). The age interval for the metamorphism pre-dates the intense granitic magmatism that affected the Southern and Central Ribeira Belt.

*Keywords:* partial melting processes; forward modelling; granulite-facies migmatites;

## **1. Introduction**

The study of high-grade terranes where migmatites and granulites have formed from igneous protoliths is not typically done using forward modelling (Powell & Holland, 2008). The majority of studies focused on characterisation and evaluation of the processes of crustal reworking through petrography, geochemistry, mineral chemistry, geochemical modelling and geochronology (e.g. Mogk, 1992; Sawyer, 1998, 2010; Slagstad *et al.*, 2005; Carvalho *et al.*, 2016). Forward modelling allows the determination, or estimation, of the *P-T* conditions, an evaluation of the fertility of the protolith and examination of how the composition of the anatectic melt changes during the partial melting. This method has been widely applied to the study of metasedimentary protoliths allowing the investigation about influence and control over partial melting of several aspects such as the intensive and extensive variables, the stable mineral assemblages, variation of the mineral assemblage, chemical composition of minerals and their relation to *P* and *T* changes and rock fertility. All these parameters permit unravelling many aspects of the petrological, tectonic and chemical evolution of these rocks. The application of this method to the study of mafic rocks has guided recent improvements in activity models for minerals (Diener *et al.*, 2007) and even for the investigation of partial melting of mafic-protolith and their derived melts (Green *et al.*, 2016).

Papers discussing how either a rock, or an experimental or a theoretical chemical system, will behave during the partial melting and especially how the residual mineral assemblage responds to melt extraction (White & Powell, 2002; Yakymchuk & Brown 2014), or to the infiltration of melt (e.g.

Koblinger & Pattison, 2017) have provided new perspectives on how such complex problems can be tackled and evaluated and understood. The application of forward modelling in phase equilibria diagrams (*i.e.* pseudosections) allows the estimation of the composition of melt and residuum (Palin *et al.*, 2016; Pavan, Moraes & Sawyer, submitted), and permits the evaluation of its evolving paths during partial melting and how retrograde assemblages will interact with the melt phase along the cooling path.

This paper presents the results of forward modelling of the partial melting of an igneous protolith of granodiorite bulk composition, with an analysis of how the anatectic melt and residuum compositions change as partial melting advances and how partial melting in an open-system will control melt fertility. The results are compared to the granulite-facies migmatitic orthogneiss from the Itatins Complex (Silva *et al.*, 1977, 1981) in the southern Ribeira Belt, Brazil, to understand how natural partial melting have affected and modified these rocks. In addition to the modelling, U-Pb zircon geochronology was applied to identify the age of the protolith and the metamorphic event. This information is going to permit the correlation of the Itatins Complex with other granulite-facies rocks of the area.

## 2. Geological Setting

The Ribeira Belt comprises with the Araçuaí, Dom Feliciano and São Gabriel Belts the Mantiqueira Province (Almeida *et al.*, 1977 and 1981 – fig. 1A), a Neoproterozoic (ca. 800-560 Ma) Brasiliano-Pan African system of orogens related with the assembly of West Gondwana (Brito Neves *et al.*, 1999). This tectonic province extends for about 3000 km along the Brazilian east coast, running alongside the eastern borders of the São Francisco and Paranapanema Cratons, the latter is now completely covered by the Parana Basin (Heilbron *et al.*, 2004; Mantovani & Brito Neves, 2005). The Ribeira Belt displays NE-SW structural trend and includes several terranes with ages that range from Archean to Neoproterozoic with widespread Ediacaran arc-related to post-collision granitoids emplaced across the belt (Basei *et al.*, 1992; Campanha & Sadowski, 1999; Janasi *et al.*, 2001, 2015; Campanha *et al.*, 2008, 2015, 2016; Siga Jr *et al.*, 2009, 2011a, 2011b; Faleiros *et al.*, 2011, 2016; Vlach *et al.*, 2011; Alves *et al.*, 2013, 2016; Henrique-Pinto *et al.*, 2015). Its central part is segmented by a crustal-scale transcurrent shear-zone system (Faleiros *et al.*, 2011 and references therein) that is related to the accretion and dispersion of tectonostratigraphic terranes. The development of pull-apart basins along the mobile belt occurred during the transition from Proterozoic to Phanerozoic times (*e.g.* Almeida *et al.*, 2012). Nowadays it is considered that the southern portion of the Ribeira Belt comprises several different tectonostratigraphic terranes (*e.g.* Faleiros *et al.*, 2011, 2016). Assuming this scenario, the region surrounding the Itatins Complex encompasses five terranes: (i) Embu, (ii) Curitiba, (iii) Luis Alves Craton, (iv) Paranaguá and (v) Costeiro (figure 1B). A general view of the tectonic framework, based on the structural geology and geochronological data, is presented for the central and southern parts of Mantiqueira Province (Passarelli *et al.*, 2004, 2007, 2011). The collision of Embu and Curitiba terranes occurred between 620 and 600

Ma, and the juxtaposition of the Costeiro Terrane with the combined Embu and Curitiba terranes occurred later, around 580 to 570 Ma. The K-Ar and Ar-Ar data from biotite supports the assumption that the northeast boundary of Curitiba Terrane remained hot for 200 Ma after the collision (Passarelli *et al.*, 2011).

### 3. Analytical methods

#### Whole-rock chemistry

Analytical data obtained to support this work comprised whole-rock and mineral chemistry (major oxides and trace elements), and U-Pb isotopic ratios in zircon. The whole-rock analysis of 7 representative samples of the biotite felsic granulite and its leucosome were performed at the NAP-Geoanalítica-USP Facility, in the Geosciences Institute of University of Sao Paulo. Major oxide concentrations were determined using a XRF equipment from Philips, model PW2400, following the protocol described in Mori *et al.*, (1999). The concentrations of trace elements were determined by a quadrupole ICP-MS from PerkinElmer/Sciex, model ELAN 6100DRC, following the protocol from Navarro *et al.* (2008).

#### Mineral chemistry

The concentrations of major oxides in biotite, orthopyroxene, plagioclase and K-feldspar from five samples were determined at: (i) EPMA Lab from the Geosciences Institute of the University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Brazil, using a EPMA equipment from CAMECA, model SX Five, and (ii) NAP Geoanalítica-USP Facility using a JXA-8530F – Hyperprobe Field Emission Electron Probe Microanalyzer (FE-EPMA) from JEOL. Analytical parameters for the analyses were: 15kV voltage, 20nA beam current and spot with 5µm diameter.

Trace elements analyses in zircon were determined at the LA-ICP-MS laboratory from the Geosciences Department of University of New Brunswick (UNB), Canada. The laboratory is equipped with a laser ablation system from Resonetics, model M-50-LR, 193 nm ArF excimer, coupled with an Agilent 7700x quadrupole ICP-MS. The ablation of the crystal was done during 40s, with a 19 µm-diameter spot, at a 4Hz repetition rate and 5 J/cm<sup>2</sup> fluency. The isotopes determined during trace element run were: <sup>31</sup>P, <sup>45</sup>Sc, <sup>89</sup>Y, <sup>139</sup>La, <sup>140</sup>Ce, <sup>141</sup>Pr, <sup>146</sup>Nd, <sup>147</sup>Sm, <sup>153</sup>Eu, <sup>157</sup>Gd, <sup>159</sup>Tb, <sup>163</sup>Dy, <sup>165</sup>Ho, <sup>166</sup>Er, <sup>169</sup>Tm, <sup>172</sup>Yb, <sup>175</sup>Lu, <sup>178</sup>Hf, <sup>208</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U. The equipment calibration was done using NIST-610 and NIST-612 reference materials.

## U-Pb geochronology

The U-Pb analyses were performed in zircon mounts at the Geochronological Research Center (CPGEO), in the Geosciences Institute of University of São Paulo. Prior to the analysis, cathodoluminescence images of zircons crystals were obtained using a Quanta 250FEG electron microscope with Mono CL+3 cathodoluminescence spectroscopy (Centaurus). With the images we selected the best spot for analysis in each crystal, taking into account the presence of zoned cores surrounded by bright or dark rims. The U-Pb determination were done using a laser ablation system (ArF excimer – 193nm) coupled to a Finnigan ICP-MS, model Neptune. The ablation was done with a 32µm spot, with a frequency of 6Hz and intensity of 7mJ. The uncertainties were controlled by measurements of the international standard JG-1. Dates were calculated using the software ISOPLOT 3.0 (Ludwig, 2003).

## 4. Itatins Complex

The Itatins Complex is located on the northeast border of the Curitiba Terrane (fig. 2). It is enclosed to the north by a steep-dipping dextral shear zone, called the Itariri Shear Zone and Rio do Peixe normal fault to the east (fig. 2). Quaternary marine sedimentary deposits cover its southern border. The Itatins Complex is composed of two main rock types of granulite-facies migmatites: a biotite felsic granulite, derived from igneous protolith, and a stromatic diatexitic paragneiss. Both units show local gradients in the contained melt fraction, with rocks that preserve a gneiss structure, grading to domains where leucosome has accumulated (*i.e.* diatexite). Rock types of minor abundance in the complex include mafic granulite, calc-silicate rocks, and lenses of ultramafic rocks. Azevedo Sobrinho (1995) determined a temperature range for the metamorphic event of 760-790 °C by means of the orthopyroxene-clinopyroxene thermometer using calibrations by Wood & Banno (1973) and Wells (1977). Isotopic and geochronological data from Picanço (1994) and Picanço *et al.* (1998) indicate the source material for the biotite felsic granulite was extracted from the mantle at 2.5 Ga (Sm-Nd model ages), and U-Pb dating from euhedral zircon grains has yielded a crystallization age of  $2.173 \pm 18$  Ma. Both the Rb-Sr and Sm-Nd data from rocks of the Itatins Complex indicate the chemical-isotopic systems were modified around 600 Ma due to granulite-facies metamorphism (Picanço *et al.*, 1998). Further geochronological studies indicate a Paleoproterozoic (*ca.* 1.9 to 2.2 Ga) origin for some migmatites of the northeasternmost Curitiba terrane affected by a high-grade metamorphism during the Neoproterozoic at *ca.* 750 to 580 Ma (Passarelli *et al.*, 2004). The complex is cut by diabase dykes with N-S and NE-SW direction, which are from Cretaceous (Comin-Chiaramonti *et al.*, 1983; Coutinho, 2008).

## 5. Petrography and Chemistry

The nomenclature adopted for the description of the migmatites from Itatins Complex follows the terminology proposed by Sawyer (2008). The biotite granulite is characterized by a *mélange* of residual neosome and unsegregated leucosome. The leucocratic portions that can be separated from the biotite granulite, in all its forms, are referred as leucosome.

In general, the rock displays a dominant stromatic to net structure, defined by a penetrative steeply dipping ENE-WSW-trending foliation. The banding is marked by the alternation of mm-thick layers with different modal amounts of mafic minerals. Leucosomes display features indicating a continuous process of melt extraction and crystallization with the formation of lenses of leucosome, grading up to veins and dykes feeding accumulation pods. Figure 3 presents an overview of one of the outcrops in the Costão Beach, Peruíbe City (check fig. 2 for outcrop location) and the distribution of leucosome structures as: (i) cm-thick, high aspect ratio layers parallel to foliation/banding (fig. 3A-a); (ii) small lenses (5-10 cm) parallel to foliation, yielding a characteristic patchy structure (fig.s 3A-b and 3B); (iii) cm-thick layers in N-S fractures and shear-bands (fig. 3A-c and 3B-C), indicating the development of “channels” or dykes; (iv) hololeucocratic dykes that cut across all other structures (fig. 3C); and (v) meter-sized granite pockets – described as diatexite domains (fig. 3A-d and 3D). The foliation readily observed in the residuum is not clearly recognised in the leucosome, which can be interpreted as resulting from the migration of melt controlled by short-range differences in the magnitude of the differential stress. The mafic granulite occurs as partially fragmented, decametric to metric sized blocks, or rafts (fig. 3A), and they will not be discussed further in this work.

### 5.1 Biotite felsic granulite

From the structural point of view, this rock is leucocratic grey gneiss with equigranular to inequigranular fine-grained fabric (0.1 to 1.0 mm). Mineral assemblage comprises orthopyroxene + biotite + quartz + plagioclase with minor amounts of K-feldspar, clinopyroxene, apatite and Ti-Fe phases (modal proportions given in table 1). Zircon and monazite occur as accessory minerals, and hornblende may be sporadically present. Orthopyroxene is classified as ferrosilite ( $\text{En}_{40-47}\text{Fs}_{51-58}\text{Wo}_{0.2-3}$ ) and occurs as subhedral grains with rounded and pointed edges (figure 4A). Textures that support a metamorphic rather than an igneous origin include the rounded inclusions of quartz (figure 4B) and plagioclase in the orthopyroxene and the development of corona-like texture around plagioclase. Orthopyroxene shows weak chemical zoning with Al as 0.040–0.016 a.p.f.u. and  $X_{\text{Mg}}$  ( $\text{Mg}/\text{Mg}+\text{Fe}$ ) = 0.494-0.420 decreasing from core to rim. Late replacement is marked by the formation of fringes of reddish-brown biotite and thin coronas composed of colourless amphibole and hornblende (fig. 4A). Plagioclase occurs as 0.1 to 1.0 mm euhedral to subhedral crystals, and as <0.1 mm euhedral grains when part of a polygonal texture. Plagioclase is weakly zoned with increasing in Ca contents from the cores ( $\text{An}_{28-34}$ ) to the rims ( $\text{An}_{29-}$



38). Larger crystals typically have corroded edges (fig. 4C), which are interpreted to indicate its consumption by melt-forming reactions. Inclusions of K-feldspar ( $Or_{92}$ ) in plagioclase have rectangular forms, but quartz has ellipsoidal shapes. Quartz forms subhedral to anhedral crystals and shows textures such as cusped contacts that preserve very low dihedral angles (fig. 5C) and is interpreted to pseudomorph melt trapped between grains. The progressive textural re-equilibration of quartz films is illustrated by a progressive increase in interfacial angle resulting in rounded corners on quartz mineral films (arrows in fig. 4D). Biotite is dark red, contains exsolutions of ilmenite/rutile and is oriented along the foliation. Clinopyroxene ( $Fs_{33-34}En_{19-25}Wo_{41-48}$ ) occurs as subhedral grains with sharp to rounded edges, interpreted as a primary mafic phase in one sample (CI-013-RA). Orthopyroxene exsolution lamellae are present in almost all of the crystals. A late- to post-metamorphic textural modification and re-equilibration is recognisable as chessboard extinction in quartz grains, and by the development of polygonal textures in the former melt pockets (fig. 4E and F).

## 5.2 Leucosome

Leucosome occurs in four sites (Fig. 3A): as cm-thick lenses, or layers, parallel to the foliation (type a); in cracks along the axial plane of asymmetric folds or cleavage planes (type b); as veins or dykes cross-cutting the previous structures (type c); and as meter-wide domains (type d) interpreted as local sites of melt accumulation. In general, the compositional and textural features of the leucosome in these structures are all similar and so they will be all described together.

The leucosome is a holo- to leucocratic rock, light-coloured, with an inequigranular fabric and medium to coarse grain size, 0.5 to 15.0 mm. The principal mineral assemblage is plagioclase + quartz + K-feldspar, with minor amounts of biotite, orthopyroxene, hornblende, apatite, monazite and zircon. Modal proportions are presented in table 1.

Plagioclase occurs as euhedral to subhedral crystals (1.0 – 15 mm wide). Plagioclase grains from types c and d leucosomes show rounded to sharp edges (fig. 5A and 5). Plagioclase in leucosomes forms small grains, 0.1 to 1.0 mm in size, which commonly displays irregular shapes with both gently curved and sharp edges (fig. 5C). This may be a corroded grain or one that has had its shape modified by the movement of the grain boundaries of the adjacent quartz due to bulging. In general, the composition of plagioclase varies between  $An_{30-33}$  in the core and  $An_{31-35}$  in the rim. A dark grey colour of the plagioclase is related to the presence of tiny spots or needles of iron/titanium phases (fig. 5B), which is a common feature in mafic plutonic and high-grade metamorphic rocks (Smith, 1974; Feinberg *et al.*, 2005; Wenk *et al.*, 2011). Rectangular and rounded inclusions of K-feldspar ( $Or_{88-91}$ ) and quartz also occur in the larger crystals of plagioclase (fig. 5D). Large, individual crystals of K-feldspar ( $Or_{84-91}$ ) are subhedral with corroded or rounded edges, with undulatory extinction and are perthitic with abundant exsolution lamellae. Myrmekite is typically developed at the contacts between grains of K-feldspar and plagioclase. Quartz occurs as subhedral to anhedral crystals, generally forming the groundmass around plagioclase

and K-feldspar. Chessboard and undulatory extinction in quartz indicates high-temperature deformation and textural re-equilibration. Orthopyroxene is sparse and subhedral, but its margins are typically replaced by biotite and chlorite.

Tonalite veins about 2.0 mm in thickness consist of rectangular crystals of plagioclase, anhedral quartz and plates of biotite (figure 4E). They form a net structure in the rock and myrmekite is commonly developed at places where these veins surround crystals of K-feldspar. It also forms leucocratic pockets, >0.1 cm wide, that are interpreted to have been places of melt accumulation (figure 4F). The distribution and composition of these veins and melt pockets are interpreted as representing the infiltration and pooling of a late-stage melt into the rock due to local variations in differential stress.

Zircon is an accessory phase and occurs as prismatic to rounded crystals included in biotite and plagioclase. Zircon has a dark grey colour in thin section and the crystal size varies between 20 to 150  $\mu\text{m}$ . The presence of small, less than 10  $\mu\text{m}$ , zircon grains associated with the exsolutions/inclusions of K-feldspar and quartz in the plagioclase are observed in the leucosome (fig. 4D). This feature also occurs in charnockites from West Uusimaa in Finland, as reported by Touret & Huizenga, (2014), who interpreted this as igneous in origin, resulting from the presence of melt droplets during crystallization of plagioclase.

### 5.3 Modal proportions - QAP

The modal analysis of the biotite felsic granulite and leucosome were performed using an optical microscope, with an analogical point-counter. Due to the heterogeneity of the samples and their fine-grain size, we selected small homogeneous domains (1.0  $\text{cm}^2$ ) in each sample for counting. Results presented in table 1 were plotted in a QAP diagram (fig. 6).

In general, the biotite felsic granulite plots close to the Q-P side of the diagram (fig. 6), in the tonalite-granodiorite domain. The leucosome composition plots in a more widespread area between granodiorite and syenogranite fields (fig. 6). The tie lines between the biotite felsic granulite and the respective leucosome forms two trends. The first is parallel to alkali feldspar-plagioclase side, without major change in quartz proportion (continuous lines). This correlation could be explained by the leucosome having composition closer to the eutectic point (Winkler, 1979). The second trend (fig. 5), forms steeper tie lines (dotted lines), showing variation in quartz content, and slightly increase in alkali-feldspar proportion. In this case, the leucosome points could represent a more evolved composition of the melt, due fractional crystallization or by chemical differentiation after interaction of the melt with the residual counterpart.

## 6. Whole rock geochemistry

### 6.1 Major oxides

Table 2 presents the chemical compositions of 7 representative samples of the biotite felsic granulite and leucosome. The melt component in the samples can be represented by  $K_2O+Na_2O$ , which corresponds to the feldspar contents, whereas the residuum components, composed by the ferromagnesian minerals, which do not preferentially enter the melt, can be represented by  $FeO+MgO$ . In the  $K_2O+Na_2O$  vs.  $SiO_2$  plot (fig. 7b) the components display a positive correlation as expected for rocks affected by a partial melting, where the loss of a granitic component from the biotite felsic granulite (residual neosome) results in an increase in  $SiO_2$ , whereas a large melt fraction in the leucosome results in an increase of  $K_2O+Na_2O$  contents. The leucosome with lower  $SiO_2$  content has higher content of feldspars in relation to quartz, representing a feldspar cumulate derived from fractional crystallisation with concomitant loss of silica-rich melt, as observed in residue-leucosome tie-lines in figure 6

The  $FeO+MgO$  vs.  $SiO_2$  diagram (fig. 7a) shows the effect of concentration of FeO and MgO into the residue resulting in the residual neosome having higher content than the leucosome crystallised from the segregated melt. The data plotted in fig. 7 shows that the distribution of the main rock types can be interpreted as the result of the segregation of melt and the concomitant change in the relative abundance of Fe-Mg phases from biotite felsic granulite to leucosome.

### 6.2 REE patterns

The biotite felsic granulite samples present two types of REE patterns. Samples CI-019-RA and CI-020-RA have  $\sum LREE = 110$  to  $130$  and  $\sum HREE = 21$  to  $24$ ,  $Eu/Eu^* = 0.78$  to  $1.03$ ,  $La_N/Sm_N = 2.15$  to  $3.09$  and  $Tb_N/Lu_N = 2.14$  to  $2.19$ . Whereas samples CI-011-RD and CI-023-RB1 have lower REE contents primarily due to a depletion in HREE ( $\sum LREE = 108$  to  $113$  and  $\sum HREE = 7.55$  to  $8.71$ ) and positive Eu anomaly with  $Eu/Eu^* = 1.74$  to  $1.80$ ,  $La_N/Sm_N = 5.49$  to  $5.83$  and  $Tb_N/Lu_N = 2.06$  to  $2.99$ . Depletion of the HREE in these two samples is correlated with the variation observed in major oxides diagram and the presence in sample CI-011-RD of small lenses, or pockets, of leucosome that were too small (mm-scale) to be physically separated. This “contamination” by the crystallisation products of the anatectic melt may also have affected sample CI-023-RB1.

The type of leucosome structure and the respective degree of melt segregation/fractionation reflect in their REE patterns (fig. 7). Sample CI-019-RB1 from a layer of leucosome parallel to banding (i.e. a stromatic migmatitic granulite - fig. 2.B) has a concave-up pattern ( $La_N/Sm_N = 5.67$  and  $Tb_N/Lu_N = 2.28$ ) enriched in LREE ( $\sum LREE = 284$ ) and  $\sum HREE = 19$ ) and has a slight positive anomaly for Eu ( $Eu/Eu^* = 1.12$ ). Sample CI-012-RC from a granite dyke has an intermediate abundance LREE compared to the other leucosome and a concave up pattern with  $\sum LREE = 147$ ,  $\sum HREE = 15$ ,  $La_N/Sm_N = 2.85$  and

$Tb_N/Lu_N = 1.18$  and, a weak, positive Eu anomaly. The most REE-depleted leucosome composition is sample CI-013-RB1, with  $\sum LREE = 39$ ,  $\sum HREE = 3$  and  $La_N/Sm_N = 12.90$  and  $Tb_N/Lu_N = 0.74$  and this results in a distinctive “V” shaped form, resembling the REE pattern for K-feldspar, with strong fractionation of MREE, resulting in a high  $Eu/Eu^*$  value of 8.01, and may indicate it was crystallized from an evolved liquid, perhaps a late fractionate from the anatectic melt. The modal proportion of this sample is plagioclase (40%), quartz (32%), K-feldspar (28%) and biotite (6%). The less depleted in HREE leucosome is the one where a major content of feldspars occurs and the most depleted are the ones rich in quartz, bearing a direct connection to crystal fractionation, segregation, crystallization. The ones that accumulate feldspars seems to be the earliest crystallized and also have major contents of accessory minerals, whereas the ones formed later concentrate just quartz and feldspars and have much lower amounts of accessory phases resulting in depletion in MREE and HREE.

When compared to JG-1 granodiorite standard (Imai et al., 1994), the biotite felsic granulite analyses show similar composition of LREE, with sample CI-011-RA having a positive anomaly for Eu, and depletion of HREE. For the leucosome, the LREE vary between enriched and depleted, with positive Eu anomaly, and depletion in HREE. This decrease in HREE, when compared to JG-1 composition, could reflect a lower content of mineral phases such as monazite, apatite and zircon in the rocks from the Itatins Complex.

## 7. Forward Modelling

To evaluate how the partial melting affect a potential protolith of the biotite felsic granulite we calculated a set of pseudosections in the  $Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O-TiO_2-O$  (NCKFMASHTO) chemical system, using the 3.33 version of THERMOCALC with the dataset 55 (ds55 – Holland & Powell, 1998). The results were then compared to the compositional data acquired for the Itatins Complex. From these calculations, we determined the composition, the amount of produced melt and the modal proportions in the residuum and crystallised melt. The minerals used in the modelling and their respective abbreviations, the last adapted from Whitney & Evans (2010) are: biotite (bt), ilmenite (ilm), K-feldspar (kfs), magnetite (mnt), orthopyroxene (opx), plagioclase (pl), quartz (qtz), water ( $H_2O$ ) and anatectic melt (liq). Ilmenite, plagioclase and quartz are assumed to be in excess. The parameters used in the forward modelling are pressure between 0.3 and 1.0 GPa and temperature between 650 and 950 °C. We assumed two scenarios for the partial melting. The first is partial melting in a closed-system, without modification of the chemical system as the melt fraction increases. So, produced melt is not separated or leave its source. The second is partial melting in an open-system, where the produced melt is removed at specific threshold values, which allows determination of how the melt composition and its proportion change during the partial melting. The threshold for the melt fraction that is extracted in open-system model is 0.05 based on the study by Rabinowickz & Vigneresse (2004). Although this

value is lower than the 0.07 suggested by Rosenberg and Handy (2001), where the change in rheological properties could indicate the presence of melt, the authors suggest that rocks with melt fractions between 0.03 and 0.07 will have the necessary interconnectivity of melt, controlled by the presence of micro-faults and the space developed between grain boundaries, as reactant phases melt, to make it possible for the melt to migrate (van der Molen & Paterson, 1979 and Rutter & Neumann, 1995).

As a starting point for the bulk composition of the protolith (table 3), the reference material “JG-1” (Imai *et al.*, 1994), a granodiorite bulk composition, is used for the forward modelling. The mineral assemblage of this rock is composed of plagioclase, K-feldspar, biotite, quartz, and with zircon, apatite and ilmenite as accessory minerals.

The mineral assemblage of the residual neosome is dominated by quartz and plagioclase with biotite and orthopyroxene as the main Fe-Mg phases. The abundance of quartz and plagioclase indicates they were in excess and characterize the initial mineral assemblage of the protolith together with biotite. The assumption that biotite was the primary Fe-Mg phase in the protolith derives from the interpretation of a metamorphic origin for the orthopyroxene, and that the protolith was a granodiorite, rather than a charnockite or enderbite. To evaluate if the application of the JG-1 composition can generate the mineral assemblage described for the biotite felsic granulite the bulk composition had its  $X_{\text{Fe}}$  ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ ) adjusted to higher values, from 0.550 to 0.649, so the  $X_{\text{Fe}}$  from biotite and orthopyroxene in the model were similar to the values determined in EPMA analysis. The role of water influx and its effect on the fertility of the protolith is estimated using a  $T$ - $X_{\text{H}_2\text{O}}$  pseudosection (see table 3).

Comparisons of mineral compositions from Itatins rocks and JG-1 used in the model were made using cationic ratio isopleths from plagioclase ( $X_{\text{An}} = \text{Ca}/\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}$ ), biotite and orthopyroxene ( $X_{\text{Fe}} = \text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Mg}$ ) (see table 4 for more details). This procedure enables the evaluation of where in the  $P$ - $T$  window these minerals have formed and whether their compositions were affected by late chemical re-equilibration.

### *7.1 Granodiorite bulk composition and water influx modelling*

The pseudosection calculated for the JG-1 is composed of twelve fields, with variance between three and six (fig. 8a). In the investigated  $P$ - $T$  window, the mineral assemblages can be separated in two groups: (i) biotite-bearing assemblages and, (ii) orthopyroxene-bearing assemblages. Both groups have K-feldspar  $\pm$  magnetite stable and at  $P < 0.4$  GPa cordierite becomes stable with orthopyroxene at expense of biotite. Due to the lack of muscovite in the temperature range modelled, melt production is constrained by the consumption of plagioclase + K-feldspar + quartz +  $\text{H}_2\text{O}$ , up to 790 – 864 °C, when orthopyroxene becomes stable. At higher temperatures, the biotite breakdown also generates a proportion of melt, increasing melt maficity (FeO + MgO content – Clemens, Stevens & Farina, 2011 – fig. 10). The amount of melt generated at 950 °C varies between 17 to 55 mol. %, from 1.0 to 0.3 GPa.

The field that is similar to the stable assemblage present in the biotite felsic granulite (quartz + plagioclase + biotite + orthopyroxene + K-feldspar + liquid  $\pm$  magnetite) occurs between 790 to 870 °C in the investigated pressure range. Using the isopleth thermobarometry, the results indicate a consistent  $P$ - $T$  value for the metamorphic conditions expected for the metamorphism recorded in the biotite felsic granulite.  $X_{Fe}$  of biotite and orthopyroxene and  $X_{An}$  of plagioclase, form an intercept inside peak assemblage field at 0.72-1.0 GPa and 845-872 °C (fig. 8b). We used standard deviation of 4% for the values of the isopleths, as this is the maximum value calculated by THERMOCALC for the composition variables of the minerals.

Although the mineral compositions have a good concordance for the  $P$ - $T$  conditions, the amount of melt predicted using the JG-1 bulk composition is much lower than is interpreted by field and petrographic observations. The estimation of melt production in outcrops where the rock displays the largest amount of leucosome indicates that the melt fraction reached a proportion of at least 50%. On the other hand, the model predicts around 10 mol. % of produced melt by the JG-1 at  $P$ - $T$  conditions determined by isopleth thermobarometry. So, its composition is not exactly the same necessary to model the biotite felsic granulite.

Water influx is being asserted as an important way to raise the amount of produced melt, especially in igneous protoliths (Sawyer, 2014; Weiberg & Hasalova, 2015; Carvalho *et al.*, 2016). To evaluate if the water influx could increase the bulk composition fertility, we used a  $T$ - $X_{H_2O}$  at a fixed pressure of 0.8 GPa, which is close to the  $P$ - $T$  conditions determined by isopleth thermobarometry (fig. 9A). The  $H_2O$  contents vary between 0 mol %, for anhydrous composition, and 16.94 mol %, for an over-saturated composition. The pseudosection shows that an increase in water content will lead into a raise of liquid production and a decrease of the temperature of breakdown of K-feldspar, from 950 to 730 °C, and magnetite, from 950 to 800 °C.

Using the phase equilibria to constrain the amount of water that could have infiltrated the biotite felsic granulite, it is possible to reach a maximum value of 9.15 mol %, which corresponds to an increase of 7.22 mol % from JG-1 composition. This value corresponds to the lower temperature of the K-feldspar breakdown in the field of the metamorphic peak mineral assemblage. In this case, the amount of melt generated at 0.8 GPa and 875 °C would be around 62 mol %.

The variation in modal proportion in  $T$ - $X_{H_2O}$  pseudosection is used to recognize which phases are being consumed by melting reactions. As  $H_2O$  or temperature increases, the rate of melt production displays slightly differences, with more linear (fig. 9B) or curved (fig. 9D) pattern. In figures 9B to C, the complete consumption of K-feldspar can be correlated with the major proportion of melt generated. Biotite is also consumed by the melting reaction that is indicated by the decrease in proportion in fig. 9C, between 650 and 875 °C.

Compositional variation of Ca in plagioclase is examined, for temperature ranging from 600 to 900 °C (fig. 9E). Plagioclase displays an increase in anorthite component as partial melting progresses, by heating and/or H<sub>2</sub>O influx, and this change in composition becomes more intense when K-feldspar is completely consumed. This can be explained by plagioclase losing the albite component to melt, as it becomes the main source of Na after K-feldspar is completely consumed.

## 7.2 Melt and residue compositions

Using the read-bulk-info (rbi) script from THERMOCALC, we determined the compositions of anatectic melt and its respective residual counterpart, and the results are plotted in binary and ternary diagrams (fig. 10, supplementary data - SP1), to compare with results from XRF analyses. All calculations were done at pressure intervals of 0.4, 0.6 and 0.8 GPa, with increasing temperature from 630 to 950 °C, in open- and closed-systems.

The composition of the anatectic melt calculated in the open- and closed-systems are calc-alkaline, peraluminous, with granite composition. The SiO<sub>2</sub> contents vary between 52.02 mol. % at 637 °C - 0.8GPa, to 77.27 mol. % at 950°C - 0.4 GPa. The  $X_{Fe}$  varies between 0.68 and 0.85, with the higher values (>0.79) associated with closed-system. This corresponds to an increase in the amount of dissolved FeO in the melt of 1.84, at 0.4 GPa, to 3.01 mol %, at 0.8 GPa, for the closed-system, and 2.96, at 0.4GPa, to 4.29 mol. %, at 0.8 GPa, in the open-system.

In the same *P-T* range, the K<sub>2</sub>O vs. Na<sub>2</sub>O + CaO diagrams show that the composition of the melt produced for both systems increases from 1.5 to 2 mol % (fig. 10A and B) as K<sub>2</sub>O content increases from 1.10 to 1.34 mol %.

The residue shows larger compositional variation in closed-system, where Na<sub>2</sub>O + CaO contents increases from 6 to 8 mol %, with decreasing pressure. On the other hand, K<sub>2</sub>O contents decrease from 2.7 to 1.5 mol %, in the closed-system. The compositions of the biotite felsic granulite and leucosome (squares and crosses in fig. 10), plot in the direction of the trends of residue and melt, but with higher content of K<sub>2</sub>O, in the leucosome, and Na<sub>2</sub>O+CaO, in the biotite felsic granulite, implying in the melting of K-feldspar and concentration of more plagioclase into the residue.

In the K<sub>2</sub>O vs.  $X_{Fe}$  diagrams (fig. 10C and D), the anatectic melt composition displays two trends, depending on the melting system. Along the partial melting in the open-system, the melt composition increases in K<sub>2</sub>O as temperature rises, and  $X_{Fe}$  increases while biotite is a stable phase, decreasing after the appearance of orthopyroxene ± cordierite. After complete consumption of biotite, the  $X_{Fe}$  increases again, at *P* > 0.4GPa, due incorporation of Mg into orthopyroxene. In the closed-system, the anatectic melt shows an increasing trend for K<sub>2</sub>O, associated with an increase in  $X_{Fe}$  during biotite consumption, followed by a decrease after complete expense of biotite and formation of orthopyroxene. The residue

trends display a wider spread of data in the partial melting in closed-system (figure 9C and D), with K<sub>2</sub>O contents decreasing from 2.7 mol % to 1.5 mol % at 0.4 GPa.

Biotite granulite compositions have lower values of  $X_{Fe}$  than residue compositions generated from JG-1 bulk composition, but show a wider range of variation. In the case of the leucosome, each composition, CI-012 and CI-013, plot in the direction of the trends for open-system and closed-system, respectively.

The results are plotted in a K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O+CaO-FeO+MgO ternary diagram (fig. 9E and F), modified from Solar and Brown (2001). Anatectic melt in both, closed and open-systems show similar trends, with the one related to closed-system displaying smaller increase in FeO+MgO content, with a small decrease after complete expense of biotite. In both systems the ratio Na<sub>2</sub>O+CaO/K<sub>2</sub>O do not display significant variation. The residue compositions have the same behavior described in previous diagrams with spread variation in Na<sub>2</sub>O+CaO contents in the closed-system. Leucosomes from Itatins Complex plots at the initial composition of the produced melt from modelling, over the 0.6 and 0.4 GPa trends. The biotite granulite compositions have higher content of FeO+MgO than the residue from modelling.

## 8. Zircon data

More than one type of zircon crystals occurs in the biotite felsic granulite and leucosome and to investigate the petrological meaning of this variation, trace elements and isotopic ratios were determined. The trace elements composition of zircon was determined by in-situ analysis using a quadrupole LA-ICP-MS at University of New Brunswick (UNB), Canada. The analysed crystals were selected by their textural relationship with other phases and shape. They are 50–300 μm in length, mainly prismatic with rounded edges, with aspect ratios of 1:1 to 3:1. A minor proportion of the crystals are soccer ball type. Both types of zircon grains occur included in plagioclase or quartz or associated with biotite flakes or apatite grains.

The results show an enrichment of HREE in relation to LREE and MREE (see supplementary data - SD2), and two patterns of LREEs: (i) one presenting positive anomaly for Ce and Sm and a negative anomaly for Eu, which is expected for igneous zircon that crystallized together or after plagioclase (Belousova et al., 2002); (ii) flat LREE pattern, without the positive anomaly of Ce. The flat pattern for LREE is related to rims overgrowth and small soccer-ball crystals, which corresponds to metamorphic recrystallization. This pattern is described by Hoskins & Schaltegger (2003) for zircon in meta-granitoids (fig. 11).

Three samples from the eastern portion of the Itatins Complex were selected for U-Pb analysis in zircon by LA-MC-ICP-MS (fig. 2). All samples were prepared at the Center of Geochronological Research (CPGEO) laboratory facilities at University of São Paulo, Brazil. Samples CI-011-RD, CI-013-RC and CI-019-RA are from the biotite felsic granulite, composed of orthopyroxene, biotite, plagioclase and



quartz with minor amounts of K-feldspar, ilmenite-magnetite, apatite and zircon. The leucosome occurs as centimetric lenses and small pockets, less than 1.0 cm wide, heterogeneously distributed within the host rock (fig. 3A). The zircon grains are prismatic to rounded, and CL images shows the majority of the crystals has older cores, some of them with complex compositional zoning (fig. 12). Obtained data show the zircon from the biotite felsic granulite has two groups of dates (see supplementary data – SD3 and fig. 10), one at the Paleoproterozoic and the other in the Neoproterozoic. All presented data has 95% of confidence. For sample CI-011-RA, 36 analyses were performed, but only 24 were used for age calculation. The line of best fit produced upper and lower intercept dates of  $2152 \pm 13$  Ma and  $625 \pm 19$  Ma, respectively. For sample CI-013-RA, 31 of the 36 analyses were used giving the upper and lower intercept dates of  $2158 \pm 11$  Ma and  $594 \pm 19$  Ma, respectively. In sample CI-019-RA, 26 of 36 analyses, produced dates of  $2139 \pm 14$  Ma for upper intercept and  $603 \pm 27$  Ma for lower intercept.

Concordia ages for each sample marks with good accuracy the protolith formation in the Paleoproterozoic (sample CI-013-RA –  $2137.2 \pm 4.6$  Ma) and the metamorphic overgrowth during the Ediacaran. The range of dates from upper intercepts could indicate two crystallizations episodes of zircon during the Paleoproterozoic, 2.15 and 2.13 Ga. Assuming the uncertainty associated with these dates there is an overlap between the results, which indicates that they cannot be interpreted as two distinct episodes.

The Concordia age calculated for the zircon rims for sample CI-011-RA (average is  $628.2 \pm 4.6$  Ma) is represented by a range of dates between 607 and 639 Ma. Using a weighted average diagram (fig. 13A), the set of analyses were separated in three groups, based in the range of overlap of the results. The Concordia ages calculated for each group are  $639.8 \pm 4.9$  Ma,  $625.1 \pm 5.6$  Ma and  $614.6 \pm 6.0$  Ma (fig. 13B). The younger group from sample CI-011-RA can be correlated to the Concordia age from sample CI-019-RA ( $605.1 \pm 4.0$  Ma), marking the ending of (re)-crystallization period for zircon. This range of dates can be explained by a continuous process involved in zircon crystallization during a period of *ca.* 25 to 40 Ma.

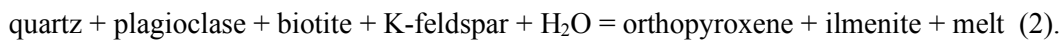
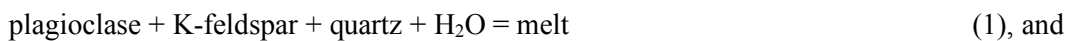
## **9. Discussion**

### *9.1 Granulite facies metamorphism and partial melting*

The Itatins Complex presents several macro and microscopic petrographic features generated by partial melting and melt crystallization. The presence of orthopyroxene associated with other minerals in the biotite felsic granulite once was used to justify the interpretation of a charnockite magmatism episode in the area (Azevedo Sobrinho, 1995; Azevedo Sobrinho & Girardi, 1995). With this interpretation, the origin of the leucosome, occurring as veins and lenses, was not well explained. The petrography allowed to identify that plagioclase, quartz, biotite and, orthopyroxene have typical features related to metamorphism, partial melting reactions and melt crystallization, such as corroded boundaries,

inclusions and coronas (fig. 4). The presence of quartz films, leucosome pockets and textural re-equilibration features, as polygonal-granoblastic texture (fig. 4) indicate the anatectic melt coexisted with the granulite and part of it has crystallized before complete melt segregation (check fig. 4 for textures).

Due the mineralogical composition of the rock, and the minerals involved in melting reactions deduced by  $T-X_{H_2O}$  pseudosection we assume the anatectic melt was generated by the melting reactions:



Phase equilibria modelling of a granodiorite composition, assumed as the protolith composition for the biotite felsic granulite, indicates the mineral assemblage, composed of biotite + plagioclase + K-feldspar + orthopyroxene + quartz + ilmenite-magnetite + liquid), was stable during the metamorphic peak at 0.72 – 1.0 GPa and 845 – 882 °C. The  $P$ - $T$  condition indicates the biotite felsic granulite was buried, at least, up to 35 km in depth, and the apparent geothermal gradient during the metamorphic event was around 25 °C.km<sup>-1</sup>. Assuming a regular geothermal gradient and a lower crust depth, the values obtained validate the interpretation that the granulite facies metamorphism occurred in the lower crust.

## 9.2 Forward modelling and real rocks

As described, a modified granodiorite composition, the reference material JG-1, was used to model the  $P$ - $T$  pseudosection to evaluate how the mineral assemblage respond to the metamorphism and partial melting, and if the granulite facies assemblage will be similar to that observed in the biotite felsic granulite.

The pseudosection in the  $P$ - $T$  range of 0.3 – 1.0 GPa and 650 – 950 °C shows the variation in mineral assemblages observed in the studied samples could be correlated to those in the modelling (fig. 7A). Increasing the  $X_{Fe}$  from 0.550 to 0.649, in the JG-1 bulk composition, was done to adjust the chemical bulk composition to try to reproduce the variation observed in the minerals analysed by EPMA. After this adjustment the  $X_{Fe}$  of biotite and orthopyroxene and  $X_{An}$  of plagioclase crosses in the  $P$ - $T$  interval of 0.7 to 1.0 GPa and 845 to 882 °C, inside the stability field of the mineral assemblage described for the biotite felsic granulite.

However, the proportion of melt predicted by the modelling at the determined  $P$ - $T$  conditions, approximately 10 mol %, does not match with the volume of leucosome observed in samples or in the

outcrops, which can easily reach values from 10 to 50%. The increase in melt production in migmatites derived from igneous rocks has been inferred as a response to water-fluxed melting (Sawyer, 2010; Weinberg & Hasalova, 2015; Borges *et al.*, 2016). For the Itatins Complex two water sources can be taken into account: (i) rocks from the paragneiss unit, from where the H<sub>2</sub>O could come as the dehydration related to metamorphism progress, and (ii) H<sub>2</sub>O infiltration into large scale structures, such as crustal scale shear zones, as described by Sawyer (2010), which can have the Lancinha-Cubatão and Itariri Shear Zones as equivalents (fig. 1 and 2).

From the  $T$ - $X_{\text{H}_2\text{O}}$  pseudosection it is necessary to increase in 7.21 mol % the amount of water (equivalent to 2.0 wt. %), in the JG-1 bulk composition, to achieve a production of up to 58 mol % of melt in the field that corresponds to the mineral assemblage at metamorphic peak. The increase in H<sub>2</sub>O content could also stabilize hydrous peritectic phases, such as hornblende which presence was observed in some samples. A minimum of 3.0 wt. % of H<sub>2</sub>O in the bulk composition is necessary to stabilise amphibole as peritectic phase in granodiorite underwent partial melting (Naney, 1983). Although we did not use amphibole in our calculations, the maximum increase of H<sub>2</sub>O in JG-1 bulk composition necessary to generate the expected amount of melt, do not reach the H<sub>2</sub>O content required to stabilise amphibole.

Besides the evaluation of melt fertility of the modified JG-1 composition, the diagram in fig. 9 also gives important information about the changes in modal proportion and how the composition of the minerals changes during heating and influx of H<sub>2</sub>O. The decrease of modal proportion of K-feldspar as partial melting increases, due to heating or H<sub>2</sub>O influx, indicates that the mineral is an important phase for the melt production, being one important reactant.

The melt and residue compositions, calculated with THERMOCALC for open- and closed-system melting and  $T$ - $X_{\text{H}_2\text{O}}$  pseudosection, display evolutionary trends in K<sub>2</sub>O vs. Na<sub>2</sub>O+CaO and K<sub>2</sub>O vs.  $X_{\text{Fe}}$ . Melt compositions have an increase in K<sub>2</sub>O and FeO contents as K-bearing phases are consumed during partial melting in a heating path. On the other hand, the residue is enriched in Na<sub>2</sub>O+CaO contents along the same path, indicating a concentration of plagioclase in relation to the other phases.

Compositions of the samples from the biotite felsic granulite plot close to the respective analogue from the model. But they display a larger compositional range, similar to the comparison made by Sawyer (2010) for the migmatites from Opatica Subprovince in Canada and experimental data.

The enrichment in K<sub>2</sub>O observed in the leucosome samples, CI-012 and CI-013, can be interpreted as a result of the fractional crystallization of the melt that formed the leucosome. The beginning of fractional crystallization forms plagioclase, segregating CaO and Na<sub>2</sub>O from the melt. The enrichment of K<sub>2</sub>O in the melt will continue up to the formation of K-feldspar.

The slightly increase in CaO observed in plagioclase rims in the biotite felsic granulite, the metamorphic residue, can be explained by the increase in anorthite content observed in modelling (fig. 9E). This increase is related to a partial consumption of plagioclase by melting reactions, with Na<sub>2</sub>O going to the

melt phase, whereas the plagioclase in the residue has its anorthite content increased. In all scenarios following an isothermal path with increase of water content in the rock, it is possible to trace the moment when plagioclase turned to be an important phase in the melting reactions, losing Na<sub>2</sub>O and its composition being enriched in anorthite (fig. 9E). This pattern resembles the formation of peritectic plagioclase as described by others (Clemens, Stevens & Farina, 2011; Clemens & Stevens, 2012).

From  $T$ - $X_{\text{H}_2\text{O}}$  pseudosection the changes in melt proportion have a stronger control from the amount of H<sub>2</sub>O in the bulk composition than from changes in temperature. The composition of several batches of melt are similar to those calculated using the starting H<sub>2</sub>O content from JG-1. The melt compositions determined for open- and closed-systems display a continuous increase in K<sub>2</sub>O content from 2.55 mol. % to 4.13 mol. %, with compositional trends for 0.4 GPa showing higher values than the 0.8 GPa trends (fig. 10). The variation in Na<sub>2</sub>O+CaO is small, below 0.5 mol. %, occurring before the formation of orthopyroxene (fig. 10A and B). In the open-system diagrams, the reduction in  $X_{\text{Fe}}$  around 3.0 mol. % of K<sub>2</sub>O, is associated with the extraction of the melt when melt fraction reaches the 0.05 threshold (fig. 10C). This indicates the composition of the melt does not display a continuous increase in  $X_{\text{Fe}}$  as several batches are generated, but there are increases from each batch of melt. On the other hand, for the closed-system the change in  $X_{\text{Fe}}$  in melt is associated with the formation of orthopyroxene. The  $X_{\text{Fe}}$  increases up to the formation of orthopyroxene, and then decreases, meaning that the Fe fractionated to the mineral, increasing the Mg content in melt (fig. 10D).

The residue compositions display a larger variation trend in closed-system than the open-system, which allows some interpretations about its formation. The decrease in K<sub>2</sub>O and increase in Na<sub>2</sub>O+CaO is a direct response to the breakdown of K-bearing minerals, and the modification in anorthite component of plagioclase, with partition of Na<sub>2</sub>O into the melt phase and increase in plagioclase anorthite content in the residue (fig. 9E). This increase in anorthite content can be interpreted as consumption of plagioclase by melting reaction and production of a peritectic plagioclase. The  $X_{\text{Fe}}$  content decreases as biotite is consumed with orthopyroxene buffering the  $X_{\text{Fe}}$  in the residue.

In K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O+CaO-FeO+MgO diagrams, melt and residue display similar trends as described for binary diagrams (fig. 10A to D). In the open-system, a larger variation in each melt batch is observed, but a smaller difference from starting material and final composition of the residue is observed (fig. 10E). The inverse is observed in the closed-system, with a smaller spread in melt compositions and larger for residues in comparison to starting bulk composition (fig. 10F).

Although the calculated  $P$ - $T$  conditions shows that partial melting was the main process for crustal reworking in the Itatins Complex, an external H<sub>2</sub>O influx was needed for increase the fertility of the biotite felsic granulite protolith, generating the features described in this work.

### 9.3 Geochronological data and tectonic implications

The development of the Southern Ribeira Belt is interpreted as a result of an amalgamation of different terranes during the Neoproterozoic (Brito Neves *et al.*, 1999; 2015; Campanha & Sadowski, 1999; Campanha & Brito Neves, 2014; Bento dos Santos *et al.*, 2010; Faleiros *et al.*, 2011, 2016). The Lancinha-Cubatão Shear Zone (LCSZ) is the main structure separating the North and South domains. In the study area, the North domain is represented by Embu Terrane, while the South Domain is represented by Curitiba and Costeiro Terranes. In previous works, the LCSZ is interpreted as a former subduction zone, structurally reactivated as a major strike-slip fault (Faleiros *et al.*, 2011). The Itariri Shear Zone (ISZ) separates the Curitiba and Costeiro terranes (Sadowski, 1974). Although the extension of ISZ is not as long as the LCSZ, due to the sectioning occurred during the opening of the Atlantic Ocean, it could represent a suture as well, just like the LCSZ. In this scenario, both shear-zones are not only important for the final geometry of the investigated terranes, but they could also be capable to bring water into the geological system to enhance and facilitate the partial melting, as depicted by Sawyer (2010) for the evolution of the Opatoca Subprovince rocks in Canada.

Zircon crystals analysed from the biotite felsic granulite present concordia ages that mark the formation of the protolith of the rock in the Paleoproterozoic, as  $2173.2 \pm 4.6$  Ma, and its reworking by the granulite facies metamorphism and partial melting in the Neoproterozoic, between 628 and 605 Ma. Previous works done in the Itatins Complex inferred that the granulite facies metamorphism occurred in the Paleoproterozoic, followed by a second metamorphic event of amphibolite facies conditions during the Neoproterozoic (Azevedo Sobrinho & Girardi, 1995; Picanço *et al.*, 1998). However, petrographic and geochronological data present here, allied to phase equilibria modelling, indicates a single event of metamorphism, partial melting and crystallization affected these rocks during a period of 25-40 Ma.

The time span associated to zircon rims is interpreted as the duration of the metamorphism event, responsible for the recrystallization of the mineral, as well as its crystallization within leucosome along the cooling path. An interval in ages like this one was recognized in the metamorphic-partial melting-crystallization evolution of the root of a magmatic arc in the Southern Brasília Belt (Rocha *et al.*, 2017), on the West boundary of the Ribeira Belt.

The interval of 630 to 600 Ma is assumed as a period of installation of a continental magmatic arc (Janasi *et al.*, 2016; Prazeres Filho, 2005; Silva *et al.*, 2005; Tupinambá *et al.*, 2000; Heilbron & Machado, 2003), in which the intense granitic magmatism, in the Southern and Central Ribeira Belt, is younger than 600 Ma (Janasi *et al.*, 2016). The thermal anomaly that was responsible for partial melting and subsequent granite magmatism was also responsible for the granulite facies metamorphism, affecting the lower portions of the Curitiba and other terranes, representing the lower continental crust of the Ribeira Belt, which might include old cores of basement rocks.

Rocks with paleoproterozoic ages, with *ca.* 2.200 Ma, are commonly recognized in the basement rocks of the Ribeira Belt and associated to rocks of the Luis Alves Craton (Passareli *et al.*, 2004, 2007, 2011,

2016; Siga Jr, 1995; Cury, 2009). The correlation of the Itatins Complex with the Luis Alves Craton was supported in the past by similar metamorphic grade in both units (Hasui *et al.*, 1975, Basei *et al.*, 1992). Faleiros *et al.* (2011) and Faleiros & Pavan (2012) describes the Serra Negra Complex, a subdivision of the Luis Alves Craton, (fig. 1) as composed of granulite-facies rocks derived from igneous protolith, mainly granodiorite, with a U-Pb concordia age in homogenous zircon of  $2155 \pm 10$  Ma. As the Itatins and Serra Negra complexes share the same type of protolith, with similar crystallization ages, the Itatins Complex could represent part of the Luis Alves Craton, which was affected by the Brasiliano Orogeny in the Neoproterozoic.

Recent geothermobarometric and geochronological data support supracrustal and basement rocks of Curitiba Terrane, cropping out to the south of the study area, record amphibolite to granulite facies metamorphism, 0.8-1.0 GPa and 790 to 820 °C, at  $584 \pm 4$  Ma, with tectonic stabilization at 555 Ma (Machado *et al.*, 2003; Faleiros *et al.*, 2011, 2016). The similarity of the data for the age and *P-T* condition of the metamorphism confirms a large-scale process, such as a collisional event, affected the Curitiba Terrane at *ca.* 600 Ma. This collision was responsible for the amalgamation of the terranes, and they now form the Southern Ribeira Belt, but in the past, were part of one of orogenies that made up Western Gondwana.

## 10. Conclusions

The Itatins Complex represents an exposure of a continental lower crust affected by partial melting and metamorphism due granulite facies conditions. The complex is composed of three main rocks: (i) biotite felsic granulite; (ii) paragneiss migmatite stromatic; and (iii) mafic granulite, which occurs as lenses or fragments surrounded by leucosome in the other two rock types. The research focused the study on the biotite felsic granulite, a migmatite derived from igneous protolith, with granodiorite bulk composition, composed of orthopyroxene, biotite, K-feldspar, plagioclase, ilmenite-magnetite, with apatite, monazite, zircon, clinopyroxene and amphibole as accessory phases.

As the biotite felsic granulite displays different types of leucosome, occurring in the field as lenses, veins with blind terminations, pockets and dykes, indicating the partial melting occurred in an open-system, we used a granodiorite bulk composition, the reference material JG-1, to represent the protolith composition for the metamorphic modelling. The *P-T* conditions were determined by comparing the mineral assemblage present in the rock with the stability fields in the pseudosection for the granodiorite bulk composition, and crossing the cationic ratios, such as  $X_{Fe} = Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$  and  $X_{An} = Ca/(Ca+Na+K)$ , of biotite, orthopyroxene and plagioclase. The results indicate the granulite-facies metamorphism reached a *P-T* peak between 0.72 and 1.0 GPa and 845 – 872 °C. The amount of melt generated by the JG-1 bulk composition is lower than proportion necessary to form the leucosome features observed in the biotite felsic granulite. Using a *T-X*<sub>H<sub>2</sub>O</sub> pseudosection for 0.8 GPa, we

determined that an increase in 7.22 mol. % of H<sub>2</sub>O in the JG-1 bulk composition is necessary to increase the amount of melt produced, due to the increase of protolith fertility.

Melt and residue compositions determined from the modelling shows that the changes in mineral assemblage of the rock, the whole residue and peritectic phases, control the composition of the products of partial melting, especially the melt. This modification of melt composition, together with the “contamination” by peritectic and protolith mineral phases (Clemens, Stevens, Farina, 2011; Garcia-Arias & Stevens, 2016, Taylor et al., 2014), and processes such as fractional crystallization or interaction melt-wall rock, are responsible for the final composition of the crystallized leucosome.

Zircon data for trace elements and U-Pb ratios indicated two crystallization periods. The first, with *ca.* 2.137 Ma is recorded in crystal cores, which usually display convolute and oscillatory zoning (fig. 12). The REE pattern for this domain of the zircon shows positive anomaly for Ce and Eu, and negative for Pr and Sm. Analysis in the overgrowth rim shows ages from *ca.* 640 Ma to 605 Ma (fig. 12). Trace element data for the rims shows an increase in LREE to the crystal cores, without the negative anomaly in Pr and Nd. This pattern is present in zircon crystals from leucosome of garnet-free granulites (Rubatto, 2002) and in zircon from meta-granitoids (Hoskins & Schaltegger, 2003). In our interpretation, the REE patterns and concordia ages of zircon rims are result of the (re)-crystallization of zircon during the granulite-facies metamorphism, a process that involved partial melting, metamorphism and melt crystallization during a time span of *ca.* 25 to 40 Ma. The upper intercept dates from the biotite felsic granulite are similar to those from the igneous protolith of the basement rocks in the Ribeira Belt (*ca.* 2.200 Ma - Passarelli *et al.*, 2004). The 640 – 605 Ma time span for the metamorphic event can be correlated to the installation of the magmatic arc, responsible for the intense granite magmatism recorded in Ribeira Belt (Janasi et al., 2016).

In general the results from phase equilibria modelling of melt and residue compositions are reliable for understanding and predicting how the products of partial melting behave. Some variations of the results when comparing those from real rocks and from models could be explained by process such as fractional crystallization or interaction melt-residue, for example.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank FAPESP for the grants #2013/04007-0 and #2016/22627-3 to R.M. and F.M.F., the program Sciences without Borders Program for the grant #206521/2014-6 to M.P, and National Sciences and Engineering Research Council of Canada for the Discovery Grant to E.W.S.

## REFERENCES

Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8, 1977. Campina Grande. Atas..., Recife: Núcleo Nordeste da Sociedade Brasileira de Geologia: 363 - 392.

Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. 1981. Brazilian Structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.*, 17(3): 1 – 29.

Almeida F.F.M.; Amaral, G.; Cordani, U.G.; Kawashita, K. 1973. The Precambrian evolution of South American cratonic margin, South of Amazon River. In: Nairs, A. E. M & Stehli, F. G. (eds.) *The ocean basins and margins*. v. 1: 411 – 446.

Almeida, R.P.; Santos, M.G.M.; Fragoso-César, A.R.S.; Janikian, L.; Fambrini, G. 2012. Recurring extensional and strike-slip tectonics after the Neoproterozoic collisional events in the southern Mantiqueira province. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, 84(2): 347-376.

Alves, A.; Janasi, V.A.; Campos Neto, M.C. 2015. Sources of granite magmatism in the Embu Terrane (Ribeira Belt, Brazil): Neoproterozoic crust recycling constrained by elemental and isotope (Sr-Nd-Pb) geochemistry *Journal of South American Earth Sciences*, 68: 205-223.

Alves, A.; Janasi, V.A.; Campos Neto, M.C.; Heaman, L.; Simonetti, A. 2013. U-Pb geochronology of the granite magmatism in the Embu Terrane: Implications for the evolution of the Central Ribeira Belt, SE Brazil. *Precambrian Research*, 230, 1-12, 2013.

Azevedo Sobrinho, J. M. 1995. *Petrologia dos Charnockitos da Região de Itariri (SP)*. 112 f. Master of Sciences Dissertation. Geosciences Institute, University of São Paulo, São Paulo.



Azevedo Sobrinho, J.M.; Girardi, V.A.V. 1995. Geologia do Bloco Itatins na região de Itariri (SP). In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 4, 1995. Águas de São Pedro. Boletim de Resumos, São Paulo: Núcleo São Paulo da Sociedade Brasileira de Geologia, v. 1, p. 135.

Basei, M.A.S.; Siga Jr., O.; Machiavelli, A.; Mancini, F. 1992. Evolução tectônica dos Terrenos entre os Cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). Revista Brasileira de Geociências, 22 (2): 216 - 221.

Bento dos Santos, T.M., Munhá, J.M., Tassinari, C.C.G., Fonseca, P.E., Dias Neto, C., 2010. Thermochronology of central Ribeira Fold Belt, SE Brazil: petrological and geochronological evidence for long-term high temperature maintenance during Western Gondwana amalgamation. Precambrian Res. 180: 285-298.

Brito Neves, B.B., Campos Neto, M.C., Fuck, R.A., 1999. From Rodinia to western Gondwana: an approach to the Brasiliano-Pan African cycle and orogenic collage. Episodes 22: 155-166.

Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., Pimentel, M.M., 2014. The Brasiliano collage in South America: a review. Braz. J. Geol. 44: 493-518.

Belousova, E.A.; Griffin, W.L.; O'Reilly, S.Y.; Fisher, N.I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143: 602-622.

Carvalho, B.B., Sawyer, E.W.; Janasi, V.A. 2016. Crustal reworking in a shear zone: transformation of metagranite to migmatite. Journal of Metamorphic Geology, **34**, 237 – 264.

Clemens, J.D.; Stevens, G. 2012. What controls chemical variation in granitic magmas? Lithos, 134-135: 317-329.

Clemens, J.D., Stevens, G. & Farina, F. 2011. The enigmatic sources of I-type granites and the clinopyroxene-ilmenite connexion. Lithos, 126: 174-181.

Cury, L.F. 2009. Geologia do Terreno Paranaguá. Doctor in Science Thesis. Geosciences Institute, University of São Paulo, São Paulo, 188 pp.

Comin-Chiaramonti, P.; Gomes, C.B.; Piccirillo, E.M.; Rivalenti, G. 1983. High-TiO<sub>2</sub> basaltic dykes in the coastline of São Paulo and Rio de Janeiro States (Brazil). *Neues Jahrbuch Mineralogische Abhandlungen*, 146: 133-150.

Coutinho, J.M.V. 2008. Dyke Swarms of the Paraná Triple Junction, Southern Brazil - Enxame de Diques da Junção Tríplice do Paraná, Brasil Meridional. *Geologia USP – Série Científica*, 8(2): 29 – 52.

Diener, J.F.A.; Powell, R.; White, R.W.; Holland, T.J.B. 2007. A new thermodynamic model for clino- and orthoamphiboles in the system Na<sub>2</sub>O–CaO–FeO–MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O–O. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(6): 631 – 656.

Faleiros, F.M.; Campanha, G.A.C., Martins, L., Vlach, S.R.F., Vasconcelos, P.M. 2011. Ediacaran high-pressure collision metamorphism and tectonics of the southern Ribeira Belt (SE Brazil): evidence for terrane accretion and dispersion during Gondwana assembly. *Precambrian Research*, 189 (3-4): 263-291.

Faleiros, F.M.; Campanha, G.A.C.; Pavan, M.; Almeida, V.V.; Rodrigues, S.W.O.; Araújo, B.P. 2016. Short-lived polyphase deformation during crustal thickening and exhumation of a collisional orogen (Ribeira Belt, Brazil). *Journal of Structural Geology*, 93: 106 – 130.

Feinberg, J.M.; Scott, G. R.; Renne, P.R.; Wenk, H.-R. 2005. Exsolved magnetite inclusions in silicates: Features determining their remanence behaviour. *Geology*, 33(6), 513–516.

Garcia-Arias, M.; Stevens, G. 2016 Phase equilibrium modelling of granite magma petrogenesis: A. An evaluation of the magma compositions produced by crystal entrainment in the source. *Lithos*, 277: 131-153.

Green, E.C.R., White, R.W., Diener, J.F.A., Powell, R., Holland, T.J.B. & Palin, R.M. 2016. Activity–composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks, *Journal of Metamorphic Geology*, **34**, 845–869.

Hasui, Y.; Carneiro, C.D.R.; Coimbra, A.M. 1975. The Ribeira Fold Belt. *Revista Brasileira de Geociência*, 5(4): 257-266.

Heilbron, M. & Machado, N. 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Research*, 125: 87-112.

Holland, T.J.B.; Powell, R. 1998. An internally-consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16 (3): 309 – 344.

Holland, T.J.B & Powell, R. 2011. An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids. *Journal of Metamorphic Geology*, **29**, 333-383.

Hoskin, P.W.O.; Schaltegger, U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In: Hancher J.M., Hoskin, P.W.O. (eds) *Zircon - Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53: 27-62.

Imai, N., Terashima, S., Itoh, S. and Ando, A. 1994 Compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples, "igneous rock series". 1995. *Geostandards Newsletter*, 19 (2): 135 – 213.

Janasi, V.A., Leite, R.J., Van Schmus, W.R., 2001. U-Pb ages and chronostratigraphy of the granitic magmatism in the Agudos Grandes batholith (W of Sao Paulo, Brazil) e implications for the evolution of the Ribeira Belt. *J. S. Am. Earth Sci.* 14, 363 - 376.

Janasi, V.A.; Andrade, S.; Vasconcellos, A.C.B.C.; Henrique-Pinto, R.; Ulbrich, H.H.G.J. 2015. Timing and sources of granite magmatism in the Ribeira Belt, SE Brazil: Insights from zircon in situ U-Pb dating and Hf isotope geochemistry in granites from the São Roque Domain. *Journal of South American Earth Sciences*. 68: 224 – 247.

Koblinger, B.M. & Pattison, D.R.M. 2017. Crystallization of heterogeneous pelitic migmatites: insights from thermodynamic modelling. *Journal of Petrology*. 58, 297-326.

Ludwig, K.R. 2003. Isoplot 3.0 – A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication N°4.

Machado, R., Dehler, N.M., Vasconcelos, P., 2007.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages (600-570 Ma) of the Serra do Azeite transtensional shear zone: evidence for syncontractional extension in the Cajati area, southern Ribeira belt. *An. Acad. Bras. Ciências* 79: 713 - 723.

McDonough, W.F. and Sun, S.-S. 1995. Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120: 223-253.

Mogk, D.W., 1992. Ductile shearing and migmatization at mid-crustal levels in an Archaean high-grade gneiss belt, northern Gallatin Range, Montana, USA. *Journal of Metamorphic Geology*, 10: 427–438.

van der Molen, I. & Paterson, M.S. 1979. Experimental deformation of partially-melted granite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70: 299–318.

Mori, P.E.; Correia, C.T.; Reeves, S.; Haukka, M. 1999. Development of a fused glass disc XRF facility and comparison with pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, São Paulo University. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(3): 441 – 446.

Naney, M.T., 1983. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. *American Journal of Science*, 283: 993–1033.

Navarro, M.S.; Andrade, S.; Ulbrich, H.H.G.J.; Gomes, C.B.; Girardi, V.A.V. 2008. The Direct Determination of Rare Earth Elements in Basaltic and Related Rocks using ICP-MS: Testing the Efficiency of Microwave Oven Sample Decomposition Procedures. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(2): 167 – 180.

Passarelli, C.R.; Basei, M.A.S.; Campos Neto, M.C.; Siga Jr., O.; Prazeres Filho, H.J. 2004. Geocronologia e geologia isotópica dos terrenos pré-cambrianos da porção sul-oriental do Estado de São Paulo. *Geologia USP, Série Científica*, São Paulo, 4(1): 55 – 74.

Passarelli, C.R.; Basei, M.A.S.; Prazeres Filho, H.J.; Siga Jr., O.; Szabó, G.A.J.; Marco-Neto, J. 2007. Structural and geochronological constraints on the evolution of the Juréia Massif, Registro Domain, State of São Paulo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79(3): 441 – 455.

Passarelli, C.R.; Basei, M.A.S.; Wemmer, K.; Siga Jr, O.; Oyhantçabal, P. 2011. Major shear zones of southern Brazil and Uruguay: escape tectonics in the eastern border of Rio de La plata and Paranapanema cratons during the Western Gondwana amalgamation, *International Journal of Earth Sciences*, 100 (2-3): 391-414.

Passarelli, C.R.; Basei, M.A.S.; Siga Jr, O.; Silva, P.M.C.; Shinoda, R. 2016 .New U-Pb LA-ICP-MS ages from granitic and migmatitic rocks of the Costeiro Terrane, Mongaguá Domain, Southeastern Brazil: Some petrogenetic implications. 10<sup>th</sup> South American Symposium on Isotope Geology – Latin America, Puerto Vallarta, Mexico – Program and Abstracts, pp 151.

Palin, R.M., White, R.W., Green, E.C.R., Diener, J.F.A., Powell, R. and Holland, T. J. B. 2016. High-grade metamorphism and partial melting of basic and intermediate rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 34: 871 – 892.

Pavan, M.; Moraes, R.; Sawyer, E.W. The composition of anatectic melt and its complementary residue by forward modelling of equilibrium and fractional melting using THERMOCALC (*submitted*).

Pavan, M., Moraes, R., Sawyer, E.W. & Faleiros, F.M. 2017. Partial melting of continental crust during West Gondwana Assembly. *Goldschmidt Abstracts*.

Picanço, J. L. 1994. Aplicação das sistemáticas Sm/Nd e Rb/Sr no Maciço de Itatins (SP). Master of Science Dissertation. Geosciences Institute, University of São Paulo, São Paulo, 140 pp.

Picanço, J.L. et al. 1998. Idades U-Pb (SHRIMP), Sm-Nd e Rb-Sr em rochas do Maciço de Itatins (SP): Evidências de Evolução Policíclica. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70 (1): 139 – 150.

Prazeres Filho, H.J., 2005. Caracterização geológica e petrogenética do Batólito Granítico Três Córregos (PR-SP): Geoquímica isotópica (Nd-Sr-Pb), idades (ID-TIMS/SHRIMP) e  $\delta^{18}\text{O}$  em zircão. Doctor of Science Thesis. Geosciences Institute, University of São Paulo, 207pp.

Rabinowicz, M. & Vigneresse, J-L., 2004. Melt segregation under compaction and shear channeling: Application to granitic magma segregation in a continental crust. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, **109**: B04407.

Rosenberg, C.L. & Handy, M.R. 2005. Experimental deformation of partially melted granite revisited: implications for the continental crust. *Journal of Metamorphic Geology*, **23**: 19-28.

Rutter, E. & Neumann, D.H.K. 1995. Experimental deformation of partially molten Westerly granite under fluid-absent conditions, with implications for the extraction of granitic magmas. *Journal of Geophysical Research*, 100: 15697–15715.

Sadowski, G.R. 1974. Tectônica do Complexo Migmatítico da Serra do Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974. Porto Alegre. Anais..., Porto Alegre, SGB, Bol. Especial n° 1: 557-561.

Sawyer, E.W. 1998. Formation and evolution of granite magmas during crustal reworking: the significance of diatexites. *Journal of Petrology*, 39: 1147–1167.

Sawyer, E.W. 2008. Atlas of migmatites. *The Canadian Mineralogist*. In: Special Publication, vol. 9. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, 371pp.

Sawyer, E.W. 2010. Migmatites formed by water-fluxed partial melting of a leucogranodiorite protolith: Microstructures in the residual rocks and source of the fluid. *Lithos* 116: 273 – 286.

Siga Jr, 1995. O. Domínios tectônicos do sudeste do Paraná e nordeste de Santa Catarina: geocronologia e evolução crustal. 1995. 212 p. Doctor of Science Thesis. Geosciences Institute, University of São Paulo, São Paulo. 212 pp.

Silva, A. T. S. F. et al. 1977. Projeto Santos – Iguape. DNPM-CPRM. Unpublished report, São Paulo, v. 1, 640 pp.

Silva, A.T.S.F. et al. 1981. Projeto Integração e Detalhe Geológica no Vale do Ribeira. DNPM-CPRM. Unpublished report, São Paulo, v. 1, 273 pp.

Silva, L.C., McNaughton, N.J., Armstrong, R., Hartmann, L.A., Fletcher, I.R., 2005. The Neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: a zircon based U-Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens. *Precambrian Research*, 136: 203 - 240.

Slagstad, T., Jamieson, R.A., Culshaw, N.G., 2005. Formation, crystallisation and migration of melt in the mid-orogenic crust: Muskoka domain migmatites, Grenville Province, Ontario. *Journal of Petrology* 46: 893–919.

Smith, J.V. 1974. *Feldspar Minerals. Volume 2: Chemical and Textural properties*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg and New York. 690 pp.

Solar, G.S. & Brown, M. 2001. Petrogenesis of Migmatites in Maine, USA: Possible Source of Peraluminous Leucogranite in Plutons? *Journal of Petrology*, **42**: 789-823.

Taylor, J.; Nicoli, G.; Stevens, G.; Frei, D.; Moyen, J.-F. 2014. The processes that control leucosome compositions in metasedimentary granulites: perspectives from the Southern Marginal Zone migmatites, Limpopo Belt, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology*, 32: 713-742.

Touret, J.L.R.; Huizenga, J.M. 2012. Charnockite microstructures: From magmatic to Metamorphic. *Geosciences Frontiers*, 3(6): 745 – 753.

Tupinambá, M.; Teixeira, W. & Heilbron, M. 2000. Neoproterozoic Western Gondwana assembly and subduction-related plutonism: the role of the Rio Negro Complex in the Ribeira Belt, Soth-eastern Brazil. *Revista Brasileira Geociências*, 30: 7-11.

Vlach, S. R. F. 2001. Microprobe monazite constraints for an early (ca. 790 Ma) Brasiliano orogeny: the Embu Terrane, Southeastern Brazil. In: 3<sup>rd</sup> South American Symposium on Isotope Geology, Pucón. Extended Abstracts, Pucón, 2001. v.1, p. 265–268.



Weinberg, R; Hasalova, P. 2015. Water-fluxed melting of the continental crust: A review. *Lithos*, 212-215: 158-188.

Wells, P.R.A. 1977. Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62: 129 – 139.

Wenk, H.-R.; Chen, K.; Smith, R. 2011. Morphology and microstructure of magnetite and ilmenite inclusions in plagioclase from Adirondack anorthositic gneiss, *American Mineralogist*, 96(8–9): 1316–1324.

White, R. W. & Powell, R. 2002. Melt loss and preservation of granulite facies mineral assemblages. *Journal of Metamorphic Geology*, 20: 621-632.

Yakymchuk, C. & Brown, M., 2014. Consequences of open-system in tectonics. *Journal of the Geological Society*, **171**: 21-40.

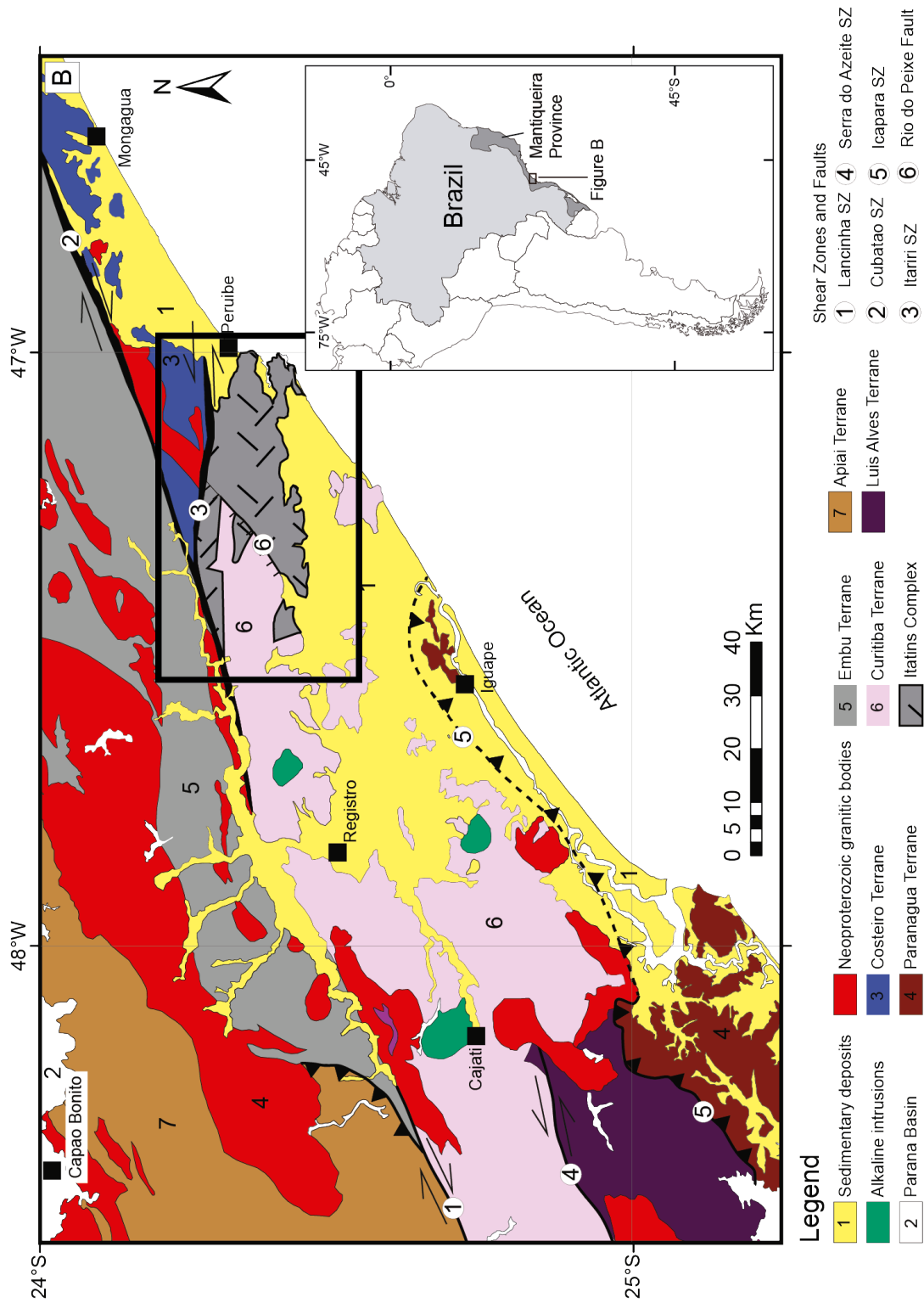
White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B, Johnson, T.E. & Green, E.C.R., 2014. New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems. *Journal of Metamorphic Geology*, **32**, 261-286.

Whitney, D.L. & Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, **95**, 185-187.

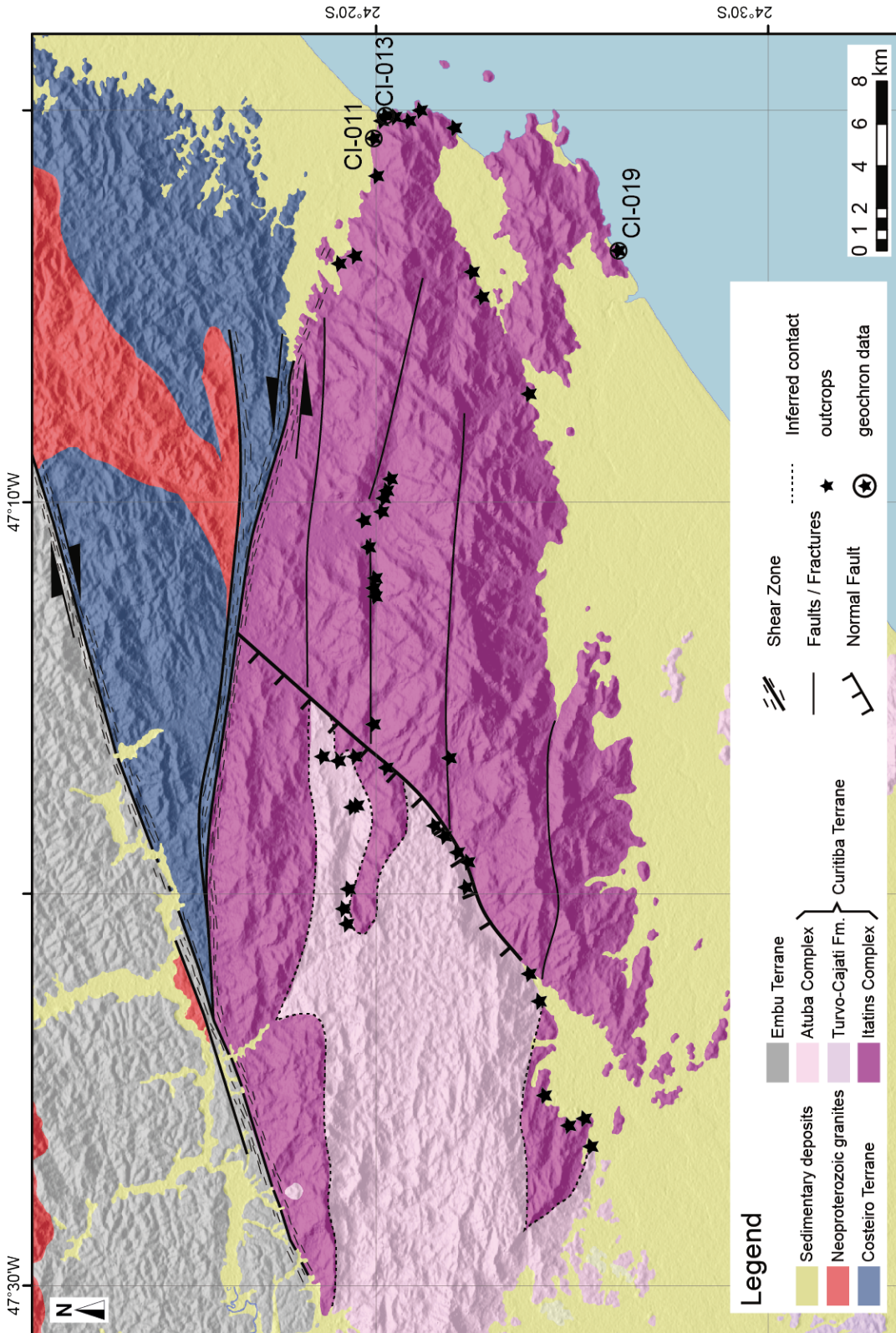
Winkler, H.G.F. 1979. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Springer, Heidelberg, 348 pp.

Wood, B.J.; Banno, S. 1973. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 42: 109 – 124.

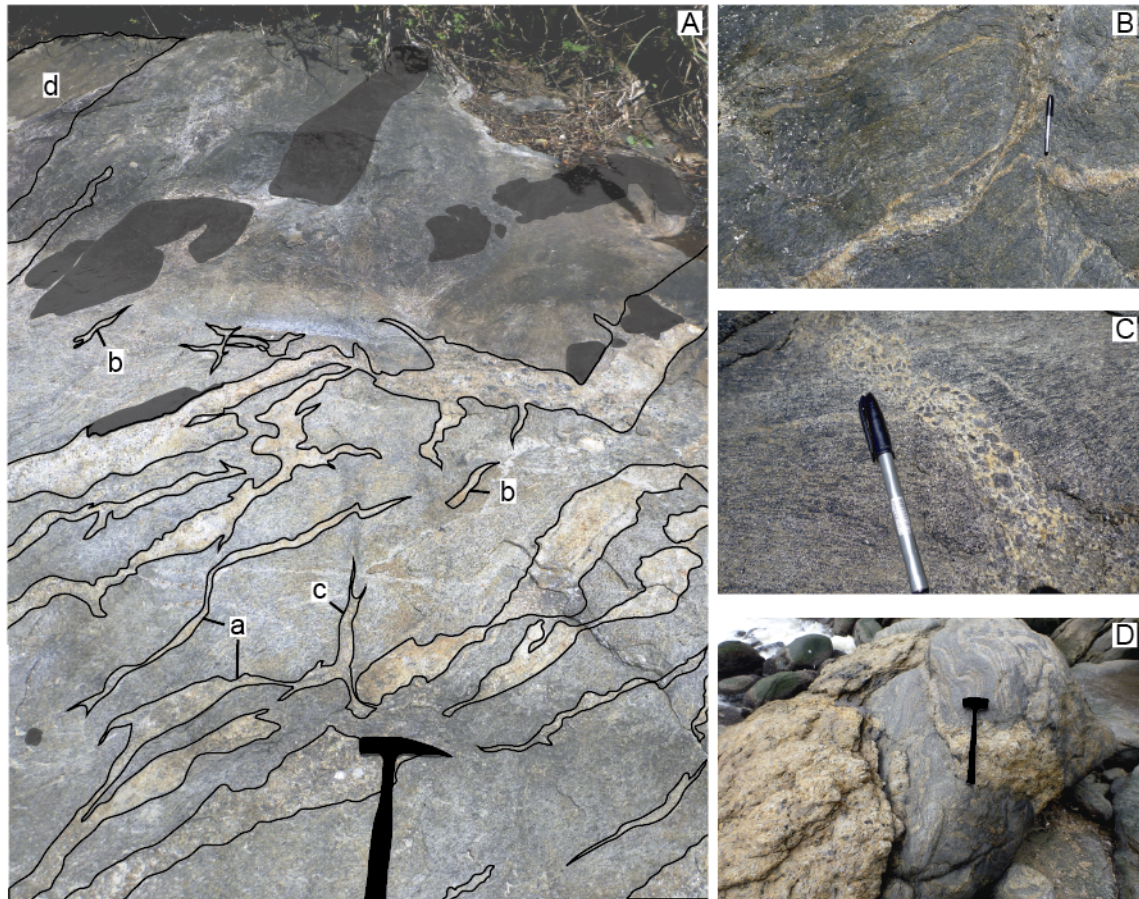
FIGURES



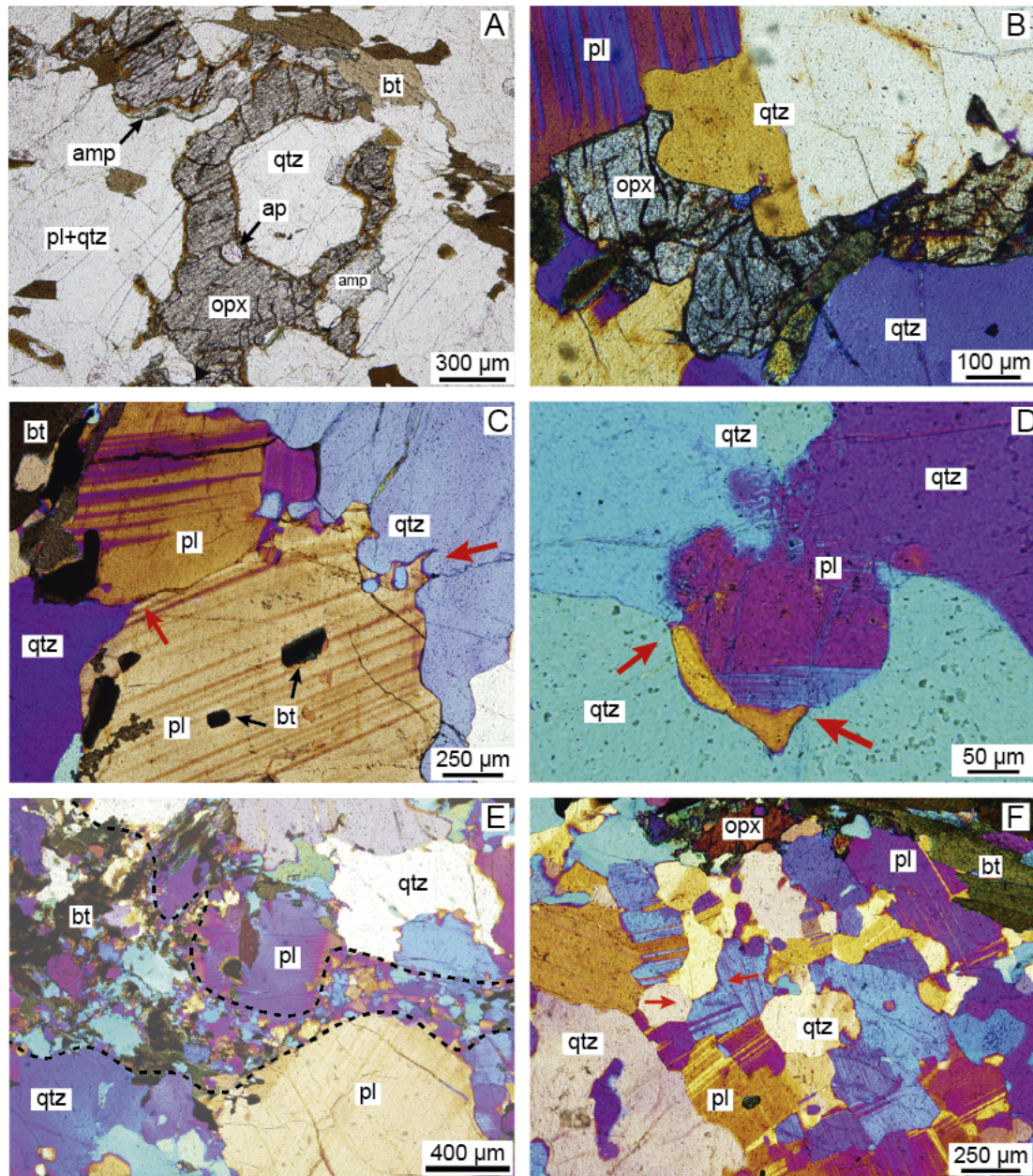
**Figure 1:** Location of the Mantiqueira Province in Brazil (A) and lithotectonic framework of Southern Ribeira Belt (B). The box indicates the location of figure 2.



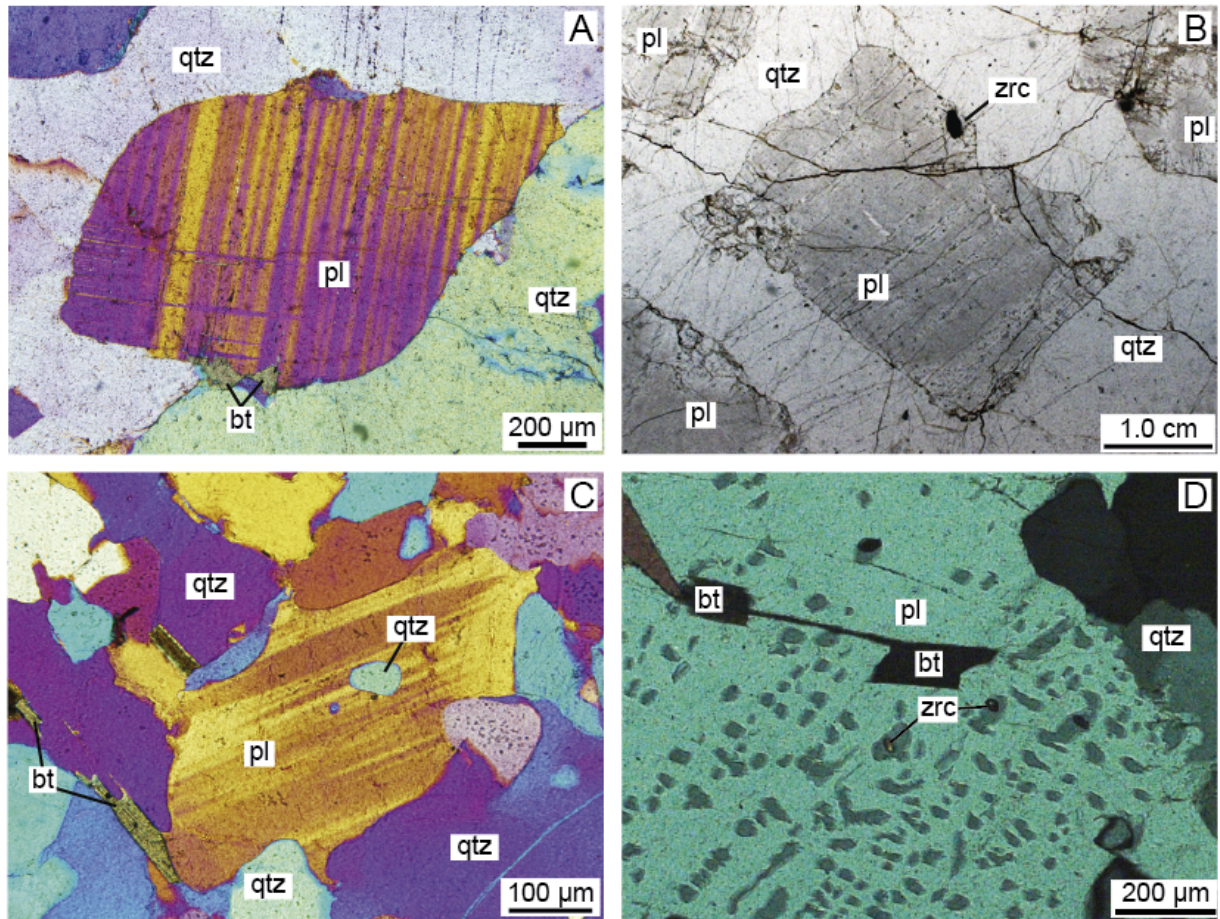
**Figure 2:** Simplified map from Itatins Complex and surroundings, with geology over the shaded relief (from SRTM data). Visited outcrops are identified by dark stars and the locations of the samples selected to geochronological data are marked by a star with enclosing circle.



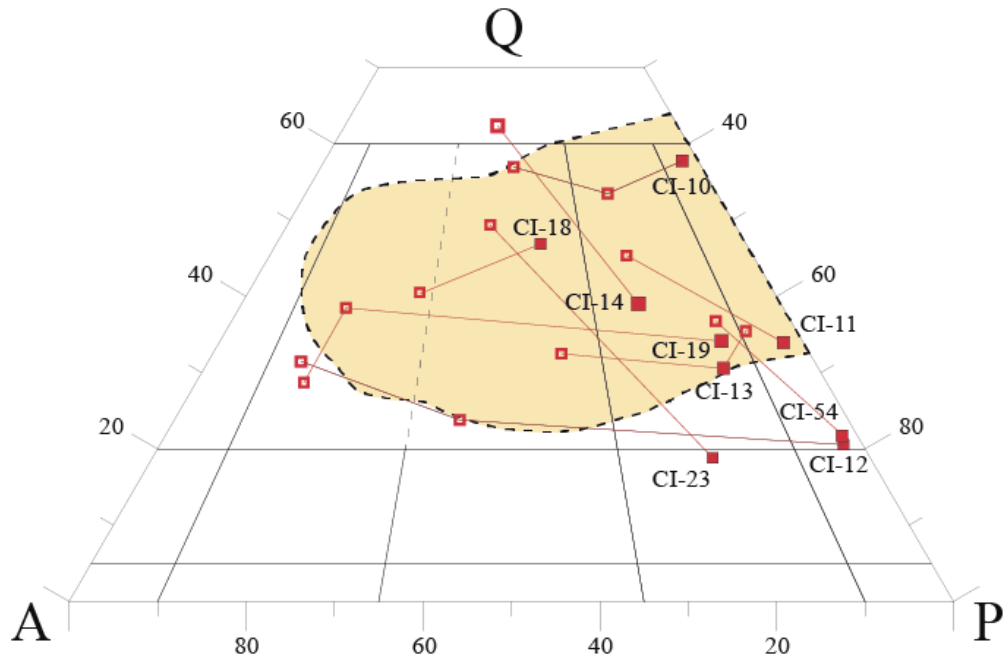
**Figure 3:** General view of the biotite felsic granulite showing the distribution and morphology of the leucosomes (A). For description of features indicated by lowercase letters, see the text. Dark grey shapes correspond to fragments of mafic granulite. (B) Layers of leucosome parallel to the foliation and affected by folding. (C) Leucosome vein in a fracture or shear band cross-cutting the foliation. Large dark crystals are made of plagioclase. (D) Granitic dyke feeding a leucosome pod interpreted to represent an accumulation of melt in the host rock.



**Figure 4:** Textural features indicating the occurrence of melting reactions, presence of former melt and crystallization from melt in the biotite felsic granulite. Mineral abbreviations are: amp (amphibole), ap (apatite), bt (biotite), pl (plagioclase), opx (orthopyroxene) and qtz (quartz). (A) Orthopyroxene involving a quartz grain. (B) Pointed edge of orthopyroxene in contact with quartz indicating mobility of the quartz grain boundary. (C) Irregular edge of plagioclase with very low interfacial angles indicated by arrows which are interpreted as a result from infiltration of melt created via the melting reaction. (D) Quartz film (orange) with arrows pointing to rounded terminations indicative of textural re-equilibration, which increased the interfacial angle. (E) Tonalite veins is marked by dashed lines and composed of biotite + plagioclase + quartz crossing a leucosome sample. (F) Leucosome layer showing plagioclase and quartz grains with a variety of shapes; some are highly irregular with embayments and sharp lobes, but others have straight, low energy grain boundaries indicative of a high degree of textural re-equilibration.

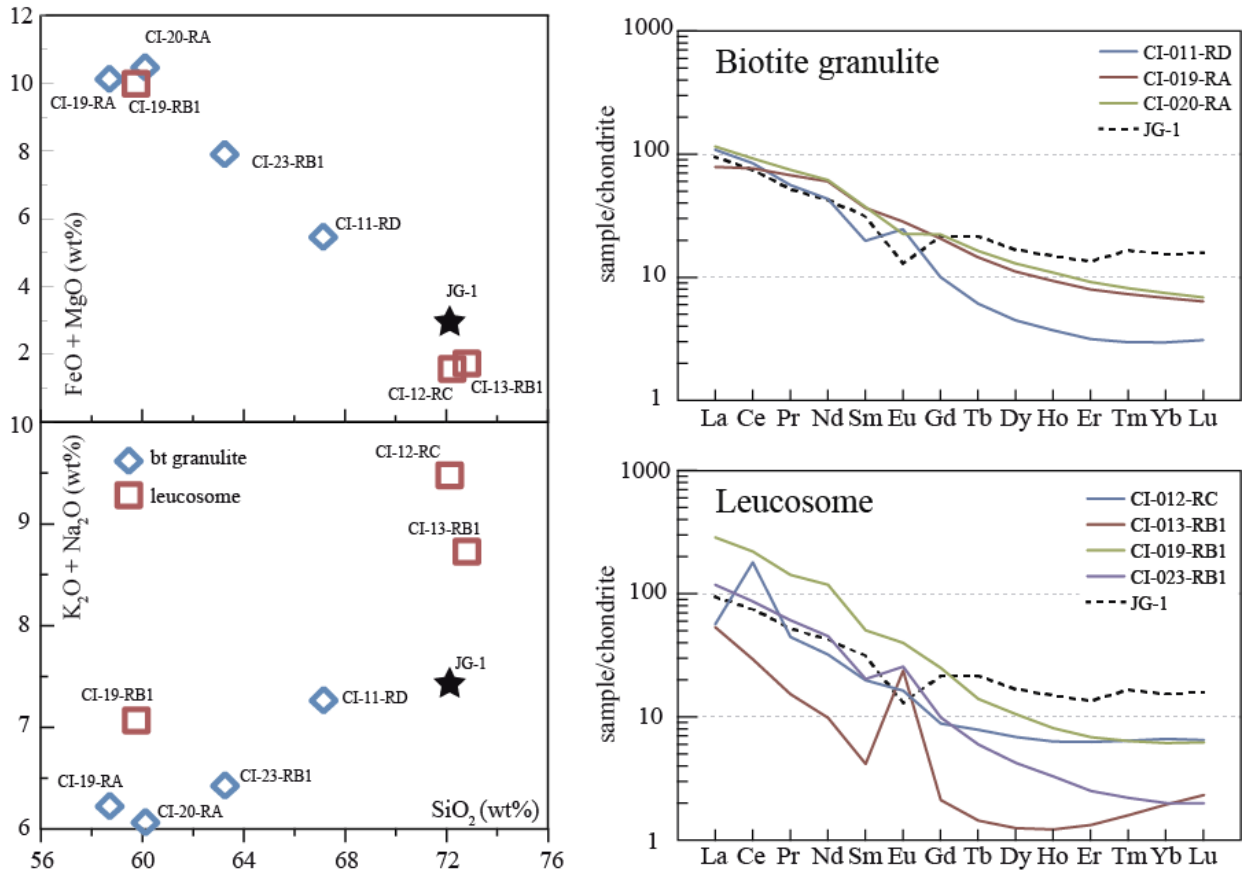


**Figure 5:** Textural features present in the leucosomes from the biotite felsic granulite. Mineral abbreviations are: bt (biotite), pl (plagioclase), opx (orthopyroxene), qtz (quartz) and zrn (zircon). (A) Plagioclase grain with rounded edges surrounded by quartz. (B) Euhedral grain of a dark grey plagioclase full of tiny inclusions of a Ti-Fe phase with a large inclusion of prismatic zircon. (C) Plagioclase grain with rounded (large interfacial angle) and pointed (low interfacial angles) edges surrounded by quartz indicating partial textural re-equilibration, from a leucosome layer in the residual neosome. (D) Zircon associated with K-feldspar inclusions/exsolution in plagioclase.

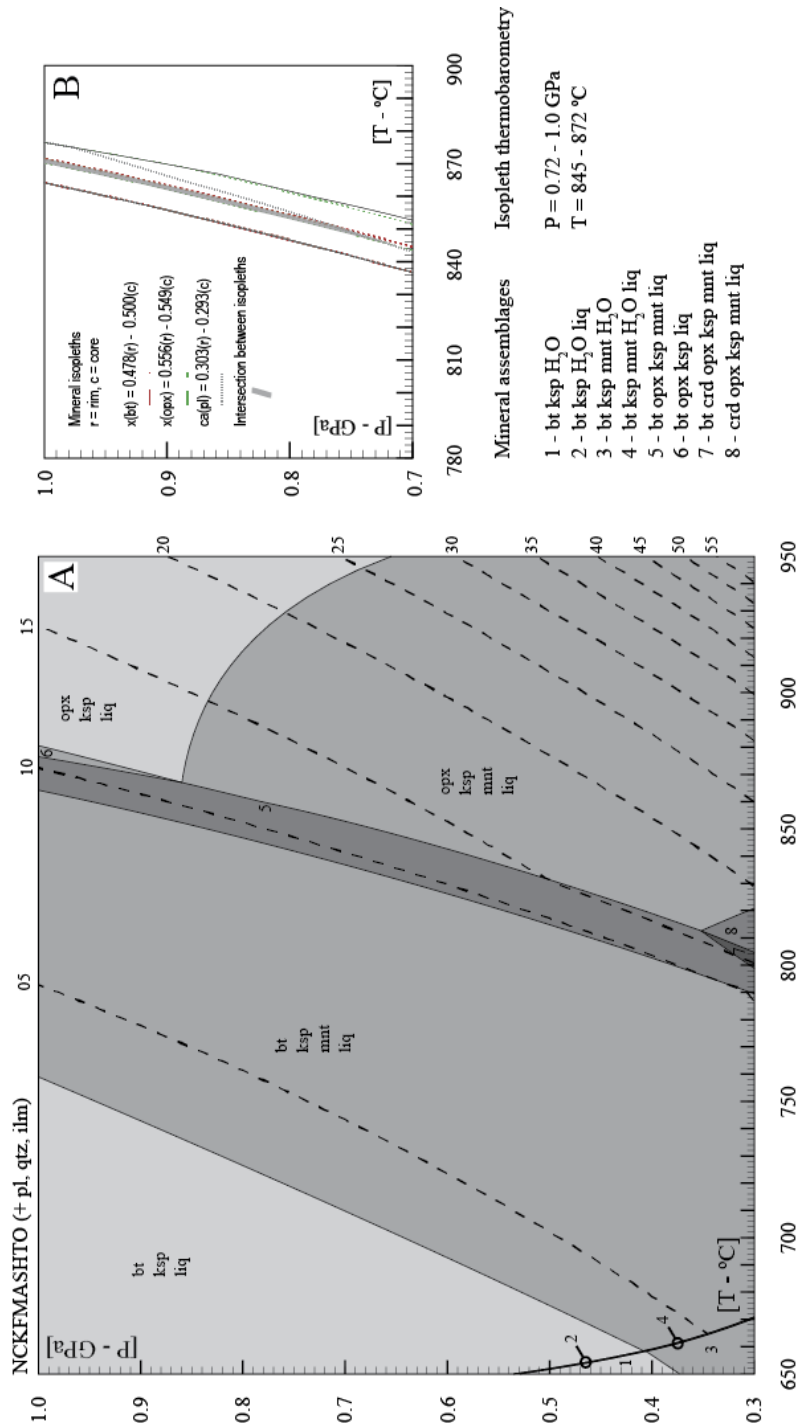


**Figure 6:** QAP diagram with the results of modal proportion from the samples described. Correlation between biotite felsic granulite (filled squares) and leucosome (empty squares) from the same outcrop is marked by tie lines. Part of the leucosome displays enrichment in A proportion, while the other displays increase in Q proportion, in relation to the residue. The correlation cannot be associated with textural/structural features, as both occur in segregated and unsegregated leucosomes. The yellow field represents the leucosome compositions from Sawyer (2008).

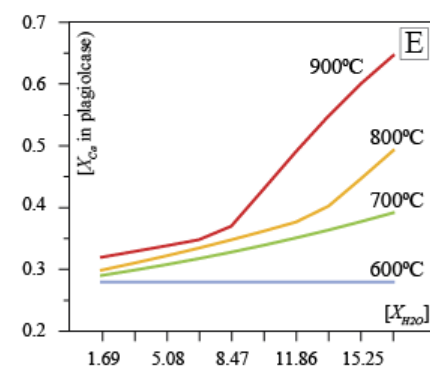
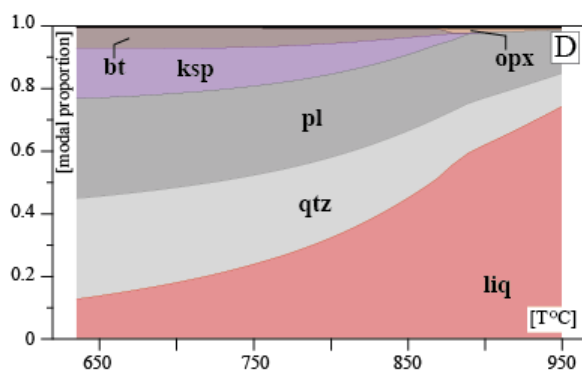
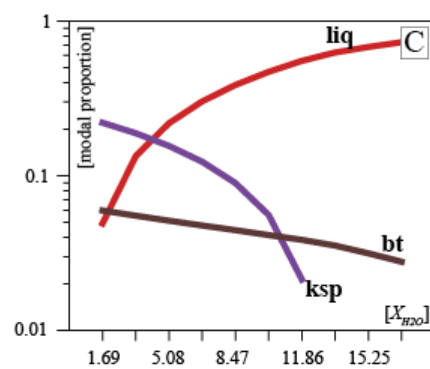
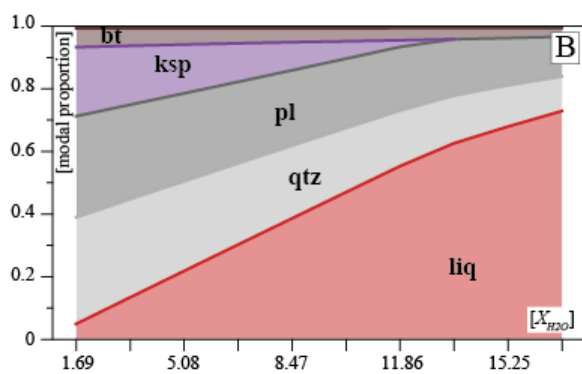
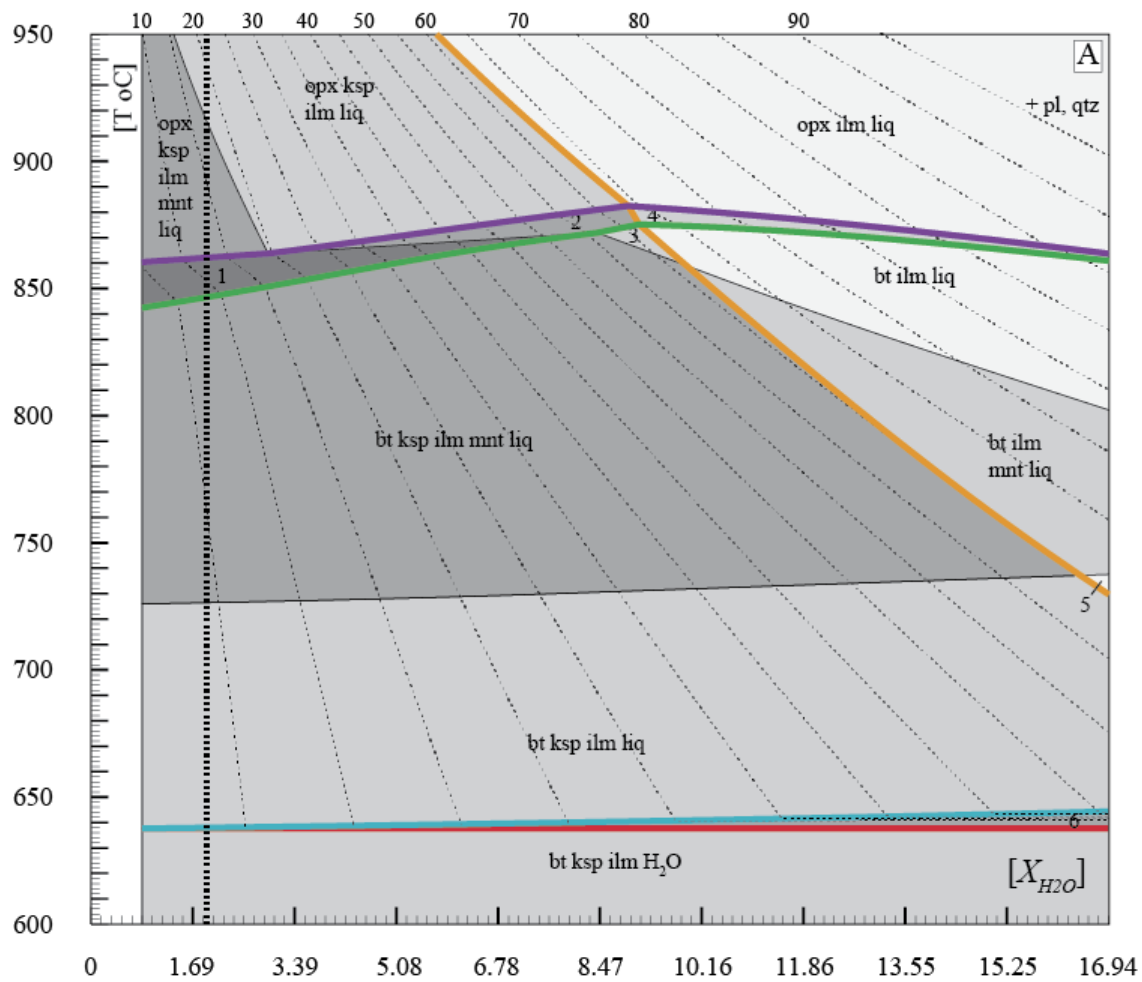




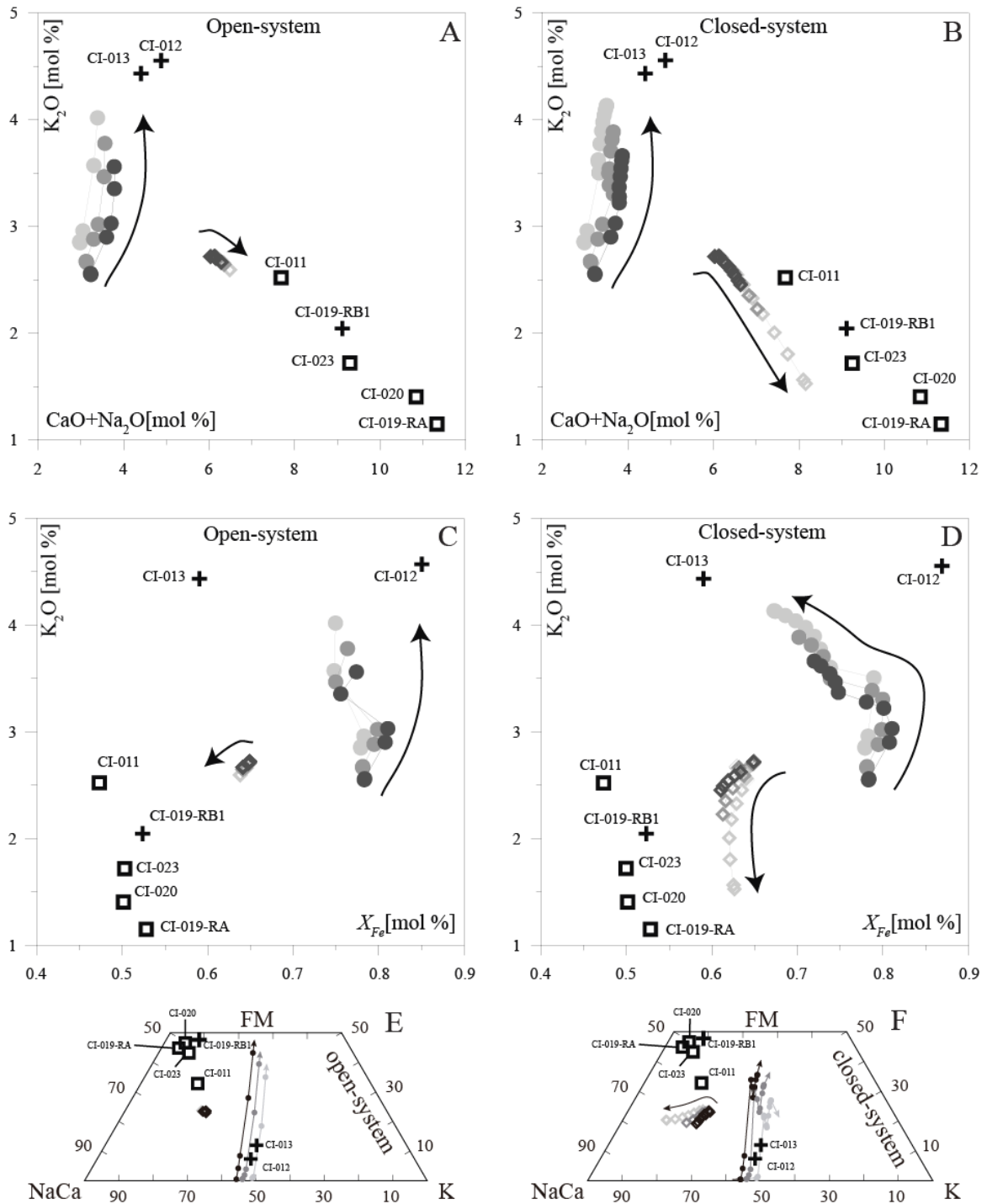
**Figure 7:** Binary diagrams for major oxides [SiO<sub>2</sub> (wt. %) vs. K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O (wt. %) and SiO<sub>2</sub> vs FeO + MgO (wt. %)] and the REE contents normalized to chondrite composition by McDonough & Sun (1995), for biotite felsic granulite and leucosome from the Itatins Complex.



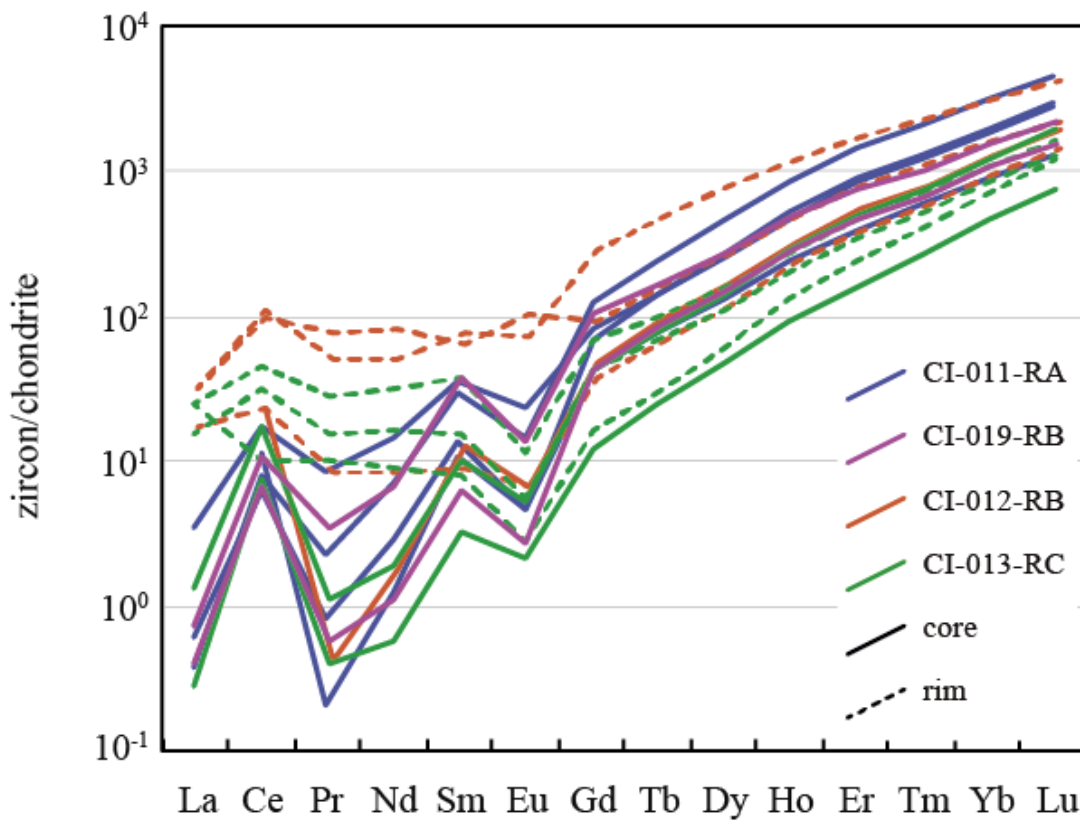
**Figure 8:** *P-T* pseudosections for JG-1 composition with  $X_{Fe}$  [ $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+MgO)$ ] modified to 0.649. In figure A the distribution of the mineral assemblages shows that biotite-bearing and orthopyroxene-bearing assemblages are dominant, with cordierite stable only at  $P > 0.3$  GPa. Dashed lines indicate the melt volume isopleths (in mol %). Figure B is a detailed view of the field (5), where cationic isopleths of plagioclase, biotite and orthopyroxene crosses marking the *P-T* condition of stability for the assemblage analysed in biotite felsic granulite samples. Composition used to calculate the pseudosection is (in mol. %): Na<sub>2</sub>O = 3.51, CaO = 2.52, K<sub>2</sub>O = 2.72, FeO = 1.70, MgO = 0.92, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 8.98, SiO<sub>2</sub> = 77.36, H<sub>2</sub>O = 1.93, TiO<sub>2</sub> = 0.21. O = 0.15.



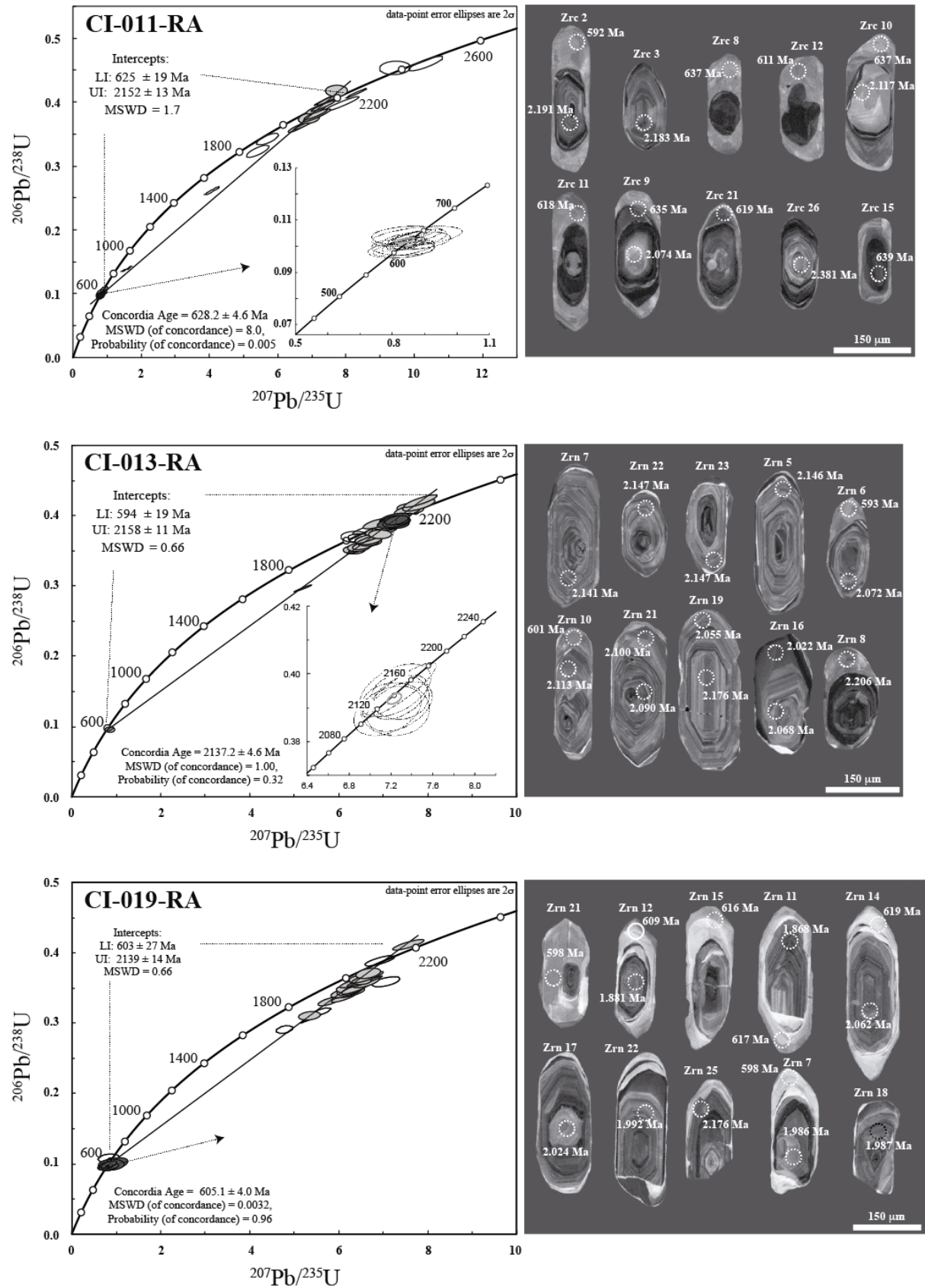
**Figure 9:** (A)  $T$ - $X_{H_2O}$  pseudosection for modified JG-1 bulk composition for evaluation of role of  $H_2O$  in melt fertility and stabilization of mineral phases. Dashed lines: thick – marks the content of  $H_2O$  for the bulk composition used in figure 8; thin – melt volume isopleths (in mol %). Coloured lines: red – solidus; blue – limit between saturated and unsaturated fields; yellow – K-feldspar-out; green – orthopyroxene-in; purple – biotite-out. (B) Modal proportion vs.  $X_{H_2O}$  at 800 °C. (C) Variation of the proportion of liquid, biotite and K-feldspar vs.  $X_{H_2O}$ . (D) Modal proportion vs.  $T$  (°C) with  $X_{H_2O} = 8.47$  mol %. (E) Variation in  $X_{Ca}$  (Ca/Ca+Na+K) of plagioclase vs.  $X_{H_2O}$ .



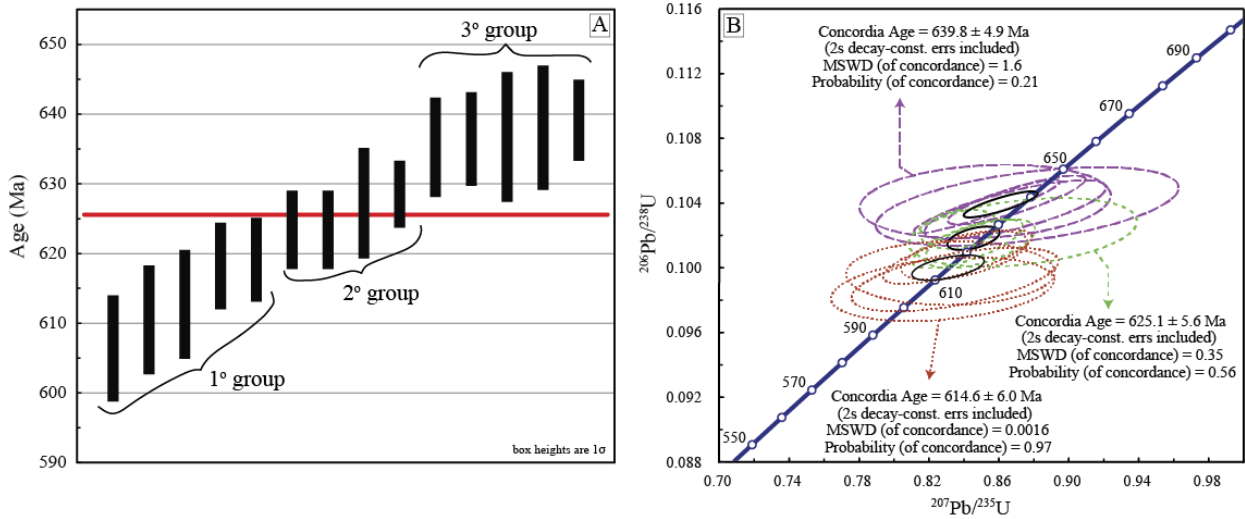
**Figure 10:** Binary and ternary diagrams showing evolutionary trends of melt and residue compositions calculated using THERMOCALC, for partial melting in open- and closed-systems, for comparison with samples from biotite felsic granulite. Arrows indicate the direction of the trend with increasing temperature. Symbols: filled circles – melt compositions; empty diamonds – residue compositions; empty squares – Biotite granulite samples; crosses – leucosome samples.



**Figure 11:** REE compositions of zircon grains from biotite felsic granulite (CI-011-RA and CI-019-RA) and leucosome (CI-012-RB and CI-013-RC) normalized to chondrite composition by McDonough & Sun (1995).



**Figure 12:** Results of U-Pb method analysed in zircon grains by LA-ICP-MS for three selected samples from the biotite felsic granulite with general view of the analysed crystals (CL image). In the diagrams, the empty ellipses correspond to analyses not used in the age calculation.



**Figure 13:** Weighted average diagram (A) and Concordia ages (B) for the set of zircon crystals from lower intercept of sample CI-011-RA. From diagram A it is separated the analyses in three groups of four to five analyses, and calculated the concordia ages for each one. It shows that rim analyses are continuously younger, during a time span of *ca.* 25 Ma.



TABLES

**Table 1:** Modal proportions of representative samples of biotite felsic granulite and leucosome from Itatins Complex. Mineral abbreviations are: qtz (quartz), pl (plagioclase), kfs (K-feldspar), bt (biotite), grt (garnet), opx (orthopyroxene), hbl (hornblende), cpx (clinopyroxene), op (opaque minerals), rt (rutile), zrn (zircon), ap (apatite), mnz (monazite) and all (allanite).

| Sample     | facies                  | qtz | plag | k-feld | bt | grt | opx | hbl | amp | cpx | op | rt | zrn | ap | mnz | all | sum | n    |
|------------|-------------------------|-----|------|--------|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|------|
| CI-010-RAJ | melanosome              | 34  | 24   | 1      | 24 | -   | 16  | -   | -   | -   | tr | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 1031 |
| CI-011-RD  | residual neosome        | 28  | 52   | 2      | 16 | -   | 2   | -   | -   | -   | tr | -  | tr  | 1  | -   | -   | 100 | 925  |
| CI-012-RB  | residual neosome        | 15  | 56   | 2      | 17 | -   | 9   | 1   | -   | tr  | tr | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 626  |
| CI-013-RC1 | residual neosome        | 21  | 40   | 7      | 12 | -   | 21  | -   | -   | -   | tr | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 1008 |
| CI-014-RB  | residual neosome        | 27  | 31   | 11     | 4  | -   | 8   | 16  | -   | -   | 2  | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 797  |
| CI-018-RA  | residual neosome        | 36  | 23   | 18     | 20 | -   | -   | tr  | -   | -   | 2  | -  | tr  | tr | -   | tr  | 100 | 857  |
| CI-019-RB2 | residual neosome        | 19  | 32   | 5      | 25 | -   | 16  | -   | -   | -   | 1  | -  | tr  | 2  | -   | -   | 100 | 714  |
| CI-023-RB2 | residual neosome        | 13  | 45   | 13     | 15 | -   | 14  | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 929  |
| CI-023-RC  | residual neosome        | 29  | 49   | 1      | 13 | 2   | 5   | -   | -   | tr  | -  | -  | tr  | 1  | -   | -   | 100 | 1489 |
| CI-047-RA  | residual neosome        | 33  | 36   | 9      | 22 | -   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | -   | -  | -   | -   | 100 | 1006 |
| CI-052-RB  | residual neosome (dom1) | 26  | 11   | 56     | 7  | -   | tr  | -   | -   | -   | tr | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 1068 |
| CI-052-RB  | residual neosome (dom2) | 24  | 20   | 37     | 20 | -   | -   | -   | -   | -   | tr | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 651  |
| CI-053-RA  | residual neosome        | 20  | 42   | 23     | 3  | -   | 7   | 3   | -   | -   | tr | -  | tr  | 1  | -   | -   | 100 | 1241 |
| CI-054-RE  | melanosome (1b)         | 14  | 43   | 2      | 27 | -   | 13  | tr  | -   | -   | -  | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 741  |
| CI-010-RAJ | leucosome               | 57  | 22   | 21     | -  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | tr | tr  | -  | tr  | -   | 100 | 1425 |
| CI-010-RC  | leucosome               | 54  | 34   | 12     | -  | -   | -   | tr  | -   | -   | tr | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 1026 |
| CI-011-RC  | leucosome               | 44  | 39   | 14     | 2  | -   | -   | -   | -   | -   | tr | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 751  |
| CI-012-RB  | leucosome               | 23  | 32   | 43     | 1  | -   | 1   | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 740  |
| CI-012-RC  | leucosome - granitic    | 30  | 10   | 56     | 4  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | tr | tr  | -  | -   | tr  | 100 | 904  |
| CI-013-RB1 | leucosome               | 35  | 59   | 6      | -  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 815  |
| CI-013-RB1 | leucosome               | 30  | 37   | 26     | 6  | 1   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 949  |
| CI-014-RB  | leucosome               | 62  | 17   | 20     | -  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | -   | -  | -   | -   | 100 | 476  |
| CI-018-RA  | leucosome               | 38  | 18   | 38     | 3  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | 1  | -   | tr  | 100 | 1155 |
| CI-019-RC1 | leucosome (coarse)      | 28  | 12   | 57     | 3  | -   | -   | -   | -   | -   | 1  | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 735  |
| CI-019-RC1 | leucosome (fine)        | 38  | 12   | 48     | 2  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 1000 |
| CI-023-RB2 | leucosome               | 46  | 22   | 26     | 6  | -   | tr  | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | tr | -   | -   | 100 | 1063 |
| CI-052-RA  | leucosome               | 34  | 51   | 8      | 8  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 967  |
| CI-052-RA  | leucosome - hbl         | 31  | 40   | 8      | 16 | -   | -   | -   | 5   | -   | tr | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 772  |
| CI-054-RD  | leucosome               | 45  | 25   | 24     | 5  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 802  |
| CI-054-RE  | leucosome (1a)          | 41  | 47   | 12     | -  | -   | -   | -   | -   | -   | -  | -  | tr  | -  | -   | -   | 100 | 727  |

Biotite granulite

leucosome

**Table 2:** Compositions in wt % and mol. % of selected samples from biotite felsic granulite and leucosome from the Itatins Complex

| Sample                         | CI-011-RD                      | CI-019-RA        | CI-020-RA    | CI-019-RB1 | CI-023-RB1 | CI-012-RC | CI-013-RB1 |        |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------|------------|------------|-----------|------------|--------|
| Rock                           | Bt granulite                   | Bt-granulite     | Bt-granulite | Leucosome  | Leucosome  | Leucosome | Leucosome  |        |
| wt %                           | SiO <sub>2</sub>               | 67.15            | 58.71        | 60.12      | 59.76      | 63.26     | 72.24      | 72.80  |
|                                | TiO <sub>2</sub>               | 0.49             | 0.83         | 0.70       | 0.92       | 0.66      | 0.12       | 0.28   |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.39            | 18.21        | 16.53      | 16.82      | 16.78     | 14.91      | 13.82  |
|                                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.04             | 0.76         | 0.70       | 0.71       | 0.28      | 0.72       | 0.51   |
|                                | FeO                            | 2.56             | 5.82         | 5.86       | 5.72       | 4.57      | 0.71       | 0.77   |
|                                | MnO                            | 0.06             | 0.11         | 0.11       | 0.11       | 0.08      | 0.02       | 0.02   |
|                                | MgO                            | 1.60             | 2.92         | 3.27       | 2.93       | 2.57      | 0.07       | 0.30   |
|                                | CaO                            | 3.18             | 5.46         | 5.61       | 3.85       | 4.35      | 1.43       | 1.51   |
|                                | Na <sub>2</sub> O              | 3.68             | 4.59         | 4.05       | 4.19       | 3.96      | 2.98       | 2.44   |
|                                | K <sub>2</sub> O               | 3.59             | 1.64         | 2.02       | 2.88       | 2.47      | 6.50       | 6.29   |
|                                | H <sub>2</sub> O               | 0.40             | 0.20         | 0.24       | 0.36       | 0.24      | 0.32       | 0.26   |
|                                | Sum                            | 99.13            | 99.24        | 99.21      | 98.24      | 99.22     | 100.02     | 98.99  |
|                                | mol %                          | SiO <sub>2</sub> | 72.87        | 64.04      | 64.96      | 65.60     | 68.50      | 78.75  |
| TiO <sub>2</sub>               |                                | 0.40             | 0.68         | 0.57       | 0.76       | 0.54      | 0.10       | 0.23   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                | 9.84             | 11.71        | 10.53      | 10.88      | 10.71     | 9.58       | 8.92   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                | 0.42             | 0.31         | 0.28       | 0.29       | 0.11      | 0.30       | 0.21   |
| FeO                            |                                | 2.32             | 5.31         | 5.30       | 5.25       | 4.14      | 0.65       | 0.71   |
| MnO                            |                                | 0.05             | 0.10         | 0.10       | 0.10       | 0.08      | 0.01       | 0.02   |
| MgO                            |                                | 2.59             | 4.75         | 5.27       | 4.79       | 4.15      | 0.11       | 0.49   |
| CaO                            |                                | 3.70             | 6.38         | 6.50       | 4.53       | 5.05      | 1.67       | 1.77   |
| Na <sub>2</sub> O              |                                | 3.87             | 4.85         | 4.24       | 4.46       | 4.16      | 3.15       | 2.59   |
| K <sub>2</sub> O               |                                | 2.48             | 1.14         | 1.39       | 2.02       | 1.71      | 4.52       | 4.39   |
| H <sub>2</sub> O               |                                | 1.45             | 0.73         | 0.86       | 1.32       | 0.87      | 1.16       | 0.95   |
| Sum                            |                                | 100.00           | 100.00       | 100.00     | 100.00     | 100.00    | 100.00     | 100.00 |

**Table 3:** Compositions of the reference material JG-1 in wt % and mol. %, with recalculated values to attend  $X_{Fe}$  [ $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ ] = 0.649 and values used in the  $T-X_{H_2O}$  pseudosection.

| Reference material             | THERMOCAL input   |                              |                                  |                            |        |        |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------|--------|--------|
|                                | P-T pseudosection |                              |                                  | $T-X_{H_2O}$ pseudosection |        |        |
| Bulk composition<br>(wt. %)    |                   | Molar proportion<br>(mol. %) | Modified composition<br>(mol. %) | X=0                        | X=1    |        |
| SiO <sub>2</sub>               | 72.3              | N                            | 3.51                             | 3.51                       | 3.58   | 2.97   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.24             | C                            | 2.52                             | 2.52                       | 2.57   | 2.13   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.38              | K                            | 2.72                             | 2.72                       | 2.77   | 2.3    |
| FeO                            | 1.61              | F                            | 1.44                             | 1.70                       | 1.73   | 1.44   |
| MgO                            | 0.74              | M                            | 1.18                             | 0.92                       | 0.94   | 0.78   |
| CaO                            | 2.2               | A                            | 8.98                             | 8.98                       | 9.16   | 7.61   |
| Na <sub>2</sub> O              | 3.38              | S                            | 77.36                            | 77.36                      | 78.88  | 65.52  |
| K <sub>2</sub> O               | 3.98              | H                            | 1.93                             | 1.93                       | 0      | 16.94  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.26              | T                            | 0.21                             | 0.21                       | 0.21   | 0.18   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.099             | O                            | 0.15                             | 0.15                       | 0.15   | 0.13   |
| MnO                            | 0.063             |                              |                                  |                            |        |        |
| H <sub>2</sub> O               | 0.54              |                              |                                  |                            |        |        |
| Sum                            | 99.792            |                              | 100.00                           | 100.00                     | 100.00 | 100.00 |
| $X_{Fe}$                       | 0.685             |                              | 0.550                            | 0.649                      | 0.649  | 0.649  |

**Table 4:** Cationic ratios from minerals used in isopleth thermobarometry. The uncertainty was calculated by THERMOCALC, and values used correspond to 4% of standard deviation from ratios determined using results from EPMA analyses.

| Cationic ratios used in Isopleth thermobarometry |                      |                            |                          |
|--|----------------------|----------------------------|--------------------------|
|  | Biotite ( $X_{Fe}$ ) | Orthopyroxene ( $X_{Fe}$ ) | Plagioclase ( $X_{An}$ ) |
| core   | $0.500 \pm 0.02$     | $0.549 \pm 0.02$           | $0.293 \pm 0.01$         |
| rim  | $0.478 \pm 0.02$     | $0.556 \pm 0.02$           | $0.303 \pm 0.01$         |

$$X_{Fe} = Fe^{2+}/(Fe^{2+}+MgO)$$

$$X_{An} = Ca/(Ca+Na+K)$$

## SUPPORTING INFORMATION

Supplementary Data 1 (S1) – Tables with chemical composition (in wt. % and mol. %) of residue and melt produced by open-system and closed-system from granodiorite bulk composition with  $X_{\text{Fe}} = 0.649$ .

Supplementary Data 2 (S2) – Trace elements concentration (ppm) of zircon crystals from representative samples of biotite granulite and leucosome.

Supplementary Data 3 (S3) – U-Pb LA-ICP-MS data from zircon grains of biotite granulite.

SUPPLEMENTARY DATA 1

Table 1: Residue and Melt compositions, Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modeling from JG-1 bulk composition modified to  $X_{Fe} = 0.649$ , under closed-system partial melting. All compositions are in mol. %. Melt fraction ( $\Phi$ ) is represented by molar proportion (%).

$\Phi$  = melt fraction (%)  
 pseudo id = reference to pseudosection  
 ASI =  $Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$   
 $X_{Fe}$  =  $FeO / (MgO + FeO)$

| Closed-system | F (GPa)                        |        | T (°C) |        | 802    |        | 804    |        | 816    |        | 819    |        | 824    |        | 855   |     | 907   |     | 924   |     | 938   |     | 949   |     | 950   |     |
|---------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
|               | $\Phi$ (mol. %)                |        |        |        | 10.00  |        | 10.19  |        | 15.00  |        | 15.98  |        | 20.00  |        | 25.00 |     | 30.00 |     | 35.00 |     | 40.00 |     | 45.00 |     | 45.70 |     |
| residue       | SiO <sub>2</sub>               | 77.36  | 78.07  | 78.09  | 78.36  | 78.41  | 78.33  | 78.24  | 78.12  | 77.96  | 77.75  | 77.48  | 77.44  |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | TiO <sub>2</sub>               | 0.21   | 0.22   | 0.23   | 0.23   | 0.23   | 0.23   | 0.23   | 0.23   | 0.23   | 0.23   | 0.23   | 0.23   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.98   | 9.13   | 9.17   | 9.23   | 9.24   | 9.28   | 9.35   | 9.42   | 9.51   | 9.61   | 9.73   | 9.75   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | FeO                            | 0.15   | 0.16   | 0.17   | 0.17   | 0.18   | 0.18   | 0.19   | 0.20   | 0.21   | 0.23   | 0.25   | 0.27   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | FeO                            | 1.70   | 1.78   | 1.79   | 1.73   | 1.80   | 1.82   | 1.77   | 1.69   | 1.63   | 1.58   | 1.55   | 1.55   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | MgO                            | 0.02   | 0.06   | 0.07   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.06   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | CaO                            | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | Na <sub>2</sub> O              | 3.51   | 3.54   | 3.54   | 3.57   | 3.57   | 3.62   | 3.67   | 3.73   | 3.81   | 3.90   | 3.99   | 4.10   | 4.12   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | K <sub>2</sub> O               | 2.72   | 2.71   | 2.71   | 2.63   | 2.56   | 2.46   | 2.33   | 2.18   | 2.01   | 1.81   | 1.57   | 1.53   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | H <sub>2</sub> O               | 1.93   | 0.79   | 0.78   | 0.67   | 0.11   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
| Total         | 100.00                         | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
| ASI           | 1.02                           | 1.02   | 1.03   | 1.07   | 1.10   | 1.10   | 1.09   | 1.08   | 1.08   | 1.07   | 1.06   | 1.06   |        |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
| $X_{Fe}$      | 0.78                           | 0.78   | 0.78   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   |        |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
| residue       | SiO <sub>2</sub>               | 62.66  | 62.69  | 64.02  | 70.79  | 70.86  | 71.70  | 71.87  | 72.47  | 74.73  | 75.59  | 76.23  | 76.77  | 77.27  |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.96   | 5.95   | 6.16   | 7.32   | 7.33   | 7.38   | 7.44   | 7.58   | 7.95   | 8.00   | 8.04   | 8.07   | 8.07   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | TiO <sub>2</sub>               | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | FeO                            | 0.17   | 0.17   | 0.19   | 0.36   | 0.36   | 0.40   | 0.41   | 0.44   | 0.67   | 0.77   | 0.83   | 0.88   | 0.92   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | CaO                            | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | Na <sub>2</sub> O              | 2.81   | 2.80   | 2.85   | 2.96   | 2.96   | 2.91   | 2.90   | 2.84   | 2.81   | 2.80   | 2.79   | 2.78   | 2.78   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | K <sub>2</sub> O               | 2.85   | 2.86   | 2.96   | 3.50   | 3.51   | 3.61   | 3.63   | 3.78   | 3.90   | 3.98   | 4.04   | 4.09   | 4.13   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | H <sub>2</sub> O               | 25.50  | 25.47  | 23.72  | 13.25  | 13.06  | 12.24  | 12.07  | 9.65   | 7.72   | 6.43   | 5.51   | 4.83   | 4.29   | 4.22  |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | Total                          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | ASI                            | 1.02   | 1.02   | 1.03   | 1.07   | 1.10   | 1.10   | 1.09   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.07   | 1.06   | 1.06   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
| $X_{Fe}$      | 0.78                           | 0.78   | 0.78   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   | 0.79   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
| residue       | SiO <sub>2</sub>               | 64.64  | 64.67  | 69.26  | 723.6  | 723.6  | 829.6  | 841.7  | 852.6  | 898.4  | 929.1  | 950    | 950    | 950    | 950   | 950 | 950   | 950 | 950   | 950 | 950   | 950 | 950   | 950 | 950   | 950 |
|               | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.96   | 5.95   | 6.16   | 7.32   | 7.33   | 7.38   | 7.44   | 7.58   | 7.95   | 8.00   | 8.04   | 8.07   | 8.07   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | TiO <sub>2</sub>               | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | FeO                            | 0.17   | 0.17   | 0.19   | 0.36   | 0.36   | 0.40   | 0.41   | 0.44   | 0.67   | 0.77   | 0.83   | 0.88   | 0.92   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | CaO                            | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | Na <sub>2</sub> O              | 2.81   | 2.80   | 2.85   | 2.96   | 2.96   | 2.91   | 2.90   | 2.84   | 2.81   | 2.80   | 2.79   | 2.78   | 2.78   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | K <sub>2</sub> O               | 2.85   | 2.86   | 2.96   | 3.50   | 3.51   | 3.61   | 3.63   | 3.78   | 3.90   | 3.98   | 4.04   | 4.09   | 4.13   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | H <sub>2</sub> O               | 25.50  | 25.47  | 23.72  | 13.25  | 13.06  | 12.24  | 12.07  | 9.65   | 7.72   | 6.43   | 5.51   | 4.83   | 4.29   | 4.22  |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | Total                          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
|               | ASI                            | 1.02   | 1.02   | 1.03   | 1.07   | 1.10   | 1.10   | 1.09   | 1.08   | 1.08   | 1.08   | 1.07   | 1.06   | 1.06   |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |
| $X_{Fe}$      | 0.65                           | 0.65   | 0.65   | 0.64   | 0.64   | 0.64   | 0.64   | 0.64   | 0.62   | 0.62   | 0.61   | 0.61   | 0.61   |        |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |       |     |

Table 2: Residue and Melt compositions, Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modeling from JG-1 bulk composition modified to  $X_{Fe} = 0.649$ , under closed-system partial melting. All compositions are in wt. % and melt fraction ( $\Phi$ ) is represented by molar proportion (%).

\* = melt fraction (%)  
 † pseudo fit = reference to pseudosection  
 ‡ ASI =  $Al_2O_3/CaO-Na_2O-K_2O$   
 §  $X_{Fe} = FeO/(MgO+FeO)$

| Closed-system                  | 659                            |                  | 679             |        | 802             |        | 804             |        | 816             |        | 819             |        | 854             |        | 885             |        | 907             |        | 924             |        | 958             |        | 960             |        |        |        |       |
|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|--------|--------|-------|
|                                | $\Phi$ (mol. %)                | T (°C)           | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | T (°C) |        |        |       |
| Closed-system                  | SiO <sub>2</sub>               | 72.47            | 72.52           | 72.51  | 72.50           | 72.46  | 72.40           | 72.33  | 72.23           | 72.10  | 71.91           | 71.67  | 71.63           | 71.63  | 71.63           | 71.63  | 71.63           | 71.63  | 71.63           | 71.63  | 71.63           | 71.63  | 71.63           | 71.63  | 71.63  | 71.63  |       |
|                                | TiO <sub>2</sub>               | 0.26             | 0.27            | 0.27   | 0.29            | 0.30   | 0.31            | 0.32   | 0.34            | 0.37   | 0.40            | 0.43   | 0.47            | 0.48   | 0.48            | 0.48   | 0.48            | 0.48   | 0.48            | 0.48   | 0.48            | 0.48   | 0.48            | 0.48   | 0.48   | 0.48   |       |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.28            | 14.39           | 14.44  | 14.48           | 14.49  | 14.56           | 14.66  | 14.78           | 14.92  | 15.08           | 15.27  | 15.30           | 15.30  | 15.30           | 15.30  | 15.30           | 15.30  | 15.30           | 15.30  | 15.30           | 15.30  | 15.30           | 15.30  | 15.30  | 15.30  |       |
|                                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.37             | 0.39            | 0.41   | 0.41            | 0.43   | 0.44            | 0.46   | 0.49            | 0.53   | 0.57            | 0.61   | 0.67            | 0.68   | 0.68            | 0.68   | 0.68            | 0.68   | 0.68            | 0.68   | 0.68            | 0.68   | 0.68            | 0.68   | 0.68   | 0.68   |       |
|                                | FeO                            | 1.90             | 1.98            | 1.98   | 1.92            | 1.99   | 2.01            | 1.95   | 1.87            | 1.80   | 1.75            | 1.71   | 1.71            | 1.71   | 1.71            | 1.71   | 1.71            | 1.71   | 1.71            | 1.71   | 1.71            | 1.71   | 1.71            | 1.71   | 1.71   | 1.71   |       |
|                                | MgO                            | 0.58             | 0.60            | 0.61   | 0.61            | 0.63   | 0.63            | 0.63   | 0.62            | 0.61   | 0.60            | 0.59   | 0.57            | 0.57   | 0.57            | 0.57   | 0.57            | 0.57   | 0.57            | 0.57   | 0.57            | 0.57   | 0.57            | 0.57   | 0.57   | 0.57   |       |
|                                | CaO                            | 2.20             | 2.28            | 2.29   | 2.39            | 2.50   | 2.52            | 2.61   | 2.74            | 2.88   | 3.05            | 3.23   | 3.45            | 3.49   | 3.49            | 3.49   | 3.49            | 3.49   | 3.49            | 3.49   | 3.49            | 3.49   | 3.49            | 3.49   | 3.49   | 3.49   |       |
|                                | Na <sub>2</sub> O              | 3.29             | 3.40            | 3.40   | 3.42            | 3.45   | 3.46            | 3.50   | 3.56            | 3.63   | 3.72            | 3.81   | 3.92            | 3.95   | 3.95            | 3.95   | 3.95            | 3.95   | 3.95            | 3.95   | 3.95            | 3.95   | 3.95            | 3.95   | 3.95   | 3.95   |       |
|                                | K <sub>2</sub> O               | 3.99             | 3.99            | 3.99   | 3.83            | 3.83   | 3.72            | 3.69   | 3.56            | 3.37   | 3.16            | 2.91   | 2.62            | 2.22   | 2.22            | 2.22   | 2.22            | 2.22   | 2.22            | 2.22   | 2.22            | 2.22   | 2.22            | 2.22   | 2.22   | 2.22   |       |
|                                | H <sub>2</sub> O               | 0.15             | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15            | 0.15   | 0.15   | 0.15   |       |
|                                | Total                          | 100.00           | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00 | 100.00 |       |
|                                | $X_{Fe}$                       | 0.77             | 0.77            | 0.76   | 0.76            | 0.76   | 0.76            | 0.76   | 0.76            | 0.76   | 0.75            | 0.74   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75   | 0.75   |       |
|                                | Closed-system                  | SiO <sub>2</sub> | 71.21           | 71.23  | 71.58           | 72.21  | 72.17           | 72.48  | 72.55           | 72.77  | 72.93           | 73.07  | 73.20           | 73.35  | 73.48           | 73.50  | 73.50           | 73.50  | 73.50           | 73.50  | 73.50           | 73.50  | 73.50           | 73.50  | 73.50  | 73.50  | 73.50 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |                                | 11.49            | 11.48           | 11.69  | 12.67           | 13.00  | 13.05           | 13.06  | 13.05           | 13.04  | 13.03           | 13.03  | 13.03           | 13.03  | 13.03           | 13.03  | 13.03           | 13.03  | 13.03           | 13.03  | 13.03           | 13.03  | 13.03           | 13.03  | 13.03  | 13.03  |       |
| FeO                            |                                | 0.05             | 0.06            | 0.09   | 1.76            | 1.84   | 1.41            | 1.33   | 1.71            | 2.01   | 2.16            | 2.21   | 2.20            | 2.15   | 2.14            | 2.14   | 2.14            | 2.14   | 2.14            | 2.14   | 2.14            | 2.14   | 2.14            | 2.14   | 2.14   | 2.14   |       |
| MgO                            |                                | 0.01             | 0.01            | 0.01   | 0.26            | 0.28   | 0.28            | 0.28   | 0.26            | 0.44   | 0.50            | 0.54   | 0.56            | 0.58   | 0.58            | 0.58   | 0.58            | 0.58   | 0.58            | 0.58   | 0.58            | 0.58   | 0.58            | 0.58   | 0.58   | 0.58   |       |
| CaO                            |                                | 0.18             | 0.18            | 0.20   | 0.34            | 0.37   | 0.38            | 0.40   | 0.44            | 0.50   | 0.54            | 0.58   | 0.61            | 0.63   | 0.63            | 0.63   | 0.63            | 0.63   | 0.63            | 0.63   | 0.63            | 0.63   | 0.63            | 0.63   | 0.63   | 0.63   |       |
| Na <sub>2</sub> O              |                                | 3.30             | 3.28            | 3.29   | 3.12            | 3.11   | 3.03            | 3.02   | 2.93            | 2.86   | 2.80            | 2.77   | 2.75            | 2.73   | 2.73            | 2.73   | 2.73            | 2.73   | 2.73            | 2.73   | 2.73            | 2.73   | 2.73            | 2.73   | 2.73   | 2.73   |       |
| K <sub>2</sub> O               |                                | 5.08             | 5.09            | 5.19   | 5.60            | 5.72   | 5.74            | 5.86   | 5.96            | 6.03   | 6.09            | 6.13   | 6.17            | 6.17   | 6.17            | 6.17   | 6.17            | 6.17   | 6.17            | 6.17   | 6.17            | 6.17   | 6.17            | 6.17   | 6.17   | 6.17   |       |
| H <sub>2</sub> O               |                                | 8.69             | 8.68            | 8.69   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65            | 8.65   | 8.65   | 8.65   |       |
| Total                          |                                | 100.00           | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00 | 100.00 |       |
| $X_{Fe}$                       |                                | 1.34             | 1.34            | 1.35   | 1.40            | 1.40   | 1.42            | 1.43   | 1.41            | 1.40   | 1.39            | 1.38   | 1.37            | 1.37   | 1.37            | 1.37   | 1.37            | 1.37   | 1.37            | 1.37   | 1.37            | 1.37   | 1.37            | 1.37   | 1.37   | 1.37   |       |
| $X_{Fe}$                       |                                | 0.86             | 0.86            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87   | 0.87   |       |
| Closed-system                  |                                | SiO <sub>2</sub> | 646.4           | 646.7  | 692.6           | 723.6  | 826             | 829.6  | 841.7           | 852.6  | 898.4           | 929.1  | 950             | 950    | 950             | 950    | 950             | 950    | 950             | 950    | 950             | 950    | 950             | 950    | 950    | 950    | 950   |
|                                |                                | TiO <sub>2</sub> | 3.74            | 3.74   | 4.38            | 5.60   | 8.75            | 10.00  | 14.11           | 15.00  | 20.00           | 25.00  | 29.00           | 32.2   | 32.2            | 32.2   | 32.2            | 32.2   | 32.2            | 32.2   | 32.2            | 32.2   | 32.2            | 32.2   | 32.2   | 32.2   | 32.2  |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 72.47            | 72.61           | 72.59  | 72.58           | 72.73  | 72.73           | 72.72  | 72.73           | 72.76  | 72.79           | 72.78  | 72.47           | 72.66  | 72.64           | 72.64  | 72.64           | 72.64  | 72.64           | 72.64  | 72.64           | 72.64  | 72.64           | 72.64  | 72.64  | 72.64  |       |
|                                | FeO                            | 0.26             | 0.27            | 0.27   | 0.27            | 0.28   | 0.28            | 0.30   | 0.30            | 0.32   | 0.34            | 0.37   | 0.26            | 0.27   | 0.27            | 0.27   | 0.27            | 0.27   | 0.27            | 0.27   | 0.27            | 0.27   | 0.27            | 0.27   | 0.27   | 0.27   |       |
|                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.28            | 14.35           | 14.35  | 14.35           | 14.38  | 14.38           | 14.40  | 14.41           | 14.48  | 14.57           | 14.65  | 14.28           | 14.32  | 14.33           | 14.33  | 14.33           | 14.33  | 14.33           | 14.33  | 14.33           | 14.33  | 14.33           | 14.33  | 14.33  | 14.33  |       |
|                                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.37             | 0.39            | 0.39   | 0.39            | 0.40   | 0.40            | 0.43   | 0.43            | 0.46   | 0.49            | 0.52   | 0.37            | 0.38   | 0.39            | 0.39   | 0.39            | 0.39   | 0.39            | 0.39   | 0.39            | 0.39   | 0.39            | 0.39   | 0.39   | 0.39   |       |
|                                | FeO                            | 1.90             | 1.96            | 1.97   | 1.98            | 1.81   | 1.81            | 1.90   | 1.88            | 1.74   | 1.60            | 1.50   | 1.90            | 1.95   | 1.96            | 1.96   | 1.96            | 1.96   | 1.96            | 1.96   | 1.96            | 1.96   | 1.96            | 1.96   | 1.96   | 1.96   |       |
|                                | MgO                            | 0.58             | 0.60            | 0.60   | 0.60            | 0.59   | 0.59            | 0.61   | 0.61            | 0.59   | 0.56            | 0.53   | 0.58            | 0.59   | 0.60            | 0.60   | 0.60            | 0.60   | 0.60            | 0.60   | 0.60            | 0.60   | 0.60            | 0.60   | 0.60   | 0.60   |       |
|                                | CaO                            | 2.20             | 2.26            | 2.28   | 2.29            | 2.35   | 2.35            | 2.46   | 2.47            | 2.57   | 2.68            | 2.78   | 2.20            | 2.25   | 2.27            | 2.28   | 2.28            | 2.28   | 2.28            | 2.28   | 2.28            | 2.28   | 2.28            | 2.28   | 2.28   | 2.28   |       |
|                                | Na <sub>2</sub> O              | 3.29             | 3.29            | 3.28   | 3.28            | 3.40   | 3.40            | 3.42   | 3.43            | 3.49   | 3.56            | 3.63   | 3.29            | 3.28   | 3.28            | 3.28   | 3.28            | 3.28   | 3.28            | 3.28   | 3.28            | 3.28   | 3.28            | 3.28   | 3.28   | 3.28   |       |
|                                | K <sub>2</sub> O               | 3.99             | 3.99            | 3.98   | 3.98            | 3.88   | 3.88            | 3.76   | 3.73            | 3.58   | 3.41            | 3.23   | 3.99            | 3.97   | 3.95            | 3.94   | 3.89            | 3.86   | 3.80            | 3.75   | 3.69            | 3.62   | 3.56            | 3.52   | 3.52   |        |       |
|                                | H <sub>2</sub> O               | 0.54             | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54            | 0.54   | 0.54   |        |       |
|                                | Total                          | 100.00           | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00 | 100.00 |       |
| $X_{Fe}$                       | 0.77                           | 0.77             | 0.77            | 0.77   | 0.75            | 0.75   | 0.76            | 0.76   | 0.75            | 0.74   | 0.74            | 0.77   | 0.77            | 0.77   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75            | 0.75   | 0.75   |        |       |
| $X_{Fe}$                       | 0.86                           | 0.86             | 0.87            | 0.88   | 0.88            | 0.88   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87            | 0.87   | 0.87   |        |       |

Table 3: Residue and Melt compositions, Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modeling from JG-1 bulk composition modified to  $X_{Fe} = 0.649$ , for partial melting under open-system. All compositions are in mol. % and melt fraction ( $\Phi$ ) is represented by molar proportion (%).

|                  |                                | 0.4     |        |                 |        |        | 0.6    |        |        |        |        | 0.8    |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |      |
|------------------|--------------------------------|---------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| Open-system      |                                | P (GPa) | T (°C) | $\Phi$ (mol. %) | R0     | R1     | R2     | R3     | R4     | 950.00 | 646.40 | 646.70 | 692.60 | 723.60 | 839.30 | 950.00 | 657.60 | 638.00 | 726.50 | 761.30 | 860.50 | 950.00 |      |
| residue          | id                             |         |        |                 | R0     | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R0     | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R0     | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     |      |
|                  | SiO <sub>2</sub>               | 77.36   | 78.07  | 78.06           | 78.41  | 78.51  | 78.13  | 78.13  | 78.60  | 78.67  | 77.36  | 78.15  | 78.13  | 78.13  | 78.60  | 78.67  | 77.36  | 78.20  | 78.18  | 78.19  | 78.78  | 78.78  |      |
|                  | TiO <sub>2</sub>               | 0.21    | 0.22   | 0.22            | 0.23   | 0.24   | 0.22   | 0.22   | 0.23   | 0.24   | 0.21   | 0.22   | 0.22   | 0.22   | 0.23   | 0.23   | 0.21   | 0.22   | 0.22   | 0.22   | 0.23   | 0.23   |      |
|                  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 8.98    | 9.13   | 9.13            | 9.20   | 9.24   | 9.10   | 9.10   | 9.17   | 9.18   | 8.98   | 9.10   | 9.11   | 9.11   | 9.17   | 9.18   | 8.98   | 9.09   | 9.09   | 9.09   | 9.15   | 9.15   |      |
|                  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.15    | 0.16   | 0.16            | 0.17   | 0.17   | 0.16   | 0.16   | 0.16   | 0.17   | 0.15   | 0.16   | 0.16   | 0.16   | 0.16   | 0.17   | 0.15   | 0.16   | 0.16   | 0.16   | 0.17   | 0.17   |      |
|                  | FeO                            | 1.7     | 1.78   | 1.79            | 1.82   | 1.76   | 1.77   | 1.77   | 1.78   | 1.79   | 1.70   | 1.77   | 1.77   | 1.78   | 1.79   | 1.76   | 1.70   | 1.76   | 1.77   | 1.77   | 1.76   | 1.75   | 1.74 |
|                  | MgO                            | 0.92    | 0.96   | 0.97            | 1.00   | 1.00   | 0.96   | 0.96   | 0.97   | 0.99   | 0.92   | 0.96   | 0.96   | 0.97   | 0.99   | 0.99   | 0.92   | 0.95   | 0.96   | 0.96   | 0.98   | 0.98   |      |
|                  | CaO                            | 2.52    | 2.63   | 2.64            | 2.76   | 2.86   | 2.52   | 2.61   | 2.64   | 2.75   | 2.78   | 2.52   | 2.61   | 2.62   | 2.64   | 2.75   | 2.78   | 2.52   | 2.60   | 2.62   | 2.63   | 2.73   | 2.73 |
|                  | Na <sub>2</sub> O              | 3.51    | 3.54   | 3.54            | 3.58   | 3.62   | 3.51   | 3.53   | 3.53   | 3.56   | 3.57   | 3.51   | 3.53   | 3.53   | 3.53   | 3.56   | 3.57   | 3.51   | 3.53   | 3.52   | 3.52   | 3.55   | 3.55 |
|                  | K <sub>2</sub> O               | 2.72    | 2.71   | 2.71            | 2.66   | 2.60   | 2.72   | 2.72   | 2.71   | 2.66   | 2.65   | 2.72   | 2.72   | 2.71   | 2.70   | 2.66   | 2.65   | 2.72   | 2.73   | 2.71   | 2.70   | 2.67   | 2.67 |
| H <sub>2</sub> O | 1.93                           | 0.79    | 0.78   | 0.17            | 0.00   | 1.93   | 0.79   | 0.77   | 0.09   | 0.00   | 1.93   | 0.79   | 0.79   | 0.09   | 0.00   | 0.00   | 1.93   | 0.79   | 0.79   | 0.76   | 0.01   | 0.00   |      |
| Total            | 100.00                         | 100.00  | 100.00 | 100.00          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |      |
| $X_{Fe}$         | 0.65                           | 0.65    | 0.65   | 0.65            | 0.64   | 0.65   | 0.65   | 0.65   | 0.64   | 0.64   | 0.65   | 0.65   | 0.65   | 0.65   | 0.64   | 0.64   | 0.65   | 0.65   | 0.65   | 0.65   | 0.64   | 0.64   |      |
| anatic melt      | id                             |         |        |                 | M0     | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M0     | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M0     | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     |      |
|                  | SiO <sub>2</sub>               | 62.66   | 62.69  | 64.02           | 71.51  | 76.32  | 60.60  | 62.80  | 69.23  | 73.36  | 52.02  | 56.97  | 60.60  | 62.80  | 69.23  | 73.36  | 52.02  | 52.05  | 59.18  | 61.62  | 66.98  | 70.36  |      |
|                  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.96    | 5.95   | 6.16            | 7.68   | 8.49   | 6.31   | 6.60   | 7.88   | 8.43   | 5.83   | 5.87   | 6.31   | 6.60   | 7.88   | 8.43   | 5.83   | 5.83   | 6.63   | 6.92   | 7.97   | 8.34   |      |
|                  | FeO                            | 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   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |      |
|                  | MgO                            | 0.04    | 0.04   | 0.07            | 1.17   | 3.00   | 0.10   | 0.21   | 1.58   | 3.66   | 0.02   | 0.03   | 0.10   | 0.21   | 1.58   | 3.66   | 0.02   | 0.02   | 0.23   | 0.50   | 2.09   | 4.32   |      |
|                  | CaO                            | 0.01    | 0.01   | 0.02            | 0.39   | 1.00   | 0.03   | 0.05   | 0.53   | 1.13   | 0.01   | 0.01   | 0.03   | 0.05   | 0.53   | 1.13   | 0.01   | 0.01   | 0.05   | 0.12   | 0.68   | 1.26   |      |
|                  | Na <sub>2</sub> O              | 0.17    | 0.17   | 0.19            | 0.39   | 0.72   | 0.20   | 0.30   | 0.52   | 0.84   | 0.25   | 0.20   | 0.25   | 0.30   | 0.52   | 0.84   | 0.25   | 0.25   | 0.38   | 0.44   | 0.70   | 0.98   |      |
|                  | K <sub>2</sub> O               | 2.81    | 2.80   | 2.85            | 2.91   | 2.67   | 2.93   | 3.04   | 3.11   | 3.02   | 2.72   | 2.92   | 3.04   | 3.11   | 3.02   | 3.02   | 2.72   | 2.98   | 3.22   | 3.22   | 3.26   | 3.09   | 2.80 |
|                  | H <sub>2</sub> O               | 2.85    | 2.86   | 2.96            | 3.57   | 4.02   | 2.67   | 2.88   | 3.47   | 3.78   | 2.55   | 2.68   | 2.88   | 3.02   | 3.47   | 3.78   | 2.55   | 2.56   | 2.90   | 3.03   | 3.36   | 3.36   | 3.56 |
|                  | Total                          | 25.50   | 25.47  | 23.72           | 12.37  | 3.78   | 31.35  | 26.80  | 23.92  | 13.77  | 6.08   | 31.35  | 31.32  | 26.80  | 23.92  | 13.77  | 6.08   | 36.34  | 36.31  | 27.41  | 24.10  | 15.14  | 8.39 |
| ASI              | 1.99                           | 2.00    | 2.01   | 2.08            | 1.93   | 1.87   | 1.88   | 1.91   | 1.94   | 1.80   | 1.87   | 1.88   | 1.90   | 1.91   | 1.94   | 1.80   | 1.81   | 1.82   | 1.82   | 1.81   | 1.79   | 1.66   |      |
| $X_{Fe}$         | 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   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |      |

$\Phi$  = melt fraction (%)  
 pseudo id = reference to pseudosection  
 ASI = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O  
 $X_{Fe}$  = FeO/(MgO+FeO)



Table 4: Residue and Melt compositions, Temperature and volume of melt produced. Results calculated by forward modeling from JG-1 bulk composition modified to  $X_{Fe} = 0.649$ , for partial melting under open-system. All compositions are in wt. % and melt fraction ( $\Phi$ ) is represented by molar proportion (%).

|                |                                | 0.4    |        |        |        |        | 0.6    |        |        |        |        | 0.8    |        |        |        |        |        |        |
|----------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Open-system    | P (GPa)                        | 658.80 | 659.20 | 678.60 | 802.10 | 950.00 | 646.40 | 646.70 | 692.60 | 723.60 | 839.30 | 950.00 | 637.60 | 638.00 | 726.50 | 761.30 | 860.50 | 950.00 |
|                | T (°C)                         | 0.00   | 4.61   | 5.00   | 5.00   | 4.58   | 0.00   | 3.74   | 4.38   | 5.00   | 5.00   | 1.46   | 0.00   | 3.22   | 4.30   | 5.00   | 5.00   | 0.07   |
|                | $\Phi$ (mol. %)                | 0.00   | 4.61   | 5.00   | 5.00   | 4.58   | 0.00   | 3.74   | 4.38   | 5.00   | 5.00   | 1.46   | 0.00   | 3.22   | 4.30   | 5.00   | 5.00   | 0.07   |
| Residue        | id                             | R0     | R1     | R2     | R3     | R4     | R0     | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     | R0     | R1     | R2     | R3     | R4     | R5     |
|                | SiO <sub>2</sub>               | 72.47  | 72.52  | 72.51  | 72.52  | 72.54  | 72.47  | 72.61  | 72.59  | 72.58  | 72.67  | 72.71  | 72.47  | 72.66  | 72.64  | 72.64  | 72.82  | 72.82  |
|                | ThO <sub>2</sub>               | 0.26   | 0.27   | 0.27   | 0.29   | 0.30   | 0.26   | 0.27   | 0.27   | 0.27   | 0.29   | 0.29   | 0.26   | 0.27   | 0.27   | 0.27   | 0.29   | 0.29   |
|                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 14.28  | 14.39  | 14.39  | 14.45  | 14.49  | 14.28  | 14.35  | 14.35  | 14.35  | 14.39  | 14.40  | 14.28  | 14.32  | 14.33  | 14.33  | 14.35  | 14.35  |
|                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.37   | 0.39   | 0.39   | 0.41   | 0.43   | 0.37   | 0.39   | 0.39   | 0.39   | 0.41   | 0.42   | 0.37   | 0.38   | 0.39   | 0.39   | 0.41   | 0.41   |
|                | FeO                            | 1.90   | 1.98   | 1.98   | 2.01   | 1.95   | 1.90   | 1.96   | 1.97   | 1.98   | 1.98   | 1.95   | 1.90   | 1.95   | 1.96   | 1.96   | 1.93   | 1.93   |
|                | MgO                            | 0.58   | 0.60   | 0.60   | 0.62   | 0.62   | 0.58   | 0.60   | 0.60   | 0.60   | 0.61   | 0.61   | 0.58   | 0.59   | 0.60   | 0.60   | 0.61   | 0.61   |
|                | CaO                            | 2.20   | 2.28   | 2.29   | 2.38   | 2.47   | 2.20   | 2.26   | 2.28   | 2.29   | 2.37   | 2.40   | 2.20   | 2.25   | 2.27   | 2.28   | 2.36   | 2.36   |
|                | Na <sub>2</sub> O              | 3.39   | 3.40   | 3.40   | 3.41   | 3.45   | 3.39   | 3.39   | 3.38   | 3.38   | 3.39   | 3.40   | 3.39   | 3.39   | 3.38   | 3.38   | 3.38   | 3.38   |
|                | K <sub>2</sub> O               | 3.99   | 3.95   | 3.94   | 3.86   | 3.76   | 3.99   | 3.96   | 3.95   | 3.94   | 3.86   | 3.84   | 3.99   | 3.97   | 3.95   | 3.94   | 3.87   | 3.87   |
|                | H <sub>2</sub> O               | 0.54   | 0.22   | 0.22   | 0.05   | 0.00   | 0.54   | 0.22   | 0.22   | 0.22   | 0.02   | 0.00   | 0.54   | 0.22   | 0.22   | 0.21   | 0.00   | 0.00   |
|                | Total                          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| $X_{Fe}$       |                                | 0.77   | 0.77   | 0.77   | 0.76   | 0.76   | 0.77   | 0.77   | 0.77   | 0.77   | 0.76   | 0.76   | 0.77   | 0.77   | 0.77   | 0.77   | 0.76   | 0.76   |
| anhydrous melt | id                             | M0     | M1     | M2     | M3     | M4     | M0     | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     | M0     | M1     | M2     | M3     | M4     | M5     |
|                | SiO <sub>2</sub>               | 71.21  | 71.23  | 71.58  | 72.32  | 72.11  | 68.00  | 68.02  | 69.36  | 70.03  | 70.63  | 70.45  | 64.91  | 64.92  | 67.88  | 68.62  | 68.99  | 68.70  |
|                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11.49  | 11.48  | 11.69  | 13.18  | 13.61  | 11.90  | 11.89  | 12.25  | 12.49  | 13.65  | 13.74  | 12.34  | 12.34  | 12.90  | 13.08  | 13.93  | 13.81  |
|                | FeO                            | 0.05   | 0.06   | 0.09   | 1.41   | 3.39   | 0.04   | 0.04   | 0.13   | 0.28   | 1.92   | 4.20   | 0.03   | 0.03   | 0.31   | 0.66   | 2.57   | 5.04   |
|                | MgO                            | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.27   | 0.64   | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.04   | 0.36   | 0.73   | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.09   | 0.47   | 0.83   |
|                | CaO                            | 0.18   | 0.18   | 0.20   | 0.36   | 0.63   | 0.22   | 0.23   | 0.27   | 0.31   | 0.50   | 0.75   | 0.29   | 0.29   | 0.40   | 0.46   | 0.67   | 0.89   |
|                | Na <sub>2</sub> O              | 3.30   | 3.28   | 3.29   | 3.04   | 2.60   | 3.61   | 3.59   | 3.59   | 3.57   | 3.17   | 2.70   | 3.84   | 3.82   | 3.81   | 3.75   | 3.28   | 2.82   |
|                | K <sub>2</sub> O               | 5.08   | 5.09   | 5.19   | 5.67   | 5.96   | 4.99   | 5.01   | 5.18   | 5.28   | 5.55   | 5.69   | 4.99   | 5.01   | 5.22   | 5.29   | 5.42   | 5.45   |
|                | H <sub>2</sub> O               | 8.69   | 8.68   | 7.95   | 3.75   | 1.07   | 11.23  | 11.21  | 9.20   | 8.00   | 4.21   | 1.75   | 13.59  | 13.58  | 9.43   | 8.05   | 4.68   | 2.46   |
|                | Total                          | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
|                | ASI                            | 1.34   | 1.34   | 1.35   | 1.45   | 1.48   | 1.35   | 1.35   | 1.35   | 1.36   | 1.48   | 1.50   | 1.35   | 1.35   | 1.37   | 1.38   | 1.49   | 1.51   |
|                | $X_{Fe}$                       |        | 0.86   | 0.86   | 0.87   | 0.84   | 0.84   | 0.86   | 0.87   | 0.88   | 0.84   | 0.85   | 0.87   | 0.87   | 0.87   | 0.88   | 0.88   | 0.85   |

$\Phi$  = melt fraction (%)  
pseudoid = reference to pseudosection  
ASI = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO+Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O  
 $X_{Fe}$  = FeO/(MgO+FeO)

SUPPLEMENTARY DATA 2

Table 1: Trace elements concentration (ppm) of zircon crystals from representative samples of biotite granulite and leucosome.

| Sample<br>Crystal | CI-011-RD |        |       |       |       |       | CI-012-RB |       |        |        |       |       | CI-013-RA |       |        |       |       |        | CI-019-RB |        |        |       |        |    |
|-------------------|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|--------|--------|-------|-------|-----------|-------|--------|-------|-------|--------|-----------|--------|--------|-------|--------|----|
|                   | 1         | 3      | 5     | 6     | 6     | 6     | 1         | 2     | 1      | 2      | 1     | 2     | 1         | 2     | 3      | 4     | 5     | 6      | 1         | 2      | 1      | 2     | 1      | 2  |
| Sc                | 58        | 52     | 60    | 67    | 67    | 67    | 65        | 52    | 55     | 55     | 53    | 53    | 53        | 57    | 53     | 49    | 53    | 52     | 50        | 50     | 52     | 57    | 50     | 55 |
| Y                 | 506       | 270    | 929   | 581   | 581   | 581   | 1250      | 262   | 548    | 187    | 336   | 369   | 250       | 316   | 110    | 318   | 225   | 221    | 153       | 312    | 535    | 234   | 502    |    |
| La                | 3         | 0      | 0     | 1     | 1     | 1     | 32        | 17    | 32     | 6      | 0     | 0     | 8         | 25    | 0      | 1     | 16    | 59     | 24        | 0      | 4      | 4     | 1      |    |
| Ce                | 17        | 11     | 8     | 6     | 6     | 6     | 112       | 23    | 97     | 30     | 17    | 23    | 13        | 45    | 8      | 17    | 31    | 85     | 10        | 7      | 25     | 10    | 11     |    |
| Pr                | 8         | 0      | 2     | 1     | 1     | 1     | 50        | 9     | 78     | 27     | 0     | 0     | 3         | 28    | 0      | 1     | 15    | 78     | 10        | 1      | 6      | 2     | 4      |    |
| Nd                | 14        | 1      | 7     | 3     | 3     | 3     | 51        | 8     | 83     | 41     | 1     | 2     | 3         | 31    | 1      | 2     | 16    | 72     | 9         | 1      | 10     | 3     | 7      |    |
| Sm                | 36        | 11     | 30    | 14    | 14    | 14    | 76        | 9     | 66     | 56     | 12    | 12    | 6         | 38    | 3      | 10    | 16    | 55     | 8         | 6      | 32     | 13    | 39     |    |
| Eu                | 24        | 5      | 14    | 5     | 5     | 5     | 71        | 7     | 103    | 126    | 8     | 7     | 12        | 11    | 2      | 5     | 5     | 14     | 3         | 3      | 10     | 5     | 14     |    |
| Gd                | 83        | 42     | 128   | 70    | 70    | 70    | 284       | 37    | 94     | 56     | 39    | 47    | 36        | 69    | 12     | 43    | 42    | 52     | 17        | 43     | 91     | 37    | 107    |    |
| Tb                | 140       | 76     | 241   | 143   | 143   | 143   | 501       | 68    | 164    | 83     | 80    | 99    | 70        | 97    | 25     | 78    | 68    | 76     | 30        | 85     | 188    | 75    | 170    |    |
| Dy                | 261       | 134    | 457   | 278   | 278   | 278   | 809       | 120   | 267    | 109    | 154   | 165   | 126       | 160   | 47     | 144   | 110   | 113    | 61        | 152    | 329    | 115   | 268    |    |
| Ho                | 471       | 236    | 841   | 526   | 526   | 526   | 1203      | 234   | 493    | 175    | 293   | 324   | 225       | 273   | 91     | 279   | 201   | 201    | 129       | 290    | 538    | 218   | 491    |    |
| Er                | 827       | 394    | 1403  | 898   | 898   | 898   | 1775      | 393   | 794    | 256    | 498   | 548   | 351       | 461   | 163    | 493   | 339   | 335    | 239       | 473    | 800    | 324   | 734    |    |
| Tm                | 1202      | 586    | 2032  | 1283  | 1283  | 1283  | 2344      | 598   | 1146   | 356    | 776   | 813   | 559       | 696   | 266    | 755   | 520   | 479    | 402       | 672    | 1101   | 482   | 1028   |    |
| Yb                | 1832      | 870    | 3068  | 1957  | 1957  | 1957  | 3199      | 934   | 1615   | 545    | 1253  | 1310  | 857       | 1068  | 455    | 1224  | 825   | 786    | 712       | 1075   | 1646   | 714   | 1516   |    |
| Lu                | 2711      | 1273   | 4415  | 2898  | 2898  | 2898  | 4215      | 1429  | 2211   | 761    | 1947  | 1890  | 1346      | 1659  | 747    | 1927  | 1270  | 1194   | 1180      | 1569   | 2142   | 1041  | 2220   |    |
| Hf                | 100971    | 104660 | 74078 | 87184 | 87184 | 87184 | 101650    | 92427 | 112534 | 132136 | 98136 | 93699 | 100777    | 97748 | 107592 | 97388 | 98282 | 107476 | 119010    | 107184 | 96602  | 97476 | 100553 |    |
| Pb                | 19        | 7      | 32    | 16    | 16    | 16    | 143       | 7     | 28     | 2      | 14    | 29    | 11        | 13    | 5      | 12    | 7     | 7      | 1         | 8      | 28     | 4     | 15     |    |
| Th                | 4834      | 2186   | 10103 | 5517  | 5517  | 5517  | 45207     | 2255  | 13448  | 1745   | 6966  | 11621 | 3955      | 4017  | 1900   | 4397  | 2593  | 2586   | 852       | 2900   | 13931  | 1369  | 4931   |    |
| U                 | 112432    | 34189  | 88919 | 72838 | 72838 | 72838 | 242162    | 28014 | 120270 | 95405  | 58514 | 75676 | 37568     | 54730 | 34703  | 57378 | 31041 | 35405  | 86351     | 73784  | 131081 | 66351 | 75676  |    |

SUPPLEMENTARY DATA 3

Table 1: U-Pb LA-ICP-MS data from zircon grains of biotite granulite, sample CI-011-RD. Age estimates were calculated with 95 % confidence.

| Analysis position | <sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> | <sup>206</sup> Pb | Th  | U    | Th/U  | 207/235 | Isotopic ratios |         |        |      | Age estimates (Ma)   |    |                      |    |       |       |
|-------------------|--------------------------------|-------------------|-----|------|-------|---------|-----------------|---------|--------|------|----------------------|----|----------------------|----|-------|-------|
|                   |                                |                   |     |      |       |         | 1s              | 206/238 | 1s     | corr | T <sub>206/238</sub> | 1σ | T <sub>207/235</sub> | 1σ | Conc. | Conc. |
| 7.2 rim           | 0.29                           | 20                | 112 | 155  | 0.72  | 0.8281  | 0.0421          | 0.0987  | 0.0013 | 0.29 | 607                  | 8  | 613                  | 24 | 99    | 95    |
| 12.1 rim          | 0.50                           | 23                | 141 | 169  | 0.83  | 0.8353  | 0.0391          | 0.0993  | 0.0013 | 0.57 | 611                  | 8  | 617                  | 22 | 99    | 95    |
| 17.1 rim          | 1.63                           | 22                | 78  | 179  | 0.44  | 0.8326  | 0.0395          | 0.0997  | 0.0013 | 0.03 | 613                  | 8  | 615                  | 22 | 99    | 98    |
| 21.1 rim          | 0.48                           | 28                | 163 | 225  | 0.73  | 0.8366  | 0.0282          | 0.1007  | 0.0011 | 0.74 | 618                  | 6  | 617                  | 16 | 100   | 100   |
| 20.1 rim          | 0.21                           | 35                | 50  | 307  | 0.16  | 0.8405  | 0.0238          | 0.1008  | 0.0010 | 0.55 | 619                  | 6  | 619                  | 13 | 99    | 99    |
| 22.1 rim          | 0.29                           | 52                | 90  | 450  | 0.20  | 0.8497  | 0.0209          | 0.1015  | 0.0010 | 0.58 | 624                  | 6  | 625                  | 11 | 99    | 99    |
| 6.1 rim           | 0.12                           | 41                | 41  | 351  | 0.12  | 0.8427  | 0.0209          | 0.1015  | 0.0010 | 0.72 | 624                  | 6  | 621                  | 12 | 100   | 102   |
| 1.2 rim           | 0.21                           | 23                | 95  | 185  | 0.51  | 0.8742  | 0.0432          | 0.1022  | 0.0014 | 0.33 | 627                  | 8  | 638                  | 24 | 98    | 92    |
| 9.2 rim           | 0.03                           | 193               | 21  | 1833 | 0.01  | 0.8380  | 0.0148          | 0.1024  | 0.0008 | 0.25 | 629                  | 5  | 618                  | 8  | 101   | 108   |
| 10.3 rim          | 0.30                           | 28                | 73  | 240  | 0.30  | 0.8694  | 0.0344          | 0.1036  | 0.0012 | 0.75 | 635                  | 7  | 635                  | 19 | 100   | 100   |
| 8.1 rim           | 0.62                           | 27                | 74  | 228  | 0.33  | 0.8532  | 0.0277          | 0.1038  | 0.0011 | 0.93 | 637                  | 7  | 626                  | 15 | 101   | 107   |
| 10.2 rim          | 1.90                           | 17                | 80  | 141  | 0.57  | 0.8764  | 0.0572          | 0.1038  | 0.0016 | 0.48 | 637                  | 9  | 639                  | 31 | 99    | 98    |
| 15.1 core         | 0.37                           | 17                | 53  | 140  | 0.38  | 0.8522  | 0.0474          | 0.1041  | 0.0015 | 0.17 | 638                  | 9  | 626                  | 26 | 101   | 109   |
| 4.1 core          | 0.09                           | 86                | 10  | 655  | 0.02  | 0.8702  | 0.0261          | 0.1042  | 0.0010 | 0.85 | 639                  | 6  | 636                  | 14 | 100   | 102   |
| 9.1 core          | 0.56                           | 108               | 66  | 277  | 0.24  | 6.5053  | 0.1070          | 0.3587  | 0.0029 | 0.89 | 1976                 | 14 | 2047                 | 15 | 96    | 93    |
| 24.2 rim          | 0.08                           | 103               | 85  | 232  | 0.37  | 6.7104  | 0.1163          | 0.3631  | 0.0030 | 0.96 | 1997                 | 14 | 2074                 | 15 | 96    | 92    |
| 18.1 core         | 0.07                           | 51                | 25  | 121  | 0.21  | 6.8504  | 0.1281          | 0.3736  | 0.0033 | 0.24 | 2047                 | 15 | 2092                 | 16 | 97    | 95    |
| 10.1 core         | 0.14                           | 32                | 28  | 62   | 0.45  | 7.0833  | 0.1627          | 0.3783  | 0.0042 | 0.92 | 2068                 | 20 | 2122                 | 20 | 97    | 95    |
| 14.1 core         | 0.26                           | 61                | 59  | 129  | 0.46  | 7.0452  | 0.1374          | 0.3796  | 0.0034 | 0.90 | 2074                 | 16 | 2117                 | 17 | 97    | 96    |
| 27.1 core         | 0.09                           | 99                | 44  | 234  | 0.19  | 7.0524  | 0.1132          | 0.3872  | 0.0029 | 0.76 | 2110                 | 13 | 2118                 | 15 | 99    | 99    |
| 3.1 core          | 0.22                           | 40                | 18  | 80   | 0.22  | 7.2687  | 0.1424          | 0.3930  | 0.0036 | 0.94 | 2137                 | 17 | 2145                 | 17 | 99    | 99    |
| 16.1 rim          | 0.54                           | 118               | 78  | 272  | 0.29  | 7.3346  | 0.1349          | 0.4030  | 0.0036 | 0.99 | 2183                 | 17 | 2153                 | 16 | 101   | 102   |
| 2.1 core          | 0.06                           | 48                | 38  | 101  | 0.38  | 7.4358  | 0.1499          | 0.4031  | 0.0038 | 0.96 | 2184                 | 17 | 2165                 | 18 | 100   | 101   |
| 7.1 core          | 0.33                           | 38                | 25  | 80   | 0.31  | 7.6552  | 0.1327          | 0.4163  | 0.0036 | 0.03 | 2244                 | 16 | 2191                 | 16 | 102   | 104   |
| 5.1 core          | 0.16                           | 73                | 51  | 171  | 0.30  | 1.5787  | 0.0668          | 0.1387  | 0.0019 | 0.99 | 837                  | 10 | 962                  | 17 | 87    | 66    |
| 13.1 core         | 0.10                           | 29                | 41  | 51   | 0.79  | 7.8555  | 0.2149          | 0.3968  | 0.0049 | 0.95 | 2154                 | 23 | 2215                 | 25 | 97    | 94    |
| 2.2 rim           | 1.11                           | 19                | 123 | 159  | 0.77  | 8.2991  | 0.1248          | 0.4139  | 0.0030 | 0.98 | 2233                 | 14 | 2264                 | 14 | 98    | 97    |
| 14.2 rim          | 1.99                           | 22                | 89  | 190  | 0.47  | 7.7959  | 0.0433          | 0.0962  | 0.0013 | 0.11 | 592                  | 8  | 595                  | 25 | 99    | 98    |
| 6.2 core          | 0.11                           | 33                | 13  | 91   | 0.14  | 4.0687  | 0.0473          | 0.1074  | 0.0015 | 0.66 | 658                  | 9  | 655                  | 24 | 100   | 102   |
| 23.1 core         | 0.53                           | 18                | 5   | 45   | 0.12  | 5.4104  | 0.0890          | 0.2612  | 0.0026 | 0.97 | 1496                 | 13 | 1648                 | 18 | 90    | 80    |
| 25.1 core         | 0.14                           | 41                | 21  | 96   | 0.22  | 5.7015  | 0.1322          | 0.3420  | 0.0037 | 0.73 | 1805                 | 19 | 1887                 | 20 | 95    | 91    |
| 26.1 core         | 0.11                           | 58                | 31  | 97   | 0.32  | 9.4280  | 0.1839          | 0.4536  | 0.0043 | 0.09 | 1896                 | 18 | 1932                 | 22 | 98    | 96    |
| 24.1 core         | 0.09                           | 49                | 39  | 80   | 0.49  | 10.3301 | 0.2028          | 0.4603  | 0.0046 | 0.84 | 2441                 | 20 | 2465                 | 18 | 99    | 98    |
| 19.1 core         | 7.92                           | 1                 | -1  | 4    | -0.23 | 5.8298  | 0.1166          | 0.3236  | 0.0031 | 0.76 | 1807                 | 15 | 1951                 | 17 | 92    | 85    |
| 1.1 core          | 0.00                           | -12               | -5  | -20  | 0.24  | 6.3652  | 0.1253          | 0.3455  | 0.0033 | 0.78 | 1913                 | 16 | 2028                 | 16 | 94    | 89    |

Table 2: U-Pb LA-ICP-MS data from zircon grains of biotite granulite, sample CI-013-RA. Age estimates were calculated with 95 % confidence.

| Analysis | Position | Isotopic ratios                    |                          |          |         |      |   |                    |   |                    |          | Estimated ages (Ma)       |         |         |                           |         |         |                           |         |         |   |
|----------|----------|------------------------------------|--------------------------|----------|---------|------|---|--------------------|---|--------------------|----------|---------------------------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|---------------------------|---------|---------|---|
|          |          | <sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> (%) | <sup>206</sup> Pb* (ppm) | Th (ppm) | U (ppm) | Th/U | <sup>207</sup> Tb/ <sup>235</sup> U (%) | <sup>1</sup> s (%) | <sup>206</sup> Tb/ <sup>238</sup> U (%) | <sup>1</sup> s (%) | corr (%) | T <sub>206/238</sub> (Ma) | 1σ (Ma) | Is (Ma) | T <sub>207/235</sub> (Ma) | 1σ (Ma) | Is (Ma) | T <sub>207/206</sub> (Ma) | 1σ (Ma) | Is (Ma) | Conc. <sup>206</sup> Tb/ <sup>238</sup> U |
| 1.2      | core     | 0.11                               | 42                       | 30       | 89      | 0.34 | 7.1674                                  | 0.1311             | 0.3891                                  | 0.0030             | 0.39     | 2119                      | 14      | 2133    | 17                        | 2146    | 31      | 99                        | 98      |         |   |
| 7.1      | core     | 0.03                               | 61                       | 31       | 130     | 0.24 | 7.2378                                  | 0.1349             | 0.3896                                  | 0.0032             | 0.01     | 2121                      | 15      | 2141    | 17                        | 2161    | 32      | 99                        | 98      |         |   |
| 22.1     | core     | 0.10                               | 82                       | 40       | 178     | 0.23 | 7.2821                                  | 0.1276             | 0.3904                                  | 0.0030             | 0.42     | 2125                      | 14      | 2147    | 15                        | 2168    | 31      | 98                        | 97      |         |   |
| 24.2     | core     | 0.16                               | 95                       | 38       | 209     | 0.18 | 7.2824                                  | 0.1091             | 0.3932                                  | 0.0027             | 0.46     | 2138                      | 12      | 2147    | 13                        | 2155    | 28      | 99                        | 99      |         |   |
| 23.1     | core     | 0.13                               | 99                       | 64       | 214     | 0.30 | 7.2882                                  | 0.1130             | 0.3932                                  | 0.0027             | 0.05     | 2138                      | 13      | 2147    | 14                        | 2157    | 29      | 99                        | 99      |         |   |
| 1.1      | rim      | 0.20                               | 60                       | 30       | 123     | 0.24 | 7.2411                                  | 0.1385             | 0.3952                                  | 0.0032             | 0.48     | 2147                      | 15      | 2142    | 17                        | 2137    | 32      | 100                       | 100     |         |   |
| 5.1      | core     | 0.12                               | 81                       | 47       | 163     | 0.29 | 7.2805                                  | 0.1423             | 0.3953                                  | 0.0033             | 0.88     | 2148                      | 16      | 2146    | 18                        | 2145    | 34      | 100                       | 100     |         |   |
| 6.2      | rim      | 0.50                               | 13                       | 74       | 95      | 0.78 | 0.8101                                  | 0.0454             | 0.0964                                  | 0.0015             | 0.02     | 593                       | 9       | 603     | 25                        | 638     | 136     | 98                        | 92      |         |   |
| 10.3     | rim      | 0.32                               | 19                       | 46       | 159     | 0.29 | 0.8137                                  | 0.0319             | 0.0977                                  | 0.0011             | 0.76     | 601                       | 7       | 605     | 18                        | 619     | 97      | 99                        | 97      |         |   |
| 20.1     | core     | 0.04                               | 101                      | 41       | 278     | 0.15 | 5.1614                                  | 0.0788             | 0.2959                                  | 0.0020             | 0.98     | 1671                      | 10      | 1846    | 13                        | 2050    | 30      | 90                        | 81      |         |   |
| 16.2     | rim      | 0.24                               | 37                       | 15       | 89      | 0.16 | 6.3273                                  | 0.1020             | 0.3508                                  | 0.0025             | 0.11     | 1938                      | 12      | 2022    | 14                        | 2109    | 30      | 95                        | 91      |         |   |
| 18.2     | core     | 0.18                               | 81                       | 37       | 187     | 0.20 | 6.4166                                  | 0.1034             | 0.3509                                  | 0.0025             | 0.91     | 1939                      | 12      | 2035    | 14                        | 2133    | 29      | 95                        | 90      |         |   |
| 12.1     | core     | 0.08                               | 76                       | 50       | 157     | 0.32 | 6.4568                                  | 0.1086             | 0.3525                                  | 0.0026             | 0.87     | 1947                      | 12      | 2040    | 14                        | 2136    | 30      | 95                        | 91      |         |   |
| 24.1     | core     | 0.07                               | 79                       | 90       | 168     | 0.53 | 6.4324                                  | 0.1044             | 0.3543                                  | 0.0025             | 0.23     | 1955                      | 12      | 2037    | 14                        | 2121    | 30      | 95                        | 92      |         |   |
| 25.1     | core     | 0.19                               | 81                       | 42       | 190     | 0.22 | 6.5407                                  | 0.1054             | 0.3568                                  | 0.0025             | 0.57     | 1967                      | 12      | 2051    | 14                        | 2138    | 30      | 95                        | 92      |         |   |
| 16.1     | core     | 0.12                               | 86                       | 47       | 186     | 0.26 | 6.6678                                  | 0.1119             | 0.3626                                  | 0.0027             | 0.08     | 1995                      | 13      | 2068    | 15                        | 2143    | 31      | 96                        | 93      |         |   |
| 15.1     | core     | 0.09                               | 39                       | 23       | 85      | 0.26 | 6.6103                                  | 0.1122             | 0.3628                                  | 0.0027             | 0.01     | 1996                      | 13      | 2061    | 15                        | 2127    | 31      | 96                        | 93      |         |   |
| 4.1      | core     | 0.14                               | 76                       | 54       | 172     | 0.32 | 6.6565                                  | 0.1246             | 0.3650                                  | 0.0029             | 0.38     | 2006                      | 14      | 2067    | 16                        | 2128    | 32      | 97                        | 94      |         |   |
| 6.1      | core     | 0.06                               | 97                       | 52       | 196     | 0.27 | 6.6918                                  | 0.1284             | 0.3667                                  | 0.0030             | 0.94     | 2014                      | 14      | 2072    | 17                        | 2129    | 32      | 97                        | 94      |         |   |
| 21.2     | core     | 0.10                               | 86                       | 42       | 203     | 0.21 | 6.9094                                  | 0.1038             | 0.3724                                  | 0.0026             | 0.01     | 2041                      | 12      | 2100    | 13                        | 2158    | 28      | 97                        | 94      |         |   |
| 19.2     | core     | 0.32                               | 95                       | 53       | 209     | 0.26 | 6.8406                                  | 0.1077             | 0.3755                                  | 0.0027             | 0.40     | 2055                      | 13      | 2091    | 14                        | 2127    | 29      | 98                        | 96      |         |   |
| 12.2     | rim      | 0.96                               | 6                        | 2        | 16      | 0.10 | 6.9498                                  | 0.1113             | 0.3768                                  | 0.0026             | 0.57     | 2061                      | 12      | 2105    | 14                        | 2148    | 29      | 97                        | 95      |         |   |
| 3.1      | core     | 0.13                               | 79                       | 47       | 174     | 0.27 | 7.0479                                  | 0.1365             | 0.3792                                  | 0.0032             | 0.86     | 2073                      | 15      | 2118    | 18                        | 2161    | 35      | 97                        | 95      |         |   |
| 10.2     | core     | 0.38                               | 88                       | 51       | 189     | 0.27 | 7.0116                                  | 0.1145             | 0.3800                                  | 0.0027             | 0.30     | 2076                      | 13      | 2113    | 14                        | 2149    | 30      | 98                        | 96      |         |   |
| 14.1     | core     | 0.40                               | 26                       | 11       | 60      | 0.19 | 7.0066                                  | 0.1121             | 0.3840                                  | 0.0027             | 0.01     | 2095                      | 13      | 2112    | 14                        | 2129    | 29      | 99                        | 98      |         |   |
| 9.1      | core     | 0.09                               | 74                       | 40       | 155     | 0.26 | 7.0570                                  | 0.1427             | 0.3866                                  | 0.0033             | 0.18     | 2107                      | 15      | 2119    | 17                        | 2130    | 34      | 99                        | 98      |         |   |
| 21.1     | core     | 0.18                               | 39                       | 29       | 83      | 0.35 | 6.8295                                  | 0.1224             | 0.3874                                  | 0.0029             | 0.67     | 2111                      | 14      | 2090    | 15                        | 2069    | 35      | 101                       | 102     |         |   |
| 19.1     | core     | 0.06                               | 85                       | 60       | 166     | 0.36 | 7.5232                                  | 0.1210             | 0.4054                                  | 0.0030             | 0.52     | 2194                      | 14      | 2176    | 15                        | 2159    | 31      | 100                       | 101     |         |   |
| 11.1     | core     | 0.32                               | 97                       | 45       | 202     | 0.22 | 7.5874                                  | 0.1240             | 0.4088                                  | 0.0029             | 0.01     | 2209                      | 13      | 2183    | 14                        | 2159    | 30      | 101                       | 102     |         |   |
| 8.2      | rim      | 0.06                               | 87                       | 49       | 175     | 0.28 | 7.7806                                  | 0.1487             | 0.4135                                  | 0.0035             | 0.70     | 2231                      | 16      | 2206    | 17                        | 2183    | 33      | 101                       | 102     |         |   |
| 18.1     | core     | 0.48                               | 57                       | 45       | 112     | 0.41 | 7.8187                                  | 0.1530             | 0.4193                                  | 0.0036             | 0.85     | 2257                      | 16      | 2210    | 18                        | 2167    | 37      | 102                       | 104     |         |   |
| 13.1     | core     | 0.06                               | 61                       | 28       | 139     | 0.20 | 6.4596                                  | 0.1012             | 0.3682                                  | 0.0025             | 0.01     | 2021                      | 12      | 2040    | 14                        | 2060    | 29      | 99                        | 98      |         |   |
| 2.1      | core     | 0.34                               | 13                       | 10       | 27      | 0.39 | 6.3655                                  | 0.1311             | 0.3698                                  | 0.0032             | 0.01     | 2029                      | 15      | 2028    | 18                        | 2026    | 37      | 100                       | 100     |         |   |
| 10.1     | core     | 0.08                               | 30                       | 33       | 60      | 0.56 | 6.5806                                  | 0.1106             | 0.3791                                  | 0.0027             | 0.81     | 2072                      | 13      | 2057    | 14                        | 2042    | 29      | 100                       | 101     |         |   |
| 17.1     | core     | -0.08                              | -3                       | -1       | -6      | 0.14 | 6.2461                                  | 0.0998             | 0.3449                                  | 0.0024             | 0.54     | 1910                      | 12      | 2011    | 14                        | 2116    | 30      | 94                        | 90      |         |   |
| 8.1      | core     | -0.69                              | -8                       | -8       | -13     | 0.61 | 5.6473                                  | 0.1799             | 0.3509                                  | 0.0048             | 0.84     | 1939                      | 23      | 1923    | 28                        | 1907    | 64      | 100                       | 101     |         |   |

Tabela 3: U-Pb LA-ICP-MS data from zircon grains of biotite granulite, sample CI-019-RA. Age estimates were calculated with 95 % confidence.

| Analysis | Position | $^{206}\text{Pb}_c$ (%) | $^{206}\text{Pb}^*$ (ppm) | Th ppm | U ppm | Th/U | Isotopic ratios |                  |         |                  | Estimated ages (Ma) |                    |                   |                    |                   |                               |                               |
|----------|----------|-------------------------|---------------------------|--------|-------|------|-----------------|------------------|---------|------------------|---------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|          |          |                         |                           |        |       |      | 207/235         | $^{1\sigma}$ (%) | 216/238 | $^{1\sigma}$ (%) | corr (%)            | $T_{206/238}$ (Ma) | $^{1\sigma}$ (Ma) | $T_{207/235}$ (Ma) | $^{1\sigma}$ (Ma) | Conc. $^{206}\text{Pb}_{238}$ | Conc. $^{206}\text{Pb}_{238}$ |
| 9.2      | rim      | 1.17                    | 7                         | 31     | 51    | 0.61 | 0.8103          | 0.0870           | 0.0968  | 0.0019           | 0.22                | 596                | 11                | 603                | 49                | 98                            | 94                            |
| 21.1     | rim      | 0.53                    | 16                        | 127    | 100   | 1.27 | 0.7948          | 0.0591           | 0.0971  | 0.0017           | 0.01                | 598                | 10                | 594                | 33                | 100                           | 103                           |
| 7.2      | rim      | 0.66                    | 7                         | 37     | 52    | 0.71 | 0.8485          | 0.0915           | 0.0972  | 0.0020           | 0.46                | 598                | 12                | 624                | 51                | 95                            | 83                            |
| 12.2     | rim      | 0.38                    | 12                        | 18     | 104   | 0.17 | 0.7988          | 0.0491           | 0.0990  | 0.0015           | 0.06                | 609                | 9                 | 596                | 27                | 102                           | 110                           |
| 23.2     | rim      | 0.90                    | 13                        | 83     | 93    | 0.89 | 0.8045          | 0.0637           | 0.0991  | 0.0018           | 0.25                | 609                | 10                | 599                | 36                | 101                           | 108                           |
| 15.1     | rim      | 1.59                    | 8                         | 45     | 57    | 0.78 | 0.9066          | 0.1167           | 0.1003  | 0.0031           | 0.12                | 616                | 18                | 655                | 65                | 94                            | 77                            |
| 11.2     | rim      | 0.88                    | 8                         | 17     | 73    | 0.23 | 0.8503          | 0.0715           | 0.1005  | 0.0020           | 0.62                | 617                | 12                | 625                | 39                | 98                            | 94                            |
| 14.2     | rim      | 1.76                    | 5                         | 26     | 39    | 0.66 | 0.9437          | 0.1365           | 0.1008  | 0.0035           | 0.45                | 619                | 20                | 675                | 69                | 91                            | 71                            |
| 11.1     | core     | 1.67                    | 2                         | 1      | 6     | 0.20 | 5.2962          | 0.1001           | 0.3101  | 0.0025           | 0.26                | 1741               | 13                | 1868               | 15                | 93                            | 86                            |
| 9.1      | core     | 0.50                    | 13                        | 5      | 38    | 0.13 | 5.7306          | 0.0981           | 0.3301  | 0.0025           | 0.68                | 1839               | 12                | 1936               | 16                | 94                            | 90                            |
| 7.1      | core     | 0.22                    | 70                        | 47     | 165   | 0.29 | 6.0690          | 0.1133           | 0.3360  | 0.0027           | 0.84                | 1867               | 13                | 1986               | 16                | 94                            | 88                            |
| 18.1     | core     | 0.19                    | 54                        | 15     | 142   | 0.10 | 6.0765          | 0.1063           | 0.3418  | 0.0028           | 0.71                | 1895               | 13                | 1987               | 15                | 95                            | 90                            |
| 24.1     | core     | 0.47                    | 14                        | 6      | 41    | 0.14 | 6.2167          | 0.1330           | 0.3423  | 0.0028           | 0.72                | 1898               | 14                | 2007               | 19                | 94                            | 89                            |
| 22.1     | core     | 0.32                    | 55                        | 16     | 138   | 0.11 | 6.1151          | 0.1385           | 0.3430  | 0.0030           | 0.62                | 1901               | 14                | 1992               | 19                | 95                            | 91                            |
| 4.1      | rim      | 0.09                    | 56                        | 14     | 131   | 0.10 | 6.1681          | 0.1009           | 0.3449  | 0.0025           | 0.46                | 1910               | 12                | 2000               | 14                | 95                            | 91                            |
| 27.1     | core     | 0.22                    | 20                        | 4      | 46    | 0.08 | 6.2024          | 0.1234           | 0.3486  | 0.0026           | 0.22                | 1928               | 13                | 2005               | 17                | 96                            | 92                            |
| 17.1     | core     | 0.06                    | 58                        | 24     | 128   | 0.19 | 6.3410          | 0.1338           | 0.3493  | 0.0034           | 0.85                | 1931               | 16                | 2024               | 18                | 95                            | 91                            |
| 29.1     | core     | 0.11                    | 68                        | 25     | 168   | 0.15 | 6.3016          | 0.1305           | 0.3566  | 0.0028           | 0.81                | 1966               | 13                | 2019               | 18                | 97                            | 94                            |
| 13.1     | core     | 0.19                    | 54                        | 24     | 129   | 0.19 | 6.5632          | 0.1271           | 0.3579  | 0.0033           | 0.64                | 1972               | 15                | 2054               | 17                | 96                            | 92                            |
| 26.1     | core     | 0.01                    | 75                        | 24     | 173   | 0.14 | 6.4780          | 0.1356           | 0.3581  | 0.0029           | 0.86                | 1973               | 14                | 2043               | 19                | 96                            | 93                            |
| 28.1     | core     | 0.13                    | 43                        | 19     | 98    | 0.19 | 6.5543          | 0.1580           | 0.3582  | 0.0034           | 0.98                | 1974               | 16                | 2053               | 21                | 96                            | 92                            |
| 3.1      | core     | 0.18                    | 53                        | 20     | 125   | 0.16 | 6.4393          | 0.1041           | 0.3611  | 0.0026           | 0.01                | 1987               | 12                | 2038               | 14                | 97                            | 95                            |
| 1.1      | rim      | 0.19                    | 81                        | 25     | 196   | 0.13 | 6.5939          | 0.1075           | 0.3645  | 0.0027           | 0.92                | 2004               | 13                | 2059               | 15                | 97                            | 94                            |
| 5.1      | core     | 0.34                    | 29                        | 21     | 69    | 0.31 | 6.6044          | 0.1444           | 0.3648  | 0.0034           | 0.87                | 2005               | 16                | 2060               | 19                | 97                            | 94                            |
| 14.1     | core     | 0.15                    | 45                        | 8      | 99    | 0.08 | 6.6176          | 0.1151           | 0.3702  | 0.0029           | 0.39                | 2031               | 14                | 2062               | 15                | 98                            | 97                            |
| 25.1     | core     | 0.14                    | 60                        | 34     | 135   | 0.25 | 7.5242          | 0.1455           | 0.4102  | 0.0031           | 0.83                | 2216               | 14                | 2176               | 18                | 101                           | 103                           |
| 20.1     | core     | 0.72                    | 63                        | 39     | 152   | 0.26 | 6.9239          | 0.1370           | 0.3881  | 0.0030           | 0.78                | 2114               | 14                | 2102               | 18                | 100                           | 101                           |
| 6.1      | core     | 0.41                    | 14                        | 6      | 37    | 0.15 | 4.7839          | 0.0775           | 0.2905  | 0.0022           | 0.32                | 1644               | 11                | 1782               | 15                | 92                            | 84                            |
| 2.2      | rim      | 0.27                    | 39                        | 8      | 100   | 0.08 | 5.6030          | 0.0942           | 0.3156  | 0.0024           | 0.76                | 1768               | 12                | 1917               | 14                | 92                            | 84                            |
| 12.1     | core     | 0.15                    | 73                        | 39     | 188   | 0.21 | 5.3780          | 0.0975           | 0.3062  | 0.0025           | 0.98                | 1722               | 13                | 1881               | 16                | 91                            | 83                            |
| 2.1      | core     | 0.13                    | 41                        | 58     | 73    | 0.79 | 7.0633          | 0.1289           | 0.3583  | 0.0029           | 0.58                | 1974               | 14                | 2119               | 16                | 93                            | 87                            |
| 8.1      | core     | 0.08                    | 41                        | 1      | 367   | 0.00 | 0.8647          | 0.0258           | 0.1060  | 0.0009           | 0.51                | 649                | 5                 | 633                | 14                | 102                           | 113                           |
| 19.1     | rim      | 1.28                    | 8                         | 38     | 59    | 0.64 | 0.8329          | 0.0986           | 0.1073  | 0.0026           | 0.18                | 657                | 15                | 615                | 55                | 106                           | 141                           |
| 10.1     | core     | -1.38                   | -1                        | 3      | 6     | 0.45 | 4.9535          | 0.0863           | 0.3000  | 0.0024           | 0.92                | 1691               | 12                | 1811               | 16                | 93                            | 86                            |
| 16.1     | core     | -0.12                   | -6                        | -2     | -15   | 0.14 | 5.8195          | 0.1139           | 0.3276  | 0.0029           | 0.46                | 1827               | 14                | 1949               | 17                | 93                            | 87                            |
| 23.1     | core     | -0.33                   | -6                        | -7     | -10   | 0.65 | 5.0412          | 0.1198           | 0.2865  | 0.0026           | 0.84                | 1624               | 12                | 1826               | 19                | 88                            | 78                            |



## **CAPÍTULO VI – APÊNDICES**

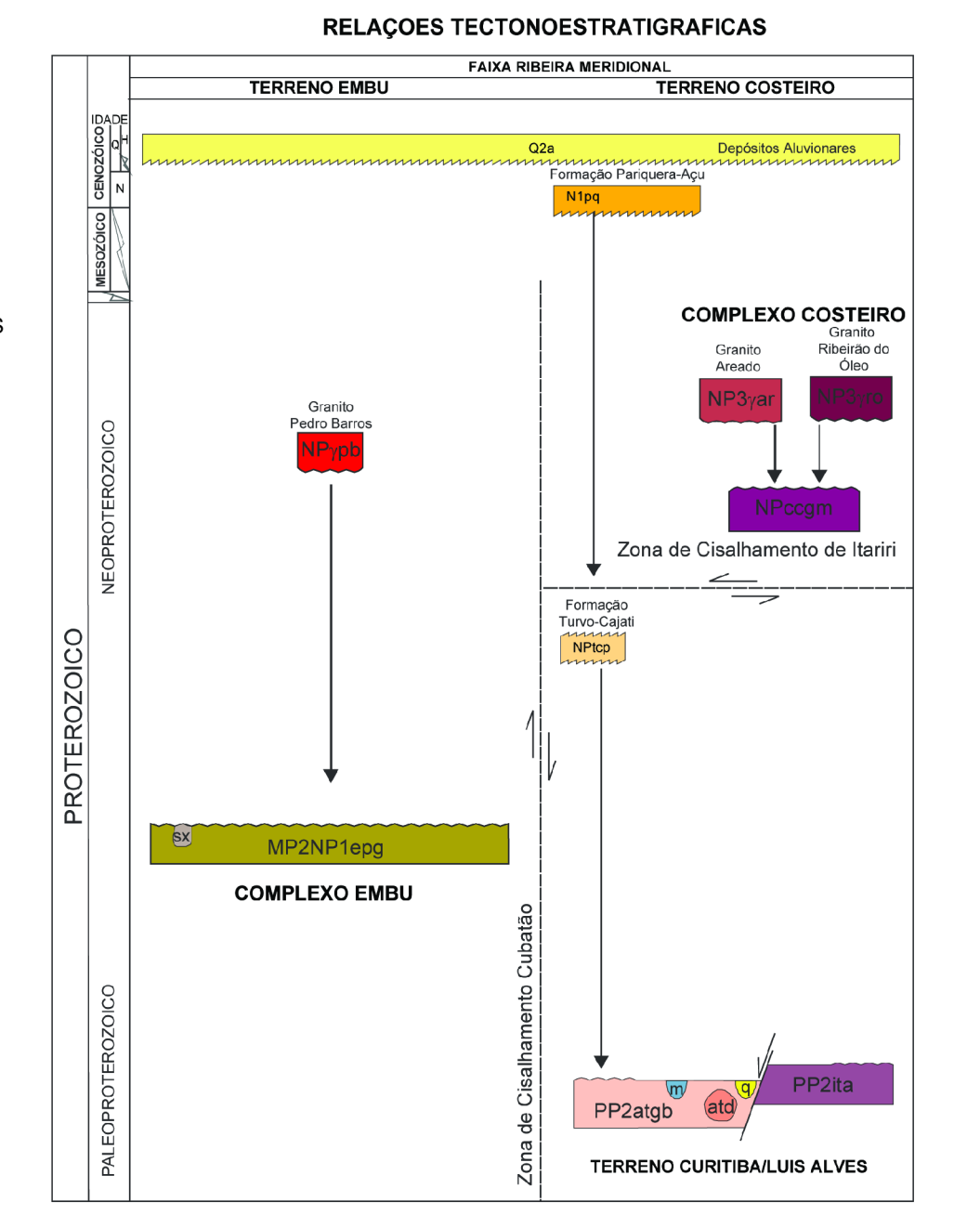
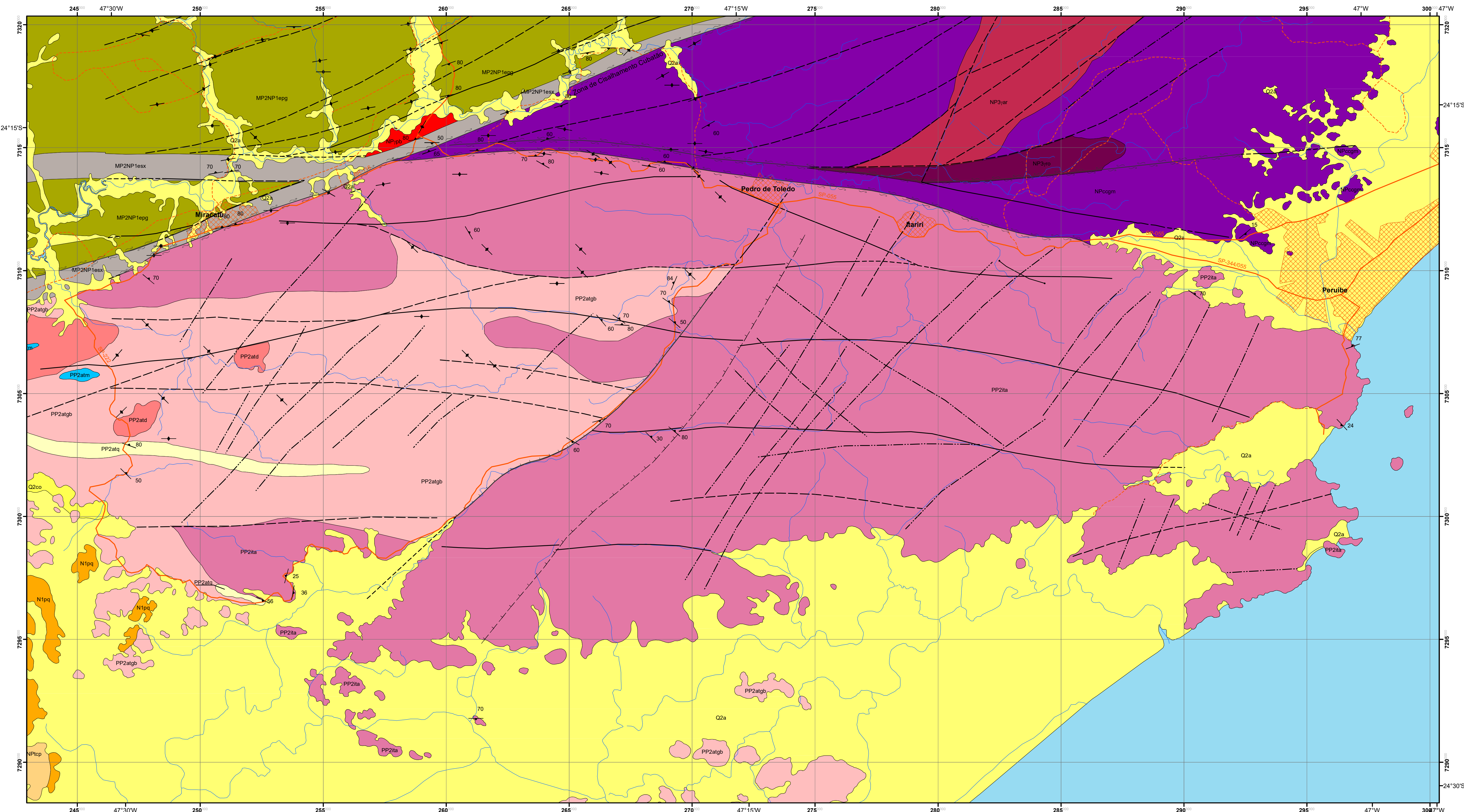
Neste capítulo são apresentados: mapa geológico (apêndice A), mapa de pontos (apêndice B), tabela simplificada de associação mineral e nomenclatura adotada (apêndice C), tabela de proporção modal (apêndice D), tabelas com análises químicas de rocha total (apêndice E) e mineral (apêndice F), tabelas de dados isotópicos Rb-Sr e Sm-Nd em rocha total e U-Pb em zircão (apêndice G).



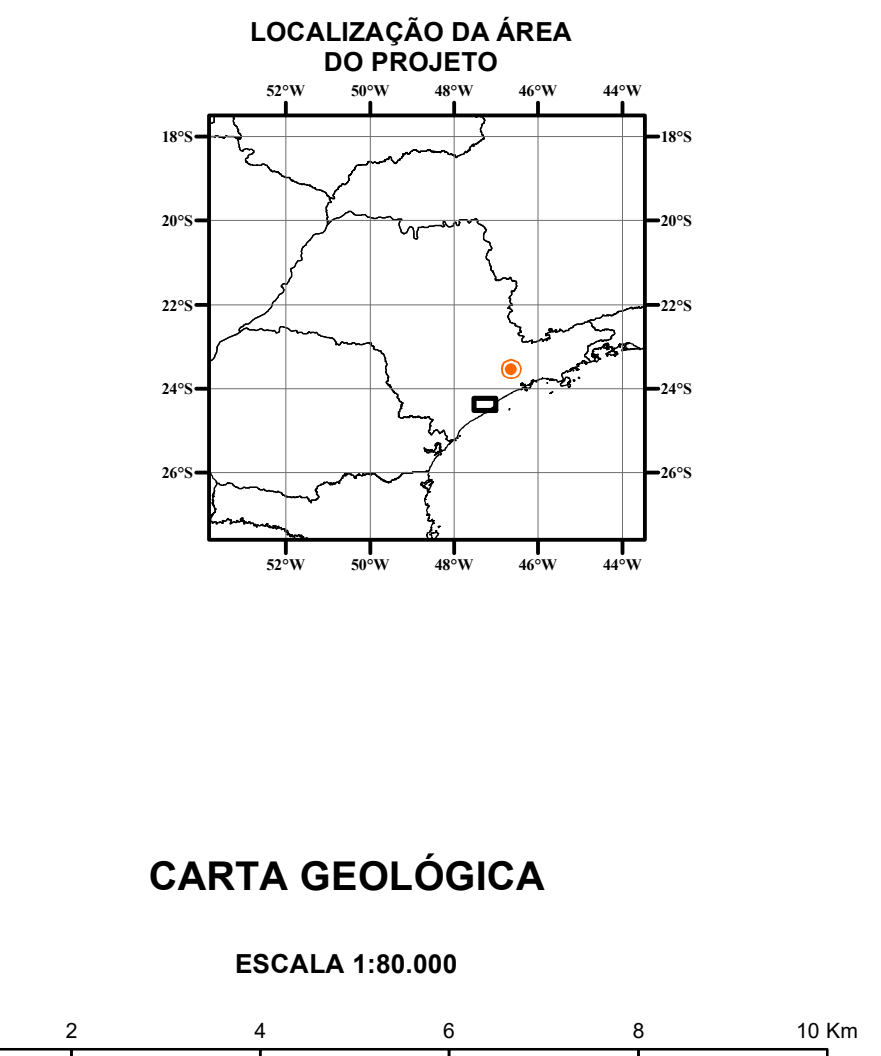
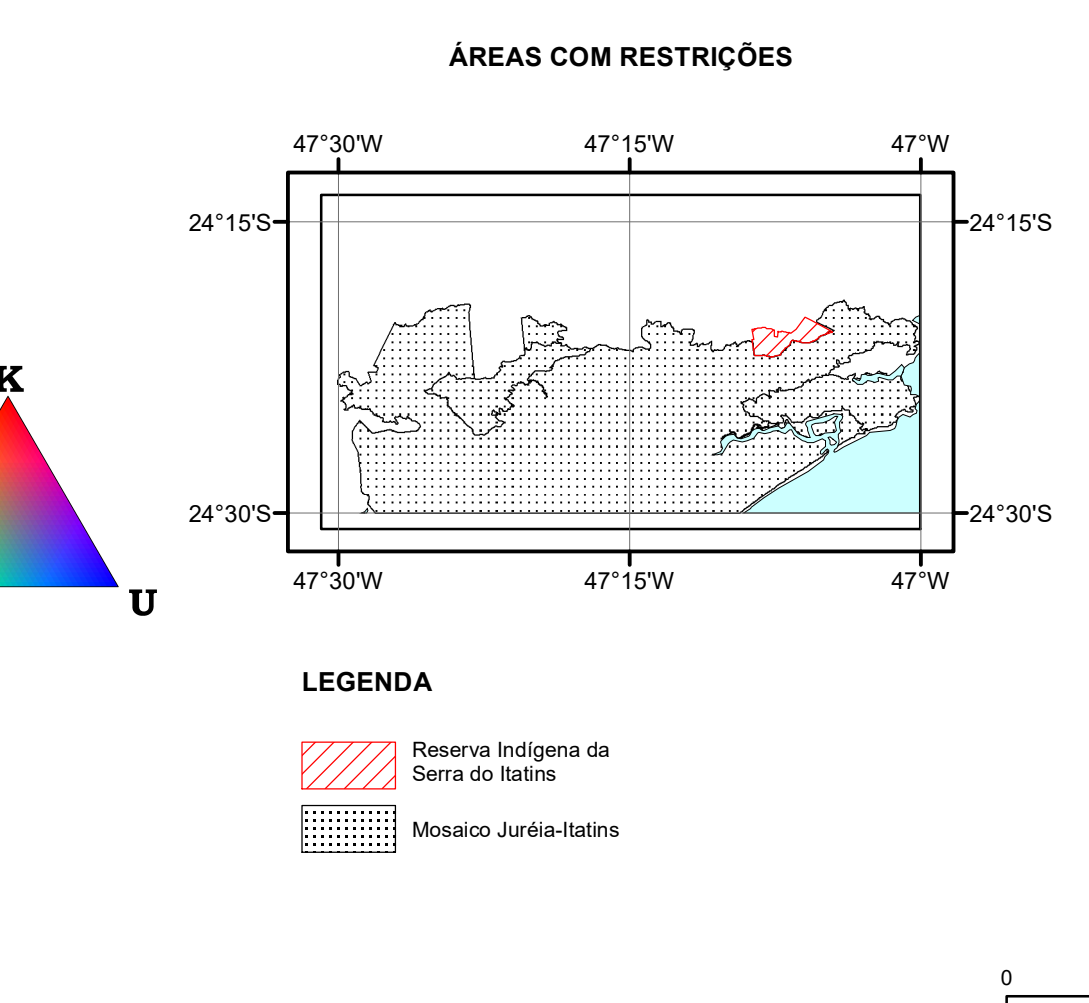
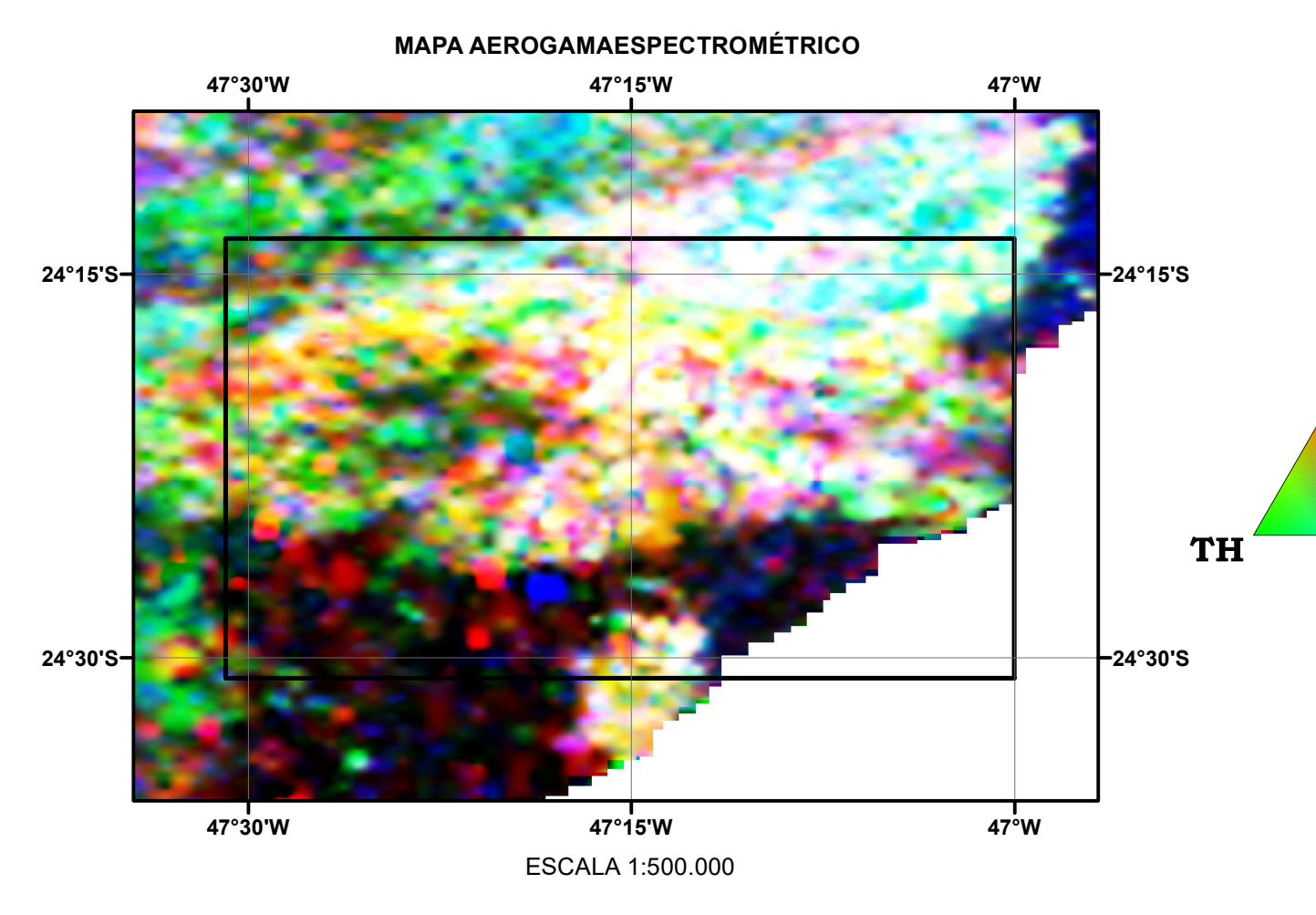
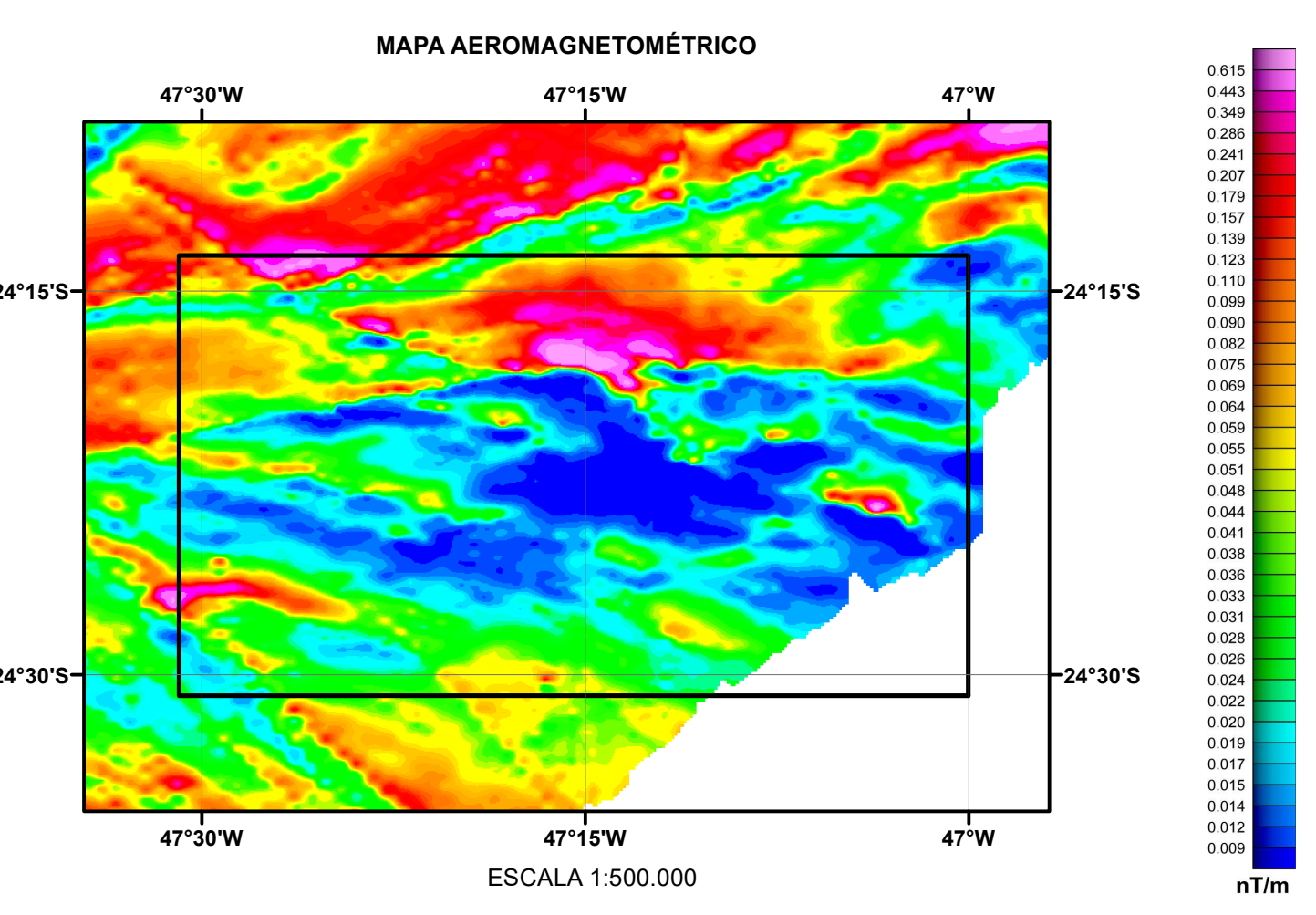
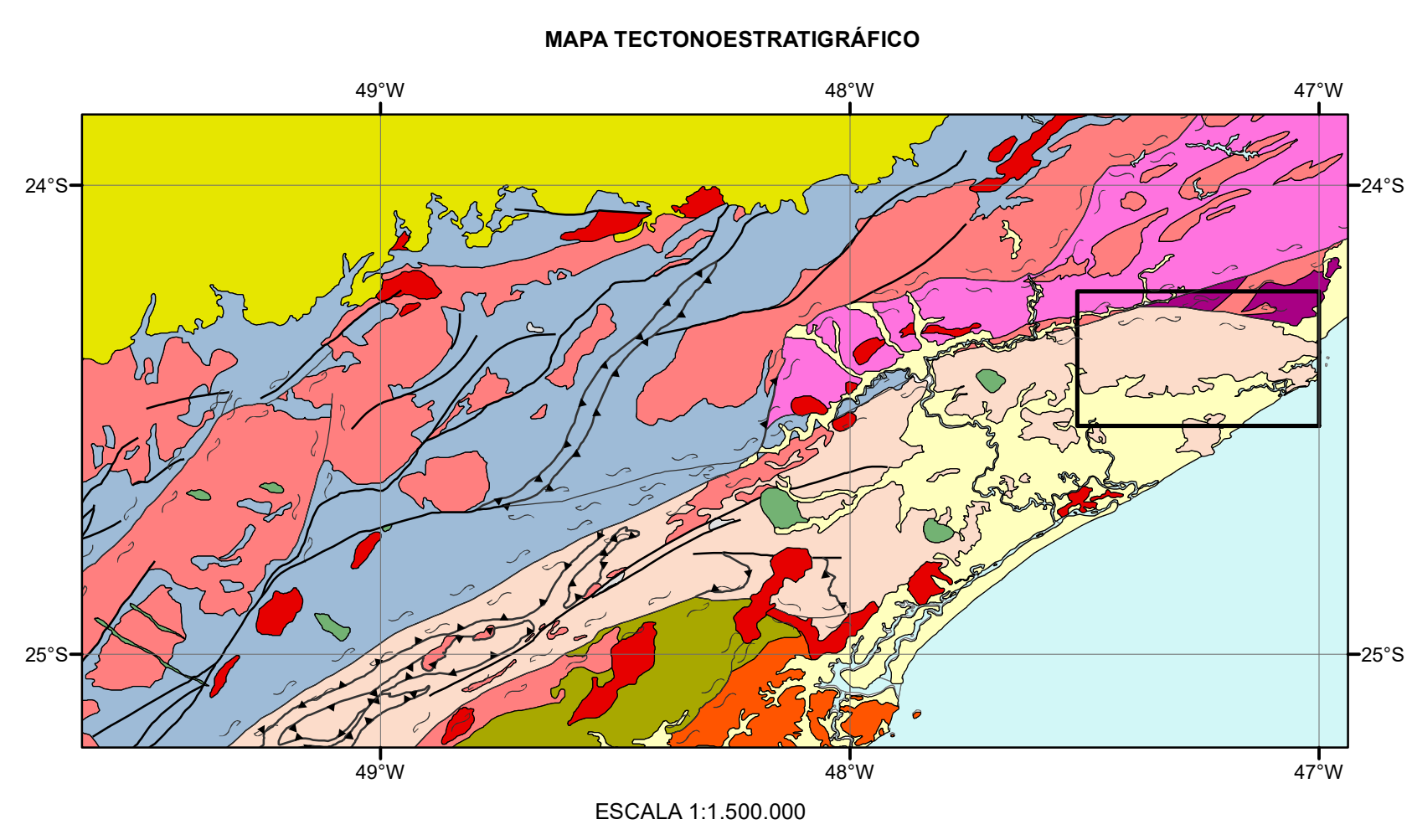
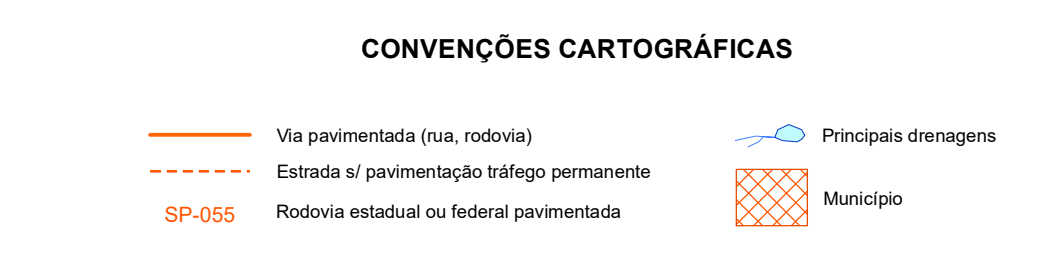
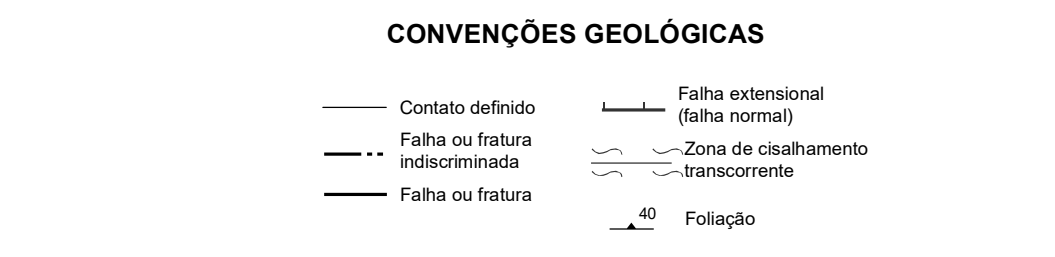


## **APÊNDICE A – MAPA GEOLÓGICO**





- ### UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS
- CENOZOICO**
    - Q2a Depósitos aluvionares indiferenciados: sedimentos inconsolidados incluindo areia, área quartzosa, cascalheira, silte e argila; depósitos coluvionares; sedimentos arenosos de deposição eólica; sedimentos arenosos de deposição marinha; sedimentos arenó-argilosos de deposição fluvio-lacustre; depósitos de mangue
    - N1pi Formação Paranaíba-Açu: paraconglomerado e arenito, subordenadamente ortoconglomerado e arenito com estratificação cruzada tabular; depósitos com granodeseissemia ascendente, variando de ortoconglomerado a areia laminada ou maciça
  - NEOPROTEROZOICO**
    - NP3ar Granito Pedro Barros: granitídeo cinza, grosseiro e porfírico
    - NP3ar Granito Ribeirão do Óleo: biotita-monzonito, granitídeos foliados e ortognaisses (561 ± 8 Ma, U-Pb em zircão<sup>1</sup>)
    - NP3ar Granito Anaco: granitídeos foliados e ortognaisses tipo I, calcialcalinos de alto e médio-K (576 ± 12 Ma, U-Pb em zircão<sup>1</sup>)
    - NP3ar Formação Turvo-Cajati, unidade de paragneisses: granada sillimanita-biotita paragneisse, cianita-granada paragneisse e granada micaxisto anafítico (585 ± 5 Ma, U-Th-Pb em monazita metamórfica<sup>2</sup>)
  - Complexo Costeiro**
    - NP3oc (horribenda)-biotita granitídeo gnaissico porfírico, alcali-feldspato granito e biotita monzonito
  - Complexo Embu**
    - NP3em Unidade de paragneisses: granada-sillimanita-biotita paragneisse migmático com bandamento mm a cm com intercalações entre lentes mesocristais com diferentes conteúdos de máficas e leucossoma granítico vertical. Presença de lentes volú (x), biotite migmáticas (792 ± 5 Ma, U-Pb, SHRIMP em zircão<sup>3</sup>)
  - PALEOPROTEROZOICO**
    - Complexo Atuba**
      - PP2atd Unidade de diatexitos: diatexitos a rochas graníticas com enclaves dos migmatitos excavantes, metabásicas, mármores e calcos-silicatos
      - PP2atg Unidade de gnaisses migmatíticos: metabásicas a diatexitos, com estrutura gnaissica preservada. Apresenta intercalações de lentes de quartzo (q) e mármores dolomíticos (m)
    - Complexo Itariri**
      - PP2ita Complexo Itariri: biotita granulito lítico e paragneisses migmatíticos estromatolíticos incluindo subordenadamente anfibolitos, serpentínitos e anafíticos usualmente retonomatizados e localmente migmatizados (217,2 ± 4,6 Ma - U-Pb, LA-ICP-MS em núcleo de zircão e 628,2 ± 4,6 Ma Ga - U-Pb, LA-ICP-MS em bordas de zircão em zircão)



- ### LEGENDA
- #### Unidades litotectônicas
- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1 Depósitos sedimentares inconsolidados       | 7 Terreno Apial             |
| 2 Bacia do Paraná                             | 8 Terreno Embu              |
| 3 Rochas alcalinas, ultramáficas e básicas    | 9 Terreno Curitiba          |
| 4 Bacia de Transição Proterozoico-Fanerozoico | 10 Terreno Costeiro         |
| 5 Granitídeos Pós-colisionais                 | 11 Terreno Paranaçu (Índio) |
| 6 Granitídeos Sin- a Tard-colisionais         | 12 Terreno Luís Alves       |
- Área do Complexo Itariri

Base planimétrica digital modificada a partir da Base Cartográfica Contínua do Brasil na escala de 1:250.000 do IBGE (disponibilizada no site [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) em 22/10/2013).

Os dados aerogeofísicos foram obtidos no Projeto São Paulo - Rio de Janeiro, realizado em 1978, o qual levantou dados aéreos de gamaespectrometria e magnetometria no estado de São Paulo com altura de voo de 150 m e espaçamento de linhas de 1.000m.

A base cartográfica foi modificada a partir da carta geológica Pedro de Toledo, escala 1:100.000, estado de São Paulo, do Projeto Integração e Detalhe Geológico do Vale do Ribeira, 1981.

Esta mapa faz parte do projeto de doutoramento de Maurício Pavan Silva, orientado pelo Prof. Dr. Renato de Moraes, sendo financiado pela FAPESP - Projeto 2013/04074-0 e 2016/22827-3

Autor: Maurício Pavan Silva

Referências consultadas:

ALMEIDA, V. V. et al., 2015. MAPA GEOLÓGICO DA FOLHA REGISTRO (SF 23-V-A), ESTADO DE SÃO PAULO, ESCALA 1:100.000.

AZEVEDO SOBRINHO, J. M., 1995. PETROLOGIA DOS CHARNOKITOS DA REGIÃO DE ITARIRI (SP). DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 112p.

DANTAS, A. S. L. et al., 1987. GEOLOGIA DAS FOLHAS JUQUÍ (SG 23-V-A-4) E MIRACATU (SG 23-V-A-3), ESTADO DE SÃO PAULO, SÃO PAULO, SGP/PT, 5v. (PT RELATÓRIO, 25.371)

FALGOUTOS, F. M. et al., 2014. GEOLÓGIA E RECURSOS MINERAIS DA FOLHA CAPÃO BONITO, SG 23-V-B-III. CPRM PASSARELLI, C. R. et al., 2007. STRUCTURAL AND GEOPHYSICAL CONSTRAINTS ON THE EVOLUTION OF THE JURÉIA MASSIF, REGISTRO DOMAIN, STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL. ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS, 79(3): 441-455.

PASSARELLI, C. R. et al., 2014. GEOPHYSICAL CONSTRAINTS ON THE EVOLUTION OF THE JURÉIA MASSIF, REGISTRO DOMAIN, COASTAL TERRANE - STATE OF SÃO PAULO, 9TH BRAG, SÃO PAULO, BRAZIL. ABSTRACTS - V. 1.

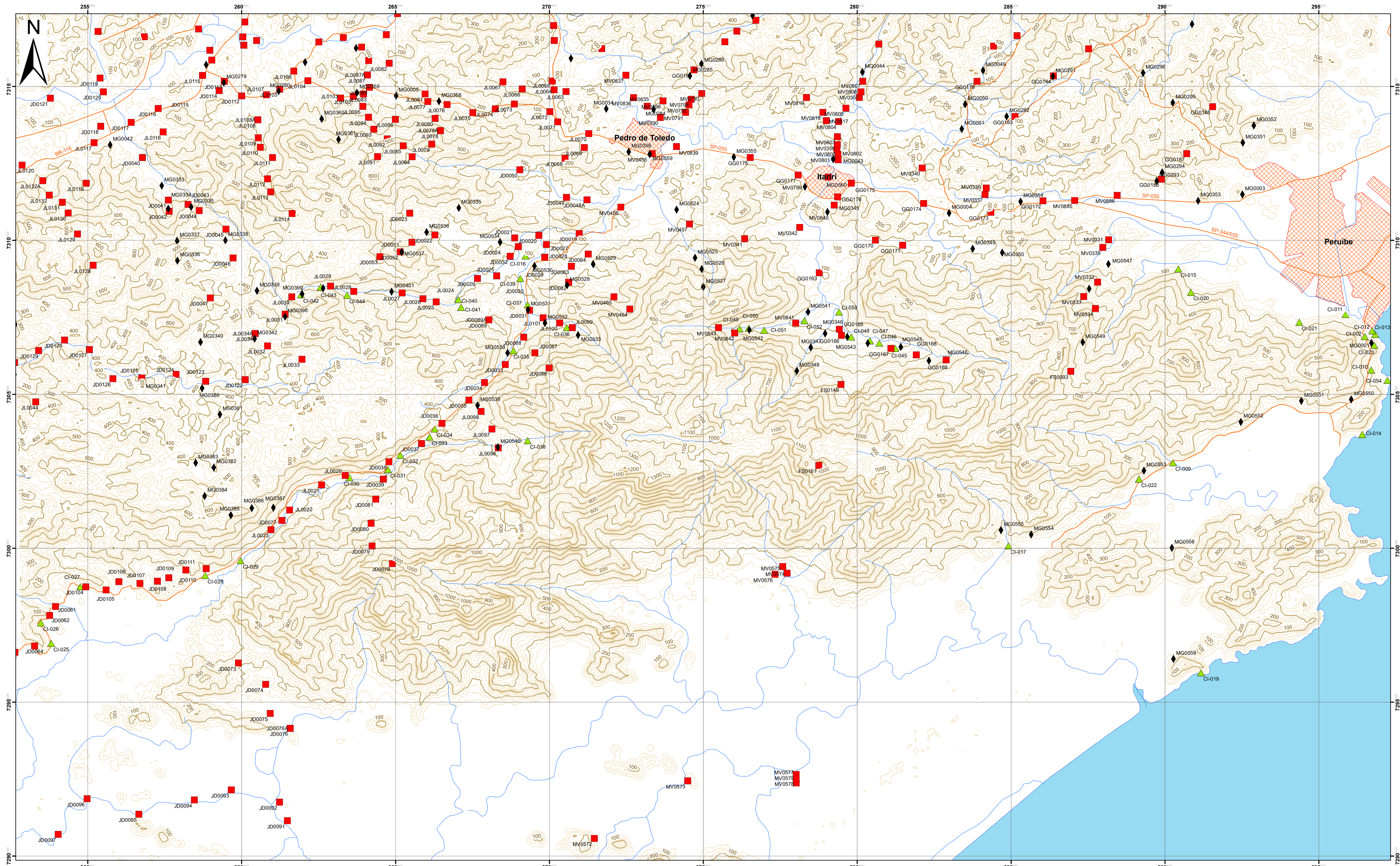
PEREIRA, M. M. et al., 2005. MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO, ESCALA 1:750.000. PROGRAMA DE LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS BÁSICOS DO BRASIL. CPRM, SÃO PAULO.

SILVA, A. T. S. F. et al., 1981. PROJETO INTEGRAÇÃO E DETALHE GEOLÓGICO DO VALE DO RIBEIRA, DIFUSIONAR. RELATÓRIO N.º 20. SÃO PAULO, V. 1, 2, 273p.

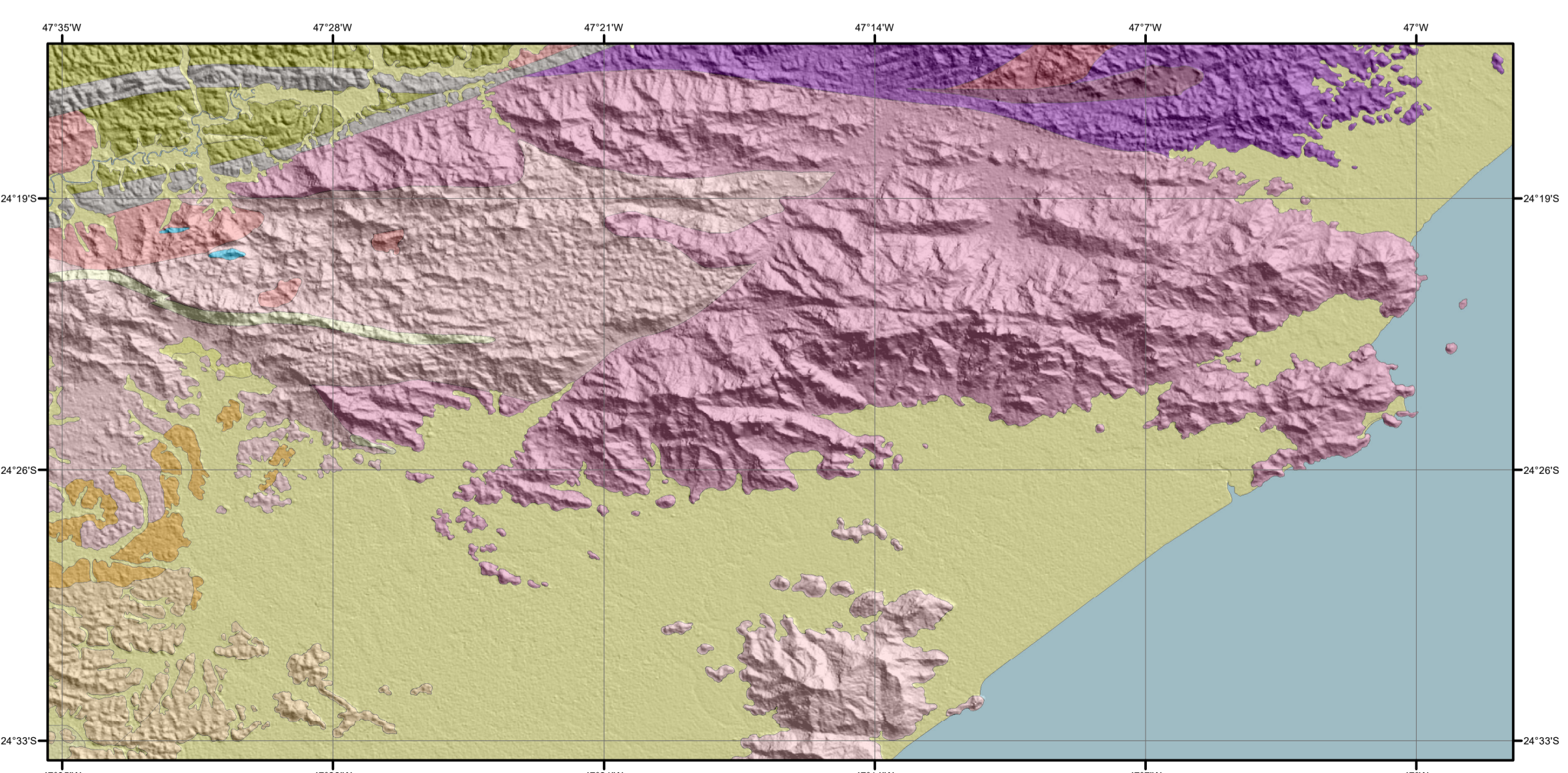
SILVA, A. R. D. et al., PROJETO INTEGRAÇÃO E REAVALIAÇÃO DO POTENCIAL MINERAL DO VALE DO RIBEIRA, ESTADOS DE PARANÁ E SÃO PAULO. CPRM, RELATÓRIO N.º 20. SÃO PAULO, (EM PREPARAÇÃO)

## **APÊNDICE B – MAPA DE PONTOS**

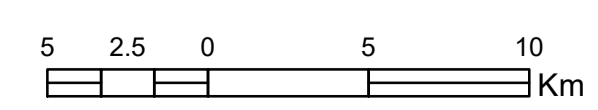




RELEVO SOMBREADO X GEOLOGIA



Legenda: ver apêndice A.



### Legenda

#### Base de dados (afioramentos)

- ◆ Projeto Integração e Detalhe Geológico do Vale do Ribeira
- Projeto SUDELPA
- ▲ Afioramentos visitados neste trabalho

#### Planimetria

- Vias pavimentadas e não pavimentadas
- Rios e córregos
- Área edificada

#### Dados de elevação (SRTM)

- curvas equidistantes de 25m
- curvas equidistantes de 100m

Mapa de pontos com a localização dos afloramentos de cada projeto consultado e visitados durante as etapas de campo do projeto.  
As curvas de nível foram desenhadas a partir de dados de elevação da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM), tratados utilizando-se o programa ENVI 5.3.

Autor: Maurício Pavan Silva

### MAPA DE PONTOS

ESCALA 1:60.000



PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR  
Origem da quilometragem UTM: "Equador e Meridiano Central 51° W.G.R."  
acrescidas as constantes: 10.000Km e 500Km, respectivamente.  
Datum horizontal: WGS84

2017



USP



**APÊNDICE C – TABELA DE DESCRIÇÕES  
PETROGRÁFICAS**

Tabela 4: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada.

| Lâmina   | Desc. Macro                       | Desc. Micro                              | assoc. Min.                                      | Litotipo                | Unidade              | Complexo                       |
|----------|-----------------------------------|--|--|-------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Cl-001-a | Kinzigito - Neossoma leucocrático | Sil-Gr-Bt-gnaiss migmatítico             | Pl=Kfs+Qzr+Grt+Br+Sil+Mnz+Zr+Op                  | Sil-grt-br diatexitó    | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| Cl-001-b | Kinzigito - Neossoma mesocrático  | Sil-Gr-Bt-gnaiss migmatítico             | Pl=Kfs+Qzr+Grt+Br+Sil+Ap+Mnz+Zr+Op               | Sil-grt-br diatexitó    | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| Cl-002-1 | Kinzigito - Neossoma              | Ru-Sil-Gr-Bt-gnaiss migmatítico          | Pl=Kfs+Qzr+Grt+Br+Sil+Ap+Mnz+Zr+Op=Ru            | Sil-grt-br diatexitó    | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| Cl-002-2 | Kinzigito - Neossoma leucocrático | Sil-Gr-Bt-gnaiss migmatítico             | Pl=Kfs+Qzr+Grt+Br+Sil+Ap+Mnz+Zr+Op               | Sil-grt-br diatexitó    | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| Cl-002-3 | Kinzigito - Neossoma leucocrático | Sp-Sil-Gr-Bt-gnaiss migmatítico          | Pl=Kfs+Qzr+Grt+Br+Sil+Sp+Ap+Mnz+Zr+Op            | Sp-sil-grt-br diatexitó | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| Cl-002-4 | Kinzigito - Neossoma meso a       | Sil-Gr-Bt-gnaiss migmatítico             | Pl=Kfs+Qzr+Grt+Br+Sil+Ap+Mnz+Zr+Op               | Sil-grt-br diatexitó    | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| Cl-002-5 | Kinzigito - Neossoma mesocrático  | Sil-Gr-Bt-gnaiss migmatítico             | Pl=Kfs+Qzr+Grt+Br+Sil+Ap+Mnz+Zr+Op               | Sil-grt-br diatexitó    | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| Cl-003-1 | Granulito Básico                  | Granulito máfico                         | Op=Kfs+Pl+Qzr+Br+Op+Ap=Ab                        | Cpx-bt granulito        | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-003-2 | Granulito Básico                  | Granulito máfico                         | Op=Kfs+Pl+Qzr+Br+Op+Ap=Ab                        | Cpx-bt granulito        | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-003-3 | Granulito Básico                  | Granulito máfico / Neossoma leucocrático | Grt+Op+Br+Pl+Qzr+Ap+Op / NL; Pl=Kfs+Qzr+Br+Ap+Ep | Bt granulito            | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-003-4 | Granulito Básico                  | Neossoma leucocrático                    | Pl+Kfs+Qzr+Br+Grt+Ap+Zr                          | Grt-bt diatexitó        | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-003-5 | Granulito Básico                  | Granulito máfico                         | Pl+Qzr+Op+Br+Ap+Zr+Op                            | Bt granulito            | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-004-1 | Granulito Grosso                  | Neossoma leucocrático                    | Pl+Qzr+Op+Hbl+Br+Op+Cpx+Zr+Mnz                   | Cpx-hbl-bt granulito    | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-004-2 | Granulito Grosso                  | Neossoma leucocrático                    | Pl+Qzr+Op+Hbl+Br+Op+Zr+Ap+Mnz                    | Cpx-hbl-bt granulito    | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-005-1 | Granulito Ácido                   | Op=Granodiorito (?)                      | Op=Br+Pl+Kfs+Qzr+Zr+Op                           | Bt granulito            | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-005-1 | Granulito Ácido                   | Op=Granodiorito (?)                      | Op=Br+Pl+Kfs+Qzr+Zr+Op                           | Bt granulito            | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-005-3 | Granulito Ácido                   | Bt-granito hololeucocrático              | Kfs+Qzr+Pl+Br+Chl+Ampr+Zr                        | Bt diatexitó            | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| Cl-006-1 | Gnaiss Blastomilonítico           | Milonito granítico (com veio de qtz)     | Me=Pl+Qzr+Ms+Br+Op+Tln=Ep                        | Gnaiss migmatítico      | Gnaiss migmatítico   | Complexo Gnaissico migmatítico |
| Cl-006-2 | Gnaiss Blastomilonítico           | Milonito granítico                       | Me=Pl+Qzr+Ms+Br+Op+Tln=Op=Kfs+Qzr+Cpx            | Gnaiss migmatítico      | Gnaiss migmatítico   | Complexo Gnaissico migmatítico |
| Cl-006-3 | Gnaiss Blastomilonítico           | Milonito granítico                       | Me=Pl+Qzr+Ms+Br+Op+Tln                           | Gnaiss migmatítico      | Gnaiss migmatítico   | Complexo Gnaissico migmatítico |
| Cl-006-4 | Gnaiss Blastomilonítico           | Milonito granítico                       | Me=Pl+Qzr+Ms+Br+Op+Tln=Chl                       | Gnaiss migmatítico      | Gnaiss migmatítico   | Complexo Gnaissico migmatítico |
| Cl-006-5 | Gnaiss Blastomilonítico           | Milonito granítico                       | Me=Pl+Qzr+Ms+Br+Chl+Ep+Op+Tln                    | Gnaiss migmatítico      | Gnaiss migmatítico   | Complexo Gnaissico migmatítico |
| Cl-006-6 | Gnaiss Blastomilonítico           | Milonito granítico (com veio de qtz)     | Me=Pl+Qzr+Ms+Br+Chl+Ep+Op+Tln                    | Gnaiss migmatítico      | Gnaiss migmatítico   | Complexo Gnaissico migmatítico |
| Cl-007-1 | Mármore                           | (Ol-Cpx)Tr-spp-námore retrometamórfico   | Tr=Spr+CcDol=Flk                                 | Mármore                 | Mármore              | Complexo Gnaissico migmatítico |
| Cl-007-2 | Mármore                           | (Ol-Cpx)Tr-spp-námore retrometamórfico   | Tr=Spr+CcDol=Flk                                 | Mármore                 | Mármore              | Complexo Gnaissico migmatítico |



Tabela 5: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 4.

| Lâmina     | Desc. Macro                       | Desc. Micro  | assoc. Min.  | Litotipo             | Unidade              | Complexo         |
|------------|-----------------------------------|--|--|----------------------|----------------------|------------------|
| CI-008-1   | Gnaíse migmatítico (Ana Dias)     | Diatexito  | Pl+Kfs+Qzr+Bt+Ap+Opr+Zr+Mnz  | Bt diatexito         | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-008-2   | Gnaíse migmatítico (Ana Dias)     | Neossoma leucocrático / Neossoma leucocrático                    | Pl+Kfs+Qzr+Gr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr+Mnz   | Spl-grt-bt diatexito | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-008-3   | Gnaíse migmatítico (Ana Dias)     | Neossoma leucocrático / Neossoma mesocrático                     | NL: Kfs+Qzr+Ap / NMs: Pl+Kfs+Qzr+Gr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr                             | Spl-grt-bt diatexito | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-008-4   | Gnaíse migmatítico (Ana Dias)     | Neossoma leucocrático / Neossoma melancrático                    | NL: Kfs+Pl+Qzr+Gr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr+Op / Nmel: Bt+Qzr+Pl+Sp+Grt+Opr+Zr            | Spl-grt-bt diatexito | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-008-5   | Gnaíse migmatítico (Ana Dias)     | Neossoma leucocrático / Neossoma leucocrático                    | Kfs+Pl+Qzr+Gr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr   | Hbl-grt-bt diatexito | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-008-6   | Gnaíse migmatítico (Ana Dias)     | Neossoma leucocrático  | Kfs+Pl+Qzr+Gr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr   | Grt-bt diatexito     | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RA  | Grt-bt-gnaíse migmatítico         | Neossoma meso a leucocrático                                     | Kfs+Pl+Qzr+Opr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr+Op+Mnz   | Hbl-bt granulito     | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RB1 | Grt-bt-gnaíse migmatítico         | Neossoma leucocrático  | Pl+Kfs+Qzr+Opr+Gr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr   | Grt-bt granulito     | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RB2 | Grt-bt-gnaíse migmatítico         | Neossoma leucocrático / Granulito máfico                         | NL: Pl+Kfs+Qzr+Opr+Gr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr / NMs: Pl+Kfs+Qzr+Opr+Gr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr | Bt granulito         | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RC  | Grt-bt-gnaíse migmatítico         | Neossoma leucocrático  | Pl+Kfs+Qzr+Gr+Opr+Hbl+Bt+Ap+Opr+Zr+Op  | Brt-bt granulito     | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RD1 | Calcossilicática (?)              | Granulito máfico   | Opx+Cpx+Pl+Qzr+Ap+Mnz+Zr   | Granulito máfico     | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RD2 | Calcossilicática (?)              | Granulito máfico   | Opx+Cpx+Pl+Qzr+Ap+Opr+Tm+Mnz+Zr  | Granulito máfico     | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RE1 | Anfibolito                        | Granulito máfico   | Opx+Cpx+Hbl+Bt+Pl+Qzr+Kfs+Opr+Ap+Mnz+Zr  | Granulito máfico     | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RE2 | Anfibolito                        | Granulito máfico   | Opx+Cpx+Hbl+Bt+Pl+Qzr+Kfs+Opr+Ap+Mnz+Zr+Op                                       | Granulito máfico     | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-009-RF  | Anfibolito                        | Granulito máfico   | Opx+Bt+Pl+Qzr+Kfs+Opr+Ap+Mnz+Zr  | Bt granulito máfico  | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-010-RA1 | Bt-amp-gnaíse                     | Neossoma mesocrático   | Opx+Pl+Qzr+Kfs+Bt+Opr+Ap+Mnz+Zr+Amf  | Bt granulito         | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-010-RA2 | Bt-amp-gnaíse                     | Neossoma leucocrático / mesocrático                              | NL: Pl+Kfs+Qzr+Br / NMs: Bt+Opx+Pl+Qzr+Kfs+Opr+Ap+Mnz+Zr                         | Hbl-bt granulito     | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-010-RB  | Grt-anfibolito (metabásica)       | Neossoma mesocrático   | Opx+Gr+Hbl+Opr+Pl+Qzr+Kfs+Opr+Tm+Mnz+Zr  | Grt granulito máfico | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-010-RC  | Alcali-granito (?) - Diatexito    | Neossoma leucocrático  | Qzr+Pl+Kfs+Hbl+Opr+Zr  | Hbl diatexito        | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-011-RA1 | Gnaíse bandado (chamoockito?) com | Neossoma mesocrático   | Pl+Kfs+Qzr+Opx+Oampr(?) +Opr+Bt+Ap+Mnz+Zr  | Bt granulito         | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-011-RA2 | Gnaíse bandado (chamoockito?) com | Neossoma hobloucrático   | Pl+Kfs+Qzr+Bt+Amf+Opr+Ap+Mnz+Zr  | Hbl granulito        | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-011-RB  | Granito - chamoockito             | Neossoma hobloucrático   | Pl+Kfs+Qzr+Bt+Op+Ap  | Bt diatexito         | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-011-RC  | Granito - chamoockito             | Neossoma hobloucrático   | Pl+Kfs+Qzr+Bt+Op+Ap  | Bt diatexito         | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-011-RD  | Granulito foliado                 |  | Opx+Pl+Kfs+Qzr+Bt+Op+Ap  | Bt granulito         | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-012-RA  | Bt-gnaíse                         | Opx-Bt gnaíse tonalítico com Hbl                                 | Bt+Hbl+Opx+Pl+Qzr+Kfs+Zr+Mnz+Ap+Op   | Hbl-bt granulito     | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-012-RB  | Bt-gnaíse com neossoma            | necha bandada com neossoma hobloucrático e neossoma leucocrático | NHbl: Pl+Kfs+Qzr+Opx+Bt+Ap+Zr; NL: Opx+Bt+Hbl+Pl+Qzr+Kfs+Ap+Mnz+Zr+Op            | Bt granulito         | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-012-RC  | Fl-amp-granito (neossoma?)        | Bt-stenogramito / Bt-diatexito (comp. Stenogramítica)            | Kfs+Pl+Qzr+Bt+Al+Zr  | Bt diatexito         | Bt granulito         | Complexo Itatins |

Tabela 6: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 5.

| Lâmina     | Desc. Macro                         | Desc. Micro   | assoc. Min.   | Litotipo               | Unidade                | Complexo                       |
|------------|-------------------------------------|---|---|------------------------|------------------------|--------------------------------|
| CI-013-RA  | Migmatito metatexitico              | Neossoma leucocrático   | Opx+Pl+Kfs+Qzr+Hbl+Bt+Apr+Zr+Opx=Mnz  | Hbl-bt granulito       | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-013-RB1 | Migmatito diatexitico               | Neossoma leucocrático   | Opx+Pl+Kfs+Qzr+Hbl+Bt+Apr+Zr+Opx=Mnz  | Hbl-bt granulito       | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-013-RB2 | Migmatito diatexitico               | Neossoma leucocrático   | Opx+Pl+Kfs+Qzr+Hbl+Bt+Apr+Zr+Opx=Mnz  | Hbl-bt granulito       | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-013-RC1 | Anfibolito                          | Neossoma mesocrático bandado                                      | Opx+Bt+Pl+Kfs+Qzr+Opx+Apr+Mnz+Zr  | Bt granulito           | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-013-RC2 | Anfibolito                          | Anfibolito  | Hbl+Bt+Opx+Pl+Qzr+Op  | Hbl-bt granulito       | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-013-RD  | Diatexitico - neossoma leucocrático | Neossoma hololeucocrático   | Pl+Kfs+Qzr+Bt+Hbl   | Hbl-bt diatexitico     | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-013-RE  | Granulito com neossoma              | Granulito máfico  |   | Bt granulito           | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-013-RF  | Granulito com neossoma              | Granulito máfico  |   | Bt granulito           | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-014-RA1 | Amp-bt-gnaisse migmatítico          | Neossoma mesocrático  | Opx+Bt+Hbl+Pl+Kfs+Qzr+Opx+Apr+Mnz+Zr=Cpx  | Hbl-bt granulito       | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-014-RA2 | Amp-bt-gnaisse migmatítico          | Neossoma mesocrático  | Opx+Bt+Hbl+Pl+Kfs+Qzr+Opx+Apr+Mnz+Zr=Cpx  | Hbl-bt granulito       | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-014-RB  | Neossoma leucocrático               | Neossoma mesocrático  | Opx+Bt+Hbl+Pl+Kfs+Qzr+Opx+Apr+Mnz+Zr=Cpx  | Cpx-hbl-bt diatexitico | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-014-RC  | Anfibolito                          | Granulito máfico  | Opx+Bt+Hbl+Pl+Qzr+Opx+Apr+Zr=Mnz  | Hbl-bt granulito       | Bt granulito           | Complexo Itaims                |
| CI-015-RA  | Migmatito diatexitico               | neossoma leucocrático   | Kfs+Pl+Qzr+Bt+Apr+Mnz+Opx+Zr  | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-015-RB1 | Migmatito diatexitico - neossoma    | rocha bandada: neossoma leucocrático, mesocrático e melanocrático | Gr+Bt+Pl+Qzr+Kfs+Apr+Mnz+Zr+Op  | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-015-RB2 | Migmatito diatexitico - neossoma    | rocha bandada: neossoma leucocrático, mesocrático e melanocrático | NL: Pl+Qzr+Br+Mnz+Zr+Op;<br>NMes: Pl+Qzr+Br+Opx+Mnz+Zr  | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-015-RB3 | Migmatito diatexitico - neossoma    | rocha bandada: neossoma leucocrático, mesocrático e melanocrático | NL: Pl+Qzr+Kfs+Br+Apr+Mnz+Zr;<br>NMes: Opx+Kfs+Tr+Oamp+Pl+Qzr+Br+Apr+Op   | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-015-RB4 | Migmatito diatexitico - neossoma    | rocha bandada: neossoma leucocrático, mesocrático a melanocrático | NL: Pl+Kfs+Qzr+Br+Apr+Opx+Mnz+Zr; NMes: Bt+Pl+Qzr+Opx+Tr+Oamp+Apr+Mnz+Zr; Nmel: Opx+Opx+Opx+Opx+Opx+Opx+Opx+Opx+Opx | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-015-RC1 | Migmatito diatexitico - neossoma    | rocha bandada: neossoma leucocrático, mesocrático e melanocrático | NL: Pl+Kfs+Qzr+Br+Opx+Gr+Apr+Mnz+Zr+Op;<br>NMes: Opx+Br+Pl+Qzr+Apr+Mnz+Opx+Zr=Gr                                    | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-015-RC2 | Migmatito diatexitico - neossoma    | Neossoma - diatexitico  | Pl+Qzr+Gr+Bt+Opx+Sp+Zr=Mnz  | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-015-RD  | Granulito máfico                    | Granulito máfico  | Opx+Hbl+Bt+Pl+Qzr+Apr+Mnz+Zr  | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-015-RE  | Calcossilicática e neossoma         | Neossoma leucocrático / Granulito máfico                          | NL: Pl+Kfs+Qzr+Gr+Bt+Opx+Mnz+Zr / GM: Opx+Hbl+Pl+Qzr+Opx+Br   | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims                |
| CI-016-RA  | Amp-bt-gnaisse milonítico           | Neossoma - diatexitico (?) milonítico                             | Me+Pl+Qzr+Bt+Apr+Mnz+Zr   | Ortognaisse            |                        | Complexo Gnaíssico migmatítico |
| CI-016-RB  | Amp-bt-gnaisse milonítico           | Granulito máfico (?)  | Opx+Cpx+Pl+Qzr+Bt+Opx+Apr+Hbl+Mnz+Zr  | Ortognaisse            |                        | Complexo Gnaíssico migmatítico |
| CI-016-RC  | Bt-granito (neossoma?)              | Granulito máfico  |   | Ortognaisse            |                        | Complexo Gnaíssico migmatítico |

Tabela 7: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 6.

| Lâmina       | Desc. Macro                           | Desc. Micro                                   | assoc. Min.  | Litotipo               | Unidade                | Complexo        |
|--------------|---------------------------------------|---|--|------------------------|------------------------|-----------------|
| CI-017-RA    | Migmatito diatexitico                 | Neossoma leucocrático                         | Grt+Pl+Qz=Kfs+Bt+Opx+Ap=MnzZr                              | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RB    | Anfibolito                            | Anfibolito                                    | Hbl+Bt+Pl+Grt=Kfs+MnzZr+Ap <sup>9</sup>                    | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RC    | Anfibolito                            | Granulito mafico                              | Opx=Cpx+Hbl+Bt+Pl+Qz=Kfs+Ap=MnzZr+Op                       | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RD    | Enclave mafico                        | Granulito mafico                              | Hbl+Opx=Cpx+Bt+Pl+Qz=Kfs+Ap=MnzZr                          | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RE1   | Grt-bt-gnaiss migmatitico (kinzigito) | Neossoma mesocrático                          | Grt+Bt+Pl=Kfs+Qz+Opx+Ap=MnzZr=Chl/Sie                      | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RE2   | Grt-bt-gnaiss migmatitico (kinzigito) | Neossoma mesocrático                          | Grt+Bt+Pl=Kfs+Qz+Opx+Ap=Sil=MnzZr=Chl/S                    | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RG    | Neossoma mesocrático                  | Neossoma mesocrático/leucocrático             | Nms: Hbl+Cpx+Opx+Pl+Qz+Opx+Bt; Nhl: Pl+Qz+Opx+MnzZr+H      | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RH    | Neossoma mesocrático/leucocrático     | Neossoma mesocrático/leucocrático             | Pl=Kfs+Qz+Grt+Bt=MnzZr+Chl+Sp+Zc                           | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RI    | Neossoma mesocrático                  | Neossoma mesocrático                          | Kfs=Pl+Qz+Grt+Bt+Sil+Rt+Opx=Chl+Sp+H                       | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RJ    | Neossoma leuco a mesocrático          | Neossoma mesocrático/leucocrático             | Pl+Kfs+Qz+Grt+Bt=MnzZr+Opx+Ap=Zc=Mg(Phen) <sub>8</sub> Chl | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RK    | Neossomas leucocrático e              | Neossoma mesocrático                          | Pl+Cpx+Opx+Opx+Ap+Bt=Gr                                    | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RL    | Neossoma melanocrático                | Neossoma mesocrático                          | Hbl+Bt+Pl+Qz+Ap=Op   | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-017-RM    | Neossomas leucocrático e mesocrático  | Neossoma leucocrático                         | Pl+Kfs+Qz+Bt=Al  | Sil-grt-br diatexitico | Sil-grt-bt diatexitico | Complexo Itaims |
| CI-018-RA    | Granulito com neossoma leucocrático   | Neossoma leucocrático                         | Pl+Kfs+Bt=Hbl+Ap+MnzZr+Zc+Op                               | Orto gnaisse           | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-019-RA    | Granulito mesocrático                 | Neossoma leucocrático a mesocrático           | Pl+Kfs+Qz+Opx+Bt=Hbl+Apr+Zc+Op                             | Orto gnaisse           | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-019-RB1   | Granulito bandado                     | Neossoma mesocrático com níveis leucocráticos | Pl+Kfs+Qz+Opx+Bt=Hbl+Apr+MnzZr+Zc+Op                       | Orto gnaisse           | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-019-RB1-2 | Granulito bandado                     | Neossoma mesocrático com níveis leucocráticos | Pl+Kfs+Qz+Opx+Bt=Hbl+Apr+MnzZr+Zc+Op                       | Orto gnaisse           | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-019-RB2-1 | Granulito bandado                     | Neossoma mesocrático bandado                  | Pl+Kfs+Qz+Opx+Bt=Apr+MnzZr+Zc+Op                           | Orto gnaisse           | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-019-RB2-2 | Granulito bandado                     | Neossoma mesocrático bandado                  | Pl+Kfs+Qz+Opx+Bt=Apr+MnzZr+Zc+Op                           | Orto gnaisse           | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-019-RC1   | Neossoma leucocrático                 | Neossoma holo leucocrático                    | Pl+Kfs+Qz+Bt+Zc=Chl  | Orto gnaisse           | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-020-RA    | Granulito mesocrático                 | Neossoma mesocrático                          | Pl=Kfs+Qz+Opx+Bt+Apr+MnzZr+Zc+Op                           | Orto gnaisse           | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-021-RA-1  | Neossoma leuco a melanocrático        | Neossoma mesocrático                          | Pl+Kfs+Qz+Grt+Bt+Zc  | Grt-bt diatexitico     | Bt granulito           | Complexo Itaims |
| CI-021-RA-2  | Neossoma leuco a melanocrático        | Neossoma mesocrático                          | Pl+Kfs+Qz+Grt+Bt+Zc  | Grt-bt diatexitico     | Bt granulito           | Complexo Itaims |

Tabela 8: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 7.

| Lâmina       | Desc. Macro                            | Desc. Micro   | assoc. Min.                               | Litotipo             | Unidade              | Complexo                       |
|--------------|--|---|---|----------------------|----------------------|--------------------------------|
| CI-022-RA-1A | Neossoma mesocrático                   | Neossoma leucocrático                               | Pl=Kfs+Qz+Grt+Bt+Zrc+Mnz+Sil+Op           | Sil-grt-br diatexitó | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-022-RA-1B | Neossoma mesocrático                   | Neossoma leucocrático                               | Pl=Kfs+Qz+Grt+Bt+Zrc+Mnz+Sil+Op           | Grt-br diatexitó     | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-022-RA-2  | Neossoma leucocrático                  | Neossoma leucocrático                               | Pl=Kfs+Qz+Grt+Bt+Op+Zrc+MinSec            | Grt-br diatexitó     | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-022-RB-1  | Neossoma mesocrático                   | Neossoma mesocrático                                | Pl=Kfs+Qz+Grt+Bt+Spl+Sil+Zrc+Mnz+Op       | Spl-grt-br diatexitó | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-022-RB-2  | Neossoma mesocrático                   | Neossoma mesocrático                                | Pl=Kfs+Qz+Grt+Bt+Spl+Sil+Zrc+Mnz+Op       | Spl-grt-br diatexitó | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-022-RC    | Neossoma mesocrático                   | Neossoma mesocrático e leucocrático                 | Pl=Kfs+Qz+Op+Bt+Op+Zrc+MinSec             | Bt granulito         | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| CI-023-RA    | Neossoma leucocrático                  | Neossoma leucocrático com faixa de pelitossoma      | Pl+Kfs+Qz+Grt+Bt+Mnz+Zrc                  | Grt-br diatexitó     | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-023-RB1   | Granulito máfico                       | Neossoma mesocrático bandado                        | Pl=Kfs+Qz+Op+Bt+Op+Zrc+Mnz?               | Granulito máfico     | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-023-RB2   | Granulito máfico com veio qtz-afectivo | Neossoma mesocrático bandado com neossoma quartzoso | Pl+Kfs+Qz+Op+Bt+Op+Zrc+Mnz+Zrc+Op         | Granulito máfico     | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-023-RC    | Neossoma mesocrático                   | Neossoma leucocrático bandado                       | Pl=Kfs+Qz+Grt+Op+Bt+Op+Zrc+Mnz+Zrc+Op     | Op+grt-br diatexitó  | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-029-RA2-1 | Neossoma leucocrático                  | Neossoma leucocrático                               | Kfs+Pl+Qz+Bt+Op+Zrc+MinSec                | Bt diatexitó         | Bt granulito         | Complexo Gnáissico-migmatítico |
| CI-029-RB2-2 | Neossoma leucocrático                  | Neossoma leucocrático                               | Kfs+Pl+Qz+Bt+Op+Zrc+MinSec                | Bt diatexitó         | Bt granulito         | Complexo Gnáissico-migmatítico |
| CI-044-RB    | Neossoma mesocrático e leucocrático    | Neossoma mesocrático e leucocrático                 | Kfs+Pl+Qz+Bt+Op+Zrc+MinSec                | Bt diatexitó         | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| CI-046-RA-1  | Neossoma mesocrático                   | Neossoma leucocrático/mesocrático                   | Pl=Kfs+Qz+Grt+Bt+Op+Spl+Ap+Mnz            | Spl-grt-br diatexitó | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-046-RA-2  | Neossoma mesocrático                   | Neossoma leucocrático/mesocrático                   | Pl=Kfs+Qz+Grt+Bt+Op+Spl+Ap+Mnz            | Spl-grt-br diatexitó | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-047-RA    | Neossoma leucocrático                  | Neossoma leucocrático                               | Pl+Kfs+Qz+Op+Bt+Grt+Ap+Mnz+Zrc+Op         | Op+grt-br diatexitó  | Sil-grt-br diatexitó | Complexo Itatins               |
| CI-047-RB    | Neossoma leucocrático                  | Neossoma leucocrático                               | Pl=Kfs+Qz+Hbl+Op+Bt+Op+Ap                 | Bt granulito         | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| CI-052-RA    | Migmatito bandado - schlieren          | Neossoma leucocrático                               | Pl+Kfs+Qz+Bt+Op+Zrc+MinSec+Chl+Ap+Mnz+Zrc | Bt granulito         | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| CI-052-RB    | Migmatito bandado - leucossomas        | Neossoma leucocrático                               | Pl+Kfs+Qz+Hbl+Chl+MinSec+Ap+Mnz+Zrc+Op    | Bt granulito         | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| CI-052-RC-1  | Migmatito bandado - schöllén           | Neossoma mesocrático / Granulito máfico             | Pl+Qz+Hbl+Cpx+Bt+Op+Zrc                   | Granulito máfico     | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| CI-052-RC-2  | Migmatito bandado - schöllén           | Neossoma mesocrático / Granulito máfico             | Pl+Qz+Hbl+Cpx+Bt+Op+Zrc                   | Granulito máfico     | Bt granulito         | Complexo Itatins               |
| CI-053-RA    | Ortognaisse bandado                    | Neossoma leucocrático                               | Pl=Kfs+Qz+Op+Hbl+Cpx+Op+Bt                | Cpx-hbl granulito    | Bt granulito         | Complexo Itatins               |

Tabela 9: Tabela com os resultados da descrição petrográfica em lâmina delgada. Continuação da tabela 8.

| Lâmina      | Desc. Macro                          | Desc. Micro                          | assoc. Min.                                      | Litotipo         | Unidade              | Complexo         |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|------------------|----------------------|------------------|
| CI-054-RA   | Grt-Diatexito                        | Neossoma leucocrático                | Pl+Qz+Grt+Bt+Mnz+Ap+Zrc+Op                       | Grt diatexito    | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-054-RB   | Paragneisse migmatítico com neossoma | Neossomas leucocrático e mesocrático | Nmes: Grt+Pl+Qz+Zrc+Opx; NH:<br>Pl+Kfs+Qz+Bt+Grt | Grt-bt granulito | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-054-RC   |                                      |                                      |  | Granulito máfico | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-054-RD   | Diatexito                            | Neossoma hololeucocrático            | Pl+Kfs+Qz+Grt+Op+Mnz+Rt                          | Grt diatexito    | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-054-RE-1 | Ortognaisse migmatítico              | Neossoma mesocrático                 | Pl+Kfs+Qz+Opx+Cpx+Bt+Zrc+Op+ <sup>2</sup> Amp    | Cpx-bt granulito | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-054-RE-2 | Ortognaisse migmatítico              | Neossoma mesocrático                 | Pl+Kfs+Qz+Opx+Cpx+Bt+Zrc+Op+ <sup>2</sup> Amp    | Cpx-bt granulito | Bt granulito         | Complexo Itatins |
| CI-054-RF-1 | Diatexito com melanossoma            | Neossoma mesocrático                 | Pl+Kfs+Qz+Grt+Opx+Bt+Op+Mnz+Zrc                  | Grt-bt granulito | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |
| CI-054-RF-2 | Diatexito com melanossoma            | Neossoma mesocrático                 | Pl+Kfs+Qz+Grt+Opx+Bt+Op+Mnz+Zrc                  | Grt-bt granulito | Sil-grt-bt diatexito | Complexo Itatins |



## APÊNDICE D – TABELA DE CONTAGEM DE PONTOS

Tabela 10: Tabela com os resultados da contagem modal das amostra selecionadas.

| lâmina     | classificação         | qtz | plag | k-feld | bt | grt | opx | hbl | amp | cpx | sill | op | tr | ru | zrc | ap | mnz | all | sum | n pontos |
|------------|-----------------------|-----|------|--------|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|----------|
| CI-001-A   | leucossoma            | 49  | 40   | 1      | 4  | 4   |     |     |     |     |      | 1  | tr | tr |     |    | tr  |     | 99  | 1822     |
| CI-001-A   | resíduo               | 38  | 23   |        |    | 15  | 23  |     |     |     |      | tr | tr | tr | tr  |    | tr  |     | 99  | 1378     |
| CI-002C    | leucossoma            | 36  | 34   | 29     | 1  |     |     |     |     |     |      | tr |    |    | tr  |    | tr  |     | 100 | 1300     |
| CI-002C    | resíduo               | 36  | 28   | tr     | 13 | 22  |     |     |     |     |      | 1  |    |    |     |    |     |     | 100 | 592      |
| CI-015-RA  | leucossoma            | 18  | 10   | 68     | 3  |     |     |     |     |     |      |    |    |    |     |    | 1   |     | 100 | 1446     |
| CI-015-RC1 | resíduo (opx)         | 16  | 29   |        |    | 37  | 17  |     |     |     |      | tr |    | tr | tr  | tr |     |     | 99  | 676      |
| CI-015-RC1 | resíduo (opx+grt)     | 22  | 29   |        |    | 36  | 3   | 10  |     |     |      |    |    |    |     |    |     |     | 100 | 871      |
| CI-015-RC1 | leucossoma            | 54  | 39   |        | 4  | 2   |     |     |     |     |      |    |    |    |     | tr |     |     | 99  | 813      |
| CI-015-RC2 | leucossoma            | 46  | 44   | 4      | 3  | 3   |     |     |     |     |      |    |    |    |     |    |     |     | 99  | 1224     |
| CI-017-RC  | mafica (dominio opx)  | 8   | 53   |        |    |     | 34  |     |     |     |      | 5  | tr | tr |     |    |     |     | 100 | 932      |
| CI-017-RC  | mafica (dominio hbl)  | 17  | 39   |        | tr |     | 18  | 21  |     |     |      | 5  | tr | tr |     |    |     |     | 100 | 1046     |
| CI-017-RI  | leucossoma            | 30  | 2    | 41     | 8  | 5   |     |     |     |     | 13   | tr | tr | tr |     |    | tr  |     | 99  | 1024     |
| CI-017-RI  | resíduo (grt+sill)    | 28  | 3    | 13     | 11 | 31  |     |     |     |     | 13   | 1  | tr | tr |     |    | tr  |     | 100 | 1000     |
| CI-017-RK1 |                       | 45  | 35   | 19     | 1  |     |     |     |     |     |      |    |    |    | tr  | tr | tr  |     | 100 | 750      |
| CI-017-RK2 | leucossoma            | 7   | 50   |        |    | 11  | 31  |     |     |     |      | tr |    | tr | tr  |    |     |     | 99  | 1161     |
| CI-022-RA2 | leucossoma            | 19  | 9    | 69     | 1  | 1   |     |     |     |     |      | tr |    |    |     |    |     |     | 100 | 675      |
| CI-046-RA  | melanossoma (fino)    | 32  | 34   |        |    | 30  | 4   |     |     |     |      | tr |    | tr |     |    | tr  |     | 100 | 1099     |
| CI-046-RA  | melanossoma (grosso)  | 18  | 19   |        |    | 49  | 13  |     |     |     |      | tr | tr |    | tr  | tr | tr  |     | 99  | 1055     |
| CI-010RA2  | leucossoma            | 57  | 22   | 21     |    |     |     |     |     |     |      |    |    | tr | tr  |    | tr  |     | 100 | 1425     |
| CI-010RA2  | melanossoma           | 34  | 24   | 1      | 24 |     | 16  |     |     |     |      | tr |    | tr | tr  | tr |     |     | 100 | 1031     |
| CI-010-RB  | mafica                | 5   | 58   |        |    | 1   | 5   | 15  |     | 12  | 3    |    |    |    |     | 1  |     |     | 100 | 1068     |
| CI-010-RC  | leucossoma            | 54  | 34   | 12     |    |     |     | tr  |     |     |      | tr |    | tr |     |    |     |     | 100 | 1026     |
| CI-011-RC  | leucossoma            | 44  | 39   | 14     | 2  |     |     |     |     |     |      | tr |    | tr |     |    |     |     | 100 | 751      |
| CI-011-RD  | neossoma              | 28  | 52   | 2      | 16 | 2   |     |     |     |     |      | tr |    | tr | tr  |    |     |     | 99  | 925      |
| CI-012-RB  | leucossoma            | 23  | 32   | 43     | 1  | 0   | 1   |     |     |     |      |    |    |    | tr  |    |     |     | 100 | 740      |
| CI-012-RB  | neossoma              | 15  | 56   | 2      | 17 | 0   | 9   | 1   |     | tr  |      | tr | tr |    | tr  |    |     |     | 100 | 626      |
| CI-012-RC  | leucossoma (gran)     | 30  | 10   | 56     | 4  | 0   | 0   | 0   |     | 0   | 0    | 0  | tr | tr | 0   |    |     | tr  | 100 | 904      |
| CI-013-RC1 | neossoma              | 21  | 40   | 7      | 12 | 0   | 21  | 0   |     | 0   | 0    | tr | 0  | tr | tr  | 0  |     |     | 100 | 1008     |
| CI-013-RB1 | leucossoma            | 35  | 59   | 6      | 0  | 0   | 0   | 0   |     | 0   | 0    | 0  | 0  | tr | 0   | 0  |     |     | 100 | 815      |
| CI-013-RB1 | neossoma leuco        | 30  | 37   | 26     | 6  | 1   | 0   | 0   |     | 0   | 0    | 0  | 0  | tr | 0   | 0  |     |     | 100 | 949      |
| CI-013-RC2 | mafica                | 0   | 34   | 0      | 0  | 0   | 8   | 49  |     | 8   | 0    | 1  | 0  | 0  | 0   | 0  |     |     | 100 | 1087     |
| CI-014-RB  | leucossoma            | 62  | 17   | 20     | 0  | 0   | 0   | 0   |     | 0   | 0    | 0  | 0  | 0  | 0   | 0  |     |     | 100 | 476      |
| CI-014-RB  | neossoma leuco        | 27  | 31   | 11     | 4  | 0   | 8   | 16  |     | 0   | 0    | 2  | 0  | tr | tr  | 0  |     |     | 100 | 797      |
| CI-014-RC  | mafica (dom + leuco)  | 1   | 43   | 0      | 8  | 0   | 0   | 33  |     | 10  | 0    | 5  | 0  | tr | 1   | 0  |     |     | 100 | 942      |
| CI-014-RC  | mafica (dom + melano) | 0   | 35   | 0      | 2  | 0   | 0   | 53  |     | 4   | 0    | 5  | 0  | 0  | 1   | 0  |     |     | 100 | 878      |
| CI-018-RA  | leucossoma            | 38  | 18   | 38     | 3  | 0   | 0   | 0   |     | 0   | 0    | 1  | 0  | tr | 1   | 0  | tr  |     | 100 | 1155     |
| CI-018-RA  | neossoma              | 36  | 23   | 18     | 20 | 0   | 0   | tr  |     | 0   | 0    | 2  | 0  | tr | tr  | 0  | tr  |     | 100 | 857      |
| CI-019-RB2 | neossoma              | 19  | 32   | 5      | 25 | 16  |     |     |     |     |      | 1  |    | tr | 2   |    |     |     | 100 | 714      |
| CI-019-RC1 | dom maior             | 28  | 12   | 57     | 3  |     |     |     |     |     |      |    |    | tr | tr  |    |     |     | 100 | 735      |
| CI-019-RC1 | dom menor             | 38  | 12   | 48     | 2  |     |     |     |     |     |      |    |    | tr | tr  |    |     |     | 100 | 1000     |
| CI-023-RA  | leucossoma            | 44  | 28   | 26     | 1  | 1   |     |     |     |     |      |    |    |    |     |    |     |     | 100 | 1150     |
| CI-023-RB2 | leucossoma            | 46  | 22   | 26     | 6  |     | tr  |     |     |     |      |    |    | tr | tr  |    |     |     | 100 | 1063     |
| CI-023-RB2 | neossoma              | 13  | 45   | 13     | 15 | 14  |     |     |     |     |      |    |    | tr | tr  |    |     |     | 100 | 929      |
| CI-023-RC  | neossoma              | 29  | 49   | 1      | 13 | 2   | 5   |     |     |     |      | tr |    | tr | 1   |    |     |     | 100 | 1489     |
| CI-047-RA  | neossoma              | 33  | 36   | 9      | 22 |     |     |     |     |     |      |    |    |    |     |    |     |     | 100 | 1006     |

Tabela 11: Tabela com os resultados da contagem modal das amostra selecionadas. Continuação da tabela 10.

| lâmina    | classificação           | qtz | plag | k-feld | bt | grt | opx | hbl | amp | cpx | sill | op | tr | ru | zrc | ap | mnz | all | sum | n pontos |
|-----------|-------------------------|-----|------|--------|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|----------|
| CI-052-RA | leucossoma              | 34  | 51   | 8      | 8  |     |     |     |     |     |      | tr |    |    | tr  |    |     |     | 101 | 967      |
| CI-052-RA | leucossoma (hbl)        | 31  | 40   | 8      | 16 |     |     |     | 5   |     |      | tr |    |    | tr  |    |     |     | 100 | 772      |
| CI-052-RB | neossoma (dom 1)        | 26  | 11   | 56     | 7  |     | tr  |     |     |     |      | tr |    |    | tr  |    |     |     | 100 | 1068     |
| CI-052-RB | neossoma (dom 2)        | 24  | 20   | 37     | 20 |     |     |     |     |     |      | tr |    |    | tr  |    |     |     | 100 | 651      |
| CI-052-RC | mafica                  | 1   | 51   |        | 1  |     |     | 26  |     | 15  |      | 6  |    |    | tr  | tr |     |     | 99  | 1050     |
| CI-053-RA | Neossoma                | 20  | 42   | 23     | 3  |     | 7   | 3   |     |     |      | tr |    |    | tr  | tr |     |     | 99  | 1241     |
| CI-054-RA | leucossoma (grt)        | 28  | 26   |        | 2  | 43  |     |     |     |     |      | 1  |    |    | tr  |    | tr  |     | 100 | 891      |
| CI-054-RA | leucossoma (grt+bt)     | 31  | 37   | 0      | 10 | 21  |     |     |     |     |      | 0  |    |    | tr  |    | tr  |     | 100 | 998      |
| CI-054-RB | leucossoma              | 40  | 24   | 35     | 1  | tr  |     |     |     |     |      |    |    |    | tr  |    |     |     | 100 | 995      |
| CI-054-RB | melanossoma             | 19  | 20   | 3      | 33 | 25  |     |     |     |     |      | tr |    |    | tr  |    | tr  |     | 100 | 843      |
| CI-054-RB | neossoma                | 33  | 23   | 1      | 19 | 23  |     |     |     |     |      | tr |    |    | tr  |    |     |     | 100 | 1217     |
| CI-054-RC | mafica (dominio opx)    | 6   | 61   |        | 5  | 27  |     |     |     |     |      | 1  |    |    |     |    |     |     | 100 | 978      |
| CI-054-RC | mafica (dominio s/ opx) | 27  | 47   | 3      | 22 |     |     |     |     |     |      |    |    |    |     | tr | tr  |     | 99  | 958      |
| CI-054-RD | leucossoma              | 45  | 25   | 24     | 5  |     |     |     |     |     |      |    |    |    | tr  |    |     |     | 100 | 802      |
| CI-054-RE | leucossoma (1a)         | 41  | 47   | 12     |    |     |     |     |     |     |      |    |    |    | tr  |    |     |     | 100 | 727      |
| CI-054-RE | melanossoma (1b)        | 14  | 43   | 2      | 27 |     | 13  | tr  |     |     |      |    |    | tr | tr  | tr |     |     | 100 | 741      |
| CI-054-RE | neossoma (2)            | 14  | 49   | 1      | 12 | 17  |     |     |     | 8   |      | tr |    |    | tr  | tr |     |     | 100 | 1167     |
| CI-054-RF | neossoma (residuo)      | 32  | 20   | 12     | 27 | 7   | 3   |     |     |     |      | tr |    |    | tr  | tr | tr  |     | 100 | 1093     |



## **APÊNDICE E - QUÍMICA DE ROCHA TOTAL**

### **DETERMINAÇÃO DE ELEMENTOS MAIORES, MENORES E TRAÇOS**

Foram analisadas 15 amostras dos litotipos representativos das rochas do Complexo Itatins para determinação das concentrações de elementos maiores, menores e traços. Os resultados obtidos para os óxidos maiores foram utilizados na comparação com as composições geradas na modelagem via THERMOCALC, enquanto as concentrações de elementos menores e traço foram plotadas em diagramas multi-elementares tipo “spider” visando identificar possíveis padrões de variação associados com processos de fusão parcial. Os resultados são apresentados nas tabelas 12, 13 e 14.

Tabela 12: Concentração dos principais óxidos (% peso) das amostras representativas de cada litotipo determinada através de Fluorescência de Raios-X.

| Unidade Litológica              | Biotita granulito félsico |              |              |              | Sillimanita-granada-biotita diatexito |              |           |                      | Rochas máficas       |                      |                  |                  |                  |            |           |
|---------------------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------------|--------------|-----------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------|-----------|
|                                 | Amostra                   | CI-011-RD    | CI-019-RA    | CI-019-RB1   | CI-020-RA                             | CI-023-RB1   | CI-012-RC | CI-013-RB1           | CI-017-RE1           | CI-017-RL            | CI-022-RA        | CI-010-RB        | CI-013-RC1       | CI-014-RC  | CI-017-RB |
| Rocha                           | Bt granulito              | Bt granulito | Bt granulito | Bt granulito | Bt granulito                          | Bt granulito | Diatexito | Sil-grt-bt diatexito | Sil-grt-bt diatexito | Sil-grt-bt diatexito | Granulito máfico | Granulito máfico | Granulito máfico | Anfibolito |           |
| SiO <sub>2</sub>                | 67.15                     | 58.71        | 59.76        | 60.12        | 63.26                                 | 72.24        | 72.8      | 60.95                | 56.51                | 52.48                | 57.89            | 50.06            | 47.68            | 44.03      | 49.63     |
| TiO <sub>2</sub>                | 0.49                      | 0.83         | 0.92         | 0.70         | 0.66                                  | 0.12         | 0.28      | 1.42                 | 1.44                 | 1.66                 | 1.14             | 1.91             | 1.58             | 3.77       | 2.09      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 15.39                     | 18.21        | 16.82        | 16.53        | 16.78                                 | 14.91        | 13.82     | 14.78                | 20.87                | 17.37                | 18.48            | 16.77            | 13.4             | 13.77      | 14.68     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3r</sub> | 1.04                      | 0.76         | 0.71         | 0.70         | 0.28                                  | 0.72         | 0.51      | 2.52                 | 2.20                 | 3.83                 | 1.56             | 4.37             | 3.10             | 3.28       | 6.26      |
| FeO                             | 2.56                      | 5.82         | 5.72         | 5.86         | 4.57                                  | 0.71         | 0.77      | 8.42                 | 9.57                 | 5.27                 | 7.48             | 9.64             | 11.16            | 11.48      | 7.82      |
| MnO                             | 0.06                      | 0.11         | 0.11         | 0.11         | 0.08                                  | 0.02         | 0.02      | 0.15                 | 0.27                 | 0.16                 | 0.20             | 0.23             | 0.21             | 0.24       | 0.22      |
| MgO                             | 1.6                       | 2.92         | 2.93         | 3.27         | 2.57                                  | 0.07         | 0.3       | 3.69                 | 3.1                  | 4.02                 | 2.98             | 2.38             | 6.29             | 5.89       | 6.48      |
| CaO                             | 3.18                      | 5.46         | 3.85         | 5.61         | 4.35                                  | 1.43         | 1.51      | 1.92                 | 0.76                 | 6.22                 | 2.08             | 9.1              | 10.82            | 10.02      | 9.41      |
| Na <sub>2</sub> O               | 3.68                      | 4.59         | 4.19         | 4.05         | 3.96                                  | 2.98         | 2.44      | 2                    | 0.69                 | 3.6                  | 2.43             | 3.53             | 2.97             | 3.2        | 0.68      |
| K <sub>2</sub> O                | 3.59                      | 1.64         | 2.88         | 2.02         | 2.47                                  | 6.5          | 6.29      | 2.29                 | 2.82                 | 2.35                 | 5.35             | 0.77             | 1.01             | 1.23       | 1.45      |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>   | 0.19                      | 0.30         | 0.29         | 0.25         | 0.23                                  | 0.02         | 0.04      | 0.03                 | 0.05                 | 0.59                 | 0.05             | 0.29             | 0.14             | 0.70       | 0.10      |
| LOI                             | 0.4                       | 0.2          | 0.36         | 0.24         | 0.24                                  | 0.32         | 0.26      | 0.12                 | 0.12                 | 0.86                 | l.d.             | l.d.             | l.d.             | 0.22       | 0.4       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3t</sub> | 3.88                      | 7.22         | 7.06         | 7.2          | 5.35                                  | 1.51         | 1.36      | 11.87                | 12.82                | 9.68                 | 9.86             | 15.07            | 15.49            | 16.02      | 14.94     |
| Total*                          | 99.32                     | 99.54        | 98.54        | 99.46        | 99.45                                 | 100.04       | 99.03     | 98.29                | 98.40                | 98.41                | 99.63            | 99.04            | 98.36            | 97.83      | 99.22     |

Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> = Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub> - (FeO\*1.11)

Total\* = Soma dos óxidos e da perda ao fogo (LOI) sem a concentração de Fe<sub>2</sub>O<sub>3t</sub>

Tabela 13: Concentração de elementos menores (ppm) das amostras representativas de cada litotipo determinada através de Fluorescência de Raios-X.

| Unidade | Ortopiroxênio-biotita diatexito |              |              |              | Sillimanita-granada-biotita diatexito |              |           |            | Rochas máficas |            |            |           |            |           |            |
|---------|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------------|--------------|-----------|------------|----------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|         | Amostra                         | CI-011-RD    | CI-019-RA    | CI-019-RBI   | CI-023-RBI                            | CI-020-RA    | CI-012-RC | CI-013-RBI | CI-017-REI     | CI-017-RI  | CI-022-RA  | CI-010-RB | CI-013-RCI | CI-014-RC | CI-017-RB  |
| Rocha   | Bt granulito                    | Bt granulito | Bt granulito | Bt granulito | Bt granulito                          | Bt diatexito | Diatexito | Sil-grt-bt | Sil-grt-bt     | Sil-grt-bt | Sil-grt-bt | Granulito | Granulito  | Granulito | Anfibolito |
| Ba      | 920                             | 1003         | 987          | 598          | 959                                   | 696          | 2030      | 575        | 643            | 1715       | 1017       | 86        | 63         | 367       | 242        |
| Ce      | 35                              | l.d.         | 103          | 69           | 55                                    | 104          | l.d.      | 54         | 89             | 168        | 117        | 52        | l.d.       | 73        | l.d.       |
| Co      | 12                              | 19           | 22           | 19           | 16                                    | l.d.         | l.d.      | 29         | 35             | 25         | 24         | 35        | 52         | 48        | 50         |
| Cr      | 69                              | 62           | 106          | 95           | 82                                    | l.d.         | l.d.      | 134        | 152            | 25         | 91         | l.d.      | 65         | 20        | 71         |
| Cu      | 3                               | 13           | 25           | 12           | l.d.                                  | 9            | 7         | 21         | 74             | l.d.       | 20         | 49        | 206        | 49        | 42         |
| Ga      | 19                              | 24           | 23           | 21           | 20                                    | 19           | 14        | 19         | 31             | 25         | 24         | 23        | 17         | 21        | 22         |
| La      | l.d.                            | l.d.         | 64           | l.d.         | 29                                    | l.d.         | l.d.      | 38         | 46             | 95         | 66         | l.d.      | l.d.       | 34        | l.d.       |
| Nb      | l.d.                            | l.d.         | 9            | 10           | l.d.                                  | 9            | l.d.      | 20         | 23             | 22         | 17         | 15        | 8          | 41        | 9          |
| Nd      | 15                              | 23           | 38           | 26           | 21                                    | l.d.         | l.d.      | 23         | 38             | 70         | 45         | 33        | 13         | 40        | 19         |
| Ni      | 18                              | 18           | 39           | 29           | 23                                    | l.d.         | l.d.      | 74         | 73             | 37         | 37         | 17        | 76         | 39        | 100        |
| Pb      | 4                               | l.d.         | l.d.         | l.d.         | l.d.                                  | 21           | 5         | 8          | 17             | l.d.       | 27         | 7         | l.d.       | l.d.      | 5          |
| Rb      | 118                             | 69           | 136          | 85           | 87                                    | 255          | 182       | 95         | 145            | 124        | 207        | 7         | 6          | 11        | 75         |
| Sc      | l.d.                            | 18           | l.d.         | 19           | l.d.                                  | l.d.         | l.d.      | 19         | 21             | 18         | 19         | 29        | 41         | 30        | 38         |
| Sr      | 491                             | 737          | 758          | 558          | 636                                   | 193          | 506       | 133        | 106            | 988        | 234        | 216       | 123        | 692       | 214        |
| Th      | l.d.                            | l.d.         | l.d.         | l.d.         | l.d.                                  | 40           | l.d.      | 10         | 21             | l.d.       | 33         | l.d.      | l.d.       | l.d.      | l.d.       |
| U       | l.d.                            | l.d.         | l.d.         | l.d.         | l.d.                                  | l.d.         | l.d.      | l.d.       | 3              | l.d.       | l.d.       | 3         | l.d.       | l.d.      | l.d.       |
| V       | 51                              | 105          | 110          | 111          | 77                                    | l.d.         | 18        | 176        | 203            | 162        | 167        | 164       | 397        | 393       | 570        |
| Y       | 5                               | 15           | 12           | 18           | 4                                     | 10           | 2         | 36         | 53             | 28         | 49         | 50        | 30         | 25        | 19         |
| Zn      | 48                              | 95           | 106          | 85           | 77                                    | 22           | 17        | 123        | 152            | 140        | 134        | 98        | 107        | 116       | 121        |
| Zr      | 132                             | 144          | 296          | 142          | 131                                   | 154          | 208       | 224        | 223            | 281        | 249        | 181       | 89         | 157       | 85         |
| F       | 999                             | 907          | 1603         | 1550         | 1196                                  | 289          | 361       | 928        | 1282           | 2798       | 1376       | 941       | 997        | 3248      | 3000       |
| Cl      | l.d.                            | l.d.         | l.d.         | l.d.         | l.d.                                  | l.d.         | l.d.      | l.d.       | l.d.           | l.d.       | l.d.       | 824       | 1221       | l.d.      | l.d.       |
| S       | l.d.                            | l.d.         | l.d.         | l.d.         | l.d.                                  | l.d.         | l.d.      | l.d.       | 1910           | l.d.       | l.d.       | 660       | l.d.       | l.d.      | l.d.       |

l.d. = valores abaixo do limite de detecção

Tabela 14: Concentração de elementos traço (ppm) das amostras representativas de cada litotipo determinada através espectrometria de massa (ICP-MS).

| Unidade | Sillimanita-granada-biotita diatexito |              |              |              |              |                                       |            |           |            |            | Rochas máficas |            |            |           |            |           |            |
|---------|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|----------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|         | Bt granulito                          |              |              |              |              | Sillimanita-granada-biotita diatexito |            |           |            |            | Granulito      | Granulito  | Anfibolito |           |            |           |            |
| Amostra | CI-011-RD                             | CI-019-RA    | CI-019-RBI   | CI-020-RA    | CI-023-RBI   | CI-012-RC                             | CI-013-RBI | Diatexito | Sil-grt-bt | Sil-grt-bt | CI-017-REI     | CI-017-RL  | CI-022-RA  | CI-010-RB | CI-013-RCI | CI-014-RC | CI-017-RB  |
| Rocha   | Bt granulito                          | Bt granulito | Bt granulito | Bt granulito | Bt granulito | Bt diatexito                          | Diatexito  |           | Sil-grt-bt | Sil-grt-bt | Sil-grt-bt     | Sil-grt-bt | Sil-grt-bt | Granulito | Granulito  | Granulito | Anfibolito |
| Sr      | 518                                   | 750          | 767          | 550          | 645          | 199                                   | 566        | 133       | 102        | 1001       | 233            | 212        | 116        | 209       |            |           |            |
| Y       | 6                                     | 15           | 14           | 17           | 5            | 10                                    | 2          | 36        | 38         | 28         | 47             | 49         | 28         | 22        |            |           |            |
| Zr      | 127                                   | 149          | 284          | 114          | 111          | 160                                   | 216        | 230       | 214        | 299        | 280            | 78         | 54         | 62        |            |           |            |
| Nb      | 7                                     | 11           | 15           | 12           | 8            | 21                                    | 8          | 22        | 30         | 29         | 20             | 15         | 5          | 8         |            |           |            |
| Cs      | 1                                     | 1            | 1            | 1            | 1            | 2                                     | 1          | 2         | 4          | 1          | 1              | n.d.       | n.d.       | 7         |            |           |            |
| Ba      | 976                                   | 1010         | 990          | 575          | 973          | 771                                   | 2394       | 589       | 528        | 1738       | 929            | 94         | 53         | 271       |            |           |            |
| La      | 26                                    | 19           | 68           | 27           | 28           | 13                                    | 13         | 40        | 48         | 98         | 76             | 17         | 6          | 11        |            |           |            |
| Ce      | 52                                    | 47           | 135          | 57           | 53           | 110                                   | 18         | 82        | 118        | 204        | 161            | 41         | 17         | 23        |            |           |            |
| Pr      | 5                                     | 6            | 13           | 7            | 6            | 4                                     | 1          | 9         | 10         | 21         | 16             | 7          | 3          | 3         |            |           |            |
| Nd      | 20                                    | 27           | 54           | 28           | 21           | 15                                    | 4          | 36        | 40         | 76         | 62             | 29         | 12         | 14        |            |           |            |
| Sm      | 3                                     | 5            | 7            | 6            | 3            | 3                                     | 1          | 6         | 7          | 13         | 10             | 8          | 4          | 3         |            |           |            |
| Eu      | 1                                     | 2            | 2            | 1            | 1            | 1                                     | 1          | 1         | 1          | 3          | 2              | 3          | 1          | 1         |            |           |            |
| Gd      | 2                                     | 4            | 5            | 4            | 2            | 2                                     | n.d.       | 6         | 6          | 9          | 9              | 9          | 5          | 4         |            |           |            |
| Tb      | n.d.                                  | 1            | 1            | 1            | n.d.         | n.d.                                  | n.d.       | 1         | 1          | 1          | 1              | 1          | 1          | 1         |            |           |            |
| Dy      | 1                                     | 3            | 3            | 3            | 1            | 2                                     | n.d.       | 6         | 6          | 6          | 8              | 9          | 5          | 4         |            |           |            |
| Ho      | n.d.                                  | 1            | n.d.         | 1            | n.d.         | n.d.                                  | n.d.       | 1         | 1          | 1          | 2              | 2          | 1          | 1         |            |           |            |
| Er      | 1                                     | 1            | 1            | 1            | n.d.         | 1                                     | n.d.       | 3         | 4          | 2          | 4              | 5          | 3          | 2         |            |           |            |
| Tm      | n.d.                                  | n.d.         | n.d.         | n.d.         | n.d.         | n.d.                                  | n.d.       | 1         | 1          | n.d.       | 1              | 1          | n.d.       | n.d.      |            |           |            |
| Yb      | n.d.                                  | 1            | 1            | 1            | n.d.         | 1                                     | n.d.       | 3         | 4          | 2          | 4              | 5          | 3          | 2         |            |           |            |
| Lu      | n.d.                                  | n.d.         | n.d.         | n.d.         | n.d.         | n.d.                                  | n.d.       | n.d.      | 1          | n.d.       | 1              | 1          | n.d.       | 0         |            |           |            |
| Hf      | 3                                     | 4            | 7            | 3            | 3            | 5                                     | 6          | 6         | 6          | 7          | 8              | 3          | 2          | 2         |            |           |            |
| Pb      | 15                                    | 7            | 12           | 13           | 10           | 22                                    | 19         | 10        | 13         | 14         | 28             | 6          | 3          | 7         |            |           |            |
| Th      | 2                                     | n.d.         | 14           | 1            | 1            | 38                                    | 1          | 11        | 18         | 11         | 34             | 1          | n.d.       | 2         |            |           |            |
| U       | n.d.                                  | n.d.         | 1            | n.d.         | n.d.         | 1                                     | 1          | 1         | 2          | 1          | 1              | 2          | n.d.       | 1         |            |           |            |

n.d. = não determinado

## **APÊNDICE F - QUÍMICA MINERAL**

### **ANÁLISES POR MICROSSONDA ELETRÔNICA (EPMA)**

A determinação das composições dos minerais e identificação de variações na concentração de elementos maiores dentro dos cristais foi feita através de análises pontuais em biotita, ortopiroxênio, granada, plagioclásio, feldspato alcalino, espinélio, magnetita e ilmenita. Os resultados foram tratados com auxílio de planilhas eletrônicas para o cálculo das fórmulas estruturais e são apresentados a seguir nas tabelas 15-31.

Tabela 15: Análises químicas de biotita da amostra CI-011-RD (biotita granulito fêlsico )

| Análise                            | 1.1     | 1.2    | 2.1    | 3.1    | 3.2    | 4.1    | 5.1    | 6.1    | 7.1    | 7.2    | 8.1    | 8.2    | 8.3    | 9.1    | 9.2    | 9.3    | 10.1   | 10.2   | 11.1   | 12.1   | 12.2   | 13.1   | 13.2   |
|------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                    | Posição | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 36.09   | 36.10  | 37.14  | 35.89  | 36.45  | 36.31  | 36.45  | 36.80  | 36.47  | 36.11  | 36.54  | 35.83  | 37.01  | 36.30  | 36.20  | 36.20  | 36.84  | 37.02  | 36.49  | 36.32  | 36.74  | 36.67  | 36.76  |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 3.02    | 3.22   | 3.38   | 3.76   | 3.91   | 3.51   | 4.15   | 3.57   | 3.65   | 3.58   | 2.80   | 2.92   | 2.85   | 4.49   | 4.34   | 4.17   | 3.00   | 2.55   | 2.91   | 3.06   | 3.02   | 4.30   | 3.62   |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 14.39   | 14.33  | 14.55  | 14.45  | 14.52  | 14.57  | 14.23  | 14.49  | 14.51  | 14.89  | 14.61  | 14.51  | 14.76  | 14.25  | 14.19  | 14.28  | 14.65  | 15.01  | 14.80  | 14.18  | 14.40  | 14.43  | 14.69  |
| <b>FeO</b>                         | 21.17   | 21.22  | 21.58  | 21.74  | 21.66  | 20.97  | 20.91  | 21.07  | 21.91  | 21.97  | 20.66  | 20.85  | 21.10  | 21.31  | 21.41  | 21.74  | 20.90  | 20.88  | 21.11  | 21.16  | 20.98  | 21.83  | 20.94  |
| <b>MnO</b>                         | 0.16    | 0.16   | 0.17   | 0.21   | 0.21   | 0.16   | 0.18   | 0.16   | 0.22   | 0.21   | 0.16   | 0.17   | 0.14   | 0.21   | 0.19   | 0.20   | 0.15   | 0.15   | 0.16   | 0.15   | 0.14   | 0.17   | 0.18   |
| <b>MgO</b>                         | 11.58   | 11.27  | 11.09  | 10.78  | 10.93  | 11.29  | 10.80  | 10.91  | 10.89  | 10.74  | 11.51  | 11.10  | 11.29  | 10.46  | 10.60  | 10.51  | 11.38  | 11.05  | 11.28  | 11.84  | 11.55  | 10.68  | 10.91  |
| <b>CaO</b>                         | 0.04    | 0.02   | 0.05   | 0.00   | 0.03   | 0.07   | 0.03   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.11   | 0.17   | 0.03   | 0.02   | 0.08   | 0.00   | 0.01   | 0.10   | 0.03   | 0.00   | 0.09   | 0.00   | 0.01   |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0.08    | 0.11   | 0.05   | 0.07   | 0.06   | 0.07   | 0.02   | 0.06   | 0.04   | 0.09   | 0.07   | 0.07   | 0.06   | 0.05   | 0.03   | 0.06   | 0.05   | 0.08   | 0.10   | 0.03   | 0.04   | 0.07   | 0.06   |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 9.62    | 9.70   | 9.70   | 9.56   | 9.63   | 9.62   | 9.88   | 9.89   | 9.79   | 9.59   | 9.55   | 9.26   | 9.54   | 9.66   | 9.76   | 9.76   | 9.49   | 9.41   | 9.47   | 9.69   | 9.72   | 9.86   | 9.60   |
| <b>BaO</b>                         | 0.11    | 0.16   | 0.18   | 0.10   | 0.08   | 0.09   | 0.11   | 0.15   | 0.08   | 0.08   | 0.15   | 0.07   | 0.12   | 0.15   | 0.20   | 0.14   | 0.14   | 0.14   | 0.10   | 0.12   | 0.13   | 0.17   | 0.08   |
| <b>ZnO</b>                         | 0.07    | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.06   | 0.04   | 0.04   | 0.03   | 0.05   | 0.06   | 0.01   | 0.01   | 0.08   | 0.03   | 0.04   | 0.07   | 0.03   | 0.06   | 0.05   | 0.07   | 0.08   | 0.09   | 0.05   |
| <b>F</b>                           | 0.12    | 0.15   | 0.11   | 0.11   | 0.12   | 0.12   | 0.11   | 0.12   | 0.08   | 0.13   | 0.14   | 0.14   | 0.12   | 0.12   | 0.10   | 0.09   | 0.14   | 0.16   | 0.14   | 0.14   | 0.11   | 0.10   | 0.13   |
| <b>Cl</b>                          | 0.16    | 0.16   | 0.20   | 0.23   | 0.24   | 0.16   | 0.12   | 0.13   | 0.20   | 0.20   | 0.17   | 0.09   | 0.15   | 0.17   | 0.17   | 0.21   | 0.19   | 0.19   | 0.14   | 0.10   | 0.12   | 0.18   | 0.17   |
| <b>Total</b>                       | 96.61   | 96.61  | 98.21  | 96.92  | 97.89  | 96.97  | 97.03  | 97.39  | 97.88  | 97.65  | 96.50  | 95.18  | 97.25  | 97.21  | 97.30  | 97.43  | 96.97  | 96.80  | 96.78  | 96.87  | 97.12  | 98.54  | 97.19  |
| <b>Si</b>                          | 5.53    | 5.54   | 5.59   | 5.50   | 5.52   | 5.53   | 5.58   | 5.53   | 5.49   | 5.58   | 5.58   | 5.55   | 5.60   | 5.53   | 5.52   | 5.52   | 5.60   | 5.63   | 5.56   | 5.54   | 5.58   | 5.52   | 5.57   |
| <b>Al<sup>iv</sup></b>             | 2.47    | 2.46   | 2.41   | 2.50   | 2.48   | 2.47   | 2.45   | 2.42   | 2.47   | 2.51   | 2.47   | 2.45   | 2.40   | 2.47   | 2.48   | 2.48   | 2.40   | 2.37   | 2.44   | 2.46   | 2.47   | 2.48   | 2.43   |
| <b>Σ</b>                           | 8.00    | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   | 8.00   |
| <b>Al<sup>vi</sup></b>             | 0.13    | 0.13   | 0.17   | 0.11   | 0.11   | 0.14   | 0.11   | 0.17   | 0.12   | 0.15   | 0.21   | 0.20   | 0.24   | 0.09   | 0.07   | 0.08   | 0.22   | 0.31   | 0.22   | 0.10   | 0.16   | 0.08   | 0.20   |
| <b>Ti</b>                          | 0.35    | 0.37   | 0.38   | 0.43   | 0.45   | 0.40   | 0.48   | 0.41   | 0.42   | 0.41   | 0.32   | 0.34   | 0.32   | 0.51   | 0.50   | 0.48   | 0.34   | 0.29   | 0.33   | 0.35   | 0.35   | 0.49   | 0.41   |
| <b>Fe<sup>2+</sup></b>             | 2.71    | 2.72   | 2.72   | 2.79   | 2.74   | 2.67   | 2.66   | 2.67   | 2.78   | 2.79   | 2.64   | 2.70   | 2.67   | 2.71   | 2.73   | 2.77   | 2.65   | 2.65   | 2.69   | 2.70   | 2.67   | 2.75   | 2.65   |
| <b>Mn</b>                          | 0.02    | 0.02   | 0.02   | 0.03   | 0.03   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.03   | 0.03   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.03   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   |
| <b>Mg</b>                          | 2.64    | 2.58   | 2.49   | 2.46   | 2.47   | 2.56   | 2.45   | 2.47   | 2.46   | 2.43   | 2.62   | 2.56   | 2.55   | 2.37   | 2.41   | 2.39   | 2.58   | 2.50   | 2.56   | 2.69   | 2.62   | 2.40   | 2.47   |
| <b>Zn</b>                          | 0.01    | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |
| <b>Σ</b>                           | 5.86    | 5.82   | 5.78   | 5.81   | 5.80   | 5.80   | 5.72   | 5.74   | 5.80   | 5.82   | 5.81   | 5.83   | 5.81   | 5.72   | 5.73   | 5.75   | 5.82   | 5.79   | 5.83   | 5.87   | 5.81   | 5.75   | 5.76   |
| <b>Ca</b>                          | 0.01    | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.02   | 0.03   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.02   | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   |
| <b>Na</b>                          | 0.02    | 0.03   | 0.01   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.03   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.03   | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.02   |
| <b>K</b>                           | 1.88    | 1.90   | 1.86   | 1.87   | 1.86   | 1.87   | 1.92   | 1.91   | 1.89   | 1.86   | 1.86   | 1.83   | 1.84   | 1.88   | 1.90   | 1.90   | 1.84   | 1.82   | 1.84   | 1.89   | 1.88   | 1.89   | 1.86   |
| <b>Ba</b>                          | 0.01    | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.00   |
| <b>Σ</b>                           | 1.92    | 1.94   | 1.90   | 1.89   | 1.88   | 1.91   | 1.94   | 1.94   | 1.91   | 1.89   | 1.91   | 1.88   | 1.87   | 1.90   | 1.93   | 1.92   | 1.86   | 1.87   | 1.88   | 1.90   | 1.92   | 1.92   | 1.88   |
| <b>OH*</b>                         | 3.90    | 3.89   | 3.90   | 3.89   | 3.88   | 3.90   | 3.92   | 3.91   | 3.91   | 3.89   | 3.89   | 3.91   | 3.90   | 3.90   | 3.91   | 3.90   | 3.88   | 3.87   | 3.90   | 3.91   | 3.91   | 3.90   | 3.90   |
| <b>F</b>                           | 0.06    | 0.07   | 0.05   | 0.05   | 0.06   | 0.06   | 0.05   | 0.06   | 0.04   | 0.06   | 0.07   | 0.07   | 0.06   | 0.06   | 0.05   | 0.04   | 0.07   | 0.08   | 0.07   | 0.07   | 0.05   | 0.05   | 0.06   |
| <b>Cl</b>                          | 0.04    | 0.04   | 0.05   | 0.06   | 0.06   | 0.04   | 0.03   | 0.03   | 0.05   | 0.05   | 0.04   | 0.02   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.05   | 0.05   | 0.05   | 0.04   | 0.03   | 0.03   | 0.05   | 0.04   |
| <b>TOTAL</b>                       | 19.78   | 19.76  | 19.68  | 19.71  | 19.68  | 19.71  | 19.66  | 19.68  | 19.71  | 19.71  | 19.72  | 19.71  | 19.68  | 19.62  | 19.66  | 19.68  | 19.68  | 19.66  | 19.71  | 19.78  | 19.73  | 19.67  | 19.64  |

Tabela 16: Análises químicas de biotita na amostra CI-013-RA (biotita granulito félsico)

| Análise          | 1.1   |        | 1.2   |        | 2.1   |        | 2.2   |        | 3.1   |        | 4.1   |        | 4.2   |        | 5.1   |        | 6.1   |        | 7.1   |        | 7.2   |        | 8.1   |        | 8.2   |        | 9.1   |        | 9.2   |        | 9.3   |        | 10.1  |        | 10.2  |        | 10.3  |        | 11.1  |        | 11.2  |        | 12.1  |        |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub> | 36.33 | 36.11  | 36.30 | 36.33  | 36.33 | 36.33  | 36.32 | 36.32  | 36.05 | 36.44  | 36.00 | 36.16  | 36.02 | 36.28  | 36.07 | 36.34  | 35.74 | 36.06  | 35.71 | 36.05  | 36.00 | 36.32  | 36.24 | 35.82  | 35.91 | 5.10   | 4.66  | 4.56   | 4.47  | 5.03   | 4.84  | 4.93   | 4.84  | 5.05   | 4.85  | 5.22   | 4.60  | 4.92   | 4.88  | 4.93   | 4.93  | 4.94   | 5.11  | 4.81   | 5.01 | 14.40 | 14.25 | 14.41 | 14.27 | 14.46 | 14.29 | 14.35 | 14.32 | 14.26 | 14.29 | 14.44 | 14.16 | 14.20 | 14.12 | 14.21 | 14.15 | 14.15 | 14.19 | 14.33 | 14.26 | 14.26 | 20.59 | 20.85 | 20.59 | 20.61 | 20.81 | 20.95 | 20.93 | 21.17 | 20.86 | 20.54 | 20.83 | 20.50 | 20.79 | 20.98 | 20.81 | 20.90 | 21.24 | 20.41 | 20.98 | 20.98 | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.09 | 0.07 | 0.05 | 0.11 | 0.12 | 0.10 | 0.09 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.06 | 0.08 | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.09 | 0.14 | 0.14 | 11.13 | 10.95 | 11.05 | 11.19 | 10.80 | 10.90 | 10.87 | 10.51 | 10.95 | 11.19 | 10.83 | 10.64 | 11.30 | 10.70 | 10.92 | 10.88 | 10.95 | 10.70 | 10.87 | 10.90 | 0.00 | 0.00 | 0.09 | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.06 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.10 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.04 | 0.06 | 0.01 | 0.08 | 0.02 | 0.04 | 0.04 | 0.07 | 0.04 | 0.07 | 0.01 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.01 | 0.08 | 0.02 | 0.02 | 0.09 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.05 | 0.07 | 0.03 | 0.12 | 0.06 | 0.02 | 10.02 | 9.72 | 9.72 | 9.90 | 9.79 | 9.71 | 9.76 | 9.74 | 9.75 | 9.79 | 9.80 | 9.65 | 9.69 | 9.79 | 9.70 | 9.74 | 9.74 | 9.74 | 9.73 | 9.71 | 9.69 | 10.06 | 0.34 | 0.29 | 0.40 | 0.26 | 0.31 | 0.39 | 0.38 | 0.33 | 0.41 | 0.42 | 0.42 | 0.36 | 0.29 | 0.31 | 0.41 | 0.33 | 0.36 | 0.25 | 0.34 | 0.47 | 0.32 | 0.44 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.03 | 0.07 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.06 | 0.05 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.00 | 0.07 | 0.06 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.10 | 0.14 | 0.10 | 0.13 | 0.13 | 0.18 | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.20 | 0.22 | 0.16 | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.19 | 0.22 | 0.19 | 0.20 | 0.18 | 0.22 | 0.19 | 0.14 | 0.17 | 0.20 | 0.19 | 0.15 | 0.21 | 0.17 | 0.17 | 0.23 | 98.41 | 97.30 | 97.59 | 97.46 | 97.98 | 97.53 | 97.97 | 97.85 | 97.99 | 97.71 | 98.18 | 97.19 | 97.92 | 96.80 | 97.34 | 97.17 | 97.47 | 97.45 | 98.01 | 97.56 | 97.30 | 98.21 |
| Si               | 5.46  | 5.49   | 5.50  | 5.51   | 5.48  | 5.47   | 5.50  | 5.45   | 5.47  | 5.47   | 5.47  | 5.47   | 5.47  | 5.47   | 5.49  | 5.48   | 5.46  | 5.49   | 5.45  | 5.48   | 5.47  | 5.49   | 5.49  | 5.46   | 5.44  | 2.54   | 2.51  | 2.50   | 2.49  | 2.52   | 2.53  | 2.50   | 2.55  | 2.53   | 2.53  | 2.53   | 2.51  | 2.52   | 2.54  | 2.51   | 2.52  | 2.53   | 2.51  | 2.51   | 2.54 | 2.55  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  | 8.00  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Al <sup>IV</sup> | 0.02  | 0.05   | 0.07  | 0.06   | 0.05  | 0.03   | 0.06  | 0.01   | 0.07  | 0.03   | 0.01  | 0.07   | 0.03  | 0.01   | 0.06  | 0.05   | 0.01  | 0.04   | 0.00  | 0.02   | 0.00  | 0.02   | 0.05  | 0.02   | 0.00  | 0.58   | 0.53  | 0.52   | 0.51  | 0.57   | 0.55  | 0.56   | 0.60  | 0.56   | 0.55  | 0.57   | 0.56  | 0.59   | 0.53  | 0.56   | 0.56  | 0.56   | 0.56  | 0.58   | 0.55 | 0.57  | 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  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 2.59  | 2.65  | 2.61  | 2.61  | 2.63  | 2.66  | 2.62  | 2.65  | 2.68  | 2.65  | 2.59  | 2.62  | 2.63  | 2.62  | 2.65  | 2.68  | 2.66  | 2.69 | 2.59 | 2.67 | 2.66 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01  | 0.01  | 0.02  | 0.01  | 0.02  | 2.50  | 2.48  | 2.50  | 2.53  | 2.43  | 2.47  | 2.45  | 2.43  | 2.37  | 2.48  | 2.52  | 2.46  | 2.39  | 2.57  | 2.43  | 2.49 | 2.46 | 2.48 | 2.42 | 2.42 | 2.47 | 2.46 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 5.69 | 5.73 | 5.71 | 5.73 | 5.70 | 5.72 | 5.69 | 5.71 | 5.69 | 5.72 | 5.70 | 5.70 | 5.68 | 5.75  | 5.69 | 5.74 | 5.71 | 5.72 | 5.71 | 5.66 | 5.74 | 5.72 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Ca               | 0.00  | 0.00   | 0.01  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.01  | 0.00   | 0.00  | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 0.01  | 0.02   | 0.00  | 0.00   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.00   | 0.01  | 0.00   | 0.01  | 0.00   | 0.01  | 0.02   | 0.01  | 0.02   | 0.00  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.00  | 0.02   | 0.01  | 0.01   | 0.03  | 0.01   | 0.03  | 0.01   | 0.01  | 0.02   | 0.01  | 0.03   | 0.02 | 0.01  | 0.01  | 1.92  | 1.89  | 1.88  | 1.91  | 1.88  | 1.88  | 1.88  | 1.88  | 1.88  | 1.89  | 1.88  | 1.87  | 1.87  | 1.89  | 1.90  | 1.89  | 1.89  | 1.89  | 1.88  | 1.88  | 1.88  | 1.94  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.02  | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 1.96 | 1.92 | 1.94 | 1.94 | 1.91 | 1.92 | 1.92 | 1.90 | 1.93 | 1.93 | 1.93 | 1.92 | 1.90 | 1.94 | 1.94 | 1.93 | 1.94  | 1.94  | 1.91  | 1.95  | 1.92  | 1.98  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| OH*              | 3.89  | 3.88   | 3.89  | 3.90   | 3.90  | 3.91   | 3.89  | 3.90   | 3.89  | 3.89   | 3.87  | 3.87   | 3.87  | 3.89   | 3.89  | 3.89   | 3.89  | 3.89   | 3.88  | 3.89   | 3.91  | 3.89   | 3.89  | 3.89   | 3.86  | 0.06   | 0.06  | 0.06   | 0.06  | 0.06   | 0.05  | 0.07   | 0.05  | 0.06   | 0.06  | 0.06   | 0.09  | 0.07   | 0.07  | 0.07   | 0.07  | 0.06   | 0.05  | 0.06   | 0.06 | 0.07  | 0.08  | 0.05  | 0.06  | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.05  | 0.06  | 0.05  | 0.05  | 0.05  | 0.06  | 0.06  | 0.04  | 0.04  | 0.05  | 0.04  | 0.05  | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.04  | 0.06  |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| TOTAL            | 19.65 | 19.64  | 19.64 | 19.66  | 19.61 | 19.64  | 19.61 | 19.62  | 19.62 | 19.65  | 19.63 | 19.66  | 19.62 | 19.58  | 19.69 | 19.63  | 19.66 | 19.64  | 19.65 | 19.62  | 19.60 | 19.62  | 19.60 | 19.66  | 19.69 |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

Tabela 17: Análises químicas de biotita na amostra CI-019-RA (biotita granulito fêlsico)

| Análise                            | 1.1     | 2.1      | 3.1      | 4.1     | 4.2      | 5.1     | 5.2      | 6.1     | 6.2      | 7.1     | 7.2      | 7.3     | 8.1      | 8.2     | 9.1      | 9.2     | 10.1     | 10.2    | 10.3     | 11.1    | 11.2     |
|------------------------------------|---------|----------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
|                                    | Passivo | contorno | contorno | hoiardo | contorno | hoiardo | contorno | hoiardo | contorno | hoiardo | contorno | hoiardo | contorno | hoiardo | contorno | hoiardo | contorno | hoiardo | contorno | hoiardo | contorno |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 36.10   | 35.33    | 36.81    | 36.17   | 35.83    | 35.91   | 35.50    | 36.04   | 36.25    | 34.67   | 35.65    | 35.85   | 36.52    | 36.07   | 34.80    | 36.19   | 36.07    | 36.30   | 36.14    | 35.68   | 35.74    |
| <b>ThO<sub>2</sub></b>             | 4.96    | 5.11     | 4.69     | 4.65    | 4.99     | 4.87    | 5.18     | 4.38    | 4.86     | 4.57    | 4.94     | 5.00    | 4.55     | 4.35    | 4.24     | 4.69    | 4.05     | 4.66    | 4.21     | 4.83    | 4.78     |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 14.62   | 14.32    | 14.63    | 14.53   | 14.48    | 14.46   | 14.49    | 14.37   | 14.46    | 14.55   | 14.40    | 14.65   | 14.95    | 14.57   | 13.96    | 14.58   | 14.55    | 14.45   | 14.44    | 14.25   | 14.59    |
| <b>FeO</b>                         | 21.37   | 21.31    | 21.43    | 21.15   | 21.24    | 21.58   | 21.67    | 21.65   | 21.38    | 20.02   | 20.84    | 21.07   | 21.11    | 21.16   | 20.53    | 20.85   | 20.92    | 21.50   | 21.69    | 21.24   | 21.01    |
| <b>MnO</b>                         | 0.09    | 0.09     | 0.05     | 0.09    | 0.12     | 0.11    | 0.11     | 0.12    | 0.12     | 0.08    | 0.06     | 0.12    | 0.12     | 0.13    | 0.06     | 0.09    | 0.09     | 0.08    | 0.09     | 0.07    | 0.11     |
| <b>MgO</b>                         | 10.47   | 10.61    | 10.74    | 10.71   | 10.55    | 10.48   | 10.02    | 9.81    | 10.73    | 10.36   | 10.77    | 10.53   | 10.78    | 10.54   | 11.02    | 10.67   | 11.00    | 10.48   | 10.52    | 10.56   | 10.65    |
| <b>CaO</b>                         | 0.00    | 0.00     | 0.04     | 0.02    | 0.01     | 0.00    | 0.02     | 0.00    | 0.05     | 0.11    | 0.02     | 0.00    | 0.08     | 0.07    | 0.07     | 0.00    | 0.02     | 0.02    | 0.00     | 0.03    | 0.02     |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 0.07    | 0.12     | 0.08     | 0.03    | 0.08     | 0.04    | 0.03     | 0.07    | 0.05     | 0.06    | 0.09     | 0.05    | 0.04     | 0.09    | 0.08     | 0.09    | 0.03     | 0.06    | 0.02     | 0.06    | 0.03     |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 9.72    | 9.80     | 9.75     | 9.65    | 9.68     | 9.67    | 9.40     | 9.79    | 9.60     | 9.66    | 9.15     | 9.62    | 9.68     | 9.05    | 9.34     | 9.58    | 9.82     | 9.51    | 9.68     | 9.56    | 9.79     |
| <b>BaO</b>                         | 0.56    | 0.51     | 0.50     | 0.62    | 0.61     | 0.71    | 0.88     | 0.84    | 0.56     | 0.54    | 0.50     | 0.60    | 0.51     | 0.56    | 0.69     | 0.63    | 0.59     | 0.63    | 0.59     | 0.71    | 0.77     |
| <b>ZnO</b>                         | 0.06    | 0.07     | 0.02     | 0.02    | 0.02     | 0.03    | 0.07     | 0.02    | 0.09     | 0.06    | 0.02     | 0.03    | 0.09     | 0.05    | 0.10     | 0.03    | 0.05     | 0.00    | 0.06     | 0.04    | 0.02     |
| <b>F</b>                           | 0.07    | 0.10     | 0.09     | 0.10    | 0.09     | 0.08    | 0.12     | 0.06    | 0.12     | 0.10    | 0.10     | 0.10    | 0.09     | 0.11    | 0.14     | 0.11    | 0.11     | 0.10    | 0.10     | 0.09    | 0.07     |
| <b>Cl</b>                          | 0.14    | 0.14     | 0.18     | 0.16    | 0.17     | 0.13    | 0.17     | 0.14    | 0.14     | 0.20    | 0.16     | 0.18    | 0.19     | 0.09    | 0.17     | 0.17    | 0.14     | 0.13    | 0.12     | 0.14    | 0.18     |
| <b>Total</b>                       | 08.24   | 07.51    | 08.51    | 07.80   | 07.95    | 08.08   | 07.65    | 07.45   | 07.61    | 04.30   | 07.23    | 07.77   | 08.14    | 07.13   | 05.46    | 07.85   | 07.15    | 08.07   | 07.58    | 07.45   | 07.62    |
| <b>Si</b>                          | 5.45    | 5.40     | 5.53     | 5.48    | 5.44     | 5.45    | 5.42     | 5.48    | 5.49     | 5.43    | 5.44     | 5.44    | 5.49     | 5.50    | 5.43     | 5.48    | 5.50     | 5.50    | 5.50     | 5.45    | 5.44     |
| <b>Al<sup>iv</sup></b>             | 2.55    | 2.58     | 2.47     | 2.52    | 2.56     | 2.55    | 2.58     | 2.52    | 2.51     | 2.57    | 2.56     | 2.56    | 2.51     | 2.50    | 2.57     | 2.52    | 2.50     | 2.50    | 2.50     | 2.55    | 2.56     |
| <b>Σ</b>                           | 8.00    | 7.98     | 8.00     | 8.00    | 8.00     | 8.00    | 8.00     | 8.00    | 8.00     | 8.00    | 8.00     | 8.00    | 8.00     | 8.00    | 8.00     | 8.00    | 8.00     | 8.00    | 8.00     | 8.00    | 8.00     |
| <b>Al<sup>vi</sup></b>             | 0.06    | 0.00     | 0.13     | 0.07    | 0.03     | 0.04    | 0.03     | 0.04    | 0.08     | 0.07    | 0.11     | 0.03    | 0.06     | 0.14    | 0.12     | 0.00    | 0.09     | 0.11    | 0.08     | 0.10    | 0.06     |
| <b>Ti</b>                          | 0.56    | 0.59     | 0.53     | 0.53    | 0.57     | 0.56    | 0.60     | 0.58    | 0.50     | 0.55    | 0.54     | 0.57    | 0.51     | 0.50    | 0.50     | 0.53    | 0.46     | 0.53    | 0.48     | 0.55    | 0.55     |
| <b>Cr</b>                          | 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    | 0.00     | 0.00    | 0.00     |
| <b>Fe<sup>2+</sup></b>             | 2.70    | 2.72     | 2.69     | 2.68    | 2.70     | 2.74    | 2.77     | 2.78    | 2.71     | 2.62    | 2.66     | 2.67    | 2.65     | 2.70    | 2.68     | 2.64    | 2.67     | 2.72    | 2.76     | 2.71    | 2.67     |
| <b>Mn</b>                          | 0.01    | 0.01     | 0.01     | 0.01    | 0.02     | 0.01    | 0.01     | 0.02    | 0.01     | 0.02    | 0.01     | 0.02    | 0.02     | 0.02    | 0.01     | 0.01    | 0.01     | 0.01    | 0.01     | 0.01    | 0.01     |
| <b>Mg</b>                          | 2.36    | 2.42     | 2.30     | 2.42    | 2.39     | 2.37    | 2.28     | 2.24    | 2.43     | 2.42    | 2.45     | 2.38    | 2.42     | 2.39    | 2.56     | 2.41    | 2.50     | 2.37    | 2.39     | 2.41    | 2.42     |
| <b>Zn</b>                          | 0.01    | 0.01     | 0.00     | 0.00    | 0.00     | 0.00    | 0.01     | 0.00    | 0.01     | 0.01    | 0.00     | 0.00    | 0.01     | 0.01    | 0.01     | 0.00    | 0.01     | 0.00    | 0.01     | 0.00    | 0.00     |
| <b>Σ</b>                           | 5.70    | 5.75     | 5.66     | 5.72    | 5.71     | 5.72    | 5.70     | 5.66    | 5.75     | 5.69    | 5.71     | 5.71    | 5.75     | 5.73    | 5.76     | 5.69    | 5.76     | 5.71    | 5.75     | 5.71    | 5.71     |
| <b>Ca</b>                          | 0.00    | 0.00     | 0.01     | 0.00    | 0.00     | 0.00    | 0.00     | 0.00    | 0.01     | 0.02    | 0.00     | 0.00    | 0.01     | 0.01    | 0.01     | 0.00    | 0.00     | 0.00    | 0.00     | 0.00    | 0.00     |
| <b>Na</b>                          | 0.02    | 0.03     | 0.02     | 0.01    | 0.02     | 0.01    | 0.01     | 0.02    | 0.01     | 0.02    | 0.03     | 0.02    | 0.01     | 0.03    | 0.02     | 0.03    | 0.01     | 0.02    | 0.01     | 0.02    | 0.01     |
| <b>K</b>                           | 1.87    | 1.91     | 1.87     | 1.86    | 1.88     | 1.87    | 1.83     | 1.91    | 1.86     | 1.87    | 1.83     | 1.87    | 1.87     | 1.74    | 1.82     | 1.91    | 1.90     | 1.85    | 1.86     | 1.91    | 1.87     |
| <b>Ba</b>                          | 0.03    | 0.03     | 0.03     | 0.04    | 0.04     | 0.04    | 0.05     | 0.05    | 0.03     | 0.03    | 0.04     | 0.03    | 0.03     | 0.03    | 0.03     | 0.04    | 0.04     | 0.04    | 0.04     | 0.04    | 0.05     |
| <b>Σ</b>                           | 1.93    | 1.97     | 1.93     | 1.94    | 1.94     | 1.93    | 1.90     | 1.90    | 1.91     | 1.92    | 1.91     | 1.93    | 1.92     | 1.81    | 1.89     | 1.90    | 1.94     | 1.90    | 1.92     | 1.91    | 1.96     |
| <b>OH*</b>                         | 3.93    | 3.91     | 3.91     | 3.92    | 3.93     | 3.90    | 3.93     | 3.91    | 3.92     | 3.91    | 3.91     | 3.91    | 3.91     | 3.91    | 3.92     | 3.89    | 3.90     | 3.91    | 3.92     | 3.92    | 3.92     |
| <b>F</b>                           | 0.03    | 0.05     | 0.04     | 0.05    | 0.04     | 0.04    | 0.06     | 0.03    | 0.06     | 0.05    | 0.04     | 0.05    | 0.04     | 0.05    | 0.07     | 0.05    | 0.05     | 0.05    | 0.05     | 0.04    | 0.04     |
| <b>Cl</b>                          | 0.04    | 0.04     | 0.05     | 0.04    | 0.04     | 0.03    | 0.04     | 0.04    | 0.04     | 0.05    | 0.04     | 0.05    | 0.05     | 0.04    | 0.02     | 0.05    | 0.04     | 0.03    | 0.03     | 0.04    | 0.05     |
| <b>TOTAL</b>                       | 19.63   | 19.70    | 19.59    | 19.63   | 19.64    | 19.60   | 19.64    | 19.66   | 19.61    | 19.62   | 19.64    | 19.62   | 19.55    | 19.61   | 19.75    | 19.63   | 19.66    | 19.62   | 19.66    | 19.67   | 19.65    |



Tabela 18: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-011-RD (biotita granulito fêlsico)

| Análise                            | 1.1    | 1.2    | 1.3   | 2.1   | 2.2    | 2.3   | 2a.1   | 2a.2   | 3.1   | 3.2    | 3.3   | 6.1    | 6.2    | 6.3   | 7.1    | 8.1    | 8.2    |
|------------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
|                                    | borda  | centro | borda | borda | centro | borda | centro | centro | borda | centro | borda | borda  | centro | borda | centro | centro | centro |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 50.91  | 50.42  | 50.18 | 50.69 | 50.81  | 50.81 | 50.75  | 50.23  | 50.21 | 50.40  | 50.37 | 51.22  | 50.65  | 50.72 | 51.12  | 50.85  | 50.59  |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0.13   | 0.11   | 0.10  | 0.09  | 0.10   | 0.10  | 0.09   | 0.09   | 0.14  | 0.14   | 0.10  | 0.14   | 0.13   | 0.12  | 0.08   | 0.13   | 0.10   |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.51   | 0.55   | 0.49  | 0.48  | 0.49   | 0.42  | 0.35   | 0.38   | 0.53  | 0.63   | 0.60  | 0.47   | 0.61   | 0.53  | 0.36   | 0.52   | 0.46   |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.04   | 0.00   | 0.03  | 0.03  | 0.01   | 0.01  | 0.02   | 0.02   | 0.02  | 0.02   | 0.02  | 0.04   | 0.01   | 0.01  | 0.03   | 0.00   | 0.04   |
| <b>FeO</b>                         | 31.75  | 30.70  | 31.54 | 31.41 | 31.32  | 31.39 | 30.95  | 31.33  | 31.11 | 31.17  | 31.38 | 31.65  | 31.06  | 30.70 | 31.07  | 31.05  | 31.39  |
| <b>MnO</b>                         | 14.64  | 14.68  | 14.66 | 14.70 | 14.73  | 14.80 | 14.50  | 14.80  | 14.48 | 14.36  | 14.07 | 14.92  | 14.93  | 15.12 | 14.57  | 14.74  | 14.52  |
| <b>MgO</b>                         | 1.41   | 1.41   | 1.34  | 1.35  | 1.38   | 1.41  | 1.52   | 1.41   | 1.56  | 1.50   | 1.69  | 1.46   | 1.36   | 1.46  | 1.59   | 1.35   | 1.39   |
| <b>CaO</b>                         | 0.04   | 0.04   | 0.03  | 0.02  | 0.01   | 0.03  | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.00   | 0.01  | 0.03   | 0.01   | 0.03  | 0.03   | 0.02   | 0.03   |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 1.09   | 1.79   | 1.06  | 0.95  | 1.06   | 0.93  | 1.11   | 0.91   | 1.07  | 1.12   | 1.06  | 1.10   | 1.02   | 1.14  | 1.27   | 0.98   | 1.08   |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              |        |        |       |       |        |       | 0.00   | 0.00   |       | 0.00   |       |        | 0.01   | 0.01  |        |        |        |
| <b>Total</b>                       | 100.47 | 99.69  | 99.42 | 99.70 | 99.92  | 99.89 | 99.31  | 99.16  | 99.13 | 99.35  | 99.30 | 101.03 | 99.79  | 99.83 | 100.12 | 99.62  | 99.61  |
| <b>Si</b>                          | 2.11   | 2.10   | 2.10  | 2.11  | 2.11   | 2.11  | 2.12   | 2.11   | 2.10  | 2.10   | 2.10  | 2.11   | 2.11   | 2.11  | 2.12   | 2.12   | 2.11   |
| <b>Ti</b>                          | 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   |
| <b>Al</b>                          | 0.02   | 0.03   | 0.02  | 0.02  | 0.02   | 0.02  | 0.02   | 0.02   | 0.03  | 0.03   | 0.03  | 0.02   | 0.03   | 0.03  | 0.02   | 0.03   | 0.02   |
| <b>Cr</b>                          | 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   |
| <b>Fe<sup>2+</sup></b>             | 1.10   | 1.07   | 1.10  | 1.09  | 1.09   | 1.09  | 1.08   | 1.10   | 1.09  | 1.09   | 1.10  | 1.09   | 1.08   | 1.07  | 1.08   | 1.08   | 1.09   |
| <b>Mn</b>                          | 0.51   | 0.52   | 0.52  | 0.52  | 0.52   | 0.52  | 0.51   | 0.53   | 0.51  | 0.51   | 0.50  | 0.52   | 0.53   | 0.53  | 0.51   | 0.52   | 0.51   |
| <b>Mg</b>                          | 0.09   | 0.09   | 0.08  | 0.08  | 0.09   | 0.09  | 0.09   | 0.09   | 0.10  | 0.09   | 0.10  | 0.09   | 0.08   | 0.09  | 0.10   | 0.08   | 0.09   |
| <b>Ca</b>                          | 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   |
| <b>Na</b>                          | 0.09   | 0.14   | 0.09  | 0.08  | 0.08   | 0.08  | 0.09   | 0.07   | 0.09  | 0.09   | 0.09  | 0.09   | 0.08   | 0.09  | 0.10   | 0.08   | 0.09   |
| <b>K</b>                           | 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   |
| <b>Total</b>                       | 3.92   | 3.95   | 3.93  | 3.91  | 3.92   | 3.91  | 3.92   | 3.92   | 3.92  | 3.92   | 3.92  | 3.92   | 3.92   | 3.92  | 3.92   | 3.91   | 3.92   |
| <b>En</b>                          | 0.06   | 0.07   | 0.06  | 0.06  | 0.06   | 0.06  | 0.07   | 0.06   | 0.07  | 0.07   | 0.07  | 0.06   | 0.06   | 0.06  | 0.07   | 0.06   | 0.06   |
| <b>Fs</b>                          | 0.94   | 0.93   | 0.94  | 0.94  | 0.94   | 0.94  | 0.93   | 0.94   | 0.93  | 0.93   | 0.93  | 0.94   | 0.94   | 0.93  | 0.93   | 0.94   | 0.94   |
| <b>Wo</b>                          | 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   |

Tabela 19: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-012-RB (leucossoma)

| Análise                            | 1.1    | 1.2    | 1.3   | 2.1   | 2.2    | 2.3    | 2.4    | 3.1   | 3.2    | 3.3    | 3.4    | 3.5    | 3.6    | 3.7    | 3.8    | 3.9    | 3.10   | 3.11   | 3.12   | 3.13   |
|------------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                    | centro | centro | borda | borda | centro | centro | centro | borda | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | borda  | borda  | borda  |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 50.35  | 50.20  | 49.94 | 49.58 | 49.88  | 49.83  | 50.24  | 49.62 | 49.54  | 49.88  | 49.98  | 49.94  | 49.79  | 49.93  | 49.94  | 50.01  | 50.35  | 50.23  | 50.17  | 50.16  |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0.12   | 0.11   | 0.12  | 0.10  | 0.14   | 0.11   | 0.12   | 0.12  | 0.13   | 0.14   | 0.12   | 0.17   | 0.14   | 0.13   | 0.12   | 0.10   | 0.11   | 0.13   | 0.11   | 0.13   |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.69   | 0.71   | 0.70  | 0.58  | 0.71   | 0.68   | 0.77   | 0.63  | 0.69   | 0.78   | 0.79   | 0.78   | 0.76   | 0.69   | 0.76   | 0.70   | 0.62   | 0.67   | 0.70   | 0.67   |
| <b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.02   | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.02  | 0.02   | 0.02   | 0.00   | 0.02   | 0.02   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.02   | -0.01  | 0.01   |
| <b>FeO</b>                         | 32.84  | 32.58  | 32.87 | 33.47 | 32.56  | 32.78  | 31.58  | 33.44 | 32.84  | 33.28  | 33.06  | 32.95  | 33.42  | 33.13  | 33.12  | 32.97  | 33.48  | 33.42  | 33.14  | 32.77  |
| <b>MnO</b>                         | 1.12   | 1.16   | 1.19  | 1.33  | 1.06   | 1.06   | 1.06   | 1.16  | 1.12   | 1.10   | 1.02   | 1.12   | 1.07   | 1.06   | 1.04   | 1.08   | 1.15   | 1.11   | 1.17   | 1.00   |
| <b>MgO</b>                         | 13.99  | 14.38  | 13.75 | 13.38 | 14.34  | 14.27  | 14.23  | 13.96 | 14.06  | 14.27  | 14.13  | 14.32  | 14.18  | 14.24  | 14.06  | 14.18  | 14.28  | 14.07  | 14.01  | 14.24  |
| <b>CaO</b>                         | 0.95   | 1.00   | 1.05  | 0.95  | 0.94   | 1.02   | 1.01   | 0.86  | 1.22   | 0.81   | 1.05   | 1.02   | 1.00   | 0.83   | 0.84   | 1.29   | 0.94   | 0.96   | 1.12   | 1.07   |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             |        | 0.03   | 0.04  | 0.02  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.02  | 0.01   | 0.01   |        | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.03   | 0.02   | 0.00   |        | 0.03   |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              |        |        |       |       |        | 0.00   | 0.00   |       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | 0.01   |
| <b>Total</b>                       | 100.06 | 100.16 | 99.67 | 99.41 | 99.63  | 99.76  | 99.05  | 99.81 | 99.60  | 100.29 | 100.14 | 100.32 | 100.37 | 100.02 | 99.88  | 100.37 | 100.95 | 100.62 | 100.39 | 100.09 |
| <b>Si</b>                          | 1.98   | 1.97   | 1.98  | 1.98  | 1.97   | 1.97   | 1.99   | 1.97  | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.96   | 1.96   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.98   |
| <b>Ti</b>                          | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| <b>Al</b>                          | 0.03   | 0.03   | 0.03  | 0.03  | 0.03   | 0.03   | 0.04   | 0.03  | 0.03   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.03   | 0.04   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03   |
| <b>Cr</b>                          | 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   | 0.00   | 0.00   |
| <b>Fe<sup>2+</sup></b>             | 1.08   | 1.07   | 1.09  | 1.12  | 1.08   | 1.08   | 1.04   | 1.11  | 1.09   | 1.10   | 1.09   | 1.08   | 1.10   | 1.09   | 1.09   | 1.09   | 1.10   | 1.10   | 1.09   | 1.08   |
| <b>Mn</b>                          | 0.04   | 0.04   | 0.04  | 0.05  | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04  | 0.04   | 0.04   | 0.03   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.03   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.03   |
| <b>Mg</b>                          | 0.82   | 0.84   | 0.81  | 0.80  | 0.85   | 0.84   | 0.84   | 0.83  | 0.83   | 0.84   | 0.83   | 0.84   | 0.83   | 0.84   | 0.83   | 0.83   | 0.83   | 0.82   | 0.82   | 0.84   |
| <b>Ca</b>                          | 0.04   | 0.04   | 0.04  | 0.04  | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04  | 0.05   | 0.03   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.05   | 0.04   | 0.04   | 0.05   | 0.05   |
| <b>Na</b>                          | 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   | 0.00   | 0.00   |
| <b>K</b>                           | 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   | 0.00   | 0.00   |
| <b>Total</b>                       | 4.00   | 4.01   | 4.00  | 4.01  | 4.01   | 4.01   | 3.99   | 4.01  | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.02   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   |
| <b>En</b>                          | 0.42   | 0.44   | 0.42  | 0.41  | 0.44   | 0.43   | 0.43   | 0.43  | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.42   | 0.42   | 0.43   |
| <b>Fs</b>                          | 0.56   | 0.54   | 0.56  | 0.57  | 0.54   | 0.54   | 0.55   | 0.55  | 0.54   | 0.55   | 0.55   | 0.54   | 0.55   | 0.55   | 0.56   | 0.54   | 0.55   | 0.55   | 0.55   | 0.55   |
| <b>Wo</b>                          | 0.02   | 0.02   | 0.02  | 0.02  | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02  | 0.03   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.03   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   |

Tabela 20: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-012-RB (leucossoma) - continuação da tabela 19.

| Análise                        | 4.1    | 4.2    | 4.3    | 5.1    | 5.2    | 5.3    | 6.1    | 6.2    | 6.3    | 6.4    | 6.5    | 6.6    |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Posição                        | b      | c      | b      | b      | c      | b      | b      | b/c    | b/c    | c      | c/b    | b      |
| SiO <sub>2</sub>               | 49.87  | 50.01  | 50.03  | 50.35  | 50.07  | 49.95  | 49.90  | 50.22  | 50.23  | 50.10  | 50.21  | 50.04  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.15   | 0.15   | 0.12   | 0.13   | 0.12   | 0.12   | 0.14   | 0.10   | 0.15   | 0.12   | 0.15   | 0.14   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.73   | 0.91   | 0.61   | 0.62   | 0.74   | 0.80   | 0.82   | 0.62   | 0.78   | 0.78   | 0.77   | 0.79   |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | -0.01  | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.03   | -0.01  | 0.00   |
| FeO                            | 32.88  | 33.17  | 32.98  | 33.35  | 32.92  | 33.32  | 32.78  | 33.38  | 33.33  | 33.01  | 33.37  | 32.71  |
| MnO                            | 1.10   | 1.05   | 1.05   | 1.02   | 1.08   | 1.00   | 1.05   | 1.00   | 1.02   | 1.05   | 1.08   | 1.02   |
| MgO                            | 14.32  | 14.00  | 14.46  | 14.36  | 14.32  | 14.25  | 14.23  | 14.52  | 14.32  | 14.41  | 14.48  | 14.49  |
| CaO                            | 1.13   | 1.14   | 0.88   | 0.87   | 1.10   | 0.78   | 1.14   | 1.12   | 1.02   | 0.90   | 0.85   | 1.25   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.02   | 0.02   | 0.05   |        | 0.03   | 0.03   | 0.01   | 0.03   | 0.01   | 0.01   |        | 0.05   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.01   |        | 0.00   |        |        | 0.00   |        | 0.00   |        |        |        | 0.01   |
| Total                          | 100.21 | 100.46 | 100.19 | 100.68 | 100.41 | 100.27 | 100.07 | 101.00 | 100.86 | 100.36 | 100.88 | 100.49 |
| Si                             | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.96   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.96   |
| 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   |
| Al                             | 0.03   | 0.04   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.04   | 0.04   | 0.03   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   |
| Cr                             | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| Fe <sup>2+</sup>               | 1.08   | 1.09   | 1.09   | 1.09   | 1.08   | 1.10   | 1.08   | 1.09   | 1.09   | 1.08   | 1.09   | 1.07   |
| Mn                             | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.03   | 0.04   | 0.03   | 0.04   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.04   | 0.03   |
| Mg                             | 0.84   | 0.82   | 0.85   | 0.84   | 0.84   | 0.84   | 0.84   | 0.85   | 0.84   | 0.84   | 0.84   | 0.85   |
| Ca                             | 0.05   | 0.05   | 0.04   | 0.04   | 0.05   | 0.03   | 0.05   | 0.05   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.05   |
| Na                             | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| K                              | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| Total                          | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.02   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.02   |
| En                             | 0.44   | 0.42   | 0.44   | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.44   | 0.43   | 0.44   | 0.44   | 0.44   |
| Fs                             | 0.54   | 0.55   | 0.54   | 0.55   | 0.54   | 0.55   | 0.54   | 0.54   | 0.55   | 0.54   | 0.54   | 0.53   |
| Wo                             | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.03   |

Tabela 21: Análises químicas de ortopiroxênio da amostra CI-013-RC (biotita granulito fêlsico)

| Análise                        | 1.1   | 1.2    | 4.1   | 4.2    | 4.3   |
|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|
| Posição                        | borda | centro | borda | centro | borda |
| SiO <sub>2</sub>               | 50.54 | 50.60  | 50.63 | 50.68  | 50.40 |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.11  | 0.10   | 0.10  | 0.09   | 0.13  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.53  | 0.64   | 0.55  | 0.54   | 0.65  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.02  | 0.04   | 0.02  | 0.02   | 0.02  |
| FeO                            | 30.90 | 29.86  | 30.78 | 30.70  | 29.95 |
| MnO                            | 1.00  | 0.83   | 0.89  | 0.93   | 0.91  |
| MgO                            | 15.02 | 15.42  | 14.97 | 15.05  | 15.29 |
| CaO                            | 1.12  | 1.39   | 0.93  | 0.97   | 0.97  |
| Na <sub>2</sub> O              |       | 0.01   | 0.02  | 0.02   | 0.01  |
| K <sub>2</sub> O               |       | 0.01   | 0.00  |        |       |
| Total                          | 99.22 | 98.89  | 98.89 | 98.99  | 98.31 |
| Si                             | 1.99  | 1.99   | 2.00  | 2.00   | 1.99  |
| Ti                             | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Al                             | 0.02  | 0.03   | 0.03  | 0.02   | 0.03  |
| Cr                             | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| Fe <sup>2+</sup>               | 1.02  | 0.98   | 1.01  | 1.01   | 0.99  |
| Mn                             | 0.03  | 0.03   | 0.03  | 0.03   | 0.03  |
| Mg                             | 0.88  | 0.90   | 0.88  | 0.88   | 0.90  |
| Ca                             | 0.05  | 0.06   | 0.04  | 0.04   | 0.04  |
| Na                             |       | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  |
| K                              |       | 0.00   | 0.00  |        |       |
| Total                          | 4.00  | 3.99   | 3.99  | 3.99   | 3.99  |
| En                             | 0.45  | 0.46   | 0.45  | 0.45   | 0.46  |
| Fs                             | 0.53  | 0.51   | 0.53  | 0.53   | 0.52  |
| Wo                             | 0.02  | 0.03   | 0.02  | 0.02   | 0.02  |



Tabela 23: Análises químicas de clinopiroxênio da amostra CI-013-RC (biotita granulito fêlsico)

| Análise                        | 2.1    | 2.2    | 2.3    | 2.4   | 2.5    | 3.1    | 3.2    | 3.3    | 3.4    | 3.5   | 3.6    | 3.7    | 3.8    | 5.1    | 5.2    | 5.3   | 5.4    | 5.5    | 5.6    | 7.1    | 7.2    | 7.3   | 7.4    | 7.5    | 7.6   | 7.7    |        |        |  |  |
|--------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--|--|
| Posição                        | bor_1  | centro | centro | bor_2 | centro | centro | bor_3  | centro | centro | bor_4 | centro | centro | bor_5  | centro | centro | bor_6 | centro | centro | bor_7  | centro | centro | bor_8 | centro | centro | bor_9 | centro | centro | bor_10 |  |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 52.21  | 51.62  | 51.23  | 51.27 | 51.45  | 51.73  | 51.67  | 51.65  | 51.22  | 51.34 | 51.26  | 51.46  | 51.63  | 51.63  | 51.35  | 51.19 | 51.37  | 51.18  | 51.70  | 51.33  | 50.98  | 50.90 | 50.87  | 51.11  | 51.16 | 51.43  |        |        |  |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.10   | 0.20   | 0.19   | 0.17  | 0.26   | 0.17   | 0.15   | 0.19   | 0.25   | 0.21  | 0.24   | 0.21   | 0.26   | 0.19   | 0.20   | 0.18  | 0.22   | 0.23   | 0.21   | 0.20   | 0.24   | 0.23  | 0.25   | 0.21   | 0.25  | 0.23   |        |        |  |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.89   | 1.28   | 1.33   | 1.34  | 1.70   | 1.35   | 1.25   | 1.40   | 1.83   | 1.36  | 1.60   | 1.54   | 1.61   | 1.39   | 1.42   | 1.48  | 1.64   | 1.64   | 1.55   | 1.54   | 1.78   | 1.77  | 1.77   | 1.51   | 1.68  | 1.56   |        |        |  |  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.05   | 0.02   | 0.02   | 0.03  | 0.04   | 0.02   | 0.01   | 0.05   | 0.04   | 0.03  | 0.04   | 0.03   | 0.06   | 0.03   | 0.04   | 0.04  | 0.05   | 0.01   | 0.04   | 0.03   | 0.02   | 0.06  | 0.04   | 0.02   | 0.03  | 0.04   |        |        |  |  |
| FeO                            | 12.60  | 13.46  | 13.88  | 14.16 | 14.75  | 15.12  | 13.67  | 14.10  | 14.24  | 14.44 | 12.41  | 13.87  | 12.90  | 13.17  | 14.17  | 15.29 | 13.58  | 13.40  | 13.52  | 14.24  | 14.29  | 14.24 | 14.04  | 13.96  | 13.74 | 12.83  |        |        |  |  |
| MnO                            | 0.38   | 0.40   | 0.42   | 0.48  | 0.44   | 0.46   | 0.47   | 0.47   | 0.46   | 0.43  | 0.43   | 0.41   | 0.42   | 0.41   | 0.44   | 0.42  | 0.45   | 0.44   | 0.44   | 0.44   | 0.45   | 0.47  | 0.50   | 0.48   | 0.45  | 0.41   |        |        |  |  |
| MgO                            | 11.78  | 11.33  | 11.53  | 11.36 | 11.37  | 11.38  | 11.39  | 11.29  | 11.02  | 11.53 | 11.01  | 11.25  | 11.20  | 11.50  | 11.53  | 11.44 | 11.39  | 11.00  | 11.22  | 11.32  | 11.20  | 20.22 | 20.26  | 20.57  | 20.89 | 21.52  |        |        |  |  |
| CaO                            | 21.70  | 21.05  | 21.02  | 20.30 | 19.82  | 19.73  | 21.19  | 20.38  | 20.39  | 19.91 | 22.15  | 20.71  | 21.70  | 21.37  | 20.26  | 19.29 | 20.92  | 20.54  | 20.92  | 20.92  | 20.26  | 20.22 | 20.49  | 20.57  | 20.89 | 21.52  |        |        |  |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.35   | 0.35   | 0.39   | 0.36  | 0.42   | 0.35   | 0.36   | 0.33   | 0.42   | 0.36  | 0.40   | 0.35   | 0.38   | 0.37   | 0.42   | 0.36  | 0.42   | 0.42   | 0.44   | 0.43   | 0.39   | 0.43  | 0.43   | 0.40   | 0.37  | 0.45   |        |        |  |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.00   |        |        |       | 0.01   |        |        |        |        | 0.01  | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |        |       | 0.01   |        | 0.00   |        |        |       |        |        |       |        |        |        |  |  |
| Total                          | 100.07 | 99.71  | 100.00 | 99.46 | 100.25 | 100.31 | 100.17 | 99.86  | 99.85  | 99.59 | 99.56  | 99.83  | 100.16 | 100.06 | 99.82  | 99.68 | 100.04 | 98.87  | 100.03 | 99.81  | 99.57  | 99.57 | 99.61  | 99.36  | 99.74 | 99.61  |        |        |  |  |
| Si                             | 1.98   | 1.97   | 1.96   | 1.97  | 1.96   | 1.97   | 1.97   | 1.97   | 1.96   | 1.97  | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96   | 1.96  | 1.96   | 1.97   | 1.97   | 1.96   | 1.95   | 1.95  | 1.95   | 1.96   | 1.96  | 1.96   |        |        |  |  |
| Ti                             | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.00  | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   |        |        |  |  |
| Al                             | 0.04   | 0.06   | 0.06   | 0.06  | 0.08   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.08   | 0.06  | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.06   | 0.06   | 0.07  | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.08   | 0.08  | 0.08   | 0.08   | 0.07  | 0.08   | 0.07   |        |  |  |
| Cr                             | 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   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   |        |        |  |  |
| Fe <sup>2+</sup>               | 0.40   | 0.43   | 0.44   | 0.45  | 0.47   | 0.48   | 0.44   | 0.45   | 0.45   | 0.46  | 0.40   | 0.44   | 0.41   | 0.42   | 0.45   | 0.49  | 0.43   | 0.43   | 0.43   | 0.46   | 0.46   | 0.46  | 0.45   | 0.45   | 0.44  | 0.41   |        |        |  |  |
| Mn                             | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.02  | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.02   | 0.02   | 0.02  | 0.01   | 0.01   |        |  |  |
| Mg                             | 0.67   | 0.64   | 0.66   | 0.65  | 0.64   | 0.65   | 0.65   | 0.64   | 0.63   | 0.66  | 0.63   | 0.64   | 0.63   | 0.65   | 0.66   | 0.65  | 0.65   | 0.63   | 0.64   | 0.64   | 0.64   | 0.64  | 0.64   | 0.64   | 0.64  | 0.64   | 0.63   |        |  |  |
| Ca                             | 0.88   | 0.86   | 0.86   | 0.83  | 0.81   | 0.80   | 0.86   | 0.83   | 0.83   | 0.82  | 0.91   | 0.85   | 0.88   | 0.87   | 0.83   | 0.79  | 0.85   | 0.85   | 0.85   | 0.83   | 0.83   | 0.83  | 0.84   | 0.85   | 0.86  | 0.88   |        |        |  |  |
| Na                             | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03  | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.02   | 0.03   | 0.03  | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03  | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.03  | 0.03   | 0.03   | 0.03  | 0.03   | 0.03   |        |  |  |
| K                              | 0.00   |        |        |       | 0.00   |        |        |        |        | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |        |       | 0.00   |        | 0.00   |        |        |       |        |        |       |        |        |        |  |  |
| Total                          | 4.01   | 4.01   | 4.02   | 4.01  | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.00   | 4.01   | 4.01  | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.02   | 4.01  | 4.02   | 4.00   | 4.01   | 4.01   | 4.01   | 4.02  | 4.02   | 4.01   | 4.01  | 4.01   | 4.01   |        |  |  |
| En                             | 0.35   | 0.34   | 0.35   | 0.34  | 0.34   | 0.34   | 0.34   | 0.34   | 0.33   | 0.35  | 0.33   | 0.34   | 0.33   | 0.34   | 0.35   | 0.34  | 0.34   | 0.33   | 0.34   | 0.34   | 0.34   | 0.34  | 0.34   | 0.34   | 0.34  | 0.34   | 0.34   |        |  |  |
| Fs                             | 0.19   | 0.21   | 0.20   | 0.22  | 0.23   | 0.24   | 0.21   | 0.23   | 0.23   | 0.23  | 0.19   | 0.22   | 0.20   | 0.20   | 0.21   | 0.24  | 0.20   | 0.22   | 0.21   | 0.22   | 0.22   | 0.22  | 0.21   | 0.22   | 0.21  | 0.20   | 0.20   |        |  |  |
| Wo                             | 0.46   | 0.45   | 0.45   | 0.44  | 0.43   | 0.42   | 0.45   | 0.44   | 0.44   | 0.43  | 0.48   | 0.44   | 0.46   | 0.46   | 0.44   | 0.42  | 0.45   | 0.45   | 0.45   | 0.45   | 0.44   | 0.44  | 0.44   | 0.45   | 0.45  | 0.45   | 0.47   |        |  |  |



Tabela 25: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-011-RD (Bt granulito) – continuação da tabela 24.

| Análise                            | 11.1   |        | 11.2   |        | 11.3   |        | 11.4   |        | 11.5   |       | 12.1   |  | 12.2  |  | 12.3   |  | 12.4  |  | 12.5   |  | 12.6  |  |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--|-------|--|--------|--|-------|--|--------|--|-------|--|
|                                    | borda  |        | centro |        | borda  |        | centro |        | borda  |       | centro |  | borda |  | centro |  | borda |  | centro |  | borda |  |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 61.02  | 61.23  | 60.98  | 61.47  | 61.51  | 60.17  | 60.45  | 59.89  | 59.77  | 59.31 | 59.46  |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0.00   | 0.01   | 0.03   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.01  | 0.00   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 25.03  | 25.09  | 25.13  | 25.12  | 24.80  | 25.16  | 24.76  | 25.04  | 24.91  | 25.09 | 24.96  |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>FeO</b>                         | 0.11   | 0.07   | 0.06   | 0.07   | 0.06   | 0.04   | 0.09   | 0.11   | 0.07   | 0.08  | 0.09   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>CaO</b>                         | 6.51   | 6.43   | 6.54   | 6.39   | 6.26   | 6.48   | 6.13   | 6.33   | 6.31   | 6.20  | 6.42   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 8.27   | 8.18   | 8.21   | 8.40   | 8.41   | 8.31   | 8.47   | 8.43   | 8.53   | 8.39  | 8.29   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0.27   | 0.29   | 0.26   | 0.26   | 0.29   | 0.26   | 0.33   | 0.30   | 0.32   | 0.30  | 0.31   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>SrO</b>                         | 0.08   | 0.09   | 0.08   | 0.08   | 0.04   | 0.06   | 0.09   | 0.06   | 0.07   | 0.12  | 0.14   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Total</b>                       | 101.29 | 101.39 | 101.29 | 101.80 | 101.37 | 100.50 | 100.34 | 100.19 | 100.01 | 99.50 | 99.66  |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Si</b>                          | 10.75  | 10.77  | 10.74  | 10.77  | 10.81  | 10.69  | 10.76  | 10.68  | 10.69  | 10.66 | 10.67  |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Al</b>                          | 5.20   | 5.20   | 5.21   | 5.18   | 5.14   | 5.26   | 5.19   | 5.26   | 5.24   | 5.31  | 5.28   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Ti</b>                          | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Σ</b>                           | 15.95  | 15.97  | 15.96  | 15.95  | 15.95  | 15.96  | 15.95  | 15.95  | 15.94  | 15.97 | 15.95  |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Fe<sup>2+</sup></b>             | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.01  | 0.01   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Ca</b>                          | 1.23   | 1.21   | 1.23   | 1.20   | 1.18   | 1.23   | 1.17   | 1.21   | 1.21   | 1.19  | 1.23   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Na</b>                          | 2.83   | 2.79   | 2.80   | 2.86   | 2.87   | 2.86   | 2.92   | 2.92   | 2.96   | 2.92  | 2.88   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>K</b>                           | 0.06   | 0.07   | 0.06   | 0.06   | 0.07   | 0.06   | 0.08   | 0.07   | 0.07   | 0.07  | 0.07   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Sr</b>                          | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Σ</b>                           | 4.14   | 4.09   | 4.11   | 4.13   | 4.12   | 4.17   | 4.19   | 4.22   | 4.26   | 4.21  | 4.22   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Cations</b>                     | 20.09  | 20.05  | 20.07  | 20.09  | 20.07  | 20.13  | 20.14  | 20.17  | 20.19  | 20.18 | 20.16  |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Ab</b>                          | 68.70  | 68.60  | 68.40  | 69.40  | 69.70  | 68.90  | 70.10  | 69.50  | 69.80  | 69.90 | 68.90  |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>An</b>                          | 29.90  | 29.80  | 30.10  | 29.20  | 28.70  | 29.70  | 28.00  | 28.80  | 28.50  | 28.50 | 29.50  |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |
| <b>Or</b>                          | 1.50   | 1.60   | 1.40   | 1.40   | 1.60   | 1.40   | 1.80   | 1.60   | 1.70   | 1.60  | 1.70   |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |

Tabela 26: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-012-RB (leucossoma).

| Análise                            | 1.1   |       | 1.2    |        | 1.3    |        | 3.1    |        | 3.2    |        | 3.3    |        | 4.1   |  | 4.2    |  | 4.3   |  | 7.1    |  | 7.2   |  | 7.3    |  |       |
|------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--|--------|--|-------|--|--------|--|-------|--|--------|--|-------|
|                                    | borda |       | centro |        | borda  |        | centro |        | borda  |        | centro |        | borda |  | centro |  | borda |  | centro |  | borda |  | centro |  | borda |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 58.80 | 59.31 | 59.31  | 60.09  | 59.31  | 60.15  | 59.08  | 60.32  | 60.75  | 59.37  | 59.38  | 59.83  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0.02  | 0.02  | 0.00   | 0.04   | 0.00   | 0.01   | 0.03   | 0.02   | 0.01   | 0.03   | 0.00   | 0.01   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 25.71 | 25.35 | 25.35  | 24.93  | 25.16  | 25.55  | 25.57  | 25.60  | 25.92  | 25.61  | 25.74  | 25.74  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>FeO</b>                         | 0.15  | 0.09  | 0.03   | 1.57   | 0.35   | 0.19   | 0.17   | 0.42   | 0.15   | 0.05   | 0.08   | 0.02   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>CaO</b>                         | 6.96  | 6.88  | 7.06   | 6.87   | 6.70   | 6.99   | 7.03   | 7.01   | 6.84   | 6.94   | 6.88   | 6.96   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 7.72  | 7.29  | 7.59   | 7.41   | 7.93   | 7.37   | 7.72   | 7.51   | 6.69   | 7.97   | 7.88   | 7.86   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0.35  | 0.95  | 0.33   | 0.37   | 0.34   | 0.36   | 0.19   | 0.24   | 0.18   | 0.20   | 0.19   | 0.20   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>SrO</b>                         | 0.08  | 0.06  | 0.10   | 0.06   | 0.08   | 0.07   | 0.10   | 0.09   | 0.10   | 0.05   | 0.06   | 0.10   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Total</b>                       | 99.81 | 99.94 | 99.76  | 101.35 | 100.15 | 100.69 | 99.88  | 101.20 | 100.64 | 100.22 | 100.21 | 100.72 |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Si</b>                          | 10.54 | 10.63 | 10.62  | 10.66  | 10.65  | 10.66  | 10.58  | 10.65  | 10.71  | 10.59  | 10.59  | 10.61  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Al</b>                          | 5.43  | 5.35  | 5.35   | 5.21   | 5.29   | 5.33   | 5.39   | 5.32   | 5.38   | 5.38   | 5.40   | 5.38   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Ti</b>                          | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Σ</b>                           | 15.98 | 15.98 | 15.97  | 15.87  | 15.94  | 15.99  | 15.97  | 15.97  | 16.10  | 15.97  | 15.99  | 15.99  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Fe<sub>2</sub></b>              | 0.02  | 0.01  | 0.00   | 0.23   | 0.05   | 0.03   | 0.03   | 0.06   | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.00   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Ca</b>                          | 1.34  | 1.32  | 1.36   | 1.31   | 1.28   | 1.33   | 1.35   | 1.33   | 1.29   | 1.33   | 1.32   | 1.32   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Na</b>                          | 2.69  | 2.53  | 2.64   | 2.55   | 2.75   | 2.53   | 2.68   | 2.57   | 2.29   | 2.76   | 2.72   | 2.70   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>K</b>                           | 0.08  | 0.22  | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.08   | 0.04   | 0.05   | 0.04   | 0.05   | 0.04   | 0.05   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Sr</b>                          | 0.01  | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Σ</b>                           | 4.14  | 4.09  | 4.08   | 4.18   | 4.17   | 3.98   | 4.11   | 4.02   | 3.65   | 4.15   | 4.10   | 4.08   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Cations</b>                     | 20.11 | 20.07 | 20.05  | 20.05  | 20.11  | 19.97  | 20.08  | 19.99  | 19.75  | 20.12  | 20.09  | 20.07  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Ab</b>                          | 65.50 | 62.20 | 64.80  | 64.70  | 66.90  | 64.20  | 65.80  | 65.10  | 63.20  | 66.80  | 66.70  | 66.40  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>An</b>                          | 32.60 | 32.40 | 33.30  | 33.20  | 31.20  | 33.70  | 33.10  | 33.60  | 35.70  | 32.10  | 32.20  | 32.50  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |
| <b>Or</b>                          | 1.90  | 5.30  | 1.80   | 2.10   | 1.90   | 2.10   | 1.10   | 1.40   | 1.10   | 1.10   | 1.00   | 1.10   |       |  |        |  |       |  |        |  |       |  |        |  |       |

Tabela 27: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-012-RB (leucossoma) – continuação da tabela 26.

| Análise                        | 8.1     |        | 8.2    |        | 9.1    |        | 9.2   |        | 9.3   |        | 10.1  |        | 10.2  |        | 10.3  |        | 10.4   |        | 11.1   |        | 11.2   |        | 11.3   |        | 11.4   |        | 11.5  |        | 11.6  |        | 11.7  |        | 12.1   |        | 12.2  |        | 12.4   |        | 14.1   |        | 14.2  |        | 14.3   |        | 14.4   |        |
|--------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                | Posição | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda  | centro | borda | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda | centro | borda  |        |        |        |
| SiO <sub>2</sub>               | 59.85   | 60.35  | 59.35  | 59.65  | 59.58  | 59.39  | 59.26 | 58.65  | 59.13 | 59.04  | 59.08 | 58.66  | 59.08 | 59.16  | 59.36 | 59.97  | 60.20  | 58.84  | 59.32  | 59.29  | 59.33  | 59.54  | 59.67  | 59.85  | 60.35  | 59.35  | 59.65 | 59.58  | 59.39 | 59.26  | 58.65 | 59.13  | 59.04  | 59.08  | 58.66 | 59.08  | 59.16  | 59.36  | 59.97  | 60.20  | 58.84 | 59.32  | 59.29  | 59.33  | 59.54  | 59.67  |
| TiO <sub>2</sub>               | -0.01   | 0.01   | 0.04   | 0.02   | 0.00   | 0.02   | -0.01 | 0.03   | 0.03  | 0.03   | 0.04  | 0.02   | 0.03  | 0.01   | 0.03  | 0.01   | 0.03   | 0.00   | 0.02   | 0.03   | 0.04   | 0.02   | 0.01   | -0.01  | 0.01   | 0.04   | 0.02  | 0.00   | 0.02  | -0.01  | 0.03  | 0.03   | 0.03   | 0.04   | 0.02  | 0.03   | 0.01   | 0.03   | 0.00   | 0.02   | 0.03  | 0.04   | 0.02   | 0.01   |        |        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 25.68   | 25.56  | 25.55  | 25.42  | 25.34  | 25.44  | 25.31 | 25.35  | 25.47 | 25.70  | 25.37 | 25.73  | 25.57 | 25.63  | 25.48 | 25.71  | 25.49  | 25.61  | 25.87  | 25.57  | 25.54  | 25.38  | 25.36  | 25.68  | 25.56  | 25.55  | 25.42 | 25.34  | 25.44 | 25.31  | 25.35 | 25.47  | 25.70  | 25.37  | 25.73 | 25.57  | 25.63  | 25.48  | 25.71  | 25.49  | 25.61 | 25.87  | 25.57  | 25.54  | 25.38  | 25.36  |
| FeO                            | 0.08    | 0.03   | 0.07   | 0.03   | 0.10   | 0.05   | 0.13  | 0.12   | 0.09  | 0.09   | 0.06  | 0.35   | 0.07  | 0.53   | 0.15  | 0.07   | 0.03   | 0.05   | 0.11   | 0.08   | 0.31   | 0.08   | 0.66   | 0.08   | 0.03   | 0.07   | 0.03  | 0.10   | 0.05  | 0.13   | 0.12  | 0.09   | 0.09   | 0.06   | 0.35  | 0.07   | 0.53   | 0.15   | 0.07   | 0.03   | 0.05  | 0.11   | 0.08   | 0.31   | 0.08   | 0.66   |
| CaO                            | 7.00    | 6.81   | 6.95   | 6.94   | 6.88   | 6.82   | 6.83  | 6.90   | 6.90  | 7.10   | 6.93  | 7.06   | 7.04  | 6.93   | 6.95  | 7.04   | 7.03   | 7.06   | 7.00   | 7.02   | 6.88   | 6.89   | 6.91   | 7.00   | 6.81   | 6.95   | 6.94  | 6.88   | 6.82  | 6.83   | 6.90  | 6.90   | 7.10   | 6.93   | 7.06  | 7.04   | 6.93   | 6.95   | 7.04   | 7.03   | 7.06  | 7.00   | 7.02   | 6.88   | 6.89   | 6.91   |
| Na <sub>2</sub> O              | 8.10    | 7.66   | 7.90   | 7.43   | 7.89   | 7.79   | 7.84  | 7.71   | 7.67  | 7.37   | 7.27  | 7.53   | 7.29  | 7.41   | 7.09  | 7.15   | 7.81   | 7.77   | 7.92   | 7.76   | 7.85   | 7.80   | 7.70   | 8.10   | 7.66   | 7.90   | 7.43  | 7.89   | 7.79  | 7.84   | 7.71  | 7.67   | 7.37   | 7.27   | 7.53  | 7.29   | 7.41   | 7.09   | 7.15   | 7.81   | 7.77  | 7.92   | 7.76   | 7.85   | 7.80   | 7.70   |
| K <sub>2</sub> O               | 0.30    | 0.21   | 0.32   | 0.37   | 0.33   | 0.31   | 0.37  | 0.33   | 0.33  | 0.65   | 0.81  | 0.38   | 0.61  | 0.50   | 0.42  | 0.33   | 0.28   | 0.33   | 0.32   | 0.29   | 0.35   | 0.37   | 0.34   | 0.30   | 0.21   | 0.32   | 0.37  | 0.33   | 0.31  | 0.37   | 0.33  | 0.33   | 0.65   | 0.81   | 0.38  | 0.61   | 0.50   | 0.42   | 0.33   | 0.28   | 0.33  | 0.32   | 0.29   | 0.35   | 0.37   | 0.34   |
| SrO                            | 0.08    | 0.10   | 0.07   | 0.11   | 0.09   | 0.05   | 0.09  | 0.08   | 0.13  | 0.11   | 0.13  | 0.08   | 0.04  | 0.09   | 0.09  | 0.08   | 0.11   | 0.05   | 0.10   | 0.09   | 0.09   | 0.08   | 0.09   | 0.08   | 0.10   | 0.07   | 0.11  | 0.09   | 0.05  | 0.09   | 0.08  | 0.13   | 0.11   | 0.13   | 0.08  | 0.04   | 0.09   | 0.09   | 0.08   | 0.11   | 0.05  | 0.10   | 0.09   | 0.09   | 0.08   | 0.09   |
| <b>Total</b>                   | 101.09  | 100.73 | 100.25 | 99.96  | 100.21 | 99.86  | 99.82 | 99.17  | 99.74 | 100.09 | 99.69 | 99.83  | 99.72 | 100.25 | 99.58 | 100.36 | 100.96 | 99.71  | 100.66 | 100.14 | 100.39 | 100.14 | 100.74 | 101.09 | 100.73 | 100.25 | 99.96 | 100.21 | 99.86 | 99.82  | 99.17 | 99.74  | 100.09 | 99.69  | 99.83 | 99.72  | 100.25 | 99.58  | 100.36 | 100.96 | 99.71 | 100.66 | 100.14 | 100.39 | 100.14 | 100.74 |
| Si                             | 10.60   | 10.68  | 10.59  | 10.65  | 10.63  | 10.62  | 10.62 | 10.58  | 10.60 | 10.56  | 10.61 | 10.53  | 10.59 | 10.57  | 10.64 | 10.65  | 10.65  | 10.56  | 10.55  | 10.59  | 10.58  | 10.63  | 10.62  | 10.60  | 10.68  | 10.59  | 10.65 | 10.63  | 10.62 | 10.62  | 10.58 | 10.60  | 10.56  | 10.61  | 10.53 | 10.59  | 10.57  | 10.64  | 10.65  | 10.65  | 10.56 | 10.55  | 10.59  | 10.58  | 10.63  | 10.62  |
| Al                             | 5.35    | 5.33   | 5.37   | 5.35   | 5.33   | 5.36   | 5.34  | 5.39   | 5.38  | 5.42   | 5.36  | 5.44   | 5.40  | 5.39   | 5.38  | 5.38   | 5.31   | 5.41   | 5.42   | 5.38   | 5.37   | 5.34   | 5.31   | 5.35   | 5.33   | 5.37   | 5.35  | 5.33   | 5.36  | 5.34   | 5.39  | 5.38   | 5.42   | 5.36   | 5.44  | 5.40   | 5.39   | 5.38   | 5.38   | 5.31   | 5.41  | 5.42   | 5.38   | 5.37   | 5.34   | 5.31   |
| Ti                             | 0.00    | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.01  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.01  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |
| Σ                              | 15.95   | 16.01  | 15.96  | 16.00  | 15.96  | 15.98  | 15.96 | 15.97  | 15.98 | 15.98  | 15.98 | 15.97  | 16.00 | 15.97  | 16.02 | 16.03  | 15.96  | 15.97  | 15.97  | 15.97  | 15.95  | 15.97  | 15.93  | 15.95  | 16.01  | 15.96  | 16.00 | 15.96  | 15.98 | 15.96  | 15.97 | 15.98  | 15.98  | 15.98  | 15.97 | 16.00  | 15.97  | 16.02  | 16.03  | 15.96  | 15.97 | 15.97  | 15.95  | 15.97  | 15.93  |        |
| Fe <sup>2+</sup>               | 0.01    | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.02  | 0.02   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.05   | 0.01  | 0.08   | 0.02  | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.05   | 0.01   | 0.10   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.00  | 0.01   | 0.01  | 0.02   | 0.02  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.05  | 0.01   | 0.08   | 0.02   | 0.01   | 0.00   | 0.01  | 0.02   | 0.01   | 0.05   | 0.01   | 0.10   |
| Ca                             | 1.33    | 1.29   | 1.33   | 1.33   | 1.32   | 1.31   | 1.31  | 1.33   | 1.33  | 1.36   | 1.33  | 1.36   | 1.35  | 1.33   | 1.33  | 1.34   | 1.33   | 1.36   | 1.34   | 1.34   | 1.31   | 1.32   | 1.32   | 1.33   | 1.29   | 1.33   | 1.33  | 1.32   | 1.31  | 1.31   | 1.33  | 1.33   | 1.36   | 1.33   | 1.36  | 1.35   | 1.33   | 1.33   | 1.34   | 1.33   | 1.36  | 1.34   | 1.34   | 1.31   | 1.32   | 1.32   |
| Na                             | 2.78    | 2.63   | 2.73   | 2.57   | 2.73   | 2.70   | 2.72  | 2.70   | 2.67  | 2.56   | 2.53  | 2.62   | 2.54  | 2.57   | 2.46  | 2.46   | 2.68   | 2.70   | 2.73   | 2.69   | 2.71   | 2.70   | 2.66   | 2.78   | 2.63   | 2.73   | 2.57  | 2.73   | 2.70  | 2.72   | 2.70  | 2.67   | 2.56   | 2.53   | 2.62  | 2.54   | 2.57   | 2.46   | 2.46   | 2.68   | 2.70  | 2.73   | 2.69   | 2.71   | 2.70   | 2.66   |
| K                              | 0.07    | 0.05   | 0.07   | 0.08   | 0.08   | 0.07   | 0.08  | 0.08   | 0.08  | 0.15   | 0.19  | 0.09   | 0.14  | 0.11   | 0.10  | 0.08   | 0.06   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.08   | 0.09   | 0.08   | 0.07   | 0.05   | 0.07   | 0.08  | 0.08   | 0.07  | 0.08   | 0.08  | 0.15   | 0.19   | 0.09   | 0.14  | 0.11   | 0.10   | 0.08   | 0.06   | 0.07   | 0.07  | 0.07   | 0.08   | 0.09   | 0.08   |        |
| Sr                             | 0.01    | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.00  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.00  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |        |
| Σ                              | 4.20    | 3.98   | 4.16   | 4.00   | 4.14   | 4.09   | 4.15  | 4.14   | 4.09  | 4.09   | 4.07  | 4.13   | 4.04  | 4.10   | 3.93  | 3.90   | 4.09   | 4.15   | 4.17   | 4.12   | 4.16   | 4.16   | 4.20   | 3.98   | 4.16   | 4.00   | 4.14  | 4.09   | 4.15  | 4.14   | 4.09  | 4.09   | 4.07   | 4.13   | 4.04  | 4.10   | 3.93   | 3.90   | 4.09   | 4.15   | 4.17  | 4.12   | 4.16   | 4.16   | 4.16   |        |
| <b>Cations</b>                 | 20.15   | 19.99  | 20.12  | 19.99  | 20.10  | 20.07  | 20.11 | 20.10  | 20.07 | 20.07  | 20.05 | 20.10  | 20.03 | 20.06  | 19.94 | 19.93  | 20.05  | 20.12  | 20.13  | 20.09  | 20.12  | 20.09  | 20.09  | 20.15  | 19.99  | 20.12  | 19.99 | 20.10  | 20.07 | 20.11  | 20.10 | 20.07  | 20.07  | 20.05  | 20.10 | 20.03  | 20.06  | 19.94  | 19.93  | 20.05  | 20.12 | 20.13  | 20.09  | 20.12  | 20.09  | 20.09  |
| Ab                             | 66.60   | 66.30  | 66.10  | 64.60  | 66.20  | 66.20  | 66.10 | 65.70  | 65.60 | 62.90  | 62.50 | 64.50  | 63.00 | 64.10  | 63.20 | 63.50  | 65.70  | 65.40  | 66.00  | 65.60  | 66.10  | 65.80  | 65.60  | 66.60  | 66.30  | 66.10  | 64.60 | 66.20  | 66.20 | 66.10  | 65.70 | 65.60  | 62.90  | 62.50  | 64.50 | 63.00  | 64.10  | 63.20  | 63.50  | 65.70  | 65.40 | 66.00  | 65.60  | 66.10  | 65.80  | 65.60  |
| An                             | 31.80   | 32.60  | 32.10  | 33.30  | 31.90  | 32.00  | 31.80 | 32.50  | 32.60 | 33.50  | 32.90 | 33.40  | 33.60 | 33.10  | 34.30 | 34.50  | 32.70  | 32.80  | 32.30  | 32.80  | 32.00  | 32.10  | 32.50  | 31.80  | 32.60  | 32.10  | 33.30 | 31.90  | 32.00 | 31.80  | 32.50 | 32.60  | 33.50  | 32.90  | 33.40 | 33.60  | 33.10  | 34.30  | 34.50  | 32.70  | 32.80 | 32.30  | 32.80  | 32.00  | 32.10  | 32.50  |
| Or                             | 1.70    | 1.20   | 1.80   | 2.10   | 1.80   | 1.70   | 2.00  | 1.90   | 1.90  | 3.60   | 4.60  | 2.10   | 3.50  | 2.80   | 2.50  | 1.90   | 1.50   | 1.80   | 1.70   | 1.60   | 1.90   | 2.10   | 1.90   | 1.70   | 1.20   | 1.80   | 2.10  | 1.80   | 1.70  | 2.00   | 1.90  | 1.90   | 3.60   | 4.60   | 2.10  | 3.50   | 2.80   | 2.50   | 1.90   | 1.50   | 1.80  | 1.70   | 1.60   | 1.90   | 2.10   | 1.90   |



Tabela 28: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-013-RB (biotita granulito fêlsico)

| Análise                            | posição | 2.1    | 2.2    | 2.3    | 2.4    | 3.1    | 3.2    | 3.3    | 3.4    | 4.1   | 4.2   | 4.3    | 4.4    | 4.5    | 5.1   | 5.2   | 5.3    | 5.4    | 5.6    | 5.7    |
|------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                                    |         | borda  | centro | centro | borda  | borda  | centro | centro | borda  | borda | borda | centro | centro | borda  | filme | borda | centro | centro | centro | centro |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             |         | 60.81  | 60.71  | 60.29  | 60.25  | 59.68  | 59.44  | 59.56  | 59.49  | 60.04 | 60.13 | 59.93  | 60.29  | 60.18  | 59.53 | 59.39 | 60.01  | 59.93  | 60.00  | 59.95  |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             |         | 0.00   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.02  | 0.02  | 0.03   | 0.05   | 0.02   | 0.02  | 0.01  | 0.02   | 0.01   | 0.04   | 0.01   |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> |         | 24.85  | 24.68  | 24.28  | 24.86  | 25.46  | 25.27  | 25.07  | 25.30  | 25.03 | 24.92 | 24.58  | 24.66  | 24.80  | 24.94 | 24.70 | 24.67  | 24.74  | 24.75  | 24.87  |
| <b>FeO</b>                         |         | 0.05   | 0.04   | 0.09   | 0.05   | 0.07   | 0.00   | 0.08   | 0.42   | 0.04  | 0.17  | 0.47   | 0.06   | 0.05   | 0.10  | 0.11  | 0.08   | 0.07   | 0.08   | 0.04   |
| <b>CaO</b>                         |         | 6.64   | 6.55   | 6.42   | 6.59   | 6.90   | 6.75   | 6.64   | 6.70   | 6.74  | 6.61  | 6.66   | 6.75   | 6.79   | 6.77  | 6.59  | 6.62   | 6.68   | 6.67   | 6.76   |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             |         | 7.99   | 8.19   | 7.75   | 8.08   | 7.84   | 7.94   | 8.13   | 7.97   | 7.71  | 7.81  | 7.94   | 7.89   | 7.95   | 7.87  | 7.98  | 8.09   | 7.76   | 7.88   | 7.93   |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              |         | 0.20   | 0.25   | 0.25   | 0.21   | 0.25   | 0.26   | 0.30   | 0.28   | 0.23  | 0.20  | 0.25   | 0.19   | 0.14   | 0.22  | 0.26  | 0.23   | 0.22   | 0.28   | 0.26   |
| <b>SrO</b>                         |         | 0.09   | 0.00   | 0.03   | 0.05   | 0.07   | 0.04   | 0.08   | 0.05   | 0.11  | 0.06  | 0.06   | 0.06   | 0.07   | 0.07  | 0.08  | 0.04   | 0.08   | 0.08   | 0.11   |
| <b>Total</b>                       |         | 100.63 | 100.45 | 99.14  | 100.11 | 100.30 | 99.72  | 99.89  | 100.22 | 99.91 | 99.93 | 99.90  | 99.94  | 100.01 | 99.52 | 99.12 | 99.76  | 99.48  | 99.78  | 99.93  |
| <b>Si</b>                          |         | 10.77  | 10.78  | 10.83  | 10.74  | 10.63  | 10.64  | 10.66  | 10.62  | 10.72 | 10.73 | 10.73  | 10.76  | 10.74  | 10.68 | 10.70 | 10.74  | 10.74  | 10.73  | 10.71  |
| <b>Al</b>                          |         | 5.18   | 5.16   | 5.14   | 5.22   | 5.34   | 5.33   | 5.28   | 5.32   | 5.26  | 5.24  | 5.18   | 5.18   | 5.21   | 5.27  | 5.24  | 5.20   | 5.22   | 5.21   | 5.23   |
| <b>Ti</b>                          |         | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   |
| <b>Σ</b>                           |         | 15.96  | 15.94  | 15.96  | 15.96  | 15.97  | 15.97  | 15.95  | 15.95  | 15.98 | 15.97 | 15.91  | 15.95  | 15.95  | 15.96 | 15.95 | 15.94  | 15.97  | 15.95  | 15.95  |
| <b>Fe<sup>2+</sup></b>             |         | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.06   | 0.01  | 0.03  | 0.07   | 0.01   | 0.01   | 0.02  | 0.02  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |
| <b>Ca</b>                          |         | 1.26   | 1.25   | 1.24   | 1.26   | 1.32   | 1.30   | 1.27   | 1.28   | 1.29  | 1.26  | 1.28   | 1.29   | 1.30   | 1.30  | 1.27  | 1.27   | 1.28   | 1.28   | 1.29   |
| <b>Na</b>                          |         | 2.74   | 2.82   | 2.70   | 2.79   | 2.71   | 2.76   | 2.82   | 2.76   | 2.67  | 2.70  | 2.75   | 2.73   | 2.75   | 2.74  | 2.79  | 2.81   | 2.70   | 2.73   | 2.75   |
| <b>K</b>                           |         | 0.05   | 0.06   | 0.06   | 0.05   | 0.06   | 0.06   | 0.07   | 0.06   | 0.05  | 0.05  | 0.06   | 0.04   | 0.03   | 0.05  | 0.06  | 0.05   | 0.05   | 0.06   | 0.06   |
| <b>Sr</b>                          |         | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.00   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |
| <b>Σ</b>                           |         | 4.07   | 4.13   | 4.01   | 4.12   | 4.10   | 4.11   | 4.19   | 4.18   | 4.03  | 4.05  | 4.17   | 4.08   | 4.10   | 4.12  | 4.15  | 4.14   | 4.05   | 4.10   | 4.12   |
| <b>Cations</b>                     |         | 20.02  | 20.07  | 19.97  | 20.07  | 20.08  | 20.09  | 20.14  | 20.12  | 20.00 | 20.02 | 20.08  | 20.03  | 20.05  | 20.07 | 20.09 | 20.08  | 20.01  | 20.05  | 20.06  |
| <b>Ab</b>                          |         | 67.70  | 68.40  | 67.60  | 68.10  | 66.30  | 67.00  | 67.80  | 67.20  | 66.60 | 67.40 | 67.40  | 67.20  | 67.40  | 67.00 | 67.70 | 68.00  | 66.90  | 67.10  | 67.00  |
| <b>An</b>                          |         | 31.10  | 30.20  | 30.90  | 30.70  | 32.30  | 31.50  | 30.60  | 31.20  | 32.10 | 31.50 | 31.20  | 31.70  | 31.80  | 31.80 | 30.90 | 30.70  | 31.80  | 31.40  | 31.50  |
| <b>Or</b>                          |         | 1.10   | 1.40   | 1.50   | 1.10   | 1.40   | 1.50   | 1.70   | 1.50   | 1.30  | 1.10  | 1.40   | 1.10   | 0.80   | 1.20  | 1.50  | 1.30   | 1.20   | 1.60   | 1.40   |

Tabela 29: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-013-RB (biotita granulito fêlsico) - continuação da tabela 28.

| Análise                        | 6.1     |       | 6.2    |       | 6.3    |       | 6.4    |       | 6.5    |       | 6.6    |       | 6.8    |       | 6.9    |       | 7.1    |       | 7.2    |       | 7.3    |       | 7.4    |       | 7.5    |       | 7.6    |       | 8.1    |       | 8.2    |       | 8.3    |       | 8.4    |  |  |  |  |  |
|--------------------------------|---------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--|--|--|--|--|
|                                | posição | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro |  |  |  |  |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 59.12   | 59.20 | 59.58  | 59.51 | 60.11  | 60.09 | 60.06  | 60.05 | 59.13  | 58.65 | 57.91  | 58.00 | 57.22  | 57.52 | 58.74  | 58.82 | 58.98  | 58.82 | 58.49  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.02    | 0.04  | 0.01   | 0.01  | 0.00   | 0.00  | 0.01   | 0.03  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.03  | 0.06   | 0.03  | 0.02   | 0.02  | 0.02   | 0.03  | 0.05   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 24.29   | 24.27 | 24.60  | 24.49 | 24.11  | 24.01 | 24.18  | 24.20 | 25.07  | 25.15 | 25.54  | 25.23 | 25.14  | 25.29 | 24.83  | 24.76 | 24.68  | 24.72 | 24.72  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| FeO                            | 0.10    | 0.15  | 0.08   | 0.04  | 0.08   | 0.08  | 0.05   | 0.12  | 0.04   | 0.02  | 0.05   | 0.26  | 1.20   | 0.65  | 0.03   | 0.06  | 0.23   | 0.37  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| CaO                            | 6.55    | 6.62  | 6.64   | 6.64  | 6.36   | 6.18  | 6.54   | 6.67  | 6.75   | 6.79  | 7.22   | 6.79  | 6.84   | 6.79  | 6.58   | 6.59  | 6.57   | 6.64  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 7.64    | 7.63  | 7.46   | 7.79  | 7.73   | 7.79  | 7.70   | 7.56  | 8.05   | 8.04  | 7.77   | 7.62  | 7.73   | 7.78  | 8.00   | 7.75  | 7.68   | 7.89  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.31    | 0.39  | 0.35   | 0.33  | 0.35   | 0.39  | 0.29   | 0.29  | 0.30   | 0.32  | 0.33   | 0.79  | 0.54   | 0.59  | 0.25   | 0.24  | 0.31   | 0.27  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| SrO                            | 0.06    | 0.07  | 0.10   | 0.05  | 0.07   | 0.08  | 0.11   | 0.08  | 0.08   | 0.07  | 0.08   | 0.08  | 0.03   | 0.07  | 0.05   | 0.09  | 0.05   | 0.08  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Total                          | 98.09   | 98.36 | 98.83  | 98.86 | 98.81  | 98.62 | 98.94  | 98.99 | 99.43  | 99.03 | 98.92  | 98.81 | 98.74  | 98.72 | 98.50  | 98.49 | 98.38  | 98.50 |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Si                             | 10.75   | 10.75 | 10.75  | 10.74 | 10.84  | 10.85 | 10.82  | 10.81 | 10.64  | 10.60 | 10.50  | 10.54 | 10.45  | 10.48 | 10.65  | 10.69 | 10.68  | 10.63 |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Al                             | 5.20    | 5.19  | 5.23   | 5.21  | 5.12   | 5.11  | 5.13   | 5.13  | 5.31   | 5.35  | 5.45   | 5.40  | 5.41   | 5.43  | 5.30   | 5.28  | 5.28   | 5.29  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Ti                             | 0.00    | 0.01  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.01   | 0.00  | 0.00   | 0.00  | 0.00   | 0.01  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Σ                              | 15.96   | 15.94 | 15.98  | 15.95 | 15.96  | 15.96 | 15.95  | 15.95 | 15.95  | 15.95 | 15.95  | 15.94 | 15.87  | 15.92 | 15.96  | 15.97 | 15.96  | 15.93 |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Fe <sup>2+</sup>               | 0.02    | 0.02  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.02  | 0.01   | 0.00  | 0.01   | 0.04  | 0.18   | 0.10  | 0.00   | 0.01  | 0.04   | 0.06  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Ca                             | 1.28    | 1.29  | 1.28   | 1.28  | 1.23   | 1.20  | 1.26   | 1.29  | 1.30   | 1.32  | 1.40   | 1.32  | 1.34   | 1.33  | 1.28   | 1.28  | 1.28   | 1.29  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Na                             | 2.70    | 2.68  | 2.61   | 2.73  | 2.70   | 2.73  | 2.69   | 2.64  | 2.81   | 2.82  | 2.73   | 2.69  | 2.74   | 2.75  | 2.81   | 2.72  | 2.70   | 2.78  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| K                              | 0.07    | 0.09  | 0.08   | 0.08  | 0.08   | 0.09  | 0.07   | 0.07  | 0.07   | 0.07  | 0.08   | 0.18  | 0.13   | 0.14  | 0.06   | 0.06  | 0.07   | 0.06  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Sr                             | 0.01    | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.00   | 0.01  | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Σ                              | 4.07    | 4.09  | 4.00   | 4.10  | 4.04   | 4.04  | 4.04   | 4.02  | 4.20   | 4.22  | 4.23   | 4.24  | 4.39   | 4.32  | 4.16   | 4.08  | 4.10   | 4.20  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Cations                        | 20.02   | 20.04 | 19.98  | 20.05 | 19.99  | 20.00 | 19.98  | 19.97 | 20.14  | 20.17 | 20.18  | 20.18 | 20.26  | 20.24 | 20.12  | 20.05 | 20.06  | 20.13 |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Ab                             | 66.70   | 66.10 | 65.70  | 66.70 | 67.40  | 68.00 | 66.90  | 66.10 | 67.20  | 67.00 | 64.90  | 64.10 | 65.20  | 65.30 | 67.80  | 67.10 | 66.70  | 67.20 |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| An                             | 31.60   | 31.70 | 32.30  | 31.40 | 30.60  | 29.80 | 31.40  | 32.20 | 31.10  | 31.30 | 33.30  | 31.50 | 31.80  | 31.50 | 30.80  | 31.50 | 31.50  | 31.30 |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |
| Or                             | 1.80    | 2.20  | 2.00   | 1.90  | 2.00   | 2.20  | 1.70   | 1.70  | 1.70   | 1.80  | 1.80   | 1.80  | 1.80   | 3.20  | 1.40   | 1.40  | 1.80   | 1.50  |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |  |  |  |  |  |

Tabela 30: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-013-RC (biotita granulito fêlsico).

| Análise                            | 1.1     | 1.2    | 1.3    | 1.4    | 1.5   | 1b.1  | 1b.2  | 2.1    | 2.2    | 2.3    | 2.4    | 3.1   | 3.2   | 3.3    | 3.4    | 4.1    | 4.2   | 4.3    | 4.4    | 4.5    | 4.6    | 4.7    | 4.8    | 4.9    | 5.1    | 5.2    | 5.3    | 5.4    |       |
|------------------------------------|---------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
|                                    | posição | centro | centro | centro | borda | borda | borda | borda  | centro | centro | centro | borda | borda | centro | centro | centro | borda | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | centro | borda  | centro | centro | borda |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 59.81   | 59.16  | 59.86  | 59.35  | 58.34 | 58.40 | 57.29 | 59.41  | 58.83  | 59.47  | 59.26  | 58.07 | 59.31 | 58.58  | 59.24  | 59.11  | 59.23 | 58.32  | 58.92  | 59.01  | 59.59  | 58.84  | 59.49  | 58.14  | 58.63  | 59.90  | 58.87  | 58.64  |       |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0.01    | 0.01   | 0.03   | 0.01   | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.02   | 0.00   | 0.03   | 0.00   | 0.02  | 0.01  | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.01  | 0.03   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.03   | 0.00   | 0.03   | 0.00  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 25.54   | 25.82  | 25.74  | 25.72  | 25.62 | 26.03 | 25.96 | 25.58  | 25.59  | 25.63  | 25.79  | 25.76 | 25.39 | 25.75  | 25.41  | 25.70  | 25.51 | 25.66  | 25.71  | 25.53  | 24.52  | 25.34  | 25.35  | 25.62  | 25.90  | 25.44  | 25.39  | 25.77  |       |
| <b>FeO</b>                         | 0.10    | 0.11   | 0.04   | 0.15   | 0.08  | 0.14  | 0.07  | 0.10   | 0.10   | 0.01   | 0.11   | 0.10  | 0.08  | 0.07   | 0.25   | 0.14   | 0.10  | 0.07   | 0.09   | 0.09   | 0.07   | 0.08   | 0.08   | 0.09   | 0.08   | 0.13   | 0.21   | 0.10   |       |
| <b>CaO</b>                         | 6.99    | 7.09   | 7.03   | 7.19   | 6.98  | 7.38  | 7.34  | 7.11   | 6.97   | 7.14   | 7.27   | 7.06  | 7.04  | 7.00   | 6.95   | 7.13   | 7.03  | 6.98   | 7.19   | 7.00   | 6.34   | 6.81   | 6.79   | 7.16   | 7.39   | 6.78   | 6.90   | 7.12   |       |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 7.54    | 7.38   | 7.53   | 7.49   | 7.58  | 7.50  | 7.24  | 7.46   | 7.50   | 7.42   | 7.34   | 7.37  | 7.32  | 7.41   | 7.40   | 7.33   | 7.38  | 7.53   | 7.33   | 7.49   | 4.44   | 7.54   | 7.60   | 7.30   | 7.26   | 7.58   | 7.56   | 7.34   |       |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0.38    | 0.41   | 0.39   | 0.29   | 0.36  | 0.30  | 0.35  | 0.39   | 0.41   | 0.38   | 0.37   | 0.37  | 0.45  | 0.46   | 0.39   | 0.43   | 0.41  | 0.44   | 0.29   | 0.38   | 4.34   | 0.44   | 0.47   | 0.35   | 0.37   | 0.43   | 0.40   | 0.36   |       |
| <b>StrO</b>                        | 0.10    | 0.10   | 0.10   | 0.08   | 0.15  | 0.05  | 0.08  | 0.09   | 0.13   | 0.09   | 0.11   | 0.11  | 0.11  | 0.07   | 0.08   | 0.09   | 0.10  | 0.09   | 0.08   | 0.10   | 0.10   | 0.02   | 0.12   | 0.15   | 0.08   | 0.10   | 0.07   | 0.09   |       |
| <b>Total</b>                       | 100.47  | 100.08 | 100.72 | 100.29 | 99.13 | 99.80 | 98.35 | 100.15 | 99.53  | 100.16 | 100.25 | 98.86 | 99.71 | 99.36  | 99.74  | 99.96  | 99.77 | 99.12  | 99.63  | 99.58  | 99.42  | 99.10  | 99.92  | 98.82  | 99.72  | 100.35 | 99.42  | 99.42  |       |
| <b>Si</b>                          | 10.63   | 10.57  | 10.62  | 10.58  | 10.53 | 10.48 | 10.43 | 10.60  | 10.57  | 10.61  | 10.57  | 10.51 | 10.63 | 10.54  | 10.62  | 10.57  | 10.61 | 10.53  | 10.57  | 10.59  | 10.80  | 10.61  | 10.64  | 10.53  | 10.52  | 10.66  | 10.59  | 10.54  |       |
| <b>Al</b>                          | 5.35    | 5.43   | 5.38   | 5.40   | 5.45  | 5.50  | 5.57  | 5.38   | 5.42   | 5.38   | 5.42   | 5.49  | 5.36  | 5.46   | 5.36   | 5.42   | 5.38  | 5.46   | 5.43   | 5.40   | 5.24   | 5.38   | 5.34   | 5.46   | 5.47   | 5.33   | 5.38   | 5.46   |       |
| <b>Ti</b>                          | 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   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |       |
| <b>Σ</b>                           | 15.98   | 16.00  | 16.00  | 15.98  | 15.99 | 15.98 | 16.00 | 15.98  | 15.99  | 15.99  | 15.99  | 16.00 | 15.99 | 16.00  | 15.98  | 15.99  | 15.99 | 16.00  | 16.00  | 15.99  | 16.04  | 15.99  | 15.98  | 15.99  | 15.99  | 15.99  | 15.97  | 16.00  |       |
| <b>Fe<sup>2+</sup></b>             | 0.02    | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.01  | 0.02  | 0.01  | 0.02   | 0.01   | 0.00   | 0.02   | 0.02  | 0.01  | 0.01   | 0.04   | 0.02   | 0.02  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.03   | 0.02  |
| <b>Ca</b>                          | 1.33    | 1.36   | 1.34   | 1.37   | 1.35  | 1.42  | 1.43  | 1.36   | 1.34   | 1.36   | 1.39   | 1.37  | 1.35  | 1.35   | 1.34   | 1.37   | 1.35  | 1.35   | 1.38   | 1.35   | 1.23   | 1.32   | 1.30   | 1.39   | 1.42   | 1.29   | 1.33   | 1.37   |       |
| <b>Na</b>                          | 2.60    | 2.56   | 2.59   | 2.59   | 2.65  | 2.61  | 2.56  | 2.58   | 2.62   | 2.57   | 2.54   | 2.59  | 2.54  | 2.59   | 2.57   | 2.54   | 2.56  | 2.64   | 2.55   | 2.61   | 1.56   | 2.64   | 2.64   | 2.56   | 2.52   | 2.61   | 2.64   | 2.56   |       |
| <b>K</b>                           | 0.09    | 0.09   | 0.09   | 0.07   | 0.08  | 0.07  | 0.08  | 0.09   | 0.09   | 0.09   | 0.08   | 0.09  | 0.10  | 0.11   | 0.09   | 0.10   | 0.09  | 0.10   | 0.07   | 0.09   | 1.01   | 0.10   | 0.11   | 0.08   | 0.08   | 0.10   | 0.09   | 0.08   |       |
| <b>Sr</b>                          | 0.01    | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01  | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |       |
| <b>Σ</b>                           | 4.04    | 4.03   | 4.03   | 4.06   | 4.12  | 4.13  | 4.09  | 4.06   | 4.08   | 4.03   | 4.04   | 4.07  | 4.02  | 4.06   | 4.04   | 4.04   | 4.03  | 4.11   | 4.02   | 4.06   | 3.82   | 4.07   | 4.07   | 4.07   | 4.05   | 4.03   | 4.10   | 4.04   |       |
| <b>Cations</b>                     | 20.03   | 20.03  | 20.03  | 20.04  | 20.10 | 20.11 | 20.09 | 20.04  | 20.06  | 20.02  | 20.03  | 20.07 | 20.01 | 20.07  | 20.03  | 20.03  | 20.02 | 20.10  | 20.02  | 20.05  | 19.85  | 20.06  | 20.05  | 20.06  | 20.04  | 20.02  | 20.07  | 20.04  |       |
| <b>Ab</b>                          | 64.70   | 63.80  | 64.50  | 64.30  | 64.90 | 63.70 | 62.80 | 64.00  | 64.00  | 63.90  | 63.30  | 64.00 | 63.60 | 64.00  | 64.40  | 63.40  | 64.00 | 64.50  | 63.80  | 64.50  | 41.10  | 65.00  | 65.20  | 63.60  | 62.70  | 65.30  | 64.90  | 63.80  |       |
| <b>An</b>                          | 33.20   | 33.80  | 33.30  | 34.10  | 33.00 | 34.60 | 35.20 | 33.70  | 33.10  | 34.00  | 34.60  | 33.90 | 33.80 | 33.40  | 33.40  | 34.10  | 33.70 | 33.00  | 34.60  | 33.30  | 32.50  | 32.50  | 32.20  | 34.40  | 35.30  | 32.30  | 32.80  | 34.20  |       |
| <b>Or</b>                          | 2.10    | 2.30   | 2.20   | 1.60   | 2.00  | 1.70  | 2.00  | 2.20   | 2.30   | 2.20   | 2.10   | 2.10  | 2.60  | 2.60   | 2.20   | 2.50   | 2.30  | 2.50   | 1.70   | 2.20   | 26.50  | 2.50   | 2.60   | 2.00   | 2.10   | 2.40   | 2.30   | 2.10   |       |

Tabela 31: Análises químicas de plagioclásio da amostra CI-019-RA (biotita granulito fêlsico).

| Análise                            | 1.1     |        | 1.2    |        | 1.3    |        | 1.5    |        | 2.1    |        | 2.2    |       | 2.3    |       | 3.1    |       | 3.2    |       | 3.3    |       | 3.4    |       |  |
|------------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--|
|                                    | Posição | borda  | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda  | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda | centro | borda |  |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>             | 59.76   | 60.22  | 60.35  | 59.42  | 59.87  | 59.69  | 59.52  | 59.54  | 60.58  | 59.82  | 60.40  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>TiO<sub>2</sub></b>             | 0.04    | 0.01   | 0.00   | 0.04   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.02   | 0.08   | 0.00   | 0.03   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 26.18   | 25.88  | 25.72  | 26.46  | 26.57  | 26.27  | 26.07  | 26.34  | 25.78  | 25.84  | 26.01  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | 0.07    | 0.10   | 0.07   | 0.07   | 0.15   | 0.06   | 0.14   | 0.05   | 0.09   | 0.07   | 0.07   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>MnO</b>                         | 0.00    | 0.00   | 0.00   | 0.03   | 0.00   | 0.00   | 0.03   | 0.02   | 0.00   | 0.03   | 0.00   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>MgO</b>                         | 0.00    | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>CaO</b>                         | 7.21    | 7.21   | 6.95   | 7.67   | 7.56   | 7.33   | 7.44   | 7.48   | 6.82   | 7.28   | 7.11   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>             | 7.06    | 7.12   | 7.12   | 6.66   | 6.98   | 7.03   | 7.01   | 6.92   | 7.21   | 7.07   | 7.26   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>              | 0.38    | 0.38   | 0.37   | 0.32   | 0.31   | 0.33   | 0.35   | 0.29   | 0.35   | 0.34   | 0.30   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>BaO</b>                         | 0.05    | 0.05   | 0.00   | 0.07   | 0.04   | 0.02   | 0.03   | 0.07   | 0.00   | 0.00   | 0.01   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>SrO</b>                         | 0.19    | 0.15   | 0.13   | 0.13   | 0.14   | 0.18   | 0.14   | 0.16   | 0.15   | 0.15   | 0.13   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Total</b>                       | 100.93  | 101.13 | 100.71 | 100.87 | 101.62 | 100.92 | 100.74 | 100.91 | 101.07 | 100.60 | 101.33 |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Si</b>                          | 10.57   | 10.63  | 10.67  | 10.52  | 10.52  | 10.56  | 10.56  | 10.54  | 10.68  | 10.61  | 10.63  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Al</b>                          | 5.45    | 5.38   | 5.36   | 5.52   | 5.50   | 5.47   | 5.45   | 5.49   | 5.35   | 5.40   | 5.39   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Fe<sup>3+</sup></b>             | 0.01    | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.01   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Ti</b>                          | 0.01    | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Σ</b>                           | 16.04   | 16.02  | 16.04  | 16.05  | 16.04  | 16.04  | 16.02  | 16.04  | 16.05  | 16.02  | 16.03  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Mn</b>                          | 0.00    | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Mg</b>                          | 0.00    | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Ca</b>                          | 1.37    | 1.36   | 1.32   | 1.46   | 1.42   | 1.39   | 1.41   | 1.42   | 1.29   | 1.38   | 1.34   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Na</b>                          | 2.42    | 2.44   | 2.44   | 2.29   | 2.38   | 2.41   | 2.41   | 2.38   | 2.46   | 2.43   | 2.48   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>K</b>                           | 0.09    | 0.09   | 0.08   | 0.07   | 0.07   | 0.07   | 0.08   | 0.07   | 0.08   | 0.08   | 0.07   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Ba</b>                          | 0.00    | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.01   | 0.00   | 0.00   | 0.00   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Sr</b>                          | 0.02    | 0.02   | 0.01   | 0.01   | 0.01   | 0.02   | 0.01   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.01   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Σ</b>                           | 3.90    | 3.91   | 3.85   | 3.83   | 3.89   | 3.90   | 3.92   | 3.89   | 3.85   | 3.92   | 3.90   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Cations</b>                     | 19.94   | 19.93  | 19.89  | 19.88  | 19.93  | 19.94  | 19.94  | 19.93  | 19.90  | 19.94  | 19.93  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Ab</b>                          | 62.50   | 62.70  | 63.50  | 60.00  | 61.40  | 62.20  | 61.80  | 61.50  | 64.30  | 62.50  | 63.80  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>An</b>                          | 35.30   | 35.10  | 34.30  | 38.20  | 36.80  | 35.90  | 36.20  | 36.70  | 33.60  | 35.60  | 34.50  |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |
| <b>Or</b>                          | 2.20    | 2.20   | 2.20   | 1.90   | 1.80   | 1.90   | 2.00   | 1.70   | 2.00   | 2.00   | 1.70   |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |  |

## APÊNDICE G - ANÁLISES ISOTÓPICAS

### ANÁLISES ISOTÓPICAS RB-SR E SM-ND

Foram analisadas sete amostras representativas dos litotipos do Complexo Itatins. Na tabela abaixo são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 32: Razões isotópicas  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  em rocha total

| AMOSTRA    | MATERIAL                  | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | erro (2 $\sigma$ ) | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ | erro (2 $\sigma$ ) | $\epsilon_{\text{Nd}(0)}$ |
|------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------|---------------------------|
| CI-011-RD  | biotita granulito félsico | 0.728089                        | 0.000019           | 0.511154                          | 0.000003           | -28.96                    |
| CI-012-RC  | leucossoma                | 0.746208                        | 0.000018           | 0.511321                          | 0.000004           | -25.69                    |
| CI-013-RB  | leucossoma                | 0.729199                        | 0.000017           | 0.511222                          | 0.000004           | -27.62                    |
| CI-019-RA  | biotita granulito félsico | 0.713958                        | 0.000020           | 0.511453                          | 0.000006           | -23.12                    |
| CI-019-RB1 | leucossoma                | 0.718735                        | 0.000015           | 0.511118                          | 0.000003           | -29.65                    |
| CI-020-RA  | biotita granulito félsico | 0.720408                        | 0.000019           | 0.511263                          | 0.000003           | -26.83                    |
| CI-023-RB1 | biotita granulito félsico | 0.716739                        | 0.000018           | 0.511038                          | 0.000004           | -31.2                     |

## ANÁLISES ISOTÓPICAS COM ESPECTROMETRIA DE MASSA EM PLASMA DE INDUÇÃO ACOPLADA (MULTI-COLETOR) POR ABLAÇÃO A LASER (LA-ICP-MS)

Cristais de zircão foram analisados através do método de LA-ICP-MS para determinação das razões isotópicas no sistema U-Pb. Os dados foram obtidos seguindo-se duas metodologias. A primeira baseou-se na seleção de cristais de zircão a partir de concentrados preparados nas dependências do IGc-USP (CPGEO). Foram escolhidas três amostras de biotita granulito félsico (CI-011-RD, CI-013-RA e CI-019-RA). Nas amostras determinou-se a idade do protolito e idade do metamorfismo granulítico.

A segunda técnica baseou-se na análise de cristais de zircão em lâmina delgada, visando correlacionar as relações texturais dos cristais com as idades obtidas. Para essa técnica foram selecionadas quatro amostras do biotita granulito félsico (CI-011-RD, CI-012-RB, CI-013-RA e CI-019-RA).

Os resultados são apresentados a seguir.

:

ANÁLISES NOS MOUNTS

Tabela 33: Análises isotópicas em zircão da amostra CI-011-RD (biotita granulito félsico)

| Análise | Posição | <sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> (%) | <sup>206</sup> Pb* (ppm) | Th (ppm) | U (ppm) | Th/U  | Razões isotópicas |        |         |                 | Idades                    |         |                           |         |              |               |     |
|---------|---------|------------------------------------|--------------------------|----------|---------|-------|-------------------|--------|---------|-----------------|---------------------------|---------|---------------------------|---------|--------------|---------------|-----|
|         |         |                                    |                          |          |         |       | 207/235           | 1σ (%) | 206/238 | 1σ (%) corr (%) | T <sub>206/238</sub> (Ma) | 1σ (Ma) | T <sub>207/235</sub> (Ma) | 1σ (Ma) | Conc. 06/238 | Conc. 206/238 |     |
| 7.2     | borda   | 0.29                               | 20                       | 112      | 155     | 0.72  | 0.8281            | 0.0421 | 0.0987  | 0.0013          | 0.29                      | 607     | 8                         | 613     | 24           | 99            | 95  |
| 12      | borda   | 0.50                               | 23                       | 141      | 169     | 0.83  | 0.8353            | 0.0391 | 0.0993  | 0.0013          | 0.57                      | 611     | 8                         | 617     | 22           | 99            | 95  |
| 17      | borda   | 1.63                               | 22                       | 78       | 179     | 0.44  | 0.8326            | 0.0395 | 0.0997  | 0.0013          | 0.03                      | 613     | 8                         | 615     | 22           | 99            | 98  |
| 11      | borda   | 0.48                               | 28                       | 163      | 225     | 0.73  | 0.8366            | 0.0282 | 0.1007  | 0.0011          | 0.74                      | 618     | 6                         | 617     | 16           | 100           | 100 |
| 21      | borda   | 0.21                               | 35                       | 50       | 307     | 0.16  | 0.8405            | 0.0238 | 0.1008  | 0.0010          | 0.55                      | 619     | 6                         | 619     | 13           | 99            | 99  |
| 20      | borda   | 0.29                               | 52                       | 90       | 450     | 0.20  | 0.8497            | 0.0209 | 0.1015  | 0.0010          | 0.58                      | 624     | 6                         | 625     | 11           | 99            | 99  |
| 22      | borda   | 0.12                               | 41                       | 41       | 351     | 0.12  | 0.8427            | 0.0209 | 0.1015  | 0.0010          | 0.72                      | 624     | 6                         | 621     | 12           | 100           | 102 |
| 6.1     | borda   | 0.21                               | 23                       | 95       | 185     | 0.51  | 0.8742            | 0.0432 | 0.1022  | 0.0014          | 0.33                      | 627     | 8                         | 638     | 24           | 98            | 92  |
| 1.2     | borda   | 0.03                               | 193                      | 21       | 1833    | 0.01  | 0.8380            | 0.0148 | 0.1024  | 0.0008          | 0.25                      | 629     | 5                         | 618     | 8            | 101           | 108 |
| 9.2     | borda   | 0.30                               | 28                       | 73       | 240     | 0.30  | 0.8694            | 0.0344 | 0.1036  | 0.0012          | 0.75                      | 635     | 7                         | 635     | 19           | 100           | 100 |
| 10      | borda   | 0.62                               | 27                       | 74       | 228     | 0.33  | 0.8532            | 0.0277 | 0.1038  | 0.0011          | 0.93                      | 637     | 7                         | 626     | 15           | 101           | 107 |
| 8.1     | borda   | 1.90                               | 17                       | 80       | 141     | 0.57  | 0.8764            | 0.0572 | 0.1038  | 0.0016          | 0.48                      | 637     | 9                         | 639     | 31           | 99            | 98  |
| 10      | borda   | 0.37                               | 17                       | 53       | 140     | 0.38  | 0.8522            | 0.0474 | 0.1041  | 0.0015          | 0.17                      | 638     | 9                         | 626     | 26           | 101           | 109 |
| 15      | núcleo  | 0.09                               | 86                       | 10       | 655     | 0.02  | 0.8702            | 0.0261 | 0.1042  | 0.0010          | 0.85                      | 639     | 6                         | 636     | 14           | 100           | 102 |
| 4.1     | núcleo  | 0.56                               | 108                      | 66       | 277     | 0.24  | 6.5053            | 0.1070 | 0.3587  | 0.0029          | 0.89                      | 1976    | 14                        | 2047    | 15           | 96            | 93  |
| 9.1     | núcleo  | 0.08                               | 103                      | 85       | 232     | 0.37  | 6.7104            | 0.1163 | 0.3631  | 0.0030          | 0.96                      | 1997    | 14                        | 2074    | 15           | 96            | 92  |
| 24      | borda   | 0.07                               | 51                       | 25       | 121     | 0.21  | 6.8504            | 0.1281 | 0.3736  | 0.0033          | 0.24                      | 2047    | 15                        | 2092    | 16           | 97            | 95  |
| 18      | núcleo  | 0.14                               | 32                       | 28       | 62      | 0.45  | 7.0833            | 0.1627 | 0.3783  | 0.0042          | 0.92                      | 2068    | 20                        | 2122    | 20           | 97            | 95  |
| 10      | núcleo  | 0.26                               | 61                       | 59       | 129     | 0.46  | 7.0452            | 0.1374 | 0.3796  | 0.0034          | 0.90                      | 2074    | 16                        | 2117    | 17           | 97            | 96  |
| 14      | núcleo  | 0.09                               | 99                       | 44       | 234     | 0.19  | 7.0524            | 0.1132 | 0.3872  | 0.0029          | 0.76                      | 2110    | 13                        | 2118    | 15           | 99            | 99  |
| 27      | núcleo  | 0.22                               | 40                       | 18       | 80      | 0.22  | 7.2687            | 0.1424 | 0.3930  | 0.0036          | 0.94                      | 2137    | 17                        | 2145    | 17           | 99            | 99  |
| 3.1     | núcleo  | 0.54                               | 118                      | 78       | 272     | 0.29  | 7.3346            | 0.1349 | 0.4030  | 0.0036          | 0.99                      | 2183    | 17                        | 2153    | 16           | 101           | 102 |
| 16      | borda   | 0.06                               | 48                       | 38       | 101     | 0.38  | 7.4358            | 0.1499 | 0.4031  | 0.0038          | 0.96                      | 2184    | 17                        | 2165    | 18           | 100           | 101 |
| 2.1     | núcleo  | 0.33                               | 38                       | 25       | 80      | 0.31  | 7.6552            | 0.1327 | 0.4163  | 0.0036          | 0.03                      | 2244    | 16                        | 2191    | 16           | 102           | 104 |
| 7.1     | núcleo  | 0.16                               | 73                       | 51       | 171     | 0.30  | 1.5787            | 0.0668 | 0.1387  | 0.0019          | 0.99                      | 837     | 10                        | 962     | 17           | 87            | 66  |
| 5.1     | núcleo  | 0.10                               | 29                       | 41       | 51      | 0.79  | 7.8555            | 0.2149 | 0.3968  | 0.0049          | 0.95                      | 2154    | 23                        | 2215    | 25           | 97            | 94  |
| 13      | núcleo  | 0.10                               | 115                      | 97       | 208     | 0.47  | 8.2991            | 0.1248 | 0.4139  | 0.0030          | 0.98                      | 2233    | 14                        | 2264    | 14           | 98            | 97  |
| 2.2     | borda   | 1.11                               | 19                       | 123      | 159     | 0.77  | 0.7959            | 0.0433 | 0.0962  | 0.0013          | 0.11                      | 592     | 8                         | 595     | 25           | 99            | 98  |
| 14      | borda   | 1.99                               | 22                       | 89       | 190     | 0.47  | 0.9059            | 0.0473 | 0.1074  | 0.0015          | 0.66                      | 658     | 9                         | 655     | 24           | 100           | 102 |
| 6.2     | núcleo  | 0.11                               | 33                       | 13       | 91      | 0.14  | 4.0687            | 0.0890 | 0.2612  | 0.0026          | 0.97                      | 1496    | 13                        | 1648    | 18           | 90            | 80  |
| 23      | núcleo  | 0.53                               | 18                       | 5        | 45      | 0.12  | 5.4104            | 0.1369 | 0.3231  | 0.0039          | 0.78                      | 1805    | 19                        | 1887    | 20           | 95            | 91  |
| 25      | núcleo  | 0.14                               | 41                       | 21       | 96      | 0.22  | 5.7015            | 0.1322 | 0.3420  | 0.0037          | 0.73                      | 1896    | 18                        | 1932    | 22           | 98            | 96  |
| 26      | núcleo  | 0.11                               | 58                       | 31       | 97      | 0.32  | 9.4280            | 0.1839 | 0.4536  | 0.0043          | 0.09                      | 2411    | 19                        | 2381    | 18           | 101           | 102 |
| 24      | núcleo  | 0.09                               | 49                       | 39       | 80      | 0.49  | 10.3301           | 0.2028 | 0.4603  | 0.0046          | 0.84                      | 2441    | 20                        | 2465    | 18           | 99            | 98  |
| 19      | núcleo  | 7.92                               | 1                        | -1       | 4       | -0.23 | 5.8298            | 0.1166 | 0.3236  | 0.0031          | 0.76                      | 1807    | 15                        | 1951    | 17           | 92            | 85  |
| 1.1     | núcleo  | 0.00                               | -12                      | -5       | -20     | 0.24  | 6.3652            | 0.1253 | 0.3465  | 0.0033          | 0.78                      | 1913    | 16                        | 2028    | 16           | 94            | 89  |

Tabela 34: Análises isotópicas em zircão da amostra CI-013-RA (biotita granulito fêlsico)

| Análise | Posição | Razões isotópicas                    |                                |        |       |      |                                      |        |                                      |        |          | Idades             |                    |               |                    |               |  |  |     |
|---------|---------|--------------------------------------|--------------------------------|--------|-------|------|--------------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|----------|--------------------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|--|--|-----|
|         |         | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ (%) | $^{206}\text{Pb}^*/\text{ppm}$ | Th ppm | U ppm | Th/U | $^{207}\text{Tl}/^{235}\text{U}$ (%) | Is (%) | $^{206}\text{Tl}/^{238}\text{U}$ (%) | Is (%) | corr (%) | $T_{206/238}$ (Ma) | $T_{207/235}$ (Ma) | $\sigma$ (Ma) | $T_{207/206}$ (Ma) | $\sigma$ (Ma) | Conc. $^{206}\text{Tl}/^{238}\text{U}$ | Conc. $^{206}\text{Tl}/^{238}\text{U}$ |     |
| 1.2     | núcleo  | 0.11                                 | 42                             | 30     | 89    | 0.34 | 7.1674                               | 0.1311 | 0.3891                               | 0.0030 | 0.39     | 2119               | 14                 | 2133          | 17                 | 2146          | 31                                     | 99                                     | 98  |
| 7.1     | núcleo  | 0.03                                 | 61                             | 31     | 130   | 0.24 | 7.2378                               | 0.1349 | 0.3896                               | 0.0032 | 0.01     | 2121               | 15                 | 2141          | 17                 | 2161          | 32                                     | 99                                     | 98  |
| 22.1    | núcleo  | 0.10                                 | 82                             | 40     | 178   | 0.23 | 7.2821                               | 0.1276 | 0.3904                               | 0.0030 | 0.42     | 2125               | 14                 | 2147          | 15                 | 2168          | 31                                     | 98                                     | 97  |
| 24.2    | núcleo  | 0.16                                 | 95                             | 38     | 209   | 0.18 | 7.2824                               | 0.1091 | 0.3932                               | 0.0027 | 0.46     | 2138               | 12                 | 2147          | 13                 | 2155          | 28                                     | 99                                     | 99  |
| 23.1    | núcleo  | 0.13                                 | 99                             | 64     | 214   | 0.30 | 7.2882                               | 0.1130 | 0.3932                               | 0.0027 | 0.05     | 2138               | 13                 | 2147          | 14                 | 2157          | 29                                     | 99                                     | 99  |
| 1.1     | borda   | 0.20                                 | 60                             | 30     | 123   | 0.24 | 7.2411                               | 0.1385 | 0.3952                               | 0.0032 | 0.48     | 2147               | 15                 | 2142          | 17                 | 2137          | 32                                     | 100                                    | 100 |
| 5.1     | núcleo  | 0.12                                 | 81                             | 47     | 163   | 0.29 | 7.2805                               | 0.1423 | 0.3953                               | 0.0033 | 0.88     | 2148               | 16                 | 2146          | 18                 | 2145          | 34                                     | 100                                    | 100 |
| 6.2     | borda   | 0.50                                 | 13                             | 74     | 95    | 0.78 | 8.0101                               | 0.0454 | 0.0964                               | 0.0015 | 0.02     | 593                | 9                  | 603           | 25                 | 638           | 136                                    | 98                                     | 92  |
| 10.3    | borda   | 0.32                                 | 19                             | 46     | 159   | 0.29 | 8.137                                | 0.0319 | 0.0977                               | 0.0011 | 0.76     | 601                | 7                  | 605           | 18                 | 619           | 97                                     | 99                                     | 97  |
| 20.1    | núcleo  | 0.04                                 | 101                            | 41     | 278   | 0.15 | 5.1614                               | 0.0788 | 0.2959                               | 0.0020 | 0.98     | 1671               | 10                 | 1846          | 13                 | 2050          | 30                                     | 90                                     | 81  |
| 16.2    | borda   | 0.24                                 | 37                             | 15     | 89    | 0.16 | 6.3273                               | 0.1020 | 0.3508                               | 0.0025 | 0.11     | 1938               | 12                 | 2022          | 14                 | 2109          | 30                                     | 95                                     | 91  |
| 18.2    | núcleo  | 0.18                                 | 81                             | 37     | 187   | 0.20 | 6.4166                               | 0.1034 | 0.3509                               | 0.0025 | 0.91     | 1939               | 12                 | 2035          | 14                 | 2133          | 29                                     | 95                                     | 90  |
| 12.1    | núcleo  | 0.08                                 | 76                             | 50     | 157   | 0.32 | 6.4568                               | 0.1086 | 0.3525                               | 0.0026 | 0.87     | 1947               | 12                 | 2040          | 14                 | 2136          | 30                                     | 95                                     | 91  |
| 24.1    | núcleo  | 0.07                                 | 79                             | 90     | 168   | 0.53 | 6.4324                               | 0.1044 | 0.3543                               | 0.0025 | 0.23     | 1955               | 12                 | 2037          | 14                 | 2121          | 30                                     | 95                                     | 92  |
| 25.1    | núcleo  | 0.19                                 | 81                             | 42     | 190   | 0.22 | 6.5407                               | 0.1054 | 0.3568                               | 0.0025 | 0.57     | 1967               | 12                 | 2051          | 14                 | 2138          | 30                                     | 95                                     | 92  |
| 16.1    | núcleo  | 0.12                                 | 86                             | 47     | 186   | 0.26 | 6.6678                               | 0.1119 | 0.3626                               | 0.0027 | 0.08     | 1995               | 13                 | 2068          | 15                 | 2143          | 31                                     | 96                                     | 93  |
| 15.1    | núcleo  | 0.09                                 | 39                             | 23     | 85    | 0.26 | 6.6103                               | 0.1122 | 0.3628                               | 0.0027 | 0.01     | 1996               | 13                 | 2061          | 15                 | 2127          | 31                                     | 96                                     | 93  |
| 4.1     | núcleo  | 0.14                                 | 76                             | 54     | 172   | 0.32 | 6.6565                               | 0.1246 | 0.3650                               | 0.0029 | 0.38     | 2006               | 14                 | 2067          | 16                 | 2128          | 32                                     | 97                                     | 94  |
| 6.1     | núcleo  | 0.06                                 | 97                             | 52     | 196   | 0.27 | 6.6918                               | 0.1284 | 0.3667                               | 0.0030 | 0.94     | 2014               | 14                 | 2072          | 17                 | 2129          | 32                                     | 97                                     | 94  |
| 21.2    | núcleo  | 0.10                                 | 86                             | 42     | 203   | 0.21 | 6.9094                               | 0.1038 | 0.3724                               | 0.0026 | 0.01     | 2041               | 12                 | 2100          | 13                 | 2158          | 28                                     | 97                                     | 94  |
| 19.2    | núcleo  | 0.32                                 | 95                             | 53     | 209   | 0.26 | 6.8406                               | 0.1077 | 0.3755                               | 0.0027 | 0.40     | 2055               | 13                 | 2091          | 14                 | 2127          | 29                                     | 98                                     | 96  |
| 12.2    | borda   | 0.96                                 | 6                              | 2      | 16    | 0.10 | 6.9498                               | 0.1113 | 0.3768                               | 0.0026 | 0.57     | 2061               | 12                 | 2105          | 14                 | 2148          | 29                                     | 97                                     | 95  |
| 3.1     | núcleo  | 0.13                                 | 79                             | 47     | 174   | 0.27 | 7.0479                               | 0.1365 | 0.3792                               | 0.0032 | 0.86     | 2073               | 15                 | 2118          | 18                 | 2161          | 35                                     | 97                                     | 95  |
| 10.2    | núcleo  | 0.38                                 | 88                             | 51     | 189   | 0.27 | 7.0116                               | 0.1145 | 0.3800                               | 0.0027 | 0.30     | 2076               | 13                 | 2113          | 14                 | 2149          | 30                                     | 98                                     | 96  |
| 14.1    | núcleo  | 0.40                                 | 26                             | 11     | 60    | 0.19 | 7.0066                               | 0.1121 | 0.3840                               | 0.0027 | 0.01     | 2095               | 13                 | 2112          | 14                 | 2129          | 29                                     | 99                                     | 98  |
| 9.1     | núcleo  | 0.09                                 | 74                             | 40     | 155   | 0.26 | 7.0570                               | 0.1427 | 0.3866                               | 0.0033 | 0.18     | 2107               | 15                 | 2119          | 17                 | 2130          | 34                                     | 99                                     | 98  |
| 21.1    | núcleo  | 0.18                                 | 39                             | 29     | 83    | 0.35 | 6.8295                               | 0.1224 | 0.3874                               | 0.0029 | 0.67     | 2111               | 14                 | 2090          | 15                 | 2069          | 35                                     | 101                                    | 102 |
| 19.1    | núcleo  | 0.06                                 | 85                             | 60     | 166   | 0.36 | 7.5232                               | 0.1210 | 0.4054                               | 0.0030 | 0.52     | 2194               | 14                 | 2176          | 15                 | 2159          | 31                                     | 100                                    | 101 |
| 11.1    | núcleo  | 0.32                                 | 97                             | 45     | 202   | 0.22 | 7.5874                               | 0.1240 | 0.4088                               | 0.0029 | 0.01     | 2209               | 13                 | 2183          | 14                 | 2159          | 30                                     | 101                                    | 102 |
| 8.2     | borda   | 0.06                                 | 87                             | 49     | 175   | 0.28 | 7.7806                               | 0.1487 | 0.4135                               | 0.0035 | 0.70     | 2231               | 16                 | 2206          | 17                 | 2183          | 33                                     | 101                                    | 102 |
| 18.1    | núcleo  | 0.48                                 | 57                             | 45     | 112   | 0.41 | 7.8187                               | 0.1530 | 0.4193                               | 0.0036 | 0.85     | 2257               | 16                 | 2210          | 18                 | 2167          | 37                                     | 102                                    | 104 |
| 13.1    | núcleo  | 0.06                                 | 61                             | 28     | 139   | 0.20 | 6.4596                               | 0.1012 | 0.3682                               | 0.0025 | 0.01     | 2021               | 12                 | 2040          | 14                 | 2060          | 29                                     | 99                                     | 98  |
| 2.1     | núcleo  | 0.34                                 | 13                             | 10     | 27    | 0.39 | 6.3655                               | 0.1311 | 0.3698                               | 0.0032 | 0.01     | 2029               | 15                 | 2028          | 18                 | 2026          | 37                                     | 100                                    | 100 |
| 10.1    | núcleo  | 0.08                                 | 30                             | 33     | 60    | 0.56 | 6.5806                               | 0.1106 | 0.3791                               | 0.0027 | 0.81     | 2072               | 13                 | 2057          | 14                 | 2042          | 29                                     | 100                                    | 101 |
| 17.1    | núcleo  | -0.08                                | -3                             | -1     | -6    | 0.14 | 6.2461                               | 0.0998 | 0.3449                               | 0.0024 | 0.54     | 1910               | 12                 | 2011          | 14                 | 2116          | 30                                     | 94                                     | 90  |
| 8.1     | núcleo  | -0.69                                | -8                             | -8     | -13   | 0.61 | 5.6473                               | 0.1799 | 0.3509                               | 0.0048 | 0.84     | 1939               | 23                 | 1923          | 28                 | 1907          | 64                                     | 100                                    | 101 |



Tabela 35: Análises isotópicas de zircão da amostra CI-019-RA (biotita granulito fêlsico)

| Análise | Posição | $^{206}\text{Pb}_c$ (%) | $^{206}\text{Pb}^*$ (ppm) | Th ppm | U ppm | Th/U | Razões isotópicas |              |         |              | Idades   |                    |               |                    |               |   |   |
|---------|---------|-------------------------|---------------------------|--------|-------|------|-------------------|--------------|---------|--------------|----------|--------------------|---------------|--------------------|---------------|---|---|
|         |         |                         |                           |        |       |      | 207/235           | $\sigma$ (%) | 206/238 | $\sigma$ (%) | corr (%) | $T_{206/238}$ (Ma) | $\sigma$ (Ma) | $T_{207/235}$ (Ma) | $\sigma$ (Ma) | Conc. $^{206}\text{Zr}/^{207}\text{Zr}$ | Conc. $^{206}\text{Zr}/^{207}\text{Zr}$ |
| 9.2     | borda   | 1.17                    | 7                         | 31     | 51    | 0.61 | 0.8103            | 0.0870       | 0.0968  | 0.0019       | 0.22     | 596                | 11            | 603                | 49            | 98                                      | 94                                      |
| 21.1    | borda   | 0.53                    | 16                        | 127    | 100   | 1.27 | 0.7948            | 0.0591       | 0.0971  | 0.0017       | 0.01     | 598                | 10            | 594                | 33            | 100                                     | 103                                     |
| 7.2     | borda   | 0.66                    | 7                         | 37     | 52    | 0.71 | 0.8485            | 0.0915       | 0.0972  | 0.0020       | 0.46     | 598                | 12            | 624                | 51            | 95                                      | 83                                      |
| 12.2    | borda   | 0.38                    | 12                        | 18     | 104   | 0.17 | 0.7988            | 0.0491       | 0.0990  | 0.0015       | 0.06     | 609                | 9             | 596                | 27            | 102                                     | 110                                     |
| 23.2    | borda   | 0.90                    | 13                        | 83     | 93    | 0.89 | 0.8045            | 0.0637       | 0.0991  | 0.0018       | 0.25     | 609                | 10            | 599                | 36            | 101                                     | 108                                     |
| 15.1    | borda   | 1.59                    | 8                         | 45     | 57    | 0.78 | 0.9066            | 0.1167       | 0.1003  | 0.0031       | 0.12     | 616                | 18            | 655                | 65            | 94                                      | 77                                      |
| 11.2    | borda   | 0.88                    | 8                         | 17     | 73    | 0.23 | 0.8503            | 0.0715       | 0.1005  | 0.0020       | 0.62     | 617                | 12            | 625                | 39            | 98                                      | 94                                      |
| 14.2    | borda   | 1.76                    | 5                         | 26     | 39    | 0.66 | 0.9437            | 0.1365       | 0.1008  | 0.0035       | 0.45     | 619                | 20            | 675                | 69            | 91                                      | 71                                      |
| 11.1    | núcleo  | 1.67                    | 2                         | 1      | 6     | 0.20 | 5.2962            | 0.1001       | 0.3101  | 0.0025       | 0.26     | 1741               | 13            | 1868               | 15            | 93                                      | 86                                      |
| 9.1     | núcleo  | 0.50                    | 13                        | 5      | 38    | 0.13 | 5.7306            | 0.0981       | 0.3301  | 0.0025       | 0.68     | 1839               | 12            | 1936               | 16            | 94                                      | 90                                      |
| 7.1     | núcleo  | 0.22                    | 70                        | 47     | 165   | 0.29 | 6.0690            | 0.1133       | 0.3360  | 0.0027       | 0.84     | 1867               | 13            | 1986               | 16            | 94                                      | 88                                      |
| 18.1    | núcleo  | 0.19                    | 54                        | 15     | 142   | 0.10 | 6.0765            | 0.1063       | 0.3418  | 0.0028       | 0.71     | 1895               | 13            | 1987               | 15            | 95                                      | 90                                      |
| 24.1    | núcleo  | 0.47                    | 14                        | 6      | 41    | 0.14 | 6.2167            | 0.1330       | 0.3423  | 0.0028       | 0.72     | 1898               | 14            | 2007               | 19            | 94                                      | 89                                      |
| 22.1    | núcleo  | 0.32                    | 55                        | 16     | 138   | 0.11 | 6.1151            | 0.1385       | 0.3430  | 0.0030       | 0.62     | 1901               | 14            | 1992               | 19            | 95                                      | 91                                      |
| 4.1     | borda   | 0.09                    | 56                        | 14     | 131   | 0.10 | 6.1681            | 0.1009       | 0.3449  | 0.0025       | 0.46     | 1910               | 12            | 2000               | 14            | 95                                      | 91                                      |
| 27.1    | núcleo  | 0.22                    | 20                        | 4      | 46    | 0.08 | 6.2024            | 0.1234       | 0.3486  | 0.0026       | 0.22     | 1928               | 13            | 2005               | 17            | 96                                      | 92                                      |
| 17.1    | núcleo  | 0.06                    | 58                        | 24     | 128   | 0.19 | 6.3410            | 0.1338       | 0.3493  | 0.0034       | 0.85     | 1931               | 16            | 2024               | 18            | 95                                      | 91                                      |
| 29.1    | núcleo  | 0.11                    | 68                        | 25     | 168   | 0.15 | 6.3016            | 0.1305       | 0.3566  | 0.0028       | 0.81     | 1966               | 13            | 2019               | 18            | 97                                      | 94                                      |
| 13.1    | núcleo  | 0.19                    | 54                        | 24     | 129   | 0.19 | 6.5632            | 0.1271       | 0.3579  | 0.0033       | 0.64     | 1972               | 15            | 2054               | 17            | 96                                      | 92                                      |
| 26.1    | núcleo  | 0.01                    | 75                        | 24     | 173   | 0.14 | 6.4780            | 0.1356       | 0.3581  | 0.0029       | 0.86     | 1973               | 14            | 2043               | 19            | 96                                      | 93                                      |
| 28.1    | núcleo  | 0.13                    | 43                        | 19     | 98    | 0.19 | 6.5543            | 0.1580       | 0.3582  | 0.0034       | 0.98     | 1974               | 16            | 2053               | 21            | 96                                      | 92                                      |
| 3.1     | núcleo  | 0.18                    | 53                        | 20     | 125   | 0.16 | 6.4393            | 0.1041       | 0.3611  | 0.0026       | 0.01     | 1987               | 12            | 2038               | 14            | 97                                      | 95                                      |
| 1.1     | borda   | 0.19                    | 81                        | 25     | 196   | 0.13 | 6.5939            | 0.1075       | 0.3645  | 0.0027       | 0.92     | 2004               | 13            | 2059               | 15            | 97                                      | 94                                      |
| 5.1     | núcleo  | 0.34                    | 29                        | 21     | 69    | 0.31 | 6.6044            | 0.1444       | 0.3648  | 0.0034       | 0.87     | 2005               | 16            | 2060               | 19            | 97                                      | 94                                      |
| 14.1    | núcleo  | 0.15                    | 45                        | 8      | 99    | 0.08 | 6.6176            | 0.1151       | 0.3702  | 0.0029       | 0.39     | 2031               | 14            | 2062               | 15            | 98                                      | 97                                      |
| 25.1    | núcleo  | 0.14                    | 60                        | 34     | 135   | 0.25 | 7.5242            | 0.1455       | 0.4102  | 0.0031       | 0.83     | 2216               | 14            | 2176               | 18            | 101                                     | 103                                     |
| 20.1    | núcleo  | 0.72                    | 63                        | 39     | 152   | 0.26 | 6.9239            | 0.1370       | 0.3881  | 0.0030       | 0.78     | 2114               | 14            | 2102               | 18            | 100                                     | 101                                     |
| 6.1     | núcleo  | 0.41                    | 14                        | 6      | 37    | 0.15 | 4.7839            | 0.0775       | 0.2905  | 0.0022       | 0.32     | 1644               | 11            | 1782               | 15            | 92                                      | 84                                      |
| 2.2     | borda   | 0.27                    | 39                        | 8      | 100   | 0.08 | 5.6030            | 0.0942       | 0.3156  | 0.0024       | 0.76     | 1768               | 12            | 1917               | 14            | 92                                      | 84                                      |
| 12.1    | núcleo  | 0.15                    | 73                        | 39     | 188   | 0.21 | 5.3780            | 0.0975       | 0.3062  | 0.0025       | 0.98     | 1722               | 13            | 1881               | 16            | 91                                      | 83                                      |
| 2.1     | núcleo  | 0.13                    | 41                        | 58     | 73    | 0.79 | 7.0633            | 0.1289       | 0.3583  | 0.0029       | 0.58     | 1974               | 14            | 2119               | 16            | 93                                      | 87                                      |
| 8.1     | núcleo  | 0.08                    | 41                        | 1      | 367   | 0.00 | 0.8647            | 0.0258       | 0.1060  | 0.0009       | 0.51     | 649                | 5             | 633                | 14            | 102                                     | 113                                     |
| 19.1    | borda   | 1.28                    | 8                         | 38     | 59    | 0.64 | 0.8329            | 0.0986       | 0.1073  | 0.0026       | 0.18     | 657                | 15            | 615                | 55            | 106                                     | 141                                     |
| 10.1    | núcleo  | -1.38                   | -1                        | 3      | 6     | 0.45 | 4.9535            | 0.0863       | 0.3000  | 0.0024       | 0.92     | 1691               | 12            | 1811               | 16            | 93                                      | 86                                      |
| 16.1    | núcleo  | -0.12                   | -6                        | -2     | -15   | 0.14 | 5.8195            | 0.1139       | 0.3276  | 0.0029       | 0.46     | 1827               | 14            | 1949               | 17            | 93                                      | 87                                      |
| 23.1    | núcleo  | -0.33                   | -6                        | -7     | -10   | 0.65 | 5.0412            | 0.1198       | 0.2865  | 0.0026       | 0.84     | 1624               | 12            | 1826               | 19            | 88                                      | 78                                      |

Análises “in-situ”:

Tabela 36: Análises isotópicas “in-situ” em zircão por LA-ICP-MS em biotita granulito fêlsico (CI-011-RD, 013-RA e 019-RA) e leucossoma (CI-012-RA).

| Amostra   | Análise | <sup>206</sup> Pb (cps) | <sup>238</sup> U (cps) | <sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb | 2σ    | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U | 2σ   | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U | 2σ    | corr (%) | Idades                                   |         |  |         |          |
|-----------|---------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------|-------|-------------------------------------|------|-------------------------------------|-------|----------|--|---------|--|---------|----------|
|           |         |                         |                        |                                      |       |                                     |      |                                     |       |          | <sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U (Ma) | 2σ (Ma) | <sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U (Ma) | 2σ (Ma) | disc (%) |
| CI-011-RD | 1       | 152100                  | 28400                  | 0.1351                               | 0.003 | 7.2                                 | 0.39 | 0.383                               | 0.009 | 0.7749   | 2091                                     | 39      | 2136                                     | 48      | 3.22     |
|           | 2       | 12580                   | 686                    | 0.1238                               | 0.004 | 4.32                                | 0.29 | 0.25                                | 0.01  | 0.8134   | 1437                                     | 50      | 1691                                     | 56      | 27.4     |
|           | 3       | 68200                   | 10630                  | 0.1293                               | 0.003 | 5.05                                | 0.28 | 0.284                               | 0.007 | 0.8435   | 1613                                     | 37      | 1828                                     | 49      | 22.7     |
|           | 4       | 22300                   | 1280                   | 0.1319                               | 0.004 | 6.51                                | 0.37 | 0.356                               | 0.009 | 0.5917   | 1967                                     | 41      | 2048                                     | 48      | 7.8      |
|           | 5       | 41400                   | 3410                   | 0.135                                | 0.004 | 6.68                                | 0.38 | 0.361                               | 0.01  | 0.766    | 1985                                     | 49      | 2073                                     | 50      | 8.8      |
|           | 6       | 36630                   | 2600                   | 0.1261                               | 0.003 | 4.78                                | 0.26 | 0.277                               | 0.007 | 0.6701   | 1577                                     | 35      | 1786                                     | 48      | 23.2     |
|           | 7       | 244                     | 274                    | 0.346                                | 0.055 | 8                                   | 1.4  | 0.168                               | 0.019 | 0.6299   | 980                                      | 100     | 2080                                     | 190     | 72.2     |
|           | 8       | 23000                   | 1829                   | 0.1407                               | 0.004 | 7.78                                | 0.42 | 0.402                               | 0.01  | 0.6989   | 2180                                     | 44      | 2205                                     | 50      | 2.5      |
| CI-012-RB | 1       | 43500                   | 14600                  | 0.1291                               | 0.003 | 6.11                                | 0.34 | 0.344                               | 0.009 | 0.7265   | 1906                                     | 40      | 1992                                     | 49      | 8.9      |
|           | 2       | 127300                  | 8070                   | 0.1306                               | 0.003 | 5.05                                | 0.3  | 0.283                               | 0.008 | 0.9029   | 1607                                     | 42      | 1825                                     | 51      | 23.7     |
|           | 3       | 90500                   | 19200                  | 0.1319                               | 0.003 | 6.58                                | 0.38 | 0.365                               | 0.009 | 0.8978   | 2003                                     | 44      | 2055                                     | 50      | 5.7      |
|           | 4       | 26210                   | 3750                   | 0.1342                               | 0.003 | 6.95                                | 0.39 | 0.376                               | 0.009 | 0.6698   | 2057                                     | 42      | 2104                                     | 49      | 4.4      |
|           | 5       | 17400                   | 1810                   | 0.1288                               | 0.004 | 4.38                                | 0.25 | 0.252                               | 0.008 | 0.5563   | 1449                                     | 38      | 1707                                     | 48      | 30.8     |
|           | 6       | 13190                   | 1360                   | 0.1279                               | 0.004 | 5.1                                 | 0.29 | 0.293                               | 0.007 | 0.5204   | 1656                                     | 34      | 1838                                     | 49      | 20       |
| CI-013-RA | 1       | 47000                   | 4130                   | 0.1381                               | 0.002 | 7.31                                | 0.13 | 0.384                               | 0.004 | 0.6886   | 2099                                     | 21      | 2148                                     | 16      | 4.9      |
|           | 2       | 25710                   | 1934                   | 0.1338                               | 0.002 | 5.18                                | 0.12 | 0.282                               | 0.005 | 0.6454   | 1598                                     | 24      | 1850                                     | 20      | 24.8     |
|           | 3       | 73110                   | 7290                   | 0.1353                               | 0.001 | 6.62                                | 0.1  | 0.353                               | 0.004 | 0.5691   | 1948                                     | 17      | 2063                                     | 13      | 9.85     |
|           | 4       | 52390                   | 5510                   | 0.1371                               | 0.001 | 6.67                                | 0.11 | 0.353                               | 0.004 | 0.569    | 1950                                     | 18      | 2069                                     | 14      | 10.7     |
|           | 5       | 45600                   | 3390                   | 0.1338                               | 0.002 | 6.2                                 | 0.11 | 0.337                               | 0.004 | 0.5355   | 1873                                     | 20      | 2005                                     | 16      | 13       |
|           | 6       | 40740                   | 4630                   | 0.1169                               | 0.002 | 3.57                                | 0.12 | 0.224                               | 0.006 | 0.9061   | 1300                                     | 32      | 1544                                     | 29      | 31.8     |
| CI-019-RA | 1       | 20400                   | 1310                   | 0.1214                               | 0.005 | 3.79                                | 0.31 | 0.224                               | 0.011 | 0.9394   | 1306                                     | 59      | 1556                                     | 82      | 32       |
|           | 2       | 30170                   | 2430                   | 0.1282                               | 0.003 | 4.74                                | 0.32 | 0.269                               | 0.009 | 0.9371   | 1531                                     | 47      | 1765                                     | 56      | 25.6     |
|           | 3       | 13050                   | 1560                   | 0.1364                               | 0.004 | 6.55                                | 0.39 | 0.348                               | 0.01  | 0.7116   | 1923                                     | 46      | 2054                                     | 53      | 12.2     |
|           | 4       | 17710                   | 887                    | 0.1356                               | 0.004 | 6.74                                | 0.37 | 0.363                               | 0.009 | 0.4008   | 1994                                     | 40      | 2078                                     | 47      | 8.7      |
|           | 5       | 14510                   | 708                    | 0.1269                               | 0.004 | 5.6                                 | 0.32 | 0.323                               | 0.008 | 0.5417   | 1802                                     | 38      | 1913                                     | 49      | 13.3     |
|           | 6       | 35490                   | 2800                   | 0.1257                               | 0.003 | 4.55                                | 0.25 | 0.265                               | 0.006 | 0.5236   | 1513                                     | 30      | 1744                                     | 47      | 25.4     |
|           | 7       | 18070                   | 1627                   | 0.1242                               | 0.004 | 4.39                                | 0.26 | 0.256                               | 0.007 | 0.6165   | 1469                                     | 33      | 1709                                     | 49      | 27.2     |