

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PETROLOGIA DO GABRO JOSÉ FERNANDES E SUA RELAÇÃO
TEMPORAL COM O MAGMATISMO MESOZOICO TOLEÍTICO E
ALCALINO NO ARCO DE PONTA GROSSA**

Vidyã Vieira de Almeida

Orientador: Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

São Paulo

2016

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

Almeida, Vidyã Vieira de

Petrologia do Gabro José Fernandes e sua relação temporal com o magmatismo mesozoico toleítico e alcalino no Arco de Ponta Grossa. - São Paulo, 2016.

261 p. : il + anexos + mapas.

Tese (Doutorado) : IGc/USP

Orient.: Janasi, Valdecir de Assis

1. Petrologia ígnea 2. Litogeoquímica 3. Geoquímica isotópica 4. Química mineral I. Título

Aos meus filhos Samuel e Arthur

Agradecimentos

O desenvolvimento e a conclusão deste trabalho só foram possíveis graças ao auxílio de muitas pessoas às quais expresso profundo agradecimento.

Ao Prof. Dr. Valdecir de Assis Janasi pela orientação, apoio, estímulo, compreensão e conselhos ao longo de todos esses anos, desde o mestrado. Obrigada, aprendi muito com o senhor!

Aos funcionários do IGc-USP em especial, Sandra Andrade, Liliane, Isabel, Paulo Mori, Ivone, Vinícius, Marcos Mansueto, Leandro, Samuel, Paulinho e vários outros.

Agradeço ao Prof. Dr. Larry Michael Heaman e ao pesquisador Barry Shaulis pela supervisão durante minha estadia na Universidade de Alberta, Canadá. Agradeço à geóloga Judy Schultz pelo acolhimento.

Agradeço à Profa. Maria Helena B.M. de Hollanda pela realização das datações Ar-Ar na Universidade de Berkeley.

Ao Prof. Dr. Rogério Guitarrari Azzone, pelo apoio e sugestões ao longo do trabalho.

À Profa. Dra. Luana Moreira Florisbal, pela amizade, conversas e sugestões sobre o tema.

Agradeço à CPRM-Serviço Geológico do Brasil, meu local de trabalho e o superintendente José Carlos Garcia (SUREG/SP) pela liberação parcial para a realização do doutorado, incluindo doutorado sanduíche. Faltam palavras para descrever todo o apoio, empenho e paciência da minha gerente Elizete Domingues Salvador durante o meu doutorado e finalização dos volumes. Obrigada!

Agradeço todos os meus amigos da GEREMI (SUREG/SP) pelo apoio e compreensão, em especial, Maurício, Fabrizio, Mariane, Luiz Gustavo, Felipe, Ivan, Francisco, Roberto, Anderson, Luiz Palmeira, Lígia, Angela, Sueli, Arivane, Priscila, Deborah, Alexandre, Eduardo, Rafael Ribeiro, Rafael, Jairo, Sérgio e vários outros...

Ao pessoal da pós-graduação, Alex, Natasha, Letícia, Andres, Santiago, Brenda e Laísa, obrigada pela convivência.

Aos grandes amigos que a geologia me deu: Lélia, Itamar, Fernanda, Eduardo, Patrícia e outros.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) agradeço ao suporte financeiro referente aos custos analíticos (processo 2012/06082-6).

Ao programa Ciência Sem Fronteiras (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (proc. CNPq 202043/2014-2) à bolsa de doutorado sanduíche na Universidade de Alberta, Canadá.

Agradeço ao meu marido Frederico Meira Faleiros, meus dois filhos Samuel e Arthur, meus pais e toda a minha família, pelo incentivo, paciência, compreensão e sacrifícios que fizeram para eu realizar o doutorado. Sem vocês eu não teria conseguido!

Resumo

O Gabro José Fernandes é um corpo com cerca de 3 km², representante do magmatismo alcalino da Província Magmática Paraná-Etendeka na região do Arco de Ponta Grossa. A intrusão está encaixada em rochas metassedimentares proterozoicas do Grupo Votuverava e apresenta considerável variedade litológica definida por rochas gabróicas, em parte cumuláticas, cortadas por diques alcalinos. A intrusão foi datada em 134.93±0.16 Ma pelo método U-Pb TIMS em zircão. Um dique de basalto com alto Ti-P-Sr apresenta idade U-Pb de 133.95±0.16 Ma, idêntica à idade ⁴⁰Ar/³⁹Ar *step-heating* em flogopita de dique de lamprófiro (133.7±0.1 Ma), indicando com dados robustos que o magmatismo toleítico e alcalino do Cretáceo Inferior são contemporâneos na região. A idade de cristalização de um dique de basalto andesítico é um pouco mais jovem (131.31±0.13 Ma), e está de acordo com dados ⁴⁰Ar/³⁹Ar *step-heating* da literatura, confirmando que o magmatismo básico toleítico perdurou por pelo menos 3 m.y. no Arco de Ponta Grossa.

As rochas do Gabro José Fernandes mostram evidências petrográficas, geoquímicas e isotópicas de evolução magmática em sistema aberto com acentuada contribuição crustal. As evidências petrográficas incluem zoneamentos minerais e texturas de desequilíbrio com a formação de Fe-enstatita em bordas de reação de olivina. A cristalização fracionada é um importante processo na evolução das rochas, e a correlação positiva entre SiO₂ e razões isotópicas de Sr-Pb e negativa com εNd indicam contaminação progressiva do magma com o fracionamento. As variações isotópicas identificadas em diques e rochas gabróicas indicam a existência de pulsos magmáticos com diferentes contribuições crustais. O zoneamento de elementos maiores observado em minerais é acompanhado pelos elementos traços. Bordas mais ricas em Fe e Ti de cristais de clinopiroxênio também apresentam maior concentração de elementos HFS e LILE. A isotopia *in situ* de Sr em plagioclásio mostra variações nas razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i, interpretadas como evidências de recargas da câmara magmática, enquanto os dados para clinopiroxênio revelam núcleos com textura de reabsorção com razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i mais baixas (<0.705) interpretadas como relíquias de antecristais que podem apresentar relação com o magma parental. De fato, as assinaturas isotópicas desses núcleos são compatíveis com as de fenocristais de diques de basanita, fornecendo indicações de um magma parental alcalino basanítico. A composição química do líquido em equilíbrio com núcleos de fenocristais de clinopiroxênio em diques de basanita é mais alcalina, com maiores teores de Nb e elementos terras raras em relação à estimada para os gabros

cumuláticos. A natureza do contaminante é consistente com rochas (meta)-sedimentares proterozoicas, como indicado pelo aumento das razões K_2O/Na_2O , Th/La e Th/Nb; a menor razão Th/U é indicativa de crosta superior e as idades modelo Nd T_{DM} mais antigas (1400-1200 Ma) indicam assimilação de crosta pré-cambriana. Modelamentos de assimilação e cristalização fracionada mostram que a diversidade isotópica é compatível com a curva de mistura entre magma inicial alcalino basanítico e rochas metassedimentares do Grupo Votuverava.

Abstract

The José Fernandes Gabbro is a ~3 km² intrusion related to the alkaline magmatism of the Paraná-Etendeka Magmatic Province in the region of the Ponta Grossa Arch, Brazil. The intrusion is enclosed in Proterozoic metasedimentary rocks of the Votuverava Group and is composed of varied types of gabbroic rocks, including cumulates, cut by alkaline dykes. It was dated at 134.93±0.16 Ma (TIMS U-Pb zircon). A high Ti-P-Sr basalt dyke has a U-Pb age of 133.95±0.16 Ma, identical to the phlogopite ⁴⁰Ar/³⁹Ar step-heating age of a lamprophyre dyke (133.7±0.1 Ma), indicating with robust data that tholeiitic and alkaline magmatism are coeval in the region. The crystallization age of a basaltic andesite dyke is slightly younger (131.31±0.13 Ma), in agreement with previous ⁴⁰Ar/³⁹Ar step-heating data from literature, confirming that the basic tholeiitic magmatism persisted for at least 3 m.y. in the Ponta Grossa Arch.

The José Fernandes Gabbro rocks show petrographic, geochemical and isotopic evidence for open-system processes with significant crustal contribution. The petrographic evidence includes mineral zoning and disequilibrium textures with the development of Fe-enstatite in reaction rims of olivine. Fractional crystallization is an important process in the evolution of the intrusion and positive correlation of SiO₂ with Sr-Pb initial ratios and negative correlation with εNd indicate a progressive contamination of the magma with fractionation. The variation of isotopic ratios identified in dykes and gabbroic rocks indicates the existence of magmatic pulses with distinct crustal contributions. The major element chemical zoning observed in minerals is coupled with variations in trace elements. Fe-Ti enriched rims from clinopyroxene show higher concentrations of other HFS elements and LILE. In situ Sr isotope determinations in plagioclase crystals locally show variations in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i interpreted as evidence for recharges in the magma chamber, while similar data for clinopyroxene show that cores with resorbed textures may have lower ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i (<0.705) interpreted as relicts of antecrysts that can be related with the parental magma. In fact, the isotopic signatures of these relicts are compatible with those of phenocrysts from basanite dykes, suggesting a basanitic parental magma. The composition of the liquid in equilibrium with phenocrysts from basanite dykes is more alkaline, with more concentration of Nb and rare earth elements, relative to that estimated for the cumulatic gabbros. The nature of the contaminant is consistent with (meta)-sedimentary rocks, as revealed by higher K₂O/Na₂O, Th/La and Th/Nb; lower Th/U is indicative of upper crust, and the older Nd

T_{DM} model ages (1400-1200 Ma) indicate assimilation of Precambrian crust. Assimilation fractional crystallization-mixing modelling shows that the isotopic diversity is consistent with a curve of mixing between a starting alkaline basanitic magma and metasedimentary rocks of the Votuverava Group.

ÍNDICE

PARTE I

1. Apresentação e Estruturação da Tese	1
2. Localização da área e acessos	2
3. Introdução ao Tema	3
4. Justificativas	4
5. Objetivos	5
6. Materiais e Métodos	6
6.1. <i>Pesquisa Bibliográfica</i>	6
6.2. <i>Compilação de Trabalhos Anteriores</i>	6
6.3. <i>Levantamentos de Campo e Amostragem</i>	6
6.4. <i>Análise Petrográfica</i>	6
6.5. <i>Química Mineral</i>	7
6.6. <i>Geoquímica de rocha total</i>	9
6.6.1. <i>Elementos maiores por FRX</i>	9
6.6.2. <i>Elementos traços por ICP-MS</i>	10
6.7. <i>Geoquímica Isotópica</i>	11
6.7.1. <i>Sr-Sr</i>	11
6.7.2. <i>Nd-Nd</i>	11
6.7.3. <i>Pb-Pb</i>	12
6.7.4. <i>FC-AFC-FCA and mixing modeler</i>	12
6.8. <i>Isotopia in situ</i>	13
6.8.1. <i>Isótopos de Sr, Pb e O</i>	13
6.9. <i>Geocronologia</i>	14
6.9.1. <i>U-Pb por ID-TIMS</i>	14
6.9.2. <i>Ar-Ar em plagioclásio e flogopita</i>	17
7. Geologia Regional	18
7.1. <i>Origem e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa</i>	18
7.2. <i>O magmatismo alcalino no Arco de Ponta Grossa</i>	20
7.3. <i>O Gabro José Fernandes e o Complexo Gábrico Bairro da Cruz</i>	24
7.4. <i>Idade do magmatismo alcalino no Arco de Ponta Grossa</i>	25
7.5. <i>A PMPE e o EDAPG</i>	25
7.5.1. <i>Geocronologia do EDAPG</i>	27
7.6. <i>Fontes mantélicas do magmatismo toleítico e alcalino no Arco de Ponta Grossa</i>	28
Referências	29

PARTE II

1. Gabro José Fernandes	42
2. Diques máficos do Arco de Ponta Grossa	46
<i>2.1. Diques de diabásio (Alinhamento de Guapiara)</i>	46
<i>2.2. Diques alcalinos</i>	53
Referências	55

PARTE III

1. Discussão integrada dos resultados	56
<i>1.1. O Gabro José Fernandes – Significado Petrológico</i>	56
<i>1.1.2. Evolução magmática em sistema aberto – evidências petrográficas</i>	56
<i>1.1.3. Condições de cristalização</i>	57
<i>1.1.4. Cristalização fracionada, AFC e mixing</i>	57
<i>1.1.5. Natureza do contaminante</i>	59
<i>1.1.6. Potenciais magmas parentais e fontes mantélicas geradoras do magmatismo</i>	59
<i>1.1.7. Relação temporal entre o Gabro José Fernandes e o magmatismo alcalino e toleítico mesozoico do Arco de Ponta Grossa</i>	60
2. Conclusões	61
Referências	62

PARTE IV

ANEXO A	67
ANEXO B	120
ANEXO C	176
ANEXO D	211

FIGURAS NÃO ANEXADAS

PARTE I

Figura 1. Mapa rodoviário com localização da região de ocorrência do Gabro José Fernandes e diques máficos amostrados.	2
Figura 2. Mapa simplificado do Arco de Ponta Grossa com a localização dos principais alinhamentos e do Gabro José Fernandes (JF)	4
Figura 3. Mesa de Wilfley em funcionamento.	15
Figura 4. Cristais de badeleíta obtidos no processo de separação em amostra do Gabro José Fernandes.	16
Figura 5. Cristais de zircão após processo de abrasão química.	17
Figura 6. Localização do Arco de Ponta Grossa e relação espacial com outros arqueamentos segundo Almeida (1986).	20
Figura 7. Províncias alcalinas da região centro-sudeste da plataforma brasileira com principais feições estruturais (Riccomini et al., 2005).	22
Figura 8. Mapa geológico esquemático da região das intrusões alcalinas do Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, Vale do Ribeira.	23
Figura 9. Variação isotópica (Sr-Nd) das intrusões alcalinas do Arco de Ponta Grossa com o campo de variação do magmatismo toleítico. Modificado de Gomes et al. (2011).	24
Figura 10. Reconstrução pré-drift da PMPE, mostrando o EDAPG, o Enxame de diques da Serra do Mar (EDSM) e o Enxame de diques de Florianópolis (EDF) com seu correspondente no continente africano, Namíbia.	27

PARTE II

Figura 1. Visão geral da região do Gabro com indicação de afloramentos. (a) Corte de estrada na BR-476.	43
Figura 2.	44
Figura 3. Mapa aeromagnetométrico com indicação das anomalias dipolares do Gabro José Fernandes e Complexo Bairro da Cruz.	45
Figura 4. Mapa geológico do Gabro José Fernandes com a localização dos pontos descritos.	45
Figura 5. (a) Blocos e matacões em lavra de saibro (ponto VA2). (b) Blocos e matacões enterrados no solo em corte de estrada (ponto VA7).	47
Figura 6. (a) Lavra de saibro com sill bastante intemperizado localizado na borda do Alinhamento de Guapiara. (b) Detalhe do contato da soleira com a Formação Turvo-Cajati. Ponto VA-001.	47
Figura 7. (a) Diques e soleiras com até 1 m de espessura com medidas estruturais. (b) Detalhe do contato do dique com a Formação Turvo-Cajati. Ponto E-FM-204.	48
Figura 8. Blocos e matacões de diabásio enterrados em solo. (a) ponto VA31. (b) ponto VA37.	49
Figura 9. (a) Amostra de dique de diabásio (ponto VA29). (b) Afloramento de dique composto por rocha com cor cinza esverdeado com pequenas porções com cor rósea (ponto E-FM-233).	49

- Figura 10. Montagem de seção delgada mostrando as ripas de plagioclásio associadas com agregados máficos compostos por cristais de clinopiroxênio associados com minerais opacos e subordinadamente olivina. Polarizadores cruzados. Lado maior da foto: 3 cm. 50
- Figura 11. Fotomicrografias dos diques de diabásio. 51
- Figura 12. Fenocristais de plagioclásio com textura tipo peneira. Em (a) a textura tipo peneira se concentra em borda sobrecrecida. Em (b) a textura se concentra no núcleo do fenocristal. Polarizadores cruzados. Lado maior das fotos: 6,3 mm. 52
- Figura 13. (a) Intercrescimentos micrográficos com quartzo (Qtz). Polarizadores cruzados. Lado maior da foto: 6,3 mm (b) Clorita (Chl) em borda de reação de clinopiroxênio (Cpx). Polarizadores paralelos. Lado maior da foto: 3,7 mm. (c) Imagem BSE de intercrescimento micrográfico. (d) Imagem BSE com detalhe do intercrescimento. 52
- Figura 14. Imagem BSE de minerais opacos com ilmenita (Ilm) e magnetita (Mt). 53
- Figura 15. Seção delgada escaneada de amostra proveniente de dique de flogopita lamprófiro datado por Ar-Ar. Amostra A-FM38B. Lado maior da foto: 2,5 cm. 54
- Figura 16. Fotomicrografias de flogopita lamprófiro, (a) Fenocristais-megacristais de clinopiroxênio. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 6,3 mm. (b) Fenocristal amarronzado de clinopiroxênio com borda mais escura. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 6,3 mm. 55
- Figura 17. Textura glomeroporfírica de dique alcalino com fenocristais de clinopiroxênio (Cpx) e ocelos preenchidos por analcima. Polarizadores cruzados. Lado maior da foto: 1,5 cm. 55

TABELAS NÃO ANEXADAS

- Tabela 1. Padrões analíticos utilizados em análises pontuais em microsonda eletrônica. 8
- Tabela 2. Limites de detecção (LD) médios e desvios padrões (sd) do LA-Q-ICPMS, NAP-Geoanalítica (Andrade et al. 2014). 9

PARTE I

1. Apresentação e Estruturação da Tese

A tese de doutorado apresenta o estudo petrológico do Gabro José Fernandes, localizado em Adrianópolis (PR) e sua relação temporal com diques máficos do Vale do Ribeira (SP-PR). O objetivo é estudar o significado do gabro no contexto do magmatismo alcalino e toleítico na região do Arco de Ponta Grossa, por meio da identificação das fontes mantélicas envolvidas, os processos atuantes na evolução dos magmas (e.g., contaminação crustal, cristalização fracionada, mistura de magmas) e sua relação temporal com outras ocorrências presentes na região.

A tese está dividida em quatro partes, sendo que a primeira (**Parte I**) apresenta a localização da área, introdução ao tema, justificativas, objetivos, materiais e métodos, juntamente com a revisão bibliográfica sobre o magmatismo toleítico e alcalino do Cretáceo Inferior da região do Arco de Ponta Grossa. A segunda parte (**Parte II**) apresenta dados de campo e imagens aerogeofísicas da região do Gabro José Fernandes e diques do Alinhamento de Guapiara, estes amostrados e selecionados com foco na obtenção de dados geocronológicos U-Pb e Ar-Ar. A terceira parte (**Parte III**) contém uma discussão integrada e conclusões do trabalho por meio dos resultados constantes nos três manuscritos científicos em anexo (**Parte IV**). O primeiro manuscrito (**Anexo A**) com o título “*Crustal contamination and its role in the petrogenesis of José Fernandes Gabbro, Paraná Magmatic Province, Brazil: evidence from whole-rock elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry*” apresenta dados inéditos obtidos em rochas do Gabro José Fernandes, incluindo petrografia, geoquímica elemental e isotopia Sr-Nd-Pb em rocha total, com discussões acerca de evolução magmática em sistema aberto, com evidências geoquímicas e isotópicas de AFC (*assimilation fractional crystallization*), juntamente com inferências sobre as características dos magmas parentais. O segundo manuscrito (**Anexo B**) com o título “*Signatures of parental melts and crustal processes constrained by in situ Sr-Pb isotopes and trace element distribution in minerals from the José Fernandes Gabbro, Ponta Grossa Arch, Brazil*” apresenta os dados de química mineral (elementos maiores, menores e traços), juntamente com resultados de isotopia Sr-Pb-O em minerais. O manuscrito mostra uma discussão acerca do significado dos zoneamentos químicos e isotópicos encontrados em minerais com implicações para a evolução do líquido e

para a identificação dos magmas parentais. O terceiro manuscrito (**Anexo C**) foi submetido ao *Journal of Volcanology and Geothermal Research* com o título “*Contemporaneous alkaline and tholeiitic magmatism in the Ponta Grossa Arch, Paraná-Etendeka Magmatic Province: constraints from precise U-Pb zircon/baddeleyite and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite dating of the José Fernandes Gabbro and mafic dykes*”. O manuscrito apresenta dados geocronológicos U-Pb e Ar-Ar obtidos em amostras do Gabro José Fernandes e diques máficos, com discussão acerca do significado das idades e sobre a relação temporal entre o magmatismo alcalino e toleítico mesozoico no Arco de Ponta Grossa. O **Anexo D** apresenta tabelas com resultados analíticos obtidos em microsonda eletrônica.

2. Localização da área e acessos

O Gabro José Fernandes está localizado no município de Adrianópolis (PR). O acesso principal de São Paulo para a região se dá pela rodovia federal BR-116 (Figura 1). De São Paulo até a cidade de Apiaí o acesso pode ser feito pela rodovia estadual Castelo Branco (SP-280) até a cidade de Tatuí, seguido das rodovias SP-127 e SP-250 e estrada da Ribeira (BR-476) até Adrianópolis. Os pontos de diques de diabásio e diques alcalinos amostrados e selecionados para datação U-Pb e Ar-Ar estão localizados no Vale do Ribeira e Vale do Paranapanema, Alinhamento de Guapiara, cujos principais acessos partindo de São Paulo ocorrem pela rodovia BR-116 e rodovia SP-280.

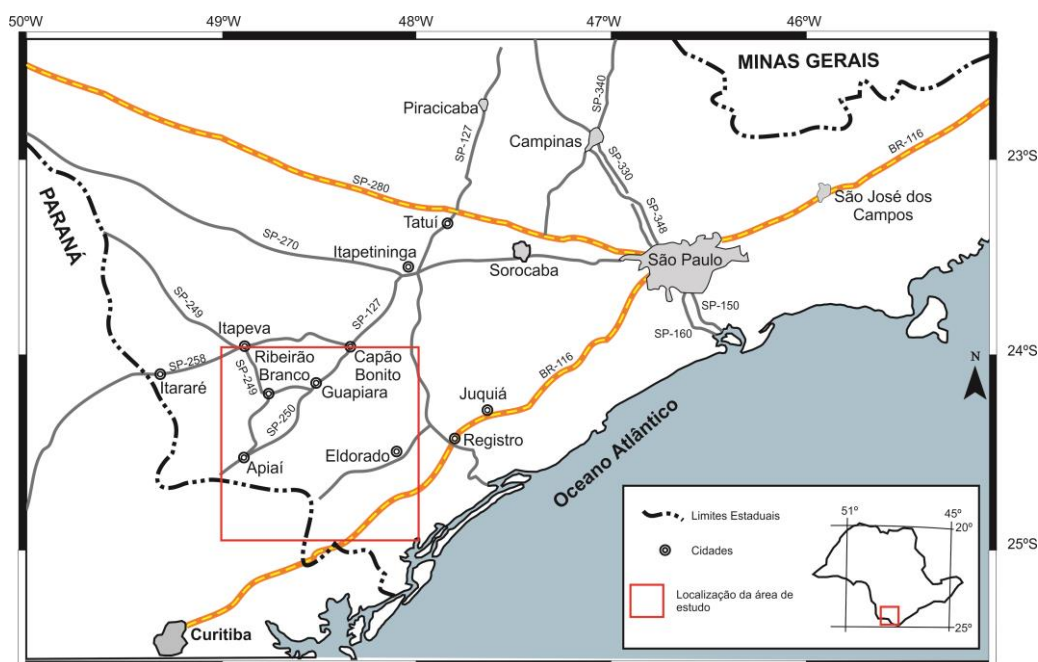


Figura 1. Mapa rodoviário com localização da região de ocorrência do Gabro José Fernandes e diques máficos amostrados.

3. Introdução ao Tema

A relação entre o magmatismo toleítico e alcalino em grandes províncias magmáticas (e.g., Deccan, Sibéria, Paraná-Etendeka) é um tema presente em estudos que abordam a diversidade de fontes mantélicas envolvidas na geração dos magmas, suas relações temporais e implicações geodinâmicas (e.g., Comin-Chiaramonti et al., 1997; Arndt et al., 1998; Wigand et al., 2004; Gibson et al., 2006). Na Província Magmática Paraná-Etendeka (PMPE), as intrusões alcalinas do Cretáceo Inferior ocorrem em maior concentração próximo às bordas da Bacia do Paraná (Paraguai, Arco de Ponta Grossa, no Brasil, e Uruguai) e em Damaraland, Namíbia. As ocorrências localizadas no Paraguai mostram idades que se concentram entre 139 a 118 Ma, sendo pré- e pós-magmatismo toleítico adjacente (Gibson et al., 2006; Comin-Chiaramonti et al., 2007; Gomes et al., 2013). No Uruguai, a idade do magmatismo varia entre 133 e 127 Ma (Stewart et al., 1996; Muzio et al., 1999), enquanto os complexos intrusivos na Namíbia (e.g., Messum) mostram idade concomitante com as lavas basálticas (132-130 Ma) (Wigand et al., 2004). Ocorre íntima relação entre rochas alcalinas e subalcalinas nas duas últimas regiões, com um importante componente crustal na evolução dos magmas (e.g., Milner & Le Roex, 1996; Harris et al., 1999; Lustrino et al., 2005). A fonte do magmatismo é um tema controverso com ampla discussão sobre a natureza das fontes mantélicas (e.g., Hawkesworth et al., 1988; White & Mackenzie, 1995). Enquanto a fonte do magmatismo alcalino é proveniente do manto litosférico (e.g., Ruberti et al., 2005), a fonte do magmatismo toleítico é atualmente atribuída ao manto astenosférico devido à impossibilidade do primeiro em produzir grandes volumes de magma basáltico (White & Mackenzie, 1995).

A região do Arco de Ponta Grossa no Vale do Ribeira (SP-PR), apresenta proximidade espacial entre o magmatismo toleítico da PMPE, representado pelo enxame de diques do Arco de Ponta Grossa (EDAPG) (Figura 2) e suítes-complexos alcalinos, cujas idades são, de forma geral, consideradas contemporâneas ao magmatismo toleítico (e.g. Jacupiranga, Juquiá, Pariquera-Açu, ~130 Ma) ou mais jovens, com idades referentes ao Cretáceo Superior (e.g. Cananéia, Tunas, Mato Preto) (Gomes et al., 2011). Diversos trabalhos sobre as ocorrências abordam sua petrogênese, com descrição de processos de diferenciação magmática e identificação de magmas parentais (e.g., Beccaluva et al., 1992; Morbidelli et al., 2000; Azzone et al., 2013). Também ocorrem estudos focados na geocronologia, principalmente com o método K-Ar (e.g., Sonoki & Garda, 1988). O Gabro José Fernandes (Figura 2), localizado no município de Adrianópolis (PR), é um corpo intrusivo nas rochas

metassedimentares do Supergrupo Açungui e que exibe expressiva variedade mineralógica-textural (Pieruceti, 1973; Pieruceti & Gomes, 1975). A intrusão, primeiramente relacionada ao magmatismo toleítico mesozoico por Pieruceti (1973), não havia sido tema de trabalhos geoquímicos, isotópicos ou de química mineral e o único dado geocronológico disponível é K-Ar de 190 ± 7 Ma presente em Teixeira (1982). Sendo assim, o presente trabalho visou o estudo mineralógico, petrológico e geocronológico da intrusão para entendimento do seu significado no contexto regional do magmatismo mesozoico no Arco de Ponta Grossa e sua relação temporal com a PMPE.

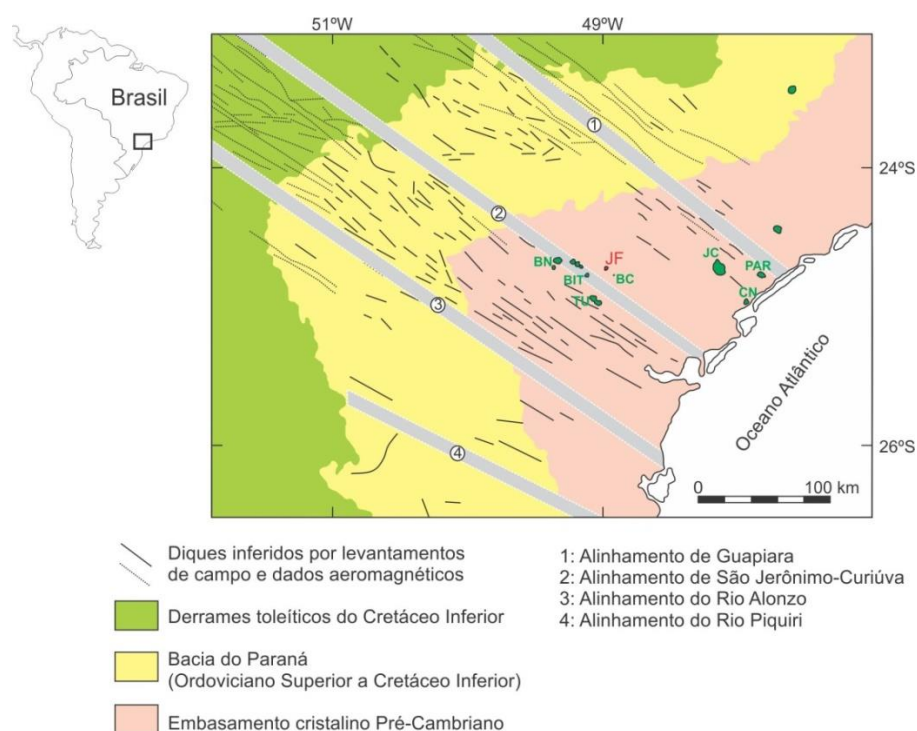


Figura 2. Mapa simplificado do Arco de Ponta Grossa com a localização dos principais alinhamentos e do Gabro José Fernandes (JF). Intrusões alcalinas: JC, Jacupiranga; PAR, Pariquera-Açu; CN, Cananéia; BN, Banhadão; BIT, Barra de Itapirapuã; TU, Tunas; BC, Bairro da Cruz. Mapa adaptado de Ruberti et al. (2005).

4. Justificativas

A região do Vale do Rio Ribeira (SP-PR) concentra um expressivo número de suítes/complexos alcalinos relacionados ao magmatismo mesozoico no Arco de Ponta Grossa (sudeste-sul do Brasil) em proximidade espacial com diques integrantes do EDAPG. O objetivo do presente trabalho consiste no estudo mineralógico e petrológico do Gabro José

Fernandes, localizado em Adrianópolis (PR), e sua relação temporal com diques máficos toleíticos e alcalinos da região. As ocorrências apresentam carência de estudos de geoquímica de rochas (elemental e isotópica), química mineral, além de datações geocronológicas por técnicas robustas (*e.g.*, métodos U-Pb e Ar-Ar) que contribuirão para a compreensão do significado da intrusão no contexto do magmatismo mesozoico da região e sua relação temporal com a PMPE.

5. Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

- a) Trabalhos de campo para descrição e coleta de amostras no Gabro José Fernandes e diques aflorantes no Alinhamento de Guapiara;
- b) Estudo petrográfico de detalhe das amostras mais favoráveis e isentas de alteração e caracterização textural, mineralógica e modal dos tipos litológicos;
- c) Determinação da composição química dos minerais em termos de elementos maiores e menores por microsonda eletrônica e elementos traços por LA-Q-ICPMS (*laser ablation quadrupole inductively coupled plasma mass spectrometry*);
- d) Análises litogeoquímicas de elementos maiores e menores por Fluorescência de Raios X (FRX) e elementos traços por ICP-MS nas amostras isentas de alteração;
- e) Análises de isótopos de Sr-Nd-Pb em rocha total e isotopia in situ Sr-Pb em minerais por LA-MC-ICPMS (*laser ablation multi collector inductively coupled plasma mass spectrometry*) para auxílio no estudo petrogenético do Gabro de José Fernandes;
- f) Datação U-Pb em badeleíta e zircão por TIMS (*thermal ionization mass spectrometry*) e datação Ar-Ar para o cálculo preciso das idades do Gabro José Fernandes, diques de diabásio do EDAPG e dique alcalino;
- g) Discussão acerca da petrogênese do Gabro José Fernandes, incluindo a identificação de potenciais magmas parentais, processos de diferenciação magmática e sua relação temporal com o magmatismo alcalino e toleítico no Arco de Ponta Grossa.

6. Materiais e Métodos

6.1. Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica foi realizada procurando cobrir a literatura nacional e internacional sobre o tema, e orientou os trabalhos de campo, o planejamento analítico e a interpretação dos resultados obtidos.

6.2. Compilação de Trabalhos Anteriores

Como suporte para o desenvolvimento da tese de doutorado, foi realizada a compilação e integração de produtos cartográficos e geológicos de campo. Também foram compilados dados aerogeofísicos da CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), provenientes do projeto Paraná-Santa Catarina (2011) com informações quanto à forma de ocorrência do Gabro José Fernandes e diques do EDAPG.

6.3. Levantamentos de Campo e Amostragem

Os levantamentos de campo e a amostragem foram realizados no Gabro José Fernandes e diques de diabásio encaixados no embasamento cristalino do Cinturão Ribeira, na região do Alinhamento de Guapiara, Vale do Ribeira (SP-PR). Parte das amostras de diques descritos é proveniente de projetos de mapeamento da CPRM, Superintendência Regional de São Paulo.

6.4. Análise Petrográfica

Foram estudadas seções delgadas ao microscópio petrográfico de luz transmitida e refletida, a fim de caracterizar os minerais e suas relações texturais. Estimativas modais foram realizadas e fotomicrografias digitais foram obtidas com o intuito de ilustrar as texturas encontradas.

6.5. *Química Mineral*

As análises químicas em fases minerais foram realizadas em microsonda eletrônica marca JEOL, na Universidade de Alberta, Canadá (modelo JXA-8900R), no NAP-Geoanalítica, Universidade de São Paulo (modelo JXA-FE-8530) e na Universidade de Brasília (modelo JXA-8230). No total 20 lâminas polidas do Gabro José Fernandes foram analisadas. As análises foram realizadas a 15 kV e corrente de 20 nA. O diâmetro do feixe utilizado esteve entre 5 e 10 μm . Os padrões utilizados são naturais e sintéticos (Tabela 1). A redução dos dados foi realizada com as correções CITZAF (Armstrong, 1985) e ZAF. Os dados foram tratados para o cálculo das fórmulas estruturais com o uso de programas como Minpet 2.0, Winpyrox (Yavuz, 2013) e Ilmat (Lepage, 2003) e as análises foram plotadas em diagramas classificatórios e de variação catiônica. A partir destes resultados, pretendeu-se analisar o comportamento químico dos minerais buscando estimar as condições de cristalização e implicações petrogenéticas para o magmatismo da região. Mapas composicionais também foram realizados em cristais de clinopiroxênio, ortopiroxênio e olivina com o objetivo de identificar zoneamentos químicos.

As análises de elementos traços em minerais foram realizadas no NAP-Geoanalítica, Universidade de São Paulo, por LA-Q-ICPMS, com espectrômetro do tipo quadrupolo modelo ELAN 6100 DRC da PerkinElmer/Sciex acoplado a um sistema laser ablation 216 nm Nd-YAG New-Wave. O vidro NIST-612 e o basalto BHVO foram utilizados como padrões de calibração. Os limites médios de detecção presentes em Andrade et al. (2014) constam na Tabela 2. A concentração de Ca, proveniente de análises por microsonda eletrônica, foi utilizada como padrão interno para análises de clinopiroxênio e plagioclásio e Mg e Si para olivina e feldspato potássico, respectivamente. A redução dos dados foi realizado com o uso do programa Glitter.

Tabela 1. Padrões analíticos utilizados em análises pontuais em microsonda eletrônica.

Universidade de Alberta									
Elemento	Linha	Cristal	Padrão Feldspato	Padrão olivina	Padrão piroxênio	Padrão mica, anfibólio, óxidos			
Ba	La	PET	Barite	barite	barite	Barite			
Na	Ka	TAP	Albite	albite	albite	Albite			
K	Ka	PETH	Sanidine	sanidine	sanidine	Sanidine			
Si	Ka	TAPJ	Plagioclase	Fo90.5_CB1	diopside	FrankSmith_CB1			
Fe	Ka	LIFH	Fayalite_CB1	Fayalite_CB1	Fayalite_CB1	Fayalite_CB1			
Ti	Ka	PET	Rutile	rutile	rutile	Rutile			
Mg	Ka	TAP	Diopside	Fo90.5_CB1	diopside	FrankSmith_CB1			
Ca	Ka	PETH	Plagioclase	diopside	diopside	Plagioclase			
Al	Ka	TAPJ	Plagioclase	plagioclase	plagioclase	Gore_CB1			
Mn	Ka	LIFH	Rhodonite	rhodonite	rhodonite	Rhodonite			
Cr	Ka	PET	Cr ₂ O ₃ _CB1	Cr ₂ O ₃ _CB1	Cr ₂ O ₃ _CB1	Cr ₂ O ₃ _CB1			
Sr	La	TAPJ	SrTiO ₃	SrTiO ₃	SrTiO ₃	SrTiO ₃			
Ni	Ka	LIFH	Ni_wire_CB1	Ni_wire_CB1	Ni_wire_CB1	Ni_wire_CB1			
NAP-Geoanalítica Universidade de São Paulo									
Elemento	Linha	Cristal	Padrão Feldspato	Padrão Olivina	Padrão piroxênio	Padrão Mica	Padrão Anfibólio	Padrão Magnetita	Padrão ilmenita
Si	Ka	TAP	Anorthoclase	diopside	diopside	Diopside	Diopside	Diopside	diopside
Al	Ka	TAP	Anorthite	anorthite	anorthite	Anorthite	hornblende_#28	Spinel	anorthite
Fe	Ka	LIFL	Fayalite	Fayalite	fayalite	Fayalite	Fayalite	Hematite	ilmenite
Mn	Ka	LIFL	Fayalite	Fayalite	fayalite	Fayalite	Fayalite	Fayalite	ilmenite
K	Ka	PETJ	Ortoclase	Ortoclase	Ortoclase	Ortoclase	Ortoclase	Ortoclase	Ortoclase
Ca	Ka	PETJ	Wollastonite	Wollastonite	Wollastonite	Wollastonite	Wollastonite	Wollastonite	Wollastonite
Sr	La	PETJ	Strontianite						
Ti	Ka	LIFL	Rutile	Rutile	Rutile	Rutile	Rutile	Ilmenite	ilmenite
Ba	La	LIFL	Benitoite			Benitoite			
Na	Ka	TAPH	Albite	Albite	Albite	Albite	Albite	Albite	Albite
Mg	Ka	TAPH	Diopside	olivine basalt	diopside	Diopside	Diopside	Diopside	diopside
Ni	Ka	LIFL		glass_ryolitic_#37					
Cr	Ka	LIFL		chromite	chromite			Chromite	chromite
Zn	Ka	LIFL				Willemite		Willemite	Willemite
F	Ka	TAPH				Fluorapatite	Fluorapatite		
Cl	Ka	PETJ				Sodalite	Sodalite		
Nb	La	PETJ						Ilmenite	ilmenite

Tabela 1. (continuação).

Universidade de Brasília					
Elemento	Linha	Cristal	Padrão Feldspato	Padrão Piroxênio	Padrão Biotita
Na	Ka	TAP	albita_gaspox	albita_gaspox	albita_gaspox
Si	Ka	TAP	olivina	olivina	olivina
Al	Ka	TAP	microclínio	microclínio	microclínio
Mg	Ka	TAP	olivina	olivina	olivina
K	Ka	PETJ	microclínio		microclínio
Ca	Ka	PETJ	wollastonita	wollastonita	wollastonita
Sr	La	PETJ	SrSO ₄		
Fe	Ka	LIFH	olivina	fayalita	fayalita
Ba	La	LIFH	BaSO ₄ _gaspox		
Mn	Ka	LIFH	MnTiO ₃	MnTiO ₃	MnTiO ₃
Ti	Ka	PETJ		MnTiO ₃	MnTiO ₃
F	Ka	LDE1			topaz
Cl	Ka	PETJ			vanadite
Cr	Ka	PETJ		Cr ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃
Ni	Ka	LIFH		NiO	

Tabela 2. Limites de detecção (LD) médios e desvios padrões (sd) do LA-Q-ICPMS, NAP-Geoanalítica (Andrade et al. 2014).

Isótopo	LD	sd	Isótopo	LD	sd	Isótopo	LD	Sd
⁷ Li	0,53	0,101	⁸⁸ Sr	0,05	0,008	¹⁵⁹ Tb	0,03	0,003
⁹ Be	3,05	0,264	⁸⁹ Y	0,04	0,007	¹⁶³ Dy	0,12	0,011
²⁵ Mg	1,4	0,267	⁹⁰ Zr	0,07	0,014	¹⁶⁵ Ho	0,03	0,004
³¹ P	19,74	2,973	⁹³ Nb	0,05	0,006	¹⁶⁶ Er	0,09	0,015
⁴² Ca	0,03	0,011	⁹⁵ Mo	0,38	0,053	¹⁶⁹ Tm	0,03	0,002
⁴⁵ Sc	0,6	0,079	¹¹⁸ Sn	0,7	0,081	¹⁷³ Yb	0,17	0,034
⁴⁹ Ti	2,09	0,182	¹²¹ Sb	0,13	0,018	¹⁷⁵ Lu	0,03	0,005
⁵¹ V	0,45	0,089	¹³³ Cs	0,04	0,005	¹⁷⁹ Hf	0,2	0,012
⁵² Cr	2,43	0,202	¹³⁷ Ba	0,27	0,05	¹⁸¹ Ta	0,03	0,004
⁵⁵ Mn	0,61	0,281	¹³⁹ La	0,04	0,005	²⁰⁸ Pb	0,09	0,009
⁵⁹ Co	0,11	0,018	¹⁴⁰ Ce	0,03	0,007	²³² Th	0,03	0,001
⁶⁰ Ni	0,52	0,085	¹⁴¹ Pr	0,03	0,004	²³⁸ U	0,03	0,004
⁶⁵ Cu	0,55	0,052	¹⁴³ Nd	0,23	0,031			
⁶⁶ Zn	1,43	0,313	¹⁴⁷ Sm	0,19	0,031			
⁷¹ Ga	0,19	0,056	¹⁵¹ Eu	0,06	0,009			
⁸⁵ Rb	0,11	0,02	¹⁵⁵ Gd	0,24	0,05			

6.6. Geoquímica de rocha total

6.6.1. Elementos maiores por FRX

As amostras livres de alteração, selecionadas por meio da petrografia e análise textural, foram analisadas por FRX no Laboratório de Fluorescência de Raios X do NAP-Geoanalítica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Detalhes sobre os procedimentos adotados no laboratório encontram-se em Mori et al. (1999). Foram analisadas 30 amostras quanto ao conteúdo em elementos maiores, menores e traços do Gabro José Fernandes e diques máficos, estes utilizados na datação U-Pb e Ar-Ar. O procedimento de preparação utilizado está detalhado a seguir:

- Retirada da superfície de alteração das amostras com serra diamantada ou prensa;

- Prensagem das amostras para redução granulométrica;
- Quarteamento das amostras mais grossas e subsequente moagem em moinho de ágata;
- Separação de cerca de 7,5 g da fração pulverizada para micronização por 25 minutos e confecção de pastilhas prensadas para análise de elementos traços por FRX;
- Adição de fundente à amostra pulverizada para confecção de pastilhas fundidas para análise dos elementos maiores;

A FRX é uma das técnicas mais utilizadas em geoquímica com muitas aplicações na petrologia. As análises possibilitaram a caracterização das rochas por meio, por exemplo, do uso de diagramas classificatórios de rochas e diagramas de variação de Harker para interpretações petrogenéticas envolvendo processos de diferenciação magmática (*e.g.*, cristalização fracionada e mistura de magmas). As análises foram tratadas com uso de planilhas Excel© e programas para tratamentos de dados geoquímicos (GCDkit; Janoušek et al., 2006).

6.6.2. Elementos traços por ICP-MS

As amostras foram analisadas quanto ao conteúdo de elementos traços por ICP-MS no NAP-Geoanalítica, IGc-USP. Desde 2003 o laboratório conta com um equipamento com espectrômetro do tipo quadrupolo modelo ELAN 6100 DRC da PerkinElmer/Sciex. Detalhes dos procedimentos analíticos podem ser encontrados em Navarro et al. (2008). Todas as amostras analisadas por FRX também foram analisadas quanto ao conteúdo de elementos traços por ICP-MS.

A espectrometria de massa com ionização num plasma de argônio é uma técnica analítica poderosa porque reúne análises multielementares com limites de detecção da ordem de partes por bilhão. Em especial os elementos incompatíveis com grande raio iônico (LILE) (*e.g.* Ba, Sr), os elementos terras-raras e elementos HFS (*high field strength*) (*e.g.* Ti, Zr, Nb) são amplamente utilizados como indicadores petrogenéticos. As análises foram utilizadas para construção de diagramas multielementares e de variação.

6.7. Geoquímica Isotópica

Isótopos radiogênicos são importantes para o estudo petrogenético já que frequentemente resistem aos fracionamentos químicos que acompanham a formação e evolução do magma. A razão isotópica herdada pelo magma durante a fusão parcial permanece constante durante a cristalização fracionada, ao menos que haja contaminação ou misturas de magmas com diferentes razões isotópicas (*e.g.* Faure, 1986). No total, 16 amostras representativas foram submetidas a análises isotópicas de Sr-Nd e 10 amostras a análises isotópicas de Pb no CPGeo (Centro de Pesquisas Geocronológicas) do IGc-USP. Os resultados foram utilizados para identificação das fontes dos magmas, assinaturas de magmas parentais e identificação de processos de contaminação crustal.

6.7.1. Sr-Sr

Minerais e rochas que apresentem Rb em sua composição química podem ser analisadas por este método. Detalhes dos procedimentos analíticos podem ser encontrados em Torquato & Kawashita (1994). O Rb apresenta o isótopo instável ^{87}Rb que decai para o ^{87}Sr , enquanto o ^{88}Sr e o ^{86}Sr constituem os isótopos de Sr. As constantes utilizadas estão presentes em Steiger & Jäger (1977). Os resultados foram utilizados em diagramas de variação para interpretações petrogenéticas.

6.7.2. Nd-Nd

O método Sm-Nd se baseia no decaimento do isótopo radioativo ^{147}Sm para o isótopo estável ^{143}Nd , com meia vida de $1,06 \times 10^{11}$ anos. A abundância do isótopo ^{143}Nd e a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ aumentam com o tempo e podem ser comparadas com a razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ do condrito (DePaolo & Wasserburg, 1976). O parâmetro ϵNd é utilizado na comparação das razões isotópicas das rochas ígneas e do condrito. Detalhes dos procedimentos analíticos adotados no CPGeo podem ser encontrados em Sato et al. (1995). Os resultados foram utilizados em diagramas de variação para interpretação petrogenética.

6.7.3. Pb-Pb

A assinatura isotópica de Pb reflete o complexo comportamento dos elementos Th, U e Pb no Planeta Terra (Zartman & Doe, 1981) e tem grande potencial na identificação de reservatórios mantélicos e crustais. Em particular, o uso dos isótopos de Pb na PMPE tem permitido identificar a presença de anomalias características associadas a certos tipos de magma, e suas implicações para a evolução tectônica regional (*e.g.*, Hawkesworth *et al.*, 1988; Marques *et al.*, 1999; Peate *et al.*, 1999). Durante a preparação das amostras de rocha foram adotados protocolos rígidos de cominuição e moagem, tendo em vista o potencial de contaminação por Pb comum. As amostras já livres de qualquer superfície de alteração foram primeiramente fragmentadas com o auxílio de um pilão de aço. Foi então realizada uma limpeza dos grânulos, provenientes de amostras com baixa concentração de Pb (<10 ppm), previamente medido no ICP-MS, com água Milli-Q e HNO₃ antes da cominuição em moinho de tungstênio. Detalhes dos procedimentos analíticos podem ser encontrados em Babinski *et al.* (1999) e Marques *et al.* (1999).

6.7.4. FC-AFC-FCA and mixing modeler

Os dados isotópicos foram utilizados em modelos presentes no **Anexo A** com o uso da planilha *FC-AFC-FCA and mixing modeler* (Ersoy & Helvacı, 2010) que utiliza as seguintes equações de Rayleigh (1896), DePaolo (1981) e Powell (1984) para o cálculo das curvas geradas por cristalização fracionada (i), AFC (ii, iii) e *mixing* (iv, v), respectivamente:

$$(i) C_1^{FC} = C_0 F^{(D-1)};$$

C_1^{FC} é a concentração de um elemento no líquido durante cristalização fracionada, C_0 é a concentração do elemento traço no líquido parental (composição inicial), F é a fração de líquido remanescente durante cristalização e D é a soma dos coeficientes de partição dos elementos nas fases minerais fracionadas.

$$(ii) C_1^{AFC} = C_0 [F^{-z} + (r/r-1) (C_a/zC_0)(1-F^{-z})];$$

C_1^{AFC} , C_0 , C_a são as concentrações de um elemento no magma resultante, magma parental e material assimilado, respectivamente. F é a fração de líquido durante o resfriamento do magma. O fator “ r ” descreve a razão entre material assimilado (m_a) e material cristalizado

(m_c) expressa por $r = m_a/m_c$. O fator “ z ” é expresso por $z = (r+D-1)/(r-1)$, onde D é a soma dos coeficientes de partição.

No caso de razões isotópicas de um magma em processo de AFC, a seguinte equação pode ser utilizada nos modelos:

$$(iii) IC_1^{AFC} = [(r/(r-1)) (C_a/z)(1-F^z)IC_a + C_0F^zIC_0] / [(r/(r-1))(C_a/z)(1-F^z) + C_0F^z]$$

IC_1^{AFC} , IC_a e IC_0 são razões isotópicas no magma em processo de AFC, no material assimilante e no magma parental, respectivamente. Os parâmetros r , z , F , C_0 e Ca são os mesmos em (ii).

$$(iv) C_m = X(C_a - C_b) + C_b;$$

Ca , Cb e Cm são concentrações de um elemento no magma a, magma b e no magma resultante de mistura de a e b, respectivamente. X é a proporção de *mixing*.

Para as razões isotópicas a equação de *mixing* é expressa por:

$$(v) IC_m = IC_a(C_aX/C_m) + IC_b(C_b(1-X)/C_m)$$

onde IC_a , IC_b e IC_m são razões isotópicas de um elemento nos magmas a, b e magma resultante de mistura de a e b, respectivamente.

6.8. Isotopia in situ

6.8.1. Isótopos de Sr, Pb e O

As análises isotópicas de Sr-Pb em minerais foram realizadas no CCIM (*Canadian Centre for Isotopic Microanalysis*), Universidade de Alberta, Canadá, sob a supervisão do Prof. Dr. Larry M. Heaman e do pesquisador Andrew DuFrane. O equipamento utilizado é o Multi Collector ICP-MS Nu Plasma acoplado a um sistema de laser ablation New Wave UP213. As análises foram realizadas em lâminas polidas com 60 μ m de espessura no modo raster com diâmetro entre 100-150 μ m. Análises isotópicas de Sr foram realizadas em cristais

de plagioclásio e clinopiroxênio em 10 lâminas polidas. O padrão de calibração utilizado foi Labradorita. As análises isotópicas de Pb em feldspato potássico foram realizadas em 6 lâminas. Nesse caso, o vidro NIST-612 foi utilizado como padrão de calibração.

Análises de isótopos de oxigênio por SIMS (*Secondary Ion Mass Spectrometry*) foram realizadas no CCIM, University of Alberta, em cristais de zircão de uma amostra do Gabro José Fernandes. O equipamento consiste em uma microsonda iônica Cameca IMS 1280 Multi Collector. Detalhes do procedimento analítico constam no manuscrito presente no **Anexo B**.

6.9. Geocronologia

6.9.1. U-Pb por ID-TIMS

O método ID-TIMS é um dos mais precisos dentre todas as técnicas isotópicas, sendo altamente aplicado tanto nas Ciências da Terra como em outras áreas. A técnica envolve, em linhas gerais, a adição de um traçador isotópico a uma amostra dissolvida cuja composição final é medida em um espectrômetro de massa termicamente ionizado (Parrish & Noble, 2003). Em particular, a datação em zircão ou badeleíta oferece a possibilidade de alcançar precisão da mesma ordem do método Ar-Ar ($\pm 0,5$ Ma) e tem sido aplicada na PMPE na datação de diques (Florisbal et al., 2014) e rochas vulcânicas (Janasi et al., 2011). O mineral badeleíta (ZrO_2) ocorre em rochas terrestres e lunares como um mineral traço, comumente com cristalização tardia, localizado em porções fracionadas de magmas máficos com apatita, ilmenita, \pm zircão e \pm zirconolita (Heaman & LeCheminant, 1993). O mineral é ideal para datação U-Pb devido à sua alta concentração em U (até 3000 ppm), rara ocorrência como xenocristal, concentração muito baixa em Pb comum e pouca perda de Pb em amostras não-metamórficas (Heaman & LeCheminant, 1993).

No total 4 amostras do Gabro José Fernandes e 2 amostras de diques de diabásio do Alinhamento de Guapiara foram submetidas à separação e datação U-Pb de cristais de badeleíta e zircão. A separação e análises foram realizadas no CCIM, Universidade de Alberta, Canadá, sob a supervisão do Prof. Dr. Larry M. Heaman e do pesquisador Barry J. Shaulis. A seleção das amostras para datação foi precedida de estudos petrográficos em microscópio eletrônico de varredura (MEV) para identificação das fases minerais de interesse

para datação. O processo de separação de badeleíta envolveu de forma geral as seguintes etapas:

- (i) fragmentação da amostra de rocha com uso de marreta e serra à disco;
- (ii) lavagem e posterior cominuição da amostra em moinho de tungstênio por três minutos e meio;
- (iii) a amostra cominuída é transferida para um recipiente de plástico, onde é adicionada uma pequena quantidade de sabão (*calgon*) e água;
- (iv) o recipiente com a amostra é deixado em ultrassom por cerca de 20 minutos;
- (v) a amostra é transferida aos poucos, com auxílio de uma colher, para a mesa de Wilfley para a separação dos concentrados de minerais leves e pesados (Figura 3). A última fração de minerais pesados presente na mesa de Wilfley é separada e transferida para um pequeno recipiente de plástico, onde os minerais magnéticos são retirados com o auxílio de um imã de mão;
- (vi) o concentrado final de minerais não-magnéticos é então observado em um estereomicroscópio para identificação e catação dos cristais de badeleíta (Figura 4).



Figura 3. Mesa de Wilfley em funcionamento.

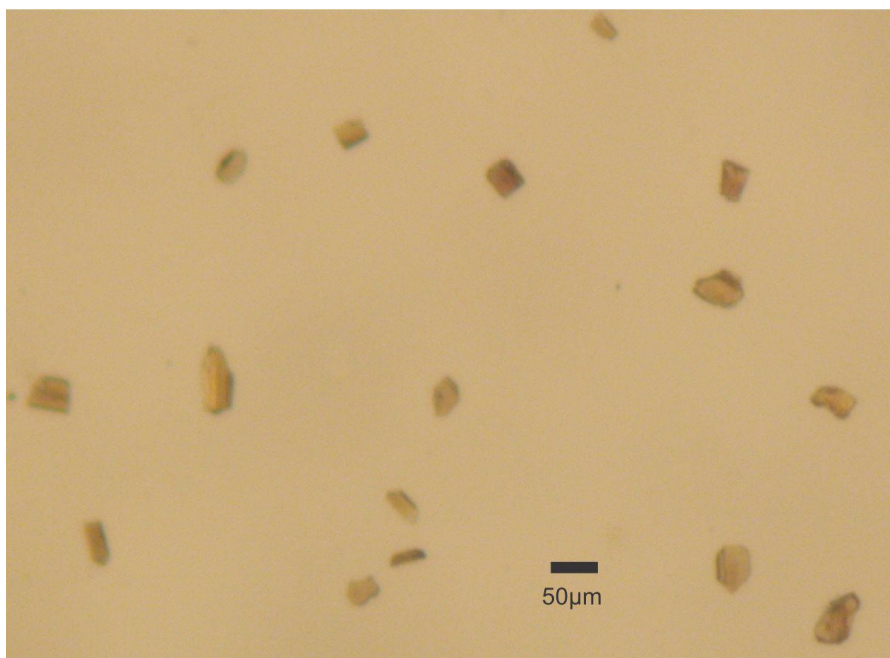


Figura 4. Cristais de badeleíta obtidos no processo de separação em amostra do Gabro José Fernandes.

Após a catação dos cristais de badeleíta, iniciou-se o processo para análise isotópica no TIMS. Detalhes do procedimento analítico constam no **Anexo C**. A separação de cristais de zircão também foi, de maneira geral, realizada da seguinte forma:

- (i) o concentrado de pesados obtido na mesa de Wilfley foi peneirado e a fração mais fina submetida a uma separação magnética com imã de mão ou por “queda livre” dependendo da quantidade de material;
- (ii) o concentrado resultante é então submetido a uma separação no separador magnético Frantz com as correntes de 0,2A, 0,4A e 0,6A;
- (iii) o concentrado não-magnético foi então submetido a uma separação com iodeto de metileno (densidade de $3,32 \text{ g/cm}^3$). O concentrado final decantado foi então observado em estereomicroscópio para identificação e catação dos cristais de zircão.

Os cristais de zircão foram submetidos a um processo de abrasão química (*chemical abrasion*, CA-TIMS) seguindo o procedimento de Mattinson (2005), com o objetivo de remover áreas com perdas de Pb por meio de *annealing* do retículo do cristal em altas temperaturas (Figura 5). Detalhes do procedimento constam no **Anexo B**.

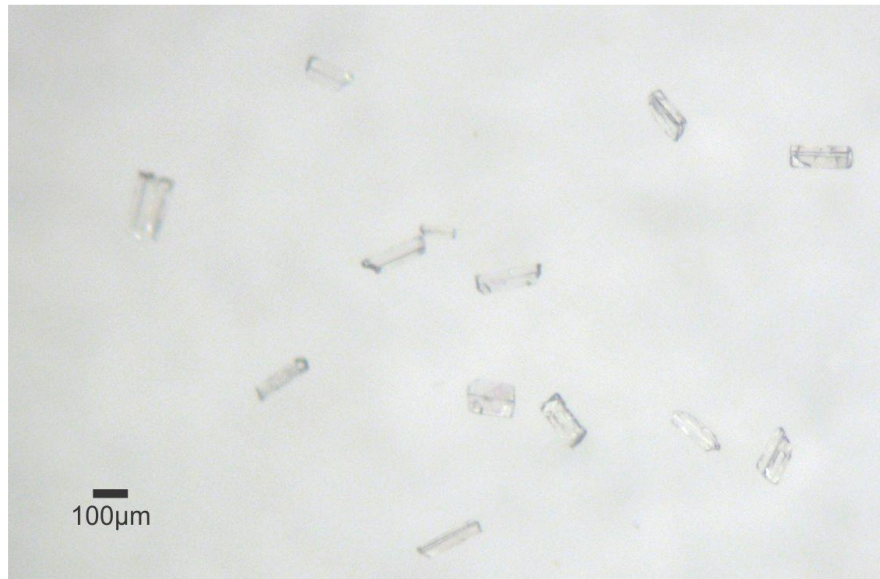


Figura 5. Cristais de zircão após processo de abrasão química.

6.9.2. *Ar-Ar em plagioclásio e flogopita*

A metodologia Ar-Ar têm sido empregada na datação de diques e intrusões alcalinas mesozoicas, sendo essencial para o estudo sobre a duração do magmatismo (e.g., Basu et al., 1993; Renne et al., 1996). No total 3 amostras (1 Gabro José Fernandes, 1 dique de diabásio, 1 dique de lamprófiro) foram submetidas a separação de cristais de plagioclásio (gabro e diabásio) e flogopita (lamprófiro). A separação mineral foi realizada no CPGeo e o procedimento adotado incluiu a fragmentação das amostras com uso de pilão de aço inoxidável, seguido de peneiramento do material e lavagem com acetona. As frações foram então submetidas à separação magnética no Frantz. A análises estão sendo realizadas no Berkeley Geochronology Center, Califórnia, Estados Unidos. O resultado da datação Ar-Ar em flogopita está disponível e integra o conjunto de dados no manuscrito do **Anexo C**, onde os procedimentos analíticos são apresentados com maior detalhe.

7. Geologia Regional

7.1. Origem e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa

A reativação Wealdeniana (Almeida, 1967, 1969) configura o processo diastrófico, ocorrido no Jurássico-Cretáceo, como reflexo da abertura do Atlântico Sul na Plataforma Sul-Americana. O processo envolveu a reativação de antigas falhas e surgimentos de blocos de falha, soerguimento de arcos, abatimento de bacias costeiras e acentuada subsidência da Bacia do Paraná (Almeida, 1983). A essa reativação está relacionado o vulcanismo bimodal com afinidade toleítica que preenche a Bacia do Paraná e os enxames de diques, onde também ocorrem intrusões alcalinas (*e.g.*, Almeida, 1983; Almeida, 1986). Dados aeromagnetométricos indicam que os enxames de diques se estendem por 300 km em direção ao depocentro da bacia (Strugale et al., 2007).

O arcabouço estrutural da Bacia do Paraná apresenta três orientações principais destacadas: NW-SE, NE-SW e E-W (Zalán et al., 1987, 1990). As direções NW-SE e NE-SW são as mais importantes e representam antigas zonas de fraqueza ativas durante a evolução da bacia. A ocorrência de grandes diques e deformação associada é típica das zonas de falha NW (Zalán et al., 1990), sendo que tanto as falhas NW como as NE apresentam movimentação com componentes horizontais e verticais e influenciaram a sedimentação de várias unidades estratigráficas em épocas diferentes na bacia (Zalán et al., 1990).

Os arqueamentos e flexuras provavelmente influenciaram a evolução da Bacia do Paraná ao longo de toda a sua história evolutiva, com atuação mais vigorosa no Mesozoico (Almeida, 2000; Machado et al., 2012). Os arcos de Ponta Grossa, Alto Paranaíba e o Sinclinal de Torres são feições mais novas, ativas desde o final do Paleozoico e início do Mesozoico (Almeida, 2000, Machado et al., 2012), enquanto os arcos do Rio Grande e de Campo Grande já são mais antigos com atuação a partir do Devoniano Médio e Carbonífero Superior (Almeida, 2000; Machado et al. 2012) (Figura 6).

A área do Arco de Ponta Grossa apresentava tendência ao soerguimento desde o Paleozoico, com reflexos na Formação Ponta Grossa (Northfleet et al., 1969; Fúlfaro, 1970). Foi no Triássico-Jurássico que o arco apresentou a feição atual como resultado de um soerguimento em abóbada que separou as bacias Pirambóia, na sub-bacia de São Paulo, e Rosário do Sul, na sub-bacia de Santa Catarina (Almeida, 1983). Na reativação Wealdeniana

do Jurássico-Cretáceo o arco apresentou soerguimento muito expressivo, com a atuação de extensas fraturas e falhas paralelas ao eixo (Almeida, 1983).

Vieira (1973) reconheceu três grandes zonas de falhas com direção NW na região do arco e as denominou: Serra da Fatura, São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo. Ferreira et al. (1981) e Ferreira (1982) comprovaram a existência das falhas identificadas por Vieira (1973) e definiram alinhamentos, com direção NW, por meio da análise e interpretação de anomalias provenientes de levantamentos aeromagnéticos. São eles de norte para sul: Alinhamento de Guapiara, São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo (Figura 2). Ferreira (1982) ainda identificou e batizou o alinhamento do Rio Piquiri (Figura 2) e dividiu o arco em três grandes regiões. A região norte é delimitada pelos alinhamentos de Guapiara e São Jerônimo-Curiúva. O Alinhamento de Guapiara possui cerca de 600 km de extensão e 20 a 100 km de largura e estende-se desde Iguape (SP) até o Rio Paraná. A região central é delimitada pelos alinhamentos de São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo com direção principal N50-N55W. Essa região é caracterizada por intenso fraturamento e falhamentos com pequeno rejeito. O Alinhamento do Rio Piquiri assinala o limite sudoeste do arco e apresenta direção principal N60-N65W, 115 km de extensão e largura máxima de 20 km (Ferreira, 1982). Almeida (1982) reconhece o alinhamento do Rio Ivaí, localizado entre os alinhamentos do Rio Alonzo e Rio Piquiri. A dimensão dos alinhamentos implicaria em um afinamento crustal de 14%, com ascensão mantélica máxima de 5 km (Ferreira et al. 1989), sugestiva de um regime de cisalhamento puro, com σ_3 horizontal e com direção NE-SW (Riccomini, 1995 a, b).

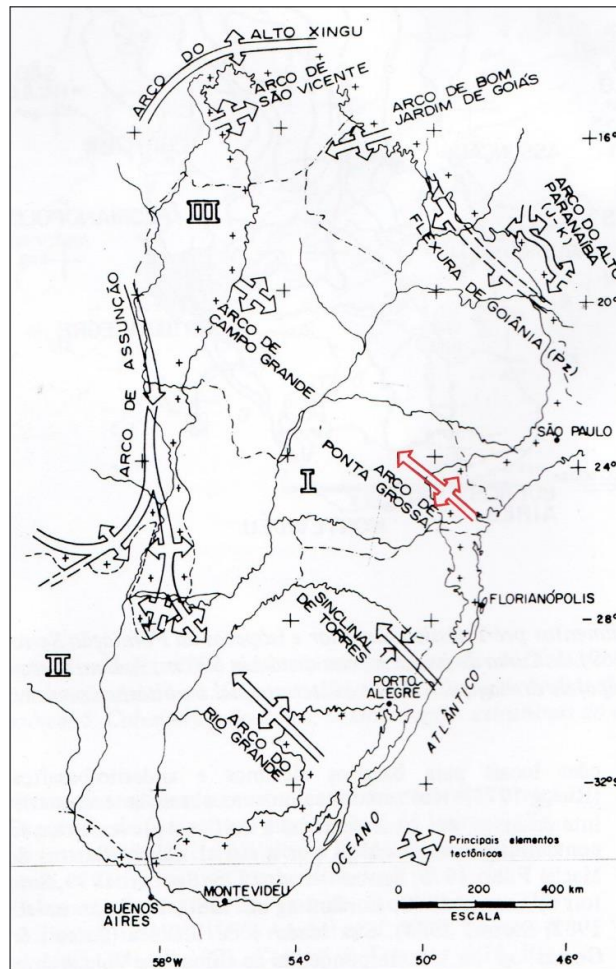


Figura 6. Localização do Arco de Ponta Grossa e relação espacial com outros arqueamentos segundo Almeida (1986).

7.2. O magmatismo alcalino no Arco de Ponta Grossa

Almeida (1983) agrupou as rochas alcalinas localizadas a sul do paralelo 15°S em 12 províncias (e.g., Poços de Caldas, Alto Paranaíba, Ipanema), incluindo a “Província Alcalina do Arco de Ponta Grossa” (PAAPG). No entanto, mais recentemente, Riccomini et al. (2005) dividiram as ocorrências em 15 províncias considerando na PAAPG apenas as com idade referentes ao Cretáceo Inferior, incluindo também as alcalinas de Ipanema e Piedade, no estado de São Paulo e Anitápolis, estado de Santa Catarina (Figura 7). As intrusões localizadas no Arco de Ponta Grossa com idade referente ao Cretáceo Superior (e.g., Cananéia, Tunas) foram incluídas pelos autores na Província Alcalina da Serra do Mar.

A região compreendida entre os alinhamentos de Guapiara e São Jerônimo-Curiúva (Figura 2), na parte sudeste do arco, concentra boa parte das intrusões alcalinas e alcalino-carbonatíticas da região, encaixadas no embasamento Pré-Cambriano e compostas por suítes/complexos intrusivos (e.g., Jacupiranga, Juquiá, Banhadão), *pipes* e *plugs* (e.g., Barra

do Teixeira, Cerro Azul, Mato Preto, Sete Quedas) (Ruberti et al., 2005; Gomes et al., 2011). Enxames de diques alcalinos são encontrados entre os alinhamentos São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonzo (e.g., Vasconcelos & Gomes, 1998).

De acordo com Gomes et al. (2011), os litotipos alcalinos da região variam de rochas máficas-ultramáficas, sienitos, carbonatitos e fenitos, em geral com afinidade potássica. Segundo os autores, predominam rochas intrusivas e hipoabissais, sendo que a falta de rochas extrusivas pode estar relacionada ao ambiente tectônico localizado em altos estruturais e a intensa erosão dessas áreas. Os carbonatitos, presentes em algumas associações (e.g., Jacupiranga, Juquiá, Mato Preto), são interpretados como produtos de imiscibilidade de líquidos formados a partir de um magma silicático (e.g., Beccaluva et al., 1992). A Suíte Intrusiva de Jacupiranga, apresenta 65 km² e é considerada como uma das mais importantes ocorrências alcalino-carbonatíticas da região, seja por seu aspecto econômico, como por suas boas exposições. O complexo foi reconhecido internacionalmente por meio do trabalho de Melcher (1966) e é composto por dois principais corpos intrusivos, com dunitos a norte e clinopiroxenitos (jacupiranguitos) a sul, onde estão encaixados dois corpos distintos de ijolito e carbonatito (e.g., Gaspar, 1989).

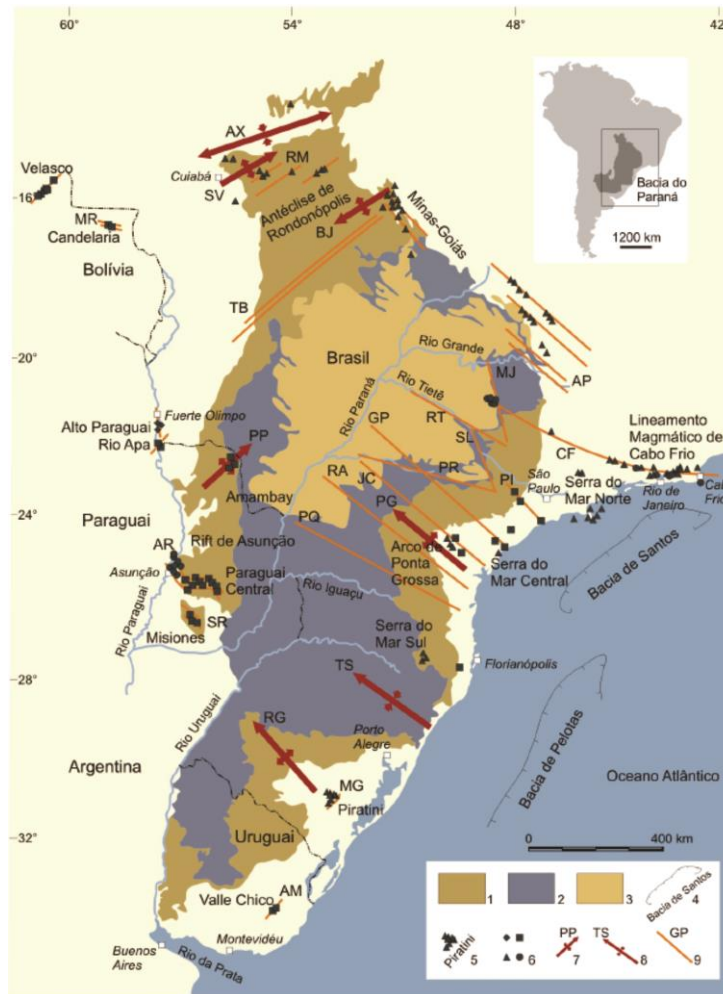


Figura 7. Províncias alcalinas da região centro-sudeste da plataforma brasileira com principais feições estruturais (Riccomini et al., 2005). 1: Ordoviciano Superior a Cretáceo Inferior na Baía do Paraná. 2: Derrames toleíticos. 3: Grupo Bauru. 4: bacias marinhas marginais. 5: Províncias Alcalinas. 6: idades das rochas alcalinas (losangos, Permiano-Triássico; quadrados, Cretáceo Inferior; triângulos, Cretáceo Superior; círculos, Paleoceno). 7: Eixos dos principais arcos (AX, Alto Xingu; SV, São Vicente; BJ, Bom Jardim de Goiás; PG, Ponta Grossa; RG, Rio Grande; PP, Ponta Porã). 8: TS, Sinclinal de Torres. 9: zonas de falhas (Rifts: MR, Mercedes; RM, Rio das Mortes; MG, Moirão; SR, Santa Rosa; AR, Asunción; Lineamentos: Tb, Transbrasiliiano; AP, Alto Paranaíba; MJ, Moji-Guaçu; CF, Cabo Frio; RT, Rio Tietê; SL, São Carlos-Leme; PR, Parapanema; PI, Piedade; GP, Guapiara; JC, São Jerônimo-Curiúva; RA, Rio Alonzo; PQ, Rio Piquiri; AM, Santa Lúcia-Aiguá-Merin). Extraído de Spinelli, 2007.

As intrusões alcalinas localizadas no Alinhamento São Jerônimo-Curiúva (*e.g.*, Tunas, Banhadão, Itapirapuã, Mato Preto, Barra do Teixeira, Cerro Azul) (Figura 8) também estão encaixadas no embasamento Pré-Cambriano (Granito Três Córregos e Supergrupo Açungui) e seguem a orientação de dois lineamentos preferenciais (N45W e E-W) (Ruberti et al., 2005). Parte das intrusões é composta por carbonatitos (*e.g.*, Mato Preto, Barra do Teixeira). Diques alcalinos são descritos no Vale do Ribeira, na região próxima ao Alinhamento São Jerônimo

Curiúva, encaixados nas intrusões alcalinas e no embasamento cristalino (Vasconcelos, 1995; Vasconcelos & Gomes, 1998). Os diques em geral são classificados como fonolitos peralcalinos, fonolitos, fonolitos nefeliníticos, microsienitos e traquitos (Vasconcelos & Gomes, 1998).

A variação isotópica do magmatismo alcalino reunida por Ruberti et al. (2005) e Gomes et al. (2011) é apresentada na Figura 9. As razões iniciais de Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$) estão no intervalo de 0,70489 a 0,70572 para as intrusões do Cretáceo Inferior do Alinhamento de Guapiara (Jacupiranga, Jujuiá, Pariquera-Açu) e valores de 0,70709 para Cananéia. Para as intrusões localizadas no Alinhamento São Jerônimo-Curiúva o valor é de 0,70454 para Barra de Itapirapuã e intervalo de 0,70491 a 0,70588 para Mato Preto e Tunas. Os valores para os carbonatitos são semelhantes aos das rochas silicáticas e em geral representam uma característica primária. No entanto, alguns valores mais altos são indicativos de contaminação crustal, em Jujuiá (0,7060-0,7078; Beccaluva et al., 1992), Ipanema (0,70655-0,70733; Guarino et al., 2011), diques sieníticos em Tunas (0,70777-0,70806; Gomes et al., 1987) e rochas sieníticas pouco a mais evoluídas de Cananéia (0,7065-0,7070 e 0,7054-0,7078; Spinelli & Gomes, 2009). As razões iniciais de Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_i$) estão no intervalo de 0,51228-0,51244 para as ocorrências do Alinhamento de Guapiara e 0,51249-0,51268 para as do Alinhamento São Jerônimo-Curiúva (Ruberti et al., 2005).

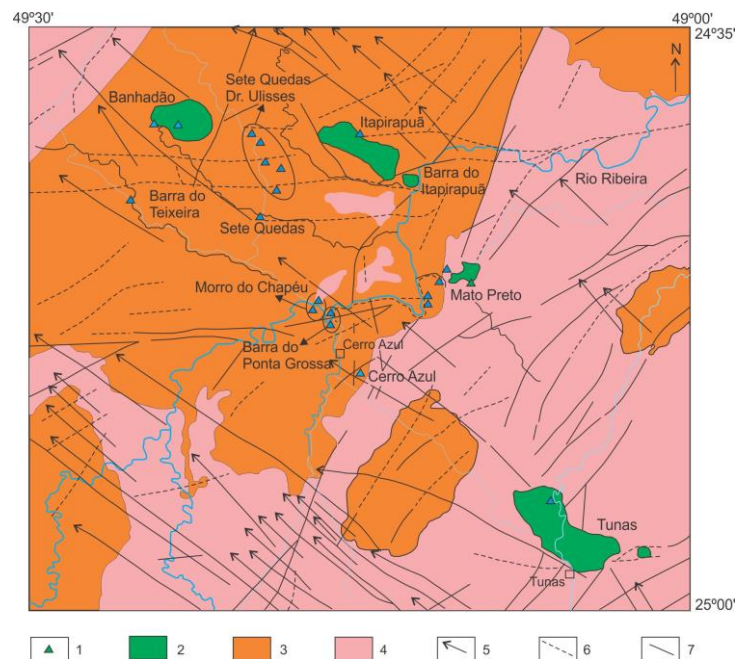


Figura 8. Mapa geológico esquemático da região das intrusões alcalinas do Alinhamento São Jerônimo-Curiúva, Vale do Ribeira. 1: diques de fonolito; 2: complexos alcalinos e plugs; 3: Granito Três Córregos (Neoproterozoico); 4: Supergrupo Açungui; 5: falhas indicadas por diques básicos; 6: falhas inferidas; 7: falhas. Adaptado de Ruberti et al. (2005).

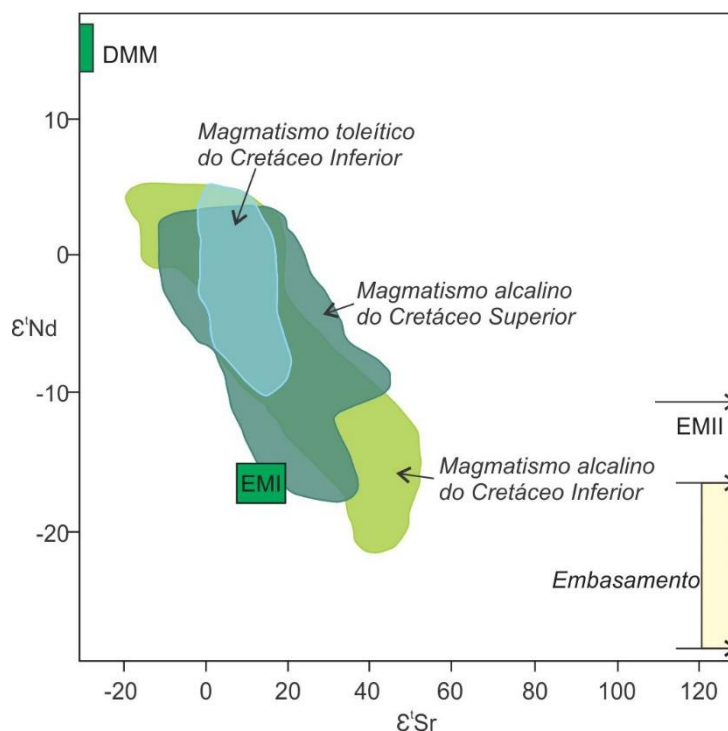


Figura 9. Variação isotópica (Sr-Nd) das intrusões alcalinas do Arco de Ponta Grossa com o campo de variação do magmatismo toleítico. Modificado de Gomes et al. (2011).

7.3. O Gabro José Fernandes e o Complexo Gábrico Bairro da Cruz

O Gabro José Fernandes apresenta relativa proximidade com as intrusões alcalinas do Alinhamento São Jerônimo-Curiúva (Figura 2). Breves referências sobre o corpo são encontradas nos trabalhos de Barbosa (1941), Moraes Rego & Almeida (1946), Bigarella (1965) e Melcher et al. (1971, 1973). A ocorrência foi tema de dissertação de mestrado de Pieruceti (1973) que também a decreve em trabalho posterior (Pieruceti & Gomes, 1975). Esses dois últimos trabalhos são focados principalmente em aspectos de campo, petrográficos e texturais das diferentes fácies encontradas. Pieruceti & Gomes (1975) também citam uma idade K-Ar (feldspato) de 183 ± 9 Ma, cuja referência no trabalho é uma comunicação verbal de Cordani. Uma idade K-Ar de 190 ± 7 Ma também está presente em Teixeira (1982).

O gabro está encaixado em rochas metassedimentares pré-cambrianas do Supergrupo Açungui (Grupo Votuverava), principalmente filitos, metacalcários e quartzitos. Pieruceti & Gomes (1975) destacam a variedade petrográfica e textural do corpo composto, segundo os autores, por melassienito, monzonito, melamonzonito, leucomonzogabro, melamonzogabro, leucogabro, gabro e melagabro com textura fanerítica, além de diques afaníticos. Os autores relacionam o gabro ao magmatismo toleítico mesozoico da região e colocam como

possibilidade a presença de mais de uma fase intrusiva por meio de dados de campo e petrografia.

O Complexo Gábrico Bairro da Cruz é relativamente próximo ao Gabro José Fernandes (Figura 2). O corpo é composto por gabro e fonolitos e apresenta uma datação K-Ar de cerca de 230 Ma (Hama et al. 1977). Sua localização é de difícil acesso e existem poucas referências sobre o corpo (e.g., Faleiros et al., 2012), não sendo citado em trabalhos de revisão sobre o magmatismo alcalino na região do Arco de Ponta Grossa (e.g., Gomes et al., 2011).

7.4. Idade do magmatismo alcalino no Arco de Ponta Grossa

As intrusões alcalinas que ocorrem na região do Arco de Ponta Grossa estão divididas temporalmente em dois grupos: as com gênese no Cretáceo Inferior (e.g., Jacupiranga, Juquiá, Pariquera-Açu, Banhadão) e as do Cretáceo Superior (e.g., Cananéia, Tunas). A maioria das idades disponíveis foram obtidas pelo método K-Ar em uma ampla gama de rochas e minerais com resultados que abrangem um amplo intervalo temporal (e.g., Amaral et al., 1967; Ruberti, 1984; Sonoki & Garda, 1988). De forma geral, boa parte das intrusões alcalinas do Cretáceo Inferior são consideradas como contemporâneas ao magmatismo toleítico adjacente da Formação Serra Geral, incluindo o EDAPG (e.g., Jacupiranga, Juquiá, Pariquera-Açu, ~130 Ma), enquanto que as relacionadas ao Cretáceo Superior apresentam formação posterior ao magmatismo toleítico (e.g., Cananéia, Tunas, ~85 Ma) (Gomes et al., 2011). No entanto, a idade de várias ocorrências ainda precisa de confirmação e atualização por meio da obtenção de dados geocronológicos mais robustos, sendo que idades Ar-Ar estão disponíveis somente para alguns complexos intrusivos (Jacupiranga, 132.8 Ma, Basu et al., 1993; Cananéia, 83.6 Ma, Spinelli & Gomes, 2008) e idades U-Pb estão restritas ao Complexo Alcalino de Tunas (Siga Jr. et al, 2007).

7.5. A PMPE e o EDAPG

A PMPE é considerada como uma das maiores províncias basálticas preservadas do planeta, composta por derrames de lava que cobrem, na Plataforma Sul-Americana, uma área com cerca de 1.200.000 km², abrangendo a porção central e sul do Brasil e também Paraguai, Argentina e Uruguai (Piccirillo & Melfi, 1988). O volume de material foi provavelmente

muito maior do que o estimado devido aos processos de erosão atuantes decorrentes (Gallagher et al., 1994). Também fazem parte da província os derrames das bacias de Cuanza e Namibe, localizadas na costa oeste de Angola (Piccirillo et al., 1990; Alberti et al., 1992). Na região de Etendeka, os derrames ocupam uma área de 780.000 km² e mostram 1 km de espessura (*e.g.*, Marsh et al., 2001). Os derrames se distribuem por quase toda a Bacia do Paraná, formando a Formação Serra Geral. Associado aos derrames ocorre expressiva quantidade de corpos toleíticos intrusivos representados por sills, que ocorrem principalmente na parte nordeste da Bacia do Paraná e pelos enxames de diques da Serra do Mar, Florianópolis e o EDAPG.

O EDAPG é uma das mais notáveis feições tectono-magmáticas associadas à PMPE (*e.g.*, Pinese, 1989; Piccirillo et al., 1990; Ussami et al., 1991; Raposo, 1995; Raposo & Ernesto, 1995a; Raposo & Ernesto, 1995b; Renne et al., 1996). O enxame é composto por um grande número de diques com espessura variável entre alguns metros a até algumas centenas de metros e extensão de 1 a 50 km (Ussami et al., 1991). Os diques apresentam preferencialmente direção NW e subordinadamente NE e estão distribuídos desde o litoral até as bordas dos derrames da PMPE, cortando tanto o embasamento cristalino pré-cambriano como as rochas sedimentares pré-vulcânicas (Marques & Ernesto, 2004). Localmente são observados diques na região de Fartura que cortam os derrames na Bacia do Paraná (*e.g.*, Piccirillo et al., 1990).

Para vários autores (*e.g.*, Burke & Dewey, 1973; Herz, 1977; Coutinho, 2008), o EDAPG constitui o braço abortado da junção tríplice Paraná, formada juntamente com os outros dois principais enxames de diques paralelos às linhas de costa: Serra do Mar, a norte (com orientação NE) e Florianópolis, a sul (com orientação NNE) (Figura 10). Os diques não estão uniformemente distribuídos por toda a região do arco, ocorrendo regiões com maior densidade, como em Fartura (SP), Guapiara (SP), Sapopema (PR), Telêmaco Borba (PR) e Curitiba (PR) (Raposo, 1995).

Os primeiros estudos sobre os diques são os de Marini et al. (1967) e Fúlfaro & Suguio (1967) que estudaram diques na região central do arco. Fúlfaro & Suguio (1967) concluíram que os diques formam sistemas paralelos e orientados a NW, embora a direção NE também esteja presente como um sistema secundário. Na região norte do estado de São Paulo, segundo esses autores, a situação é inversa, já que a direção NE neste local é predominante. Raposo (1995) ressalta que a direção NE representa a orientação principal do embasamento cristalino e que, as anomalias magnéticas com direção NE e E-W podem igualmente

representar diques, apesar de não terem sido consideradas como diques em mapas aeromagnéticos por Ferreira (1982).



Figura 10. Reconstrução pré-drift da PMPE, mostrando o EDAPG, o Enxame de diques da Serra do Mar (EDSM) e o Enxame de diques de Florianópolis (EDF) com seu correspondente no continente africano, Namíbia. Os derrames da província estão representados em cinza escuro. RP: Alinhamento do Rio Piquiri; RU: Alinhamento do Rio Uruguai. Modificado de Renne et al. (1996).

7.5.1. Geocronologia do EDAPG

Estimativas da idade e duração do vulcanismo da Formação Serra Geral foram realizadas até recentemente com base em um amplo banco de dados de idades obtidas pelo método Ar-Ar fusão total a laser (e.g., Stewart et al., 1996; Turner et al., 1994). No entanto, resultados mais recentes pelo método Ar-Ar *step-heating* mostram que os resultados obtidos por aquele método são de significado incerto (Thiede & Vasconcelos, 2010), e atestam um vulcanismo de curta duração (<3 Ma) com início em 134 Ma (e.g., Ernesto et al., 1999; Renne et al., 1992; Thiede & Vasconcelos, 2010). Idades U-Pb em badeleíta e zircão de rochas vulcânicas são consistentes com essa idade (Janasi et al., 2011; Pinto et al., 2011).

Dados geocronológicos disponíveis do EDAPG se concentram nos métodos Ar-Ar (e.g., Regelous, 1993; Turner et al., 1994; Renne et al., 1996) e K-Ar (e.g., Pinese, 1989). Datações Ar-Ar *step-heating* mostram um predomínio de idades plateau concentradas no

intervalo de 133 a 130 Ma sendo que alguns diques têm idades mais jovens (127 Ma) (Renne et al., 1996). Parte das idades é compatível com os derrames adjacentes da PMPE. No entanto, alguns diques podem indicar eventos posteriores à construção da pilha de lavas (*e.g.*, Renne et al., 1996). Datações Ar-Ar *step-heating* obtidas por Ernesto et al. (1999) em sills e derrames da região norte da Bacia do Paraná mostram idades plateau entre 133 e 131 Ma concomitantes com o EDAPG e com derrames mais superficiais da parte norte da bacia, porém são mais jovens em relação às idades das vulcânicas do sul da bacia e na Província Etendeka. Idades U-Pb (TIMS) obtidas recentemente nos diques de Florianópolis estão no intervalo entre $134,7 \pm 0,3$ a $133,9 \pm 0,7$ Ma (Florisbal et al., 2014) e são contemporâneas às obtidas nas lavas.

7.6. Fontes mantélicas do magmatismo toleítico e alcalino no Arco de Ponta Grossa

A formação do imenso volume de magma associado aos derrames basálticos da PMPE requer uma ampla anomalia termal no manto que tem sido associada à atuação de uma pluma por diversos autores (*e.g.*, Morgan, 1981; Peate, 1997). A fonte dos derrames da Bacia do Paraná é um tema controverso, com intensa discussão sobre o grau de participação do manto litosférico na fonte dos magmas (Hawkesworth et al., 1988; White & Mackenzie, 1995). O modelo de White & Mackenzie (1995) indica um predomínio de sequências com fonte astenosférica com pequena contribuição litosférica. No entanto, diversos trabalhos propuseram uma maior contribuição do manto litosférico enriquecido devido às razões isotópicas (Sr-Nd-Pb) e de elementos traços (Nb/La) principalmente dos basaltos tipo Gramado (*e.g.*, Hawkesworth et al., 1988). Apesar de vários autores considerarem a participação da pluma de Tristão da Cunha na geração da PMPE (Hill, 1991; Hawkesworth et al., 1992), são poucas as evidências composicionais e isotópicas que indicam seu envolvimento (*e.g.*, Peate, 1997; Ernesto et al., 2002). Na realidade, as únicas ocorrências com características químicas e isotópicas semelhantes às ilhas de Tristão da Cunha e Gough, são os basaltos Tafelkop e as alcalinas de Okenyenya em Etendeka (*e.g.*, Milner & Le Roex, 1996). Dados isotópicos Re-Os mais recentes indicam o manto astenosférico como fonte do magmatismo toleítico na província, com mistura entre os componentes EMI e EMII e descartam a vinculação com a pluma Tristão da Cunha (Rocha-Júnior et al., 2012).

As assinaturas de elementos maiores e traços e de isotópos das intrusões alcalinas indicam que o manto litosférico teve papel fundamental na geração das rochas alcalinas da região do Arco de Ponta Grossa (Ruberti et al., 2005). Dados termobarométricos de Klein &

Langmuir (1987) e Albarede (1992) de rochas alcalinas mais primitivas sugerem fusão a 28-22 kbar e 1270-1400°C tendo como fontes peridotitos de fácies granada. Segundo Ruberti et al. (2005), as altas concentrações de elementos incompatíveis e a alta razão ETRL/ETRP pode indicar metassomatismo da fonte mantélica por meio de fluidos/fundidos, sendo que idades modelo Nd T_{DM} indicam que esse metassomatismo pode ter ocorrido a 900 Ma no Alinhamento de Guapiara e 700 Ma no Alinhamento de São Jerônimo-Curiúva.

Referências

Albarede, F. 1992. How deep do common basaltic magmas form and differentiate?. *Journal of Geophysical Research*, 97: 10997-11009.

Alberti, A., Piccirillo, E.M., Bellieni, G., Civetta, I., Comin-Chiaramonti, P., Morais, E.A.A. 1992. Mesozoic acid volcanics from Southern Angola: petrology, Sr-Nd isotope characteristics and correlation with the acid stratoid volcanic suítes of Paraná Basin (southeastern Brazil). *European Journal of Mineralogy*, 4: 597-604.

Almeida, F.F.M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. DNPM/DGM. *Boletim*. Rio de Janeiro, 241, 36 p.

Almeida, F.F.M. 1969. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 23, Salvador. Sociedade Brasileira de Geologia. *Anais*, 29-46.

Almeida, F.F.M. 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências*, 13: 139-158.

Almeida, F.F.M. 1986. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16: 325-349.

Almeida, F.F.M. 2000. Síntese sobre a tectônica da Bacia do Paraná. In: Simpósio Regional de Geologia, 3, Curitiba, PR. Sociedade Brasileira de Geologia. *Atas*.

Almeida, T.I.R. 1982. O Arco de Ponta Grossa: uma proposta de configuração a partir da interpretação de dados de sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 108 p.

Amaral, G., Bushee, J., Cordani, U.G., Kawashita, K., Reynolds, J.H. 1967. Potassium-argon ages of alkaline rocks from Southern Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31: 117-142.

Andrade, S., Ulbrich, H.H., Gomes, C.B., Martins, L. 2014. Methodology for the determination of trace and minor elements in minerals and fused rock glasses with Laser Ablation associated with Quadrupole Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-Q-ICPMS). *American Journal of Analytical Chemistry*, 5: 701-721.

Armstrong, J.T. 1995. CITZAF: a package of correction programs for the quantitative electron microbeam X-ray-analysis of thick polished materials, thin films, and particles. *Microbeam Analysis*, 4: 177-200.

Arndt, N., Chauvel, C., Czamanske, G., Fedorenko, V. 1998. Two mantle sources, two plumbing systems: tholeiitic and alkaline magmatism of the Maymecha River basin, Siberian flood volcanic province. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 133(3): 297-313.

Azzone, R.G., Enrich, G.E.R., Gomes, C.B., Ruberti, E. 2013. Trace element composition of parental magmas from mafic-ultramafic cumulates determined by in situ mineral analyses: The Juquiá mafic-ultramafic alkaline-carbonatite, SE Brazil. *Journal of South American Sciences*, 41: 5-21.

Babinski, M., van Schmus, W. R., Chemale Jr., F. 1999. Pb-Pb dating and Pb isotope geochemistry of Neoproterozoic carbonate rocks from the São Francisco basin, Brazil: Implications for the mobility of Pb isotopes during tectonism and metamorphism. *Chemical Geology*, 160: 175-199.

Barbosa, O. 1941. Geologia e petrologia da região de Apiaí, estado de São Paulo. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Tese de Cátedra.

Basu, A.R., Renne, P.R., Mertz, D., Poreda, R.J. 1993. Alkaline igneous rocks of the Deccan and Paraná: implications for the origin of continental flood basalts (CFB) (abstract). *Eos, Transactions American Geophysical Union*, p. 552.

Beccaluva, L., Barbieri, M., Born, H., Brotzu, P., Coltorti, M., Conte, A., Garbarino, C., Gomes, C.B., Macciota, G., Morbidelli, L., Ruberti, E., Siena, F., Traversa, G. 1992.

Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquiá, São Paulo, Brazil. *Journal of Petrology*, 33: 1371-1404.

Bigarella, J.J. 1965. Folha geológica de Adrianópolis. CODEPAR.

Burke, K., Dewey, J.F. 1973. Plume-Generated Triple Junctions: Key Indicators in Applying Plate Tectonics to Old Rocks. *The Journal of Geology*, 81(4): 406-433.

Comin-Chiaramonti, P., Cundari, A., Piccirillo, E.M., Gomes, C.B., Castorina, F., Censi, P., De Min, A., Marzoli, A., Speziale, S., Velázquez, V.F. 1997. Potassic and sodic igneous rocks from eastern Paraguay: their origin from the lithospheric mantle and genetic relationships with the associated Paraná flood tholeiites, *Journal of Petrology*, 38(4): 495-528.

Comin-Chiaramonti, P., Marzoli, A., Gomes, C.B., Milan, A., Riccomini, C., Velásquez, V.F., Mantovani, M. M.S., Renne, P., Tassinari, C.C.G., Vasconcelos, P.M. 2007. Origin of Post-Paleozoic Magmatism in Eastern Paraguay. In: Foulger R.G., Jurdy D.M. eds. Plates, plumes and planetary processes. Geological Society of America, 43: 603-633.

Coutinho, J.M.V. 2008. Dyke swarms of the Paraná Triple Junction, southern Brazil. *Geologia USP, Série Científica*, 8(2): 29-52.

DePaolo, D.J., Wasserburg, G.J. 1976. Nd isotopic variations and petrogenetic models. *Geophysical Research Letters*, 3(5): 249-252.

DePaolo, D.J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53, 189-202.

Ernesto, M., Raposo, M.I.B., Marques, L.S., Renne, P.R., Diogo, L.A., De Min, A. 1999. Paleomagnetism, geochemistry and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of North-eastern Paraná magmatic province: tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, 28: 321-340.

Ernesto, M., Marques, L.S., Piccirillo, E.M., Molina, E.C., Ussami, U., Comin-Chiaramonti, P., Bellieni, G. 2002. Paraná Magmatic Province-Tristan da Cunha plume system: fixed versus mobile plume, petrogenetic considerations and alternative heat sources. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118: 15-36.

Ersoy, Y., Helvacı, C. 2010. FC-AFC-FCA and mixing modeler: A Microsoft Excel spreadsheet program for modeling geochemical differentiation of magma by crystal fractionation, crustal assimilation and mixing. *Computer & Geosciences*, 36: 383-390.

Faleiros, F.M., Morais, S.M. , Costa, V.C. 2012. Geologia e Recursos Minerais da Folha Apiaí escala 1:100.000, Estados de São Paulo e Paraná. São Paulo: Programa Geologia do Brasil, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 107p.

Faure, G. 1986. Principles of Isotope Geology. 2nd Edition. Wiley, 608p.

Ferreira, F.J.F., Moraes, R.A.V., Ferrari, M.P. ,Vianna, R.B. 1981. Contribuição ao estudo do alinhamento estrutural de Guapiara. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 3. Curitiba. *Atas. Sociedade Brasileira de Geologia*, 1: 226-240.

Ferreira, F.J.F. 1982. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 169p.

Ferreira, F.J.F., Monma, R., Campanha, G.A.C., Galli, V.L. 1989. An estimate of the degree of crustal extension and thinning associated with the Guapiara lineament based on aeromagnetic modelling. *Boletim IG-USP, Série Científica*, 20: 69-70.

Florisbal, L.M., Heaman, L.M., Janasi, V.A., Bitencourt, M.F. 2014. Tectonic significance of the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná-Etendeka Magmatic Province: A reappraisal based on U-Pb dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289: 140-150.

Fúlfaro, V.J., Suguio, K. 1967. Campos de diques de diabásio da Bacia do Paraná. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, 16(2): 23-37.

Fúlfaro, V.J. 1970. Contribuição à geologia da região de Angatuba, Estado de São Paulo. DNPM/DGM. *Boletim*, Rio de Janeiro, 253, 83p.

Gallagher, K.C., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M. 1994. The denudation history of the onshore continental margin of SE Brazil inferred from apatite fission track. *Journal of Geophysical Research*, 99: 17117-18145.

Gaspar, J.C. 1989. *Geologie et mineralogie du complexe carbonatique du Jacupiranga, Brésil*. Ph.D. thesis, University of Orleans, 377p.

Gibson, S.A., Thompson, R.N., Day, J.A. 2006. Timescales and mechanisms of plume-lithosphere interactions: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and geochemistry of alkaline igneous rocks from the Paraná-Etendeka large igneous province. *Earth and Planetary Science Letters*, 251: 1-17.

Gomes, C.B., Ruberti, E., Comin-Chiaramonti, P., Azzone, R.G. 2011. Alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch, SE Brazil: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 152-168.

Gomes, C.B., Barbieri, M., Beccaluva, L., Brotzu, P., Conte, A., Garbarino, C., Macciota, G., Melluso, L., Morbidelli, L., Ruberti, E., Scheibe, L.F., Tamura, R.M., Traversa, G. 1987. Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil. The Tunas massif, state of Paraná. *Geochimica Brasiliensis*, 1: 201-234.

Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., Velázquez, V.F. 2013. A synthesis on the alkaline magmatism of Eastern Paraguay. *Brazilian Journal of Geology*, 43(4): 745-761.

Guarino, V., Azzone, R.G., Brotzu, P., Gomes, C.B., Melluso, L., Morbidelli, L., Ruberti, E., Tassinari, C.G.C., Brilli, M. 2011. Magmatism and fenitization in the Cretaceous potassium-alkaline-carbonatitic complex of Ipanema São Paulo state, Brazil. *Mineralogy and Petrology*, 104: 43-61.

Hama, M., Algarte, J.P., Paiva, I.P., Rodrigues, J.C. 1977. Idades K/Ar do maciço alcalino do Banhadão e do Complexo Bairro da Cruz. In: *Atas do I Simpósio de Geologia Regional*. Sociedade Brasileira de Geologia, pp. 170-178.

Harris, C., Marsh, J.S., Milner, S.C., 1999. Petrology of the alkaline core of the Messum Igneous Complex, Namibia: Evidence for the progressively decreasing effect of crustal contamination. *Journal of Petrology*, 40: 1377-1397.

Hawkesworth, C.J., Mantovani, M., Peate, D. 1988. Lithosphere remobilization during Paraná CFB magmatism. *Journal of Petrology (Special issue)*, pp. 205-233.

Hawkesworth, C.J., Gallagher, K., Kelley, S., Mantovani, M.S.M., Peate, D.W., Regelous, M., Rogers, N.W. 1992. Paraná magmatism and the opening of the South Atlantic.

In: Storey, B.C., Alabaster, A., Pankhurst, R.J. eds. *Magmatism and the cause of continental break-up*. Geological Society, London, Special Publication, 68: 221-240.

Heaman, L.M., LeCheminant, A.N. 1993. Paragenesis and U–Pb systematics of baddeleyite (ZrO₂). *Chemical Geology*, 110: 95–126.

Herz, N. 1977. Timing of spreading in South Atlantic: information from Brazilian alkalic rocks. *Geological Society American Bulletin*, 88: 101-112.

Hill, R.I. 1991. Starting plumes and continental break-up. *Earth and Planetary Science Letters*, 104: 398-416.

Janasi, V.A., de Freitas, V.A., Heaman, L.H. 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U-Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1-2): 147-153.

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(6): 1255-1259.

Klein, E.M., Langmuir, C.H. 1987. Global correlation of ocean ridge basalt chemistry with axial depth and crustal thickness. *Journal of Geophysical Research*, 92: 8089-8115.

Lepage, L.D. 2003. ILMAT: an excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry. *Computer & Geosciences*, 29(5): 673-678.

Lustrino, M., Melluso, L., Brotzu, P., Gomes, C.B., Morbidelli, L., Muzio, R., Ruberti, E., Tassinari, C.C.G. 2005. Petrogenesis of the Early Cretaceous Valle Chico igneous complex (SE Uruguay): Relationships with Paraná-Etendeka magmatism. *Lithos*, 82: 407-434.

Machado, R., Roldan, L.F., Jacques, P.D., Fassbinder, E., Nummer, A.R. 2012. Tectônica transcorrente Mesozoica-Cenozoica no Domo de Lages – Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geociências*, 42(4): 799-811.

Marini, O.J., Fuck, R.A., Trein, E. 1967. Intrusivas básicas Jurássico-Cretáceas do Primeiro Planalto do Paraná. *Boletim Paranaense de Geociências*, Curitiba, 23-25: 307-324

Marques, L.S., Dupre, B., Piccirillo, E.M., 1999. Mantle source compositions of the Parana Magmatic Province (southern Brazil): evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry. *Journal of Geodynamics*, 28(4-5): 439-458.

Marques, L.S., Ernesto, M. 2004. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: Mantesso Neto, V. et al. org. *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca Produções Culturais, p. 245-263.

Marsh, J.S., Ewart, A., Milner, S.C., Duncan, A.R., Miller, R. M. 2001. The Etendeka igneous province: magma types and their stratigraphic distribution with implications for the evolution of the Paraná-Etendeka flood basalt province. *Bulletin of Volcanology*, 62: 464-486.

Mattinson, J.M., 2005. Zircon U–Pb chemical abrasion (“CA-TIMS”) method: combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. *Chemical Geology*, 220 (1–2): 47–66.

Melcher, G.C. 1966. The carbonatites of Jacupiranga, São Paulo, Brazil. In: Tuttle, O.F., Gittins, J. eds. *Carbonatites*. Great Britain: Intersciences Publishers, pp. 169-181.

Melcher, G.C., Cordani, U.G., Damasceno, E.C., Girardi, V.A.V., Gomes, C.B., Melfi, A.J. 1971. Geologia das rochas Pré-Cambrianas do Vale do Rio Ribeira de Iguape. In: XXV Congresso Brasileiro de Geologia, Boletim Especial, 1: 193-194, São Paulo.

Melcher, G.C., Gomes, C.B., Cordani, U.G., Bettencourt, J.S., Damasceno, E.C., Girardi, V.A.V., Melfi, A.J. 1973. Geologia e petrologia das rochas metamórficas e graníticas associadas do Vale do Rio Ribeira de Iguape, SP e PR. *Revista Brasileira de Geociências*, 3: 97-123.

Milner, S.C., Le Roex, A.P. Isotope characteristics of the Okenyanya igneous, northwestern Namibia: constraints on the composition of the early Tristan plume and the origin of the EMI mantle component. 1996. *Earth and Planetary Science Letters*, 141: 277-291.

Morbidelli, L., Gomes, C.B., Brotzu, P., D’Acquatica, S., Garbarino, C., Ruberti, E., Traversa, G. 2000. The Pariquera-Açu K-alkaline complex and Southern Brazil lithospheric mantle source characteristics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(2): 129-150.

Moraes Rego, L.F. de, Almeida, F.F.M. 1946. Seção geológica de Capela da Ribeira a Curitiba. Escola Politécnica de Universidade de São Paulo, Separata de Geologia e Metalurgia, São Paulo, Brasil, 3: 5-30.

Morgan, W.J. 1981. Hotspot tracks and the opening of the Atlantic and Indian Ocean. In: *The Sea: The Oceanic Lithosphere*. C. Emiliani ed., Wiley, New York, pp. 443-487.

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

Muzio, R., Peel E., Artur C., 1999. New geochronological data of the Valle Chico alkaline massif (Uruguay), using U-Pb and Sm-Nd systematics. In: AGA/Córdoba-Argentina, II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Extended abstracte.

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 efficiency of microwave oven sample decomposition procedures. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(2): 167-180.

Northfleet, A.A., Medeiros, R.A., Mühlmann, H. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 12(3): 291-346.

Parrish, R.R., Noble, S.R. 2003. Zircon U-Th-Pb geochronology by isotope dilution-Thermal Ionization Mass Spectrometry (ID-TIMS). *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1).

Peate, D.W. 1997. The Paraná-Etendeka Province. In: Mahoney, J.J., Coffin, M. eds. *Large Igneous Provinces*. American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series, 100: 217-245.

Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., Rogers, N.W., Turner, S.P., 1999. Petrogenesis and Stratigraphy of the High-Ti/Y Urubici Magma Type in the Paraná Flood Basalt Province and Implications for the Nature of 'Dupal'-Type Mantle in the South Atlantic Region. *Journal of Petrology*, 40(3): 451-473.

Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. 1988. The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical Aspects. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, 600 p., São Paulo.

Piccirillo, E.M., Bellieni, G., Cavazzini, G., Comin-Chiaramonti, P., Petrini, R., Melfi, A.J., Pinese, J.P.P., Zantadeschi, P., De Min, A. 1990. Lower Cretaceous tholeiitic dyke swarms from the Ponta Grossa Arch (southeast Brazil): Petrology, Sr-Nd isotopes and genetic relationships with the Paraná flood volcanics. *Chemical Geology*, 89(1-2): 19-48.

Pieruceti, J.A. 1973. A intrusão básica de José Fernandes, PR. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.

Pieruceti, J.A., Gomes, C.B. 1975. Aspectos mineralógico-petrográficos da intrusão de José Fernandes, PR. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 47:439-450.

Pinese, J.P.P. 1989. Caracterização petrológica e geoquímica dos diques do Arco de Ponta Grossa. Dissertação de mestrado. Instituto Astronômico e Geofísico. Universidade de São Paulo. 196p.

Pinto, V.M., Hartmann, L.A., Santos, J.O.S., McNaughton, N.J., Wildner, W. 2011. Zircon U-Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at ~135 Ma. *Chemical Geology*, 281(1-2): 93-102.

Powell, R. 1984. Inversion of the assimilation and fractional crystallization (AFC) equations, characterization of contaminants from isotope and trace element relationships in volcanic suites. *Journal of the Geological Society*, 141: 447-452.

Raposo, M.I.B. 1995. Episódios intrusivos no Arco de Ponta Grossa, determinados através de um estudo paleomagnético. *Revista Brasileira de Geociências*, 24(1): 3-19.

Raposo, M.I.B., Ernesto, M. 1995a. Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dyke swarm (Brazil) and its relationship with magma flow direction. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 87(3-4): 183-196.

Raposo, M.I.B., Ernesto, M. 1995b. An Early Cretaceous paleomagnetic pole from Ponta Grossa dikes (Brazil): Implications for the South American Mesozoic apparent polar wander path. *Journal of Geophysical Research*, 100(B10): 20095-20109.

Rayleigh, J.W.S. 1896. Theoretical considerations respecting the separation of gases by diffusion and similar processes. *Philosophical Magazine*, 42: 77-107.

Regelous, M. 1993. Geochemistry of dolerites from the Paraná flood basalt province, southern Brazil. Tese de doutorado. Open University Milton Keynes, 200 pp.

Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot, M., Perrin, M. 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, 258: 975-979.

Renne, P.R., Deckart, K., Ernesto, M., Féraud, G., Piccirillo, E.M. 1996. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Parana flood volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1-2): 199-211.

Riccomini, C. 1995a. Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-gondwânicos da porção centro-oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas. Tese de Livre Docência. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 100p.

Riccomini, C. 1995b. Padrão de fraturamentos do maciço alcalino de Cananéia, Estado de São Paulo: relações com a tectônica mesozóica-cenozóica do sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 25: 153-162.

Riccomini, C., Velázquez, V.F., Gomes, C.B. 2005. Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in the central-southeastern Brazillian Platform. In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. eds. Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazillian Platform. Edusp/Fapesp, São Paulo, pp. 31-56.

Rocha-Júnior, E.R.V., Puchtel, I.S., Marques, L.S., Walker, R.J., Machado, F.B., Nardy, A.J.R., Babinski, M., Figueiredo, A.M.G. 2012. Re-Os isotope and highly siderophile element systematics of the Paraná continental flood basalts (Brazil). *Earth and Planetary Science Letters*, (337-338):164-173.

Ruberti, E. Petrologia do maciço alcalino do Banhadão, PR. 1984 Tese de doutorado. Universidade de São Paulo.

Ruberti, E., Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P. 2005. The alkaline magmatism from the Ponta Grossa Arch. In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. eds. Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazillian Platform. Edusp/Fapesp, São Paulo, pp.473-521.

Sato, K., Tassinari, C.C.G., Kawashita, K., Petronilho, L. 1995. Método geocronológico Sm-Nd no IGc-USP e suas aplicações. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 67: 315-336.

Siga Jr., O., Gomes, C.B., Sato, K., Passarelli, C.R. 2007. O maciço alcalino de Tunas, PR: novos dados geocronológicos. *Geologia USP, Série Científica*, 7: 71-80.

Sonoki, I.K., Garda, G.M. 1988. Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. *Boletim do IGc-USP, Série Científica*, 19: 63-85.

Spinelli, F.P. 2007. As rochas alcalinas de Cananéia, litoral sul do estado de São Paulo: estudos mineralógicos, geoquímicos e isotópicos. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Spinelli, F.P., Gomes, C.B. 2008. A ocorrência alcalina de Cananéia, litoral sul do estado de São Paulo: Geologia e geocronologia. *Geologia USP, Série Científica*, 8: 53-64.

Spinelli, F.P., Gomes, C.B. 2009. A ocorrência alcalina de Cananéia, litoral sul do estado de São Paulo: química mineral. *Geologia USP, Série Científica*, 9: 1-13.

Steiger, R.H., Jäger, E., 1977. Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36 (3): 359–362.

Stewart, K., Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C., Kirstein, L., Mantovani, M. 1996. ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters*, 143: 95-109.

Strugale, M., Rostirolla, S.P., Mancini, F., Portela Filho, C.V., Ferreira, F.J.F., Freitas, S.C. 2007. Structural framework and Mesozoic-Cenozoic evolution of Ponta Grossa Arch, Paraná Basin, southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 24: 203-227.

Teixeira, W. 1982. Folhas SG.21 – Asunción, SG. 22 – Curitiba e SG.23 – Iguape. Considerações sobre os dados radiométricos: interpretações e evolução geocronológica. Projeto Radam Brasil. São Paulo/Florianópolis.

Thiede, D.S., Vasconcelos, P.M. 2010. Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. *Geology*, 38: 747-750.

Torquato, J.R. , Kawashita, K. 1994. Geologia Nuclear V – O método Rb-Sr. *Revista de Geologia*, 46p.

Turner, S., Regelous, M., Kelley, C., Kawkesworth, C., Mantovani, M. 1994. Magmatism and continental break-up in the South Atlantic: High precision $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ geochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 121: 333-348.

Ussami, N., Kolisnyk, A., Raposo, M.I.B., Ferreira, F.J.F., Molina, E.C., Ernesto, M. 1991. Detectabilidade magnética de diques do Arco de Ponta Grossa: Um estudo integrado de magnetometria terrestre aérea e magnetismo de rocha. *Revista Brasileira de Geociências*, 21 (4): 317-327.

Vasconcelos, E.M.G. 1995. Petrologia e geoquímica de diques e plug alcalinos da região do Vale do Ribeira, divisa dos estados do Paraná e São Paulo: características petrográficas e geoquímicas. *Geochimica Brasiliensis*, 12: 123-143.

Vasconcelos, E.M.G., Gomes, C.B. 1998. Diques e plugs alcalinos da região do Vale do Ribeira, divisa dos estados do Paraná e São Paulo: características petrográficas e geoquímicas. *Geochimica Brasiliensis*, 12: 123-143.

Vieira, A.J. 1973. Geologia do centro e nordeste do Paraná e centro-sul de São Paulo. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 27, Aracaju. Anais. Sociedade Brasileira de Geologia, 3: 259-277.

White, R.S., Mackenzie, D. 1995. Mantle plumes and flood basalts. *Journal of Geophysical Research*, 100(B9): 17543-17585.

Wigand, M., Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., Villa, I.M., Emmermann, R., 2004. Short-lived magmatism activity in an orogenic subvolcanic complex: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and ion microprobe U-Pb zircon dating of the Erongo, Damaraland, Namibia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130: 285-305.

Yavuz, F. 2013. WinPyrox: A Windows program for pyroxene calculation classification and thermobarometry. *American Mineralogist*, 98: 1338-1359.

Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S., Appi, C.T., Zanotto, O.A. 1987. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, 3. Sociedade Brasileira de Geologia, Atas, 1: 441-447.

Zalán, P.V., Wolff, S., Conceição, J.C., Marques, A., Astolfi, M.A.M., Vieira, I.S. 1990. A Bacia do Paraná. In: Gabaglia, G.P.R. , Milani, E.J. eds. Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro, Petrobras/SEREC/CEN-SUD, 135-168.

Zartman, R.E., Doe, B.R. 1981. Plumbotectonics – the model. *Tectonophysics*, 75: 135-162.

Parte II

1. Gabro José Fernandes

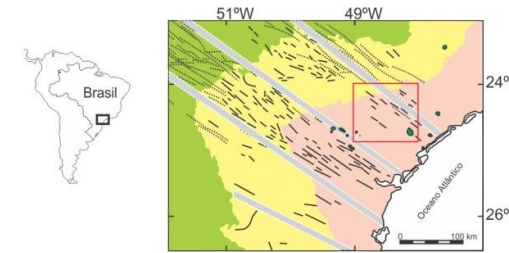
O Gabro José Fernandes é uma intrusão com cerca de 3 km², localizada na zona rural do município de Adrianópolis (PR), a cerca de 14 km da cidade de Ribeira (SP). O principal acesso se dá pela estrada da Ribeira (BR-476), onde estão localizados alguns dos principais afloramentos que consistem em cortes de estrada (ponto VA41, Figura 1a) e em uma pedreira desativada (ponto VA43) (Figura 1b) utilizada para extração de saibro. O corpo, na cota mais inferior, é cortado pelo Córrego do Laranjal que apresenta grande quantidade de blocos e matacões de gabro (Figura 1c), com matacões in situ na margem. Blocos e matacões também são encontrados dentro de propriedades rurais da região (Figura 1d).

Apesar da pequena dimensão do corpo, dados aeromagnetométricos do projeto Paraná-Santa Catarina (CPRM, 2011) mostram uma expressiva anomalia magnética que extrapola a região onde o gabro é aflorante e também é observada na região do Complexo Bairro da Cruz (figuras 2 e 3). Os dados de campo juntamente com a descrição dos litotipos encontrados são apresentados no manuscrito constante no **Anexo A**. Como base para a confecção do mapa geológico do gabro foram utilizados os limites do corpo propostos em Faleiros et al. (2012). Na região foram identificadas rochas com granulação variando de média a grossa compostas por (mela)gastro-(mela)monzogastro, gastro bandedo, quartzo monzogastro e localmente monzonito (Figura 4), com textura por vezes inequigranular. Ocorre uma fácies com granulação fina a média, também localmente inequigranular. A intrusão trunca a zona de cisalhamento Ribeira a norte (Figura 4). As rochas gabróicas são cortadas por diques, com até 1 m de espessura, observados em vários afloramentos.



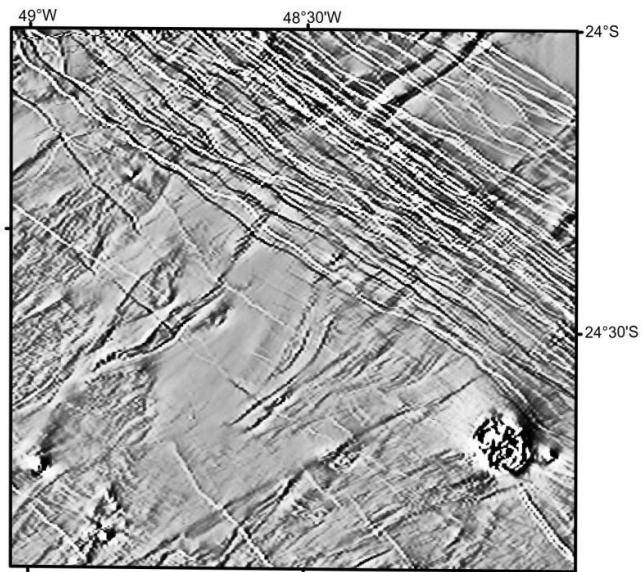
Figura 1. Visão geral da região do Gabro com indicação de afloramentos. (a) Corte de estrada na BR-476. (b) Pedreira desativada de saibro nas margens da BR-476. (c) Blocos e matacões no leito do Córrego do Laranjal. (d) Blocos em propriedade rural.

Figura 2

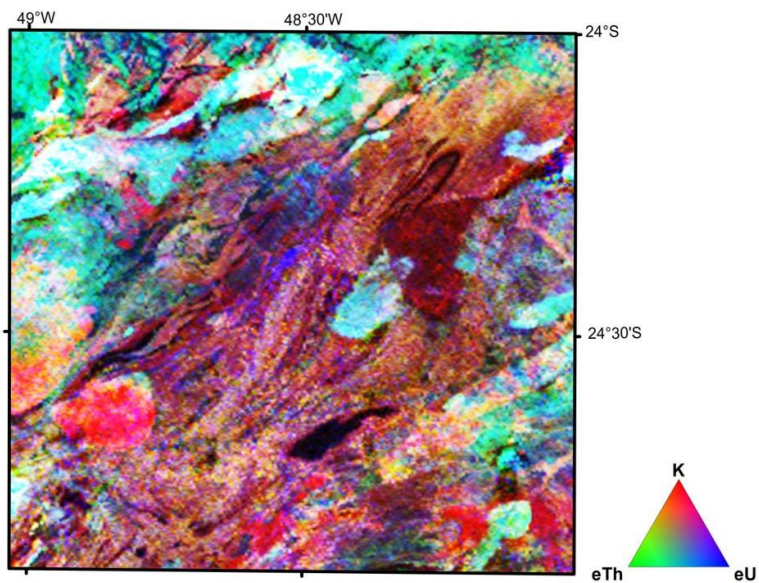


Arco de Ponta Grossa com a área em destaque. Modificado de Ruberti et al. (2005)

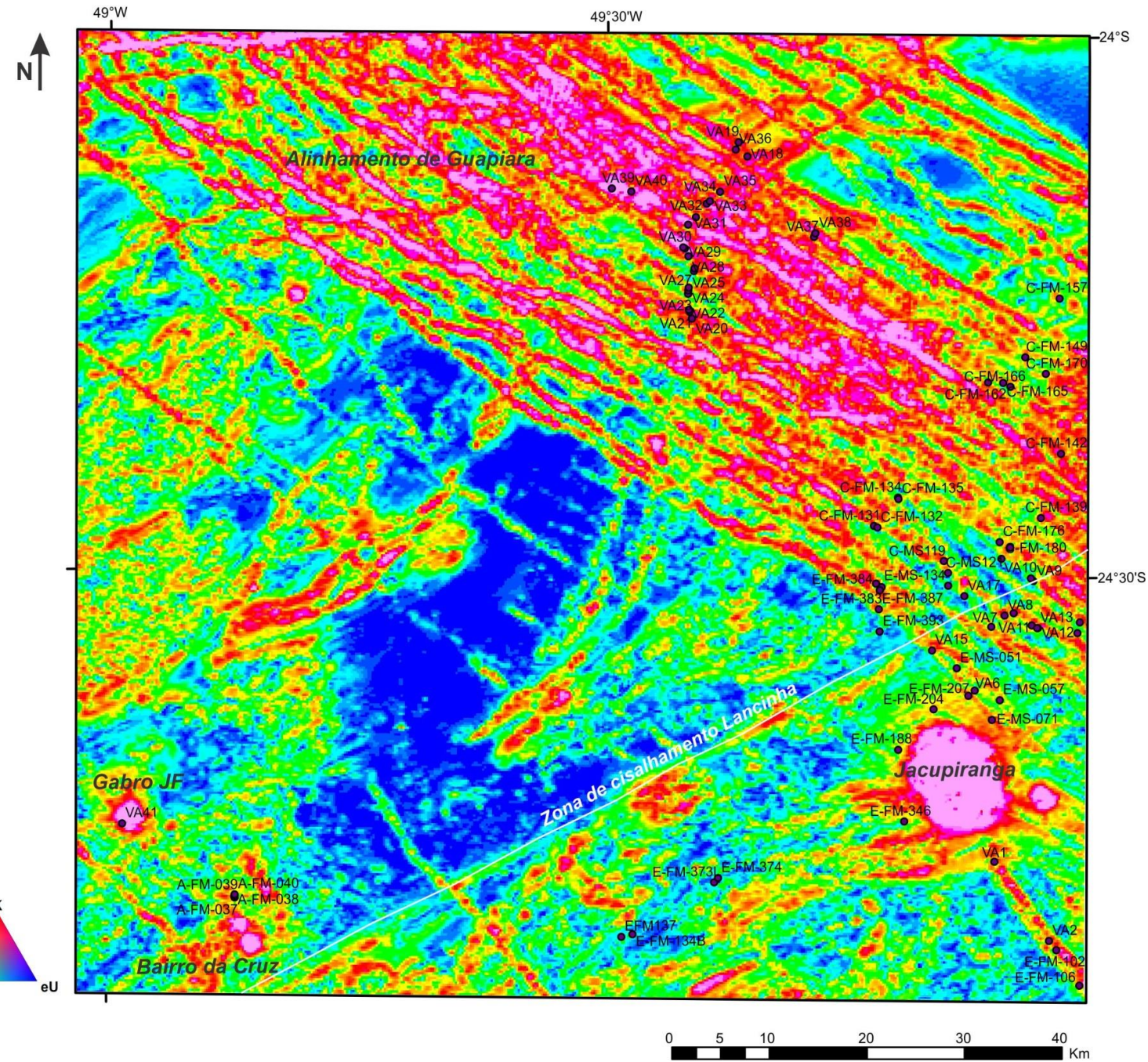
Mapa aeromagnetométrico (Primeira Derivada Vertical)



Mapa aerogamaespectrométrico composição ternária (K-Th-U)



Mapa de sinal analítico do campo magnético total da área de estudo



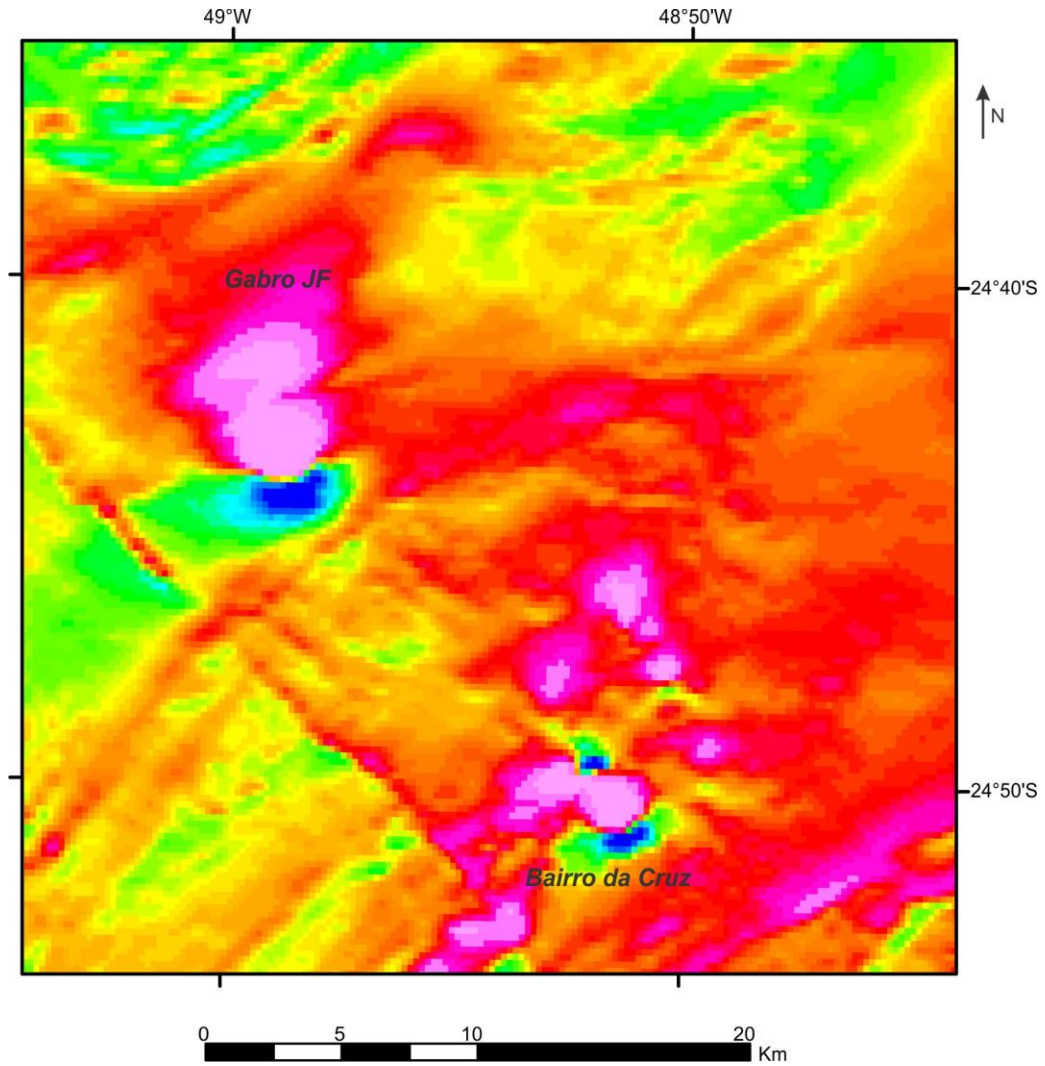


Figura 3. Mapa aeromagnetométrico com indicação das anomalias dipolares do Gabro José Fernandes e Complexo Bairro da Cruz.

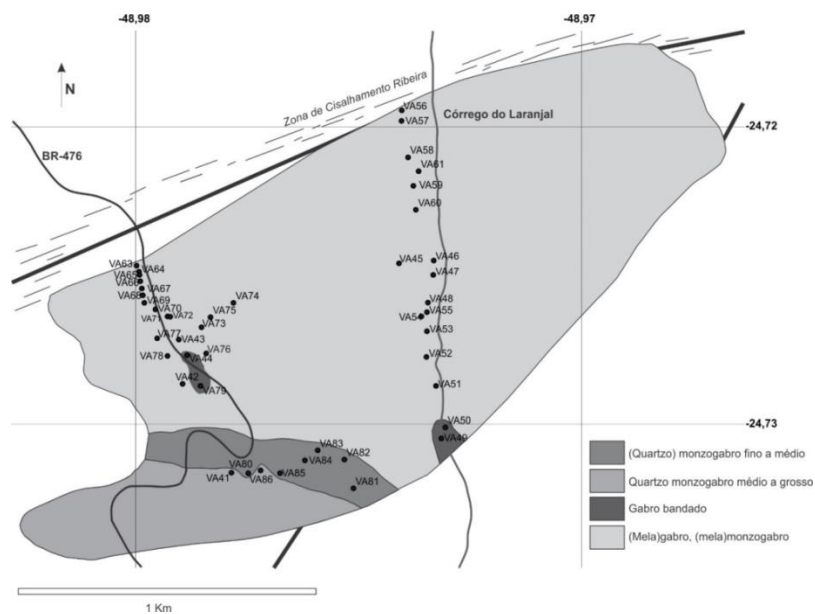


Figura 4. Mapa geológico do Gabro José Fernandes com a localização dos pontos descritos.

2. Diques máficos do Arco de Ponta Grossa

2.1. Diques de diabásio (Alinhamento de Guapiara)

Os diques de diabásio amostrados e selecionados para datação U-Pb e Ar-Ar, abordada no manuscrito presente no **Anexo C**, estão em sua maioria localizados no Alinhamento de Guapiara, com apenas alguns pontos localizados no Alinhamento São Jerônimo-Curiúva (ponto VA62). Os diques coletados estão encaixados predominantemente no embasamento pré-cambriano do Cinturão Ribeira.

O mapa aeromagnetométrico de sinal analítico apresentado na Figura 2 mostra as anomalias magnéticas com a localização dos pontos. As anomalias apresentam direção predominante NW-SE e se associam a extensos diques de diabásio (dezenas de km). As principais anomalias magnéticas com direção NE correspondem a estruturas do embasamento cristalino, como a zona de cisalhamento Lancinha indicada na Figura 2. Essas estruturas lineares estão realçadas no mapa aeromagnetométrico de Primeira Derivada Vertical. Os diques raramente aparecem no mapa aerogamaespectrométrico de composição ternária (K-Th-U). Nesse caso, as rochas e estruturas do embasamento ficam mais evidentes.

Os principais afloramentos visitados formam dois perfis com direção aproximada NE-SW que cortam o Alinhamento de Guapiara, sendo que um perfil está localizado na região sudeste do alinhamento e contempla as regiões próximas às cidades de Eldorado Paulista (SP) e Jacupiranga (SP) e o segundo perfil está localizado a noroeste do alinhamento, nas regiões próximas das cidades de Capão Bonito (Vale do Paranapanema) e Guapiara (SP). Vários pontos ocorrem alinhados ao longo de uma mesma anomalia magnética. A região apresenta proximidade com intrusões alcalinas (e.g., Jacupiranga) e em alguns pontos ocorrem diques alcalinos nos mesmos locais dos diques e soleiras de diabásio.

Na região localizada na borda do Alinhamento de Guapiara, próximo a Jacupiranga, foram encontrados cortes de estrada com 40 a 100 m de extensão e 30 m de altura com blocos e matacões de diabásio, com até 1,5 m, por vezes com esfoliação esferoidal (Figura 5). Ocorrem lavras de saibro por vezes compostas por rocha bastante alterada (figuras 6 e 7). Nessa região também são localmente encontrados diques decimétricos, com 10 a 50 cm de espessura, bastante alterados, possivelmente alcalinos, com cor cinza levemente esverdeado e por vezes com microfenocristais milimétricos e pequenas amígdalas-ocelos (e.g., ponto VA1). No mesmo afloramento também ocorrem soleiras de diabásio, porém devido ao grau de alteração dos cortes, não foi possível visualizar a relação entre os dois (VA1, Figura 6). As

soleiras apresentam rocha bastante alterada e borda de resfriamento mais fina e fraturada próximo ao contato com a rocha encaixante. Algumas medidas estruturais foram feitas em diques com menor espessura e estes apresentam orientação NW (e.g., N335/68SW) e NS (N360/75W) (Figura 7). As duas amostradas datadas por U-Pb (**Anexo C**) são provenientes dos pontos C-FM-131 e VA2, localizados na borda do Alinhamento de Guapiara.

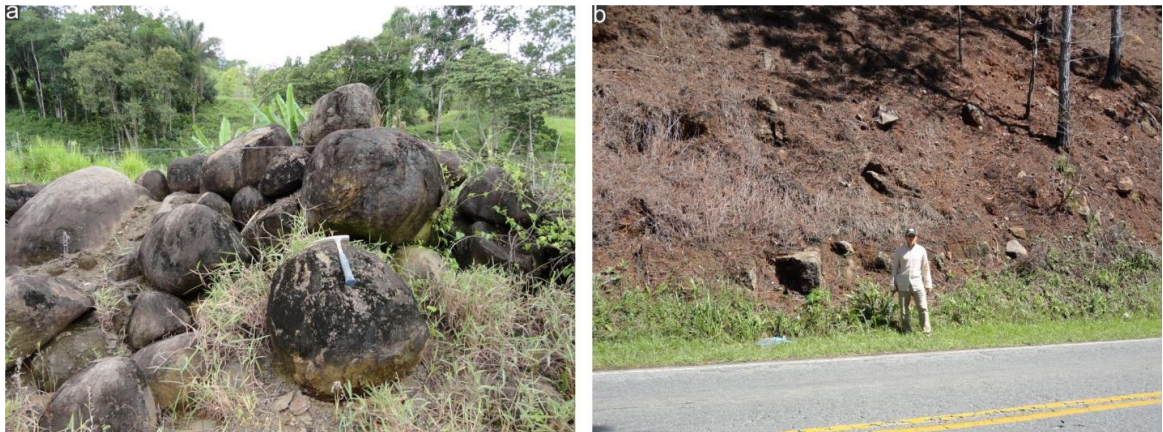


Figura 5. (a) Blocos e matações em lava de saibro (ponto VA2). (b) Blocos e matações enterrados no solo em corte de estrada (ponto VA7).

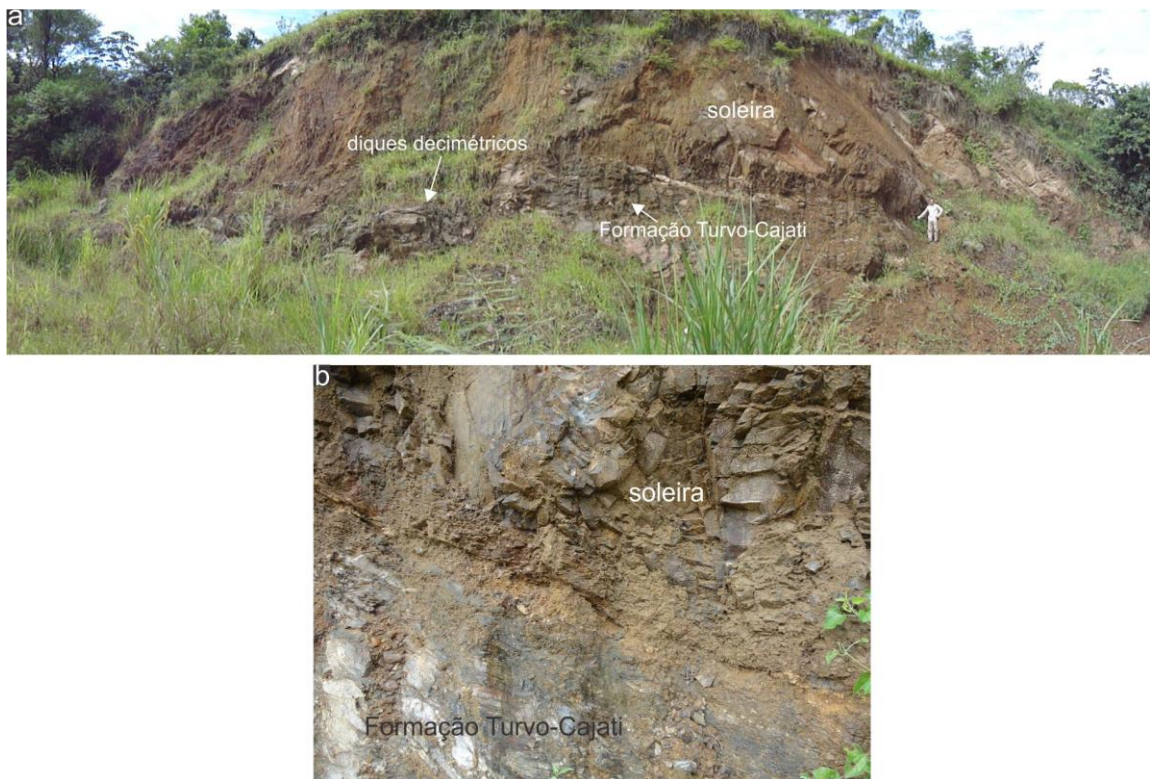


Figura 6. (a) Lava de saibro com sill bastante intemperizado localizado na borda do Alinhamento de Guapiara. A rocha encaixante é a Formação Turvo-Cajati. No chão da lava ocorre dique decimétrico possivelmente alcalino. (b) Detalhe do contato da soleira com a Formação Turvo-Cajati. Ponto VA-001.



Figura 7. (a) Diques e soleiras com até 1 m de espessura com medidas estruturais. (b) Detalhe do contato com a Formação Turvo-Cajati. Ponto E-FM-204.

Os pontos de afloramento visitados na região de Capão Bonito (Vale do Paranapanema) consistem na maioria das vezes em blocos e matacões de diabásio enterrados em cortes de estrada com 40 a 200 m de extensão (Figura 8).

Em geral os blocos e matacões apresentam capa de alteração com cor cinza amarronzado a ocre. A rocha sã apresenta cor cinza escuro, textura fanerítica fina a média (até 2 mm) composta por pequenas ripas de plagioclásio associadas com piroxênio (Figura 9a). A estrutura é maciça. Localmente ocorrem pontos com rocha cinza esverdeada, aparentemente mais félsica e com pequenas porções com cor rósea (Figura 9b).



Figura 8. Blocos e matacões de diabásio enterrados em solo. (a) ponto VA31. (b) ponto VA37.

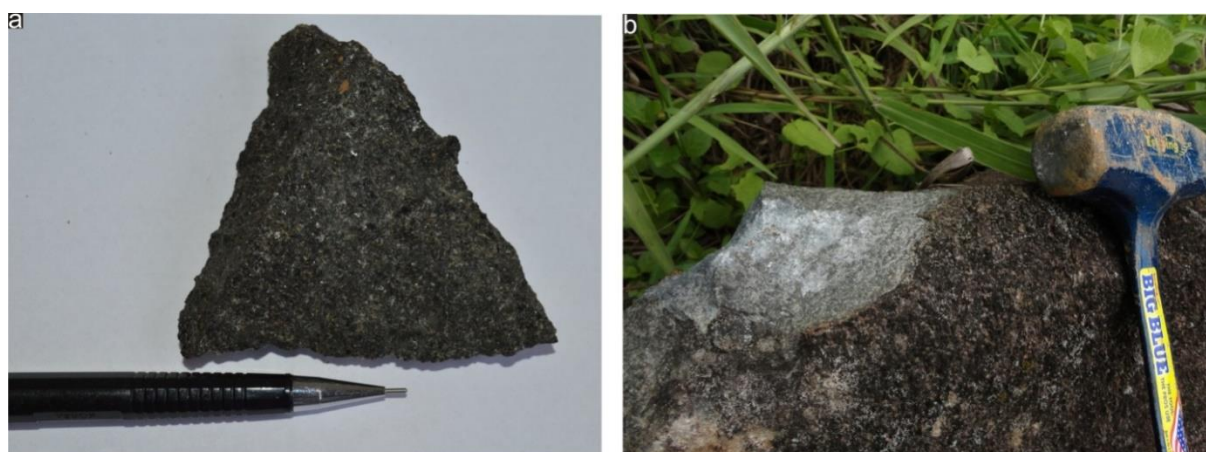


Figura 9. (a) Amostra de dique de diabásio (ponto VA29). (b) Afloramento de dique composto por rocha com cor cinza esverdeado com pequenas porções com cor rósea (ponto E-FM-233).

A textura em lâmina é intergranular (Figura 10) com cristais de clinopiroxênio amarronzado, subédrico a anédrico, com até 1 mm, por vezes concentrado em agregados máficos (Figura 11a,b) localizados entre ripas de plagioclásio, estas com até 1 mm, com cristais maiores com 2 a 3 mm. As ripas estão por vezes parcialmente sericitizadas-saussuritizadas e apresentam microfaturas com concentração de material de alteração. Localmente ocorre textura subofítica a ofítica. Algumas amostras apresentam até 4% em cristais de olivina, com até 1 mm, por vezes na forma de pseudomorfos compostos por iddingsita em contato curvado com clinopiroxênio (Figura 11c). Os pseudomorfos são por vezes encontrados como pequenos núcleos em cristais de clinopiroxênio. Os cristais de clinopiroxênio apresentam pequenas inclusões de minerais opacos e borda de reação

composta por anfibólio (hornblenda) com cor laranja avermelhado por vezes intercrescido com clorita.

O plagioclásio por vezes apresenta zoneamento oscilatório e extinção concêntrica (Figura 11f). Algumas amostras mostram cristais de pigeonita, por vezes manteda por clinopiroxênio amarronzado (Figura 11e). Em várias seções ocorrem porções com concentração de material de alteração muito fino, com cor marrom escuro, onde estão concentrados cristais aciculares de apatita e pequenos cristais de quartzo (Figura 11d). Ocorrem amostras com fenocristais subédricos de plagioclásio, com até 5 mm, por vezes zonados e com textura tipo peneira concentrada no núcleo ou em borda sobrecrecida (Figura 12a,b). Os interstícios comumente apresentam intercrescimentos micrográficos entre quartzo e feldspato alcalino onde os cristais de badeleíta e zircão foram identificados (Figura 13c,d). As amostras com cor cinza esverdeado com pequenas regiões com cor rósea apresentam alta concentração de regiões com intercrescimentos gráficos e clinopiroxênio com borda de reação composta por clorita (Figura 13 a,b). Nas amostras estudadas os cristais de minerais opacos têm dimensões variadas, desde pequenos cristais (<1 mm) a cristais com até 3 mm por vezes esqueléticos, compostos por núcleos com ilmenita e bordas com Ti-magnetita (Figura 14).



Figura 10. Montagem de seção delgada mostrando as ripas de plagioclásio associadas com agregados máficos compostos por cristais de clinopiroxênio associados com minerais opacos e subordinadamente olivina. Polarizadores cruzados. Lado maior da foto: 3 cm.

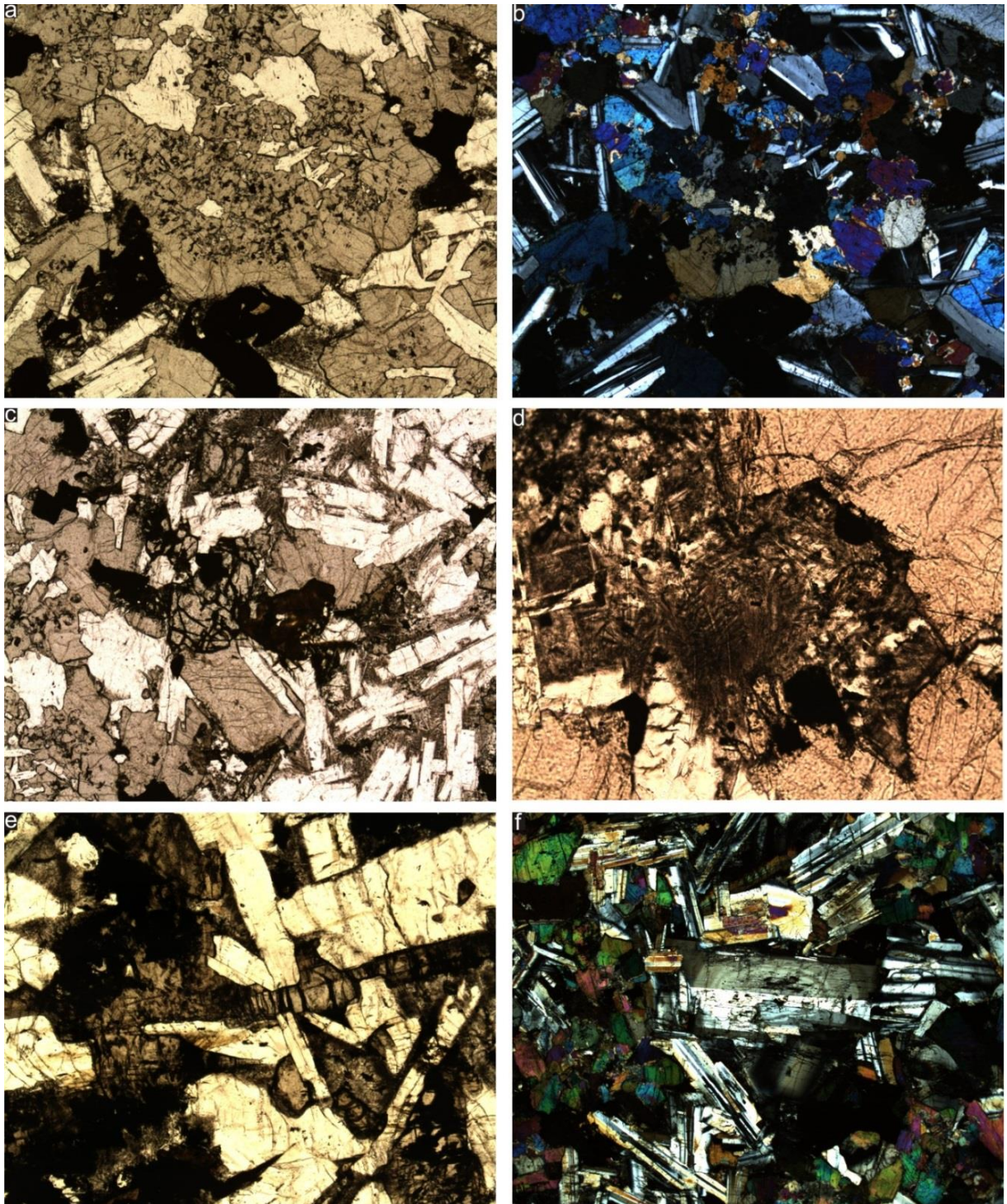


Figura 11. Fotomicrografias dos diques de diabásio. (a) Agregado máfico com concentração de cristais de clinopiroxênio com inclusões de cristais de minerais opacos. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 3,7 mm. (b) Mesma fotomicrografia com polarizadores cruzados. (c) Cristal de olivina no centro da foto em contato curvado com clinopiroxênio. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 3,7 mm. (d) Interstício com concentração de material de alteração e apatita. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 1,2 mm. (e) Cristal de pigeonita no centro da foto. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 1,2 mm. (f) Cristal de plagioclásio com zoneamento oscilatório. Polarizadores cruzados. Lado maior da foto: 1,2 mm.

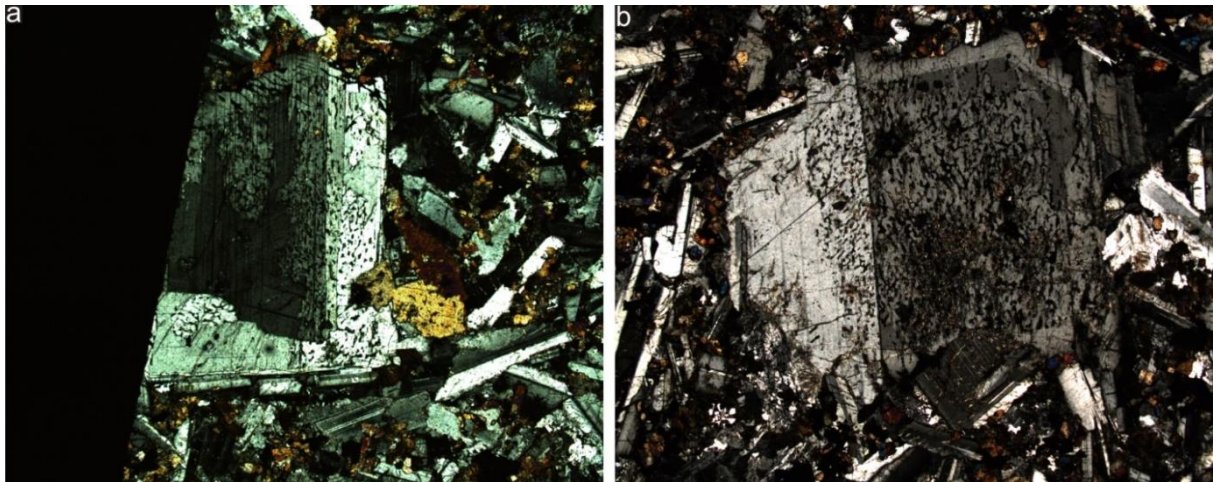


Figura 12. Fenocristais de plagioclásio com textura tipo peneira. Em (a) a textura tipo peneira se concentra em borda sobrecrecida. Em (b) a textura se concentra no núcleo do fenocristal. Polarizadores cruzados. Lado maior das fotos: 6,3 mm.

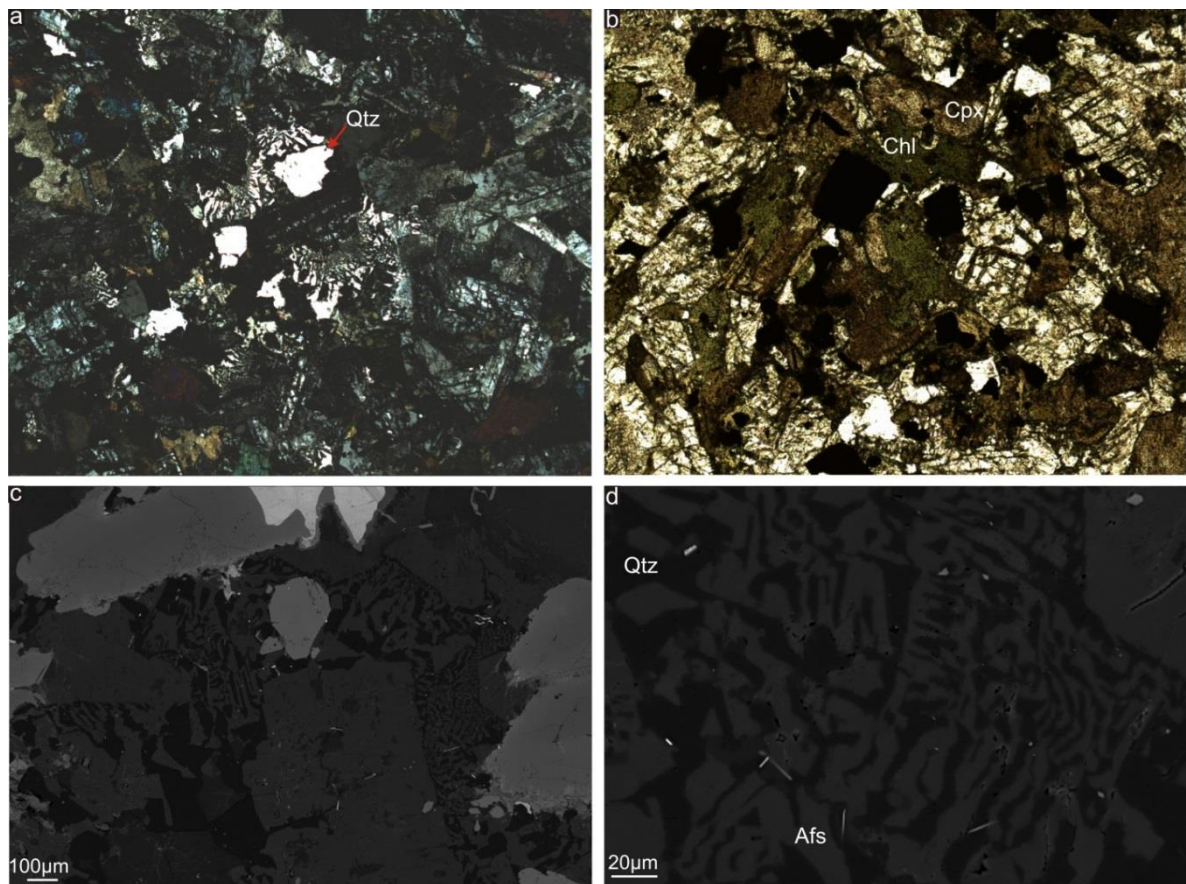


Figura 13. (a) Intercrescimentos micrográficos com quartzo (Qtz). Polarizadores cruzados. Lado maior da foto: 6,3 mm (b) Clorita (Chl) em borda de reação de clinopiroxênio (Cpx). Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 3,7 mm. (c) Imagem BSE de intercrescimento micrográfico. (d) Imagem BSE com detalhe do intercrescimento.

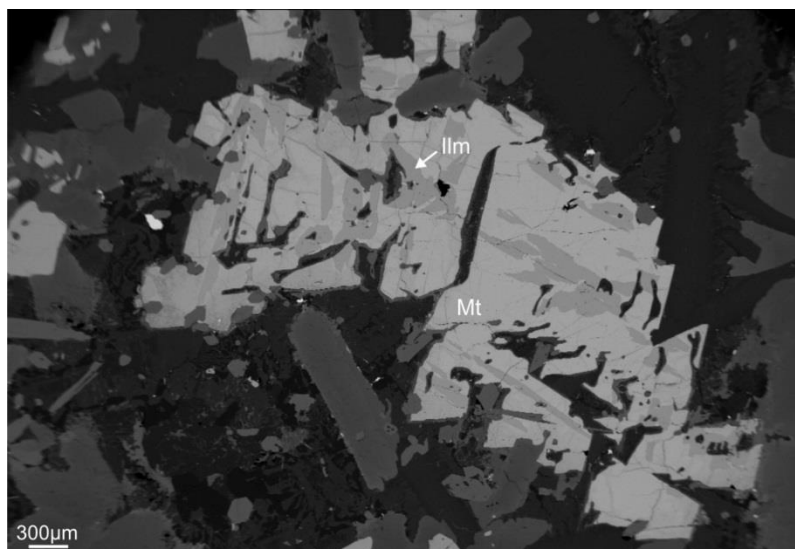


Figura 14. Imagem BSE de minerais opacos com ilmenita (Ilm) e magnetita (Mt).

2.2. *Diques alcalinos*

A região localizada entre os alinhamentos de Guapiara e São Jerônimo-Curiúva também apresenta diques alcalinos subordinados. Esses diques foram encontrados no mapeamento geológico realizado pela CPRM-SP e compreendem, na maioria das vezes, blocos em regiões de difícil acesso, nos quais somente em um caso foi possível obter medida estrutural (N25E/75SE). Parte dos pontos apresentam localização próxima de Jacupiranga (e.g., E-FM-188) e do Complexo Gábrico Bairro da Cruz (A-FM-37 a A-FM-40), cuja anomalia magnética é expressiva e se destaca no mapa aeromagnetométrico da Figura 2.

Em geral as amostras apresentam textura porfírica definida pela presença de fenocristais-megacristais milimétricos a centimétricos dispostos em uma matriz com cor cinza escuro e granulação muito fina a fina o que dificultou a estimativa da proporção modal de minerais na matriz. Algumas amostras apresentam ocelos milimétricos preenchidos por analcima.

As seções delgadas mostram que parte das amostras (A-FM-038, A-FM-039) podem ser petrograficamente classificadas como flogopita e kaesurtita lamprófiros. A amostra do ponto A-FM-038 (Figura 15) foi objeto da datação Ar-Ar apresentada no **Anexo C**. Essas amostras estão localizadas próximo ao Complexo Gábrico Bairro da Cruz. Nesse caso a textura é inequigranular seriada com fenocristais-megacristais, subédricos e euédricos, com 3 mm a 1 cm, de clinopiroxênio, olivina, flogopita e minerais opacos (Figura 15 e 16a). Ocorrem microfenocristais menores, com até 1 mm, dos mesmos minerais. Os fenocristais de clinopiroxênio são zonados, com núcleos levemente amarronzados e bordas mais escuras com

concentração de pequenos cristais de minerais opacos (Figura 16b). Localmente ocorrem fenocristais de clinopiroxênio com textura tipo peneira. Os microfenocristais-fenocristais de olivina mostram bordas arredondadas e são por vezes manteados por biotita. A flogopita apresenta cor vermelho alaranjado com bordas arredondadas com tonalidade mais escura. Localmente ocorrem pequenos agregados compostos por fenocristais de flogopita em contato curvado a levemente irregular com olivina e clinopiroxênio. Microfenocristais menores de kaesurtita e biotita circundam os fenocristais maiores. A matriz apresenta granulação muito fina a fina com material criptocristalino e cristais muito pequenos de clinopiroxênio, flogopita, kaesurtita, minerais opacos e subordinadamente olivina.

Algumas amostras (*e.g.* E-FM-134, E-FM-137) apresentam fenocristais e microfenocristais essencialmente de clinopiroxênio, minerais opacos e subordinadamente olivina. Nesses casos a textura é glomeroporfirítica com fenocristais milimétricos de clinopiroxênio amarronzado, zonado, por vezes com núcleos com textura tipo peneira e com pequenas inclusões de minerais opacos e localmente olivina. A matriz é composta por pequenos cristais de minerais opacos, clinopiroxênio amarronzado e flogopita associados com material criptocristalino. Também ocorrem amostras com textura inequigranular seriada, com matriz muito fina com interstícios isótopos e com maior concentração de cristais de clinopiroxênio (E-FM-373L, A-FM-10) (Figura 17).



Figura 15. Seção delgada escaneada de amostra proveniente de dique de flogopita lamprófiro datado por Ar-Ar. Amostra A-FM38B. Lado maior da foto: 2,5 cm.

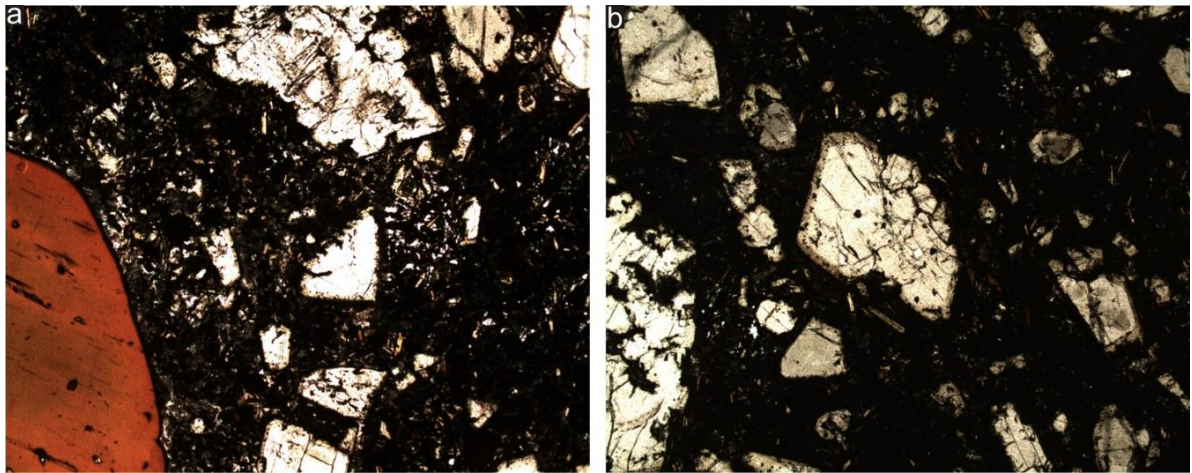


Figura 16. Fotomicrografias de flogopita lamprófito, (a) Fenocristais-megacristais de clinopiroxênio. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 6,3 mm. (b) Fenocristal amarronzado de clinopiroxênio com borda mais escura. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 6,3 mm.



Figura 17. Textura glomeroporfirítica de dique alcalino com fenocristais de clinopiroxênio (Cpx) e ocelos preenchidos por analcima. Polarizadores descruzados. Lado maior da foto: 1,5 cm.

Referências

Faleiros, F.M., Morais, S.M. , Costa, V.C. 2012. Geologia e Recursos Minerais da Folha Apiaí escala 1:100.000, Estados de São Paulo e Paraná. São Paulo: Programa Geologia do Brasil, CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 107p.

PARTE III

1. Discussão integrada dos resultados

1.1. O Gabro José Fernandes – Significado Petrológico

Os trabalhos petrológicos em suítes-complexos alcalinos do Cretáceo Inferior do Arco de Ponta Grossa indicam magmas parentais com composição basanítica (Juquiá; Beccaluva et al., 1992), ankaratrítica (Jacupiranga; Ruberti et al., 2005) e teralítica (Pariquera-Açu; Morbidelli et al., 2000). Processos de contaminação e AFC apresentam destaque em trabalhos sobre algumas intrusões, como o caso do Maciço Alcalino de Cananéia (e.g., Spinelli, 2007) com ~80 Ma. O Gabro José Fernandes encontra-se encaixado em rochas metassedimentares do Grupo Votuverava (Faleiros and Pavan, 2013) e apresenta características que se assemelham tanto ao magmatismo alcalino como toleítico da região. O estudo petrográfico, geoquímico e isotópico discutido em dois manuscritos (**anexos A e B**) indica uma considerável variedade litológica e isotópica no corpo, presente em rochas saturadas e supersaturadas em SiO₂ cortadas por diques alcalinos. Os dados mostram assinaturas mais primitivas que podem estar relacionadas aos prováveis magmas parentais e assinaturas geoquímicas mais evoluídas e contaminadas potencialmente geradas por AFC.

1.1.2. Evolução magmática em sistema aberto – evidências petrográficas

As rochas gabróicas e diques alcalinos associados mostram feições petrográficas que atestam uma evolução magmática em sistema aberto (Streck, 2008). As evidências petrográficas consistem principalmente em zoneamentos minerais, observados em seção delgada em cristais de plagioclásio e em clinopiroxênio. Adicionalmente, texturas de desequilíbrio estão presentes nas rochas gabróicas na forma de bordas de reação em cristais de olivina, estes com composição mais enriquecida em Fe (**Anexo A**). Nesse caso, as bordas são formadas por ortopiroxênio (Fe-enstatita), por vezes em intercrescimento simplectítico com magnetita e ilmenita. A presença de Fe-enstatita pode estar relacionada à reação de olivina e augita com SiO₂ e Al₂O₃ provenientes da fusão de rochas metassedimentares encaixantes, como discutido por Chandrasekharam et al. (2000) a respeito da presença local de Fe-enstatita nos basaltos de Deccan, Índia. No caso específico do gabro, os cristais de ortopiroxênio são

quase sempre encontrados em associação com óxidos de Fe e Ti, o que também pode estar relacionado com a reação da olivina com oxigênio livre (Ambler and Ashley, 1980; Barton and Van Gaans, 1988; Claeson, 1998; Efimov and Malitch, 2012; Kendrick and Jamieson, 2016).

1.1.3. Condições de cristalização

As estimativas de temperatura e fugacidade de oxigênio (fO_2) das rochas gabróicas analisadas foram realizadas por meio da composição dos pares ilmenita-magnetita com o uso da planilha ILMAT (Lepage, 2003) com equação de Spencer and Lindsley (1981). Uma temperatura de 1208 °C foi estimada em bolsão sienítico encontrado em melamonzogabro. No entanto, a maioria das estimativas forneceram valores mais baixos (<800 °C), indicando reequilíbrio pós-magmático. As estimativas de fO_2 mostram em geral valores ao longo do tampão QFM que é o esperado na evolução de intrusões máficas (e.g., Haggerty, 1976). A associação mineral presente em algumas amostras com olivina, com composição rica em Fe, em equilíbrio com quartzo e localmente pigeonita é típica de baixas pressões e altas temperaturas (Smith, 1971, Davidson and Lindsley, 1989).

1.1.4. Cristalização fracionada, AFC e mixing

Os dados geoquímicos de rocha total mostram que as rochas gabróicas apresentam hiperstênio normativo e evidências consistentes de processos de cristalização fracionada, como enfatizado no **Anexo A**. Alguns dos indicadores geoquímicos desses processos mostram como principais evidências, a correlação negativa entre SiO_2 com CaO e Mg#, a presença de anomalias de Eu e os comportamentos de Ni e Cr. A correlação positiva entre o conteúdo de SiO_2 e razões isotópicas iniciais de Sr-Pb, juntamente com a correlação negativa entre SiO_2 e ϵNd , indicam contaminação progressiva do magma com o fracionamento, típico de AFC (Harris, 1989; Baker et al., 2000). No entanto, essa contaminação é heterogênea entre as rochas gabróicas, mesmo considerando amostras de um mesmo afloramento. Ocorrem diques de basanita com assinatura mais primitiva ($^{87}Sr/^{86}Sr_i \leq 0.705$) que cortam rochas mais contaminadas ($^{87}Sr/^{86}Sr_i \geq 0.706$) e diques com maiores razões isotópicas ($^{87}Sr/^{86}Sr_i > 0.706$) que cortam rochas cumuláticas com assinatura mais primitiva, sugerindo a existência de pulsos magmáticos com diferentes contribuições crustais. A existência de diques com assinatura mais primitiva pode indicar que esses condutos estavam isolados do agente

contaminante, como observado em algumas suítes intrusivas (e.g., Messum; Harris et al., 1999).

Os dados analíticos obtidos em minerais e discutidos no **Anexo B** fornecem sustentação às interpretações realizadas utilizando a geoquímica em rocha total com relação à evolução da intrusão. As composições de cristais de olivina, ortopiroxênio e clinopiroxênio das rochas gabróicas mostram uma tendência em enriquecimento em Fe, também indicativa de cristalização fracionada. Os zoneamentos químicos observados em cristais de plagioclásio mostram variações no teor de anortita (An), enquanto que os zoneamentos observados em cristais de clinopiroxênio de rochas gabróicas e fenocristais de diques alcalinos, mostram núcleos com maiores Mg# e bordas com maior enriquecimento em FeO e TiO₂. O zoneamento também envolve variações nas concentrações de elementos traços, sendo que os núcleos com composição mais primitiva de cristais de clinopiroxênio apresentam maior concentração em Cr e menor concentração em elementos terras raras (ETR). A composição das bordas apresenta maior concentração em elementos HFS (*high field strength*) e ETR. A composição de olivina mais magnésiana presente em melamonzogabro também apresenta maior concentração em Ni e Cr, enquanto que olivina rica em Fe apresenta maior concentração em elementos HFS e alguns elementos terras raras pesados (ETRP) sugerindo cristalização a partir de um líquido mais evoluído.

A composição do líquido em equilíbrio estimado por meio da composição dos núcleos de clinopiroxênio e coeficientes de partição (Kd) mostra que os fenocristais de diques de basanita estão em equilíbrio com um líquido mais alcalino, com maior concentração em elementos HFS (e.g., Nb) e ETR em relação ao líquido estimado por meio dos núcleos de cristais em rochas cumuláticas. O Mg# do líquido em equilíbrio com cristais de olivina também é maior nos diques basaníticos. Dados de isotopia *in situ* indicam um zoneamento isotópico em cristais de plagioclásio e clinopiroxênio de amostras gabróicas e de diques alcalinos. O plagioclásio mostra flutuações nas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$, indicando recargas na câmara magmática com diferentes contribuições crustais (e.g., Tepley III and Davidson, 2003). O zoneamento isotópico em cristais maiores de clinopiroxênio mostra núcleos mais primitivos com menores razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (≤ 0.705), em desequilíbrio com as encontradas em rocha total, e bordas com maiores razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ cristalizadas a partir de um líquido mais evoluído e contaminado. Os núcleos podem ser interpretados como antecristais que representam relíquias de cristais precoces que podem ter alguma relação com a composição do magma inicial (e.g., Davidson et al., 2007). A assinatura isotópica de Sr da rocha total é em geral intermediária

entre as composições de núcleo e borda dos cristais de clinopiroxênio analisados. As razões isotópicas de Pb obtidas em cristais de feldspato potássico mostram correlações positivas que podem estar relacionadas a processos de AFC e acompanham a correlação observada em rocha total.

1.1.5. *Natureza do contaminante*

A natureza do contaminante presente na evolução das rochas do Gabro José Fernandes é discutida no **Anexo A** por meio da interpretação de dados geoquímicos e isotópicos. Nesse caso, as assinaturas indicam rochas (meta)sedimentares como prováveis contaminantes, devido ao enriquecimento progressivo de K₂O em relação a Na₂O (Esperança et al., 1992) e maiores razões Th/La, Th/Nb, juntamente com menores razões Ce/Pb em rochas mais contaminadas (e.g., Plank, 2005). Os isótopos de Pb também fornecem evidências da presença de um componente com baixas razões Th/U que é tipicamente associada à crosta superior (e.g., Wedepohl, 1995). De fato, amostras com altas razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i (>0.708) mostram idades modelo Nd T_{DM} mais antigas (1400-1200 Ma) que podem estar relacionadas a herança de crosta antiga também inferida pelos baixos valores de εNd (Florisbal et al., 2012). Apesar das rochas do Grupo Votuverava serem potenciais candidatas ao contaminante, uma contaminação em maior profundidade e durante a ascensão do magma não pode ser descartada, visto a persistente assinatura observada em toda a intrusão.

1.1.6. *Potenciais magmas parentais e fontes mantélicas geradoras do magmatismo*

Dentre a variedade litológica presente no Gabro José Fernandes, incluindo rochas cumuláticas e supersaturadas em SiO₂, os diques são os mais representativos da composição do líquido. Dentre as amostras analisadas, as de basanita com baixa razão ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i e maior εNd_i são as mais primitivas. Uma amostra de basanita (VA43D3) foi considerada como a composição inicial em modelos de AFC e mixing com equações de DePaolo (1981) e Powell (1984). A variação isotópica das amostras se encaixam nas curvas de *mixing* indicando que o magma parental pode ter composição basanítica e que evoluiu por cristalização fracionada e assimilação crustal para composições mais evoluídas. Dados de isotopia in situ em clinopiroxênio mostram que os núcleos mais primitivos dos cristais de rochas cumuláticas mostram razões ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i por vezes semelhantes às encontradas em fenocristais de diques de basanita, fornecendo sustentação a um magma parental com composição basanítica.

As intrusões alcalinas mesozoicas localizadas no Arco de Ponta Grossa são consideradas por vários autores como produtos de fusão (4-6%) de manto superior composto por granada peridotito e granada peridotito com flogopita com evidências importantes de metassomatismo de um manto heterogêneo com diferentes graus de enriquecimento (Ruberti et al., 2005; Gomes et al., 2011). As amostras mais primitivas do Gabro José Fernandes (basanita e melagabro) mostram composição isotópica similar à do componente EM1 com contribuição do componente empobrecido HIMU, que são usualmente identificados nas intrusões alcalinas da região (e.g., Banhadão; Ruberti et al., 2005).

1.1.7. Relação temporal entre o Gabro José Fernandes e o magmatismo alcalino e toleítico mesozoico do Arco de Ponta Grossa

Os novos dados U-Pb obtidos em cristais coexistentes de zircão e badeleíta em amostras do enxame de diques do Arco de Ponta Grossa e do Gabro José Fernandes (**Anexo C**) mostram dados contrastantes, onde os resultados de zircão submetidos à abrasão química (CA-TIMS) forneceram as idades melhores que as de badeleíta (com baixa concentração de U) e de zircão não submetido a CA-TIMS (com mais Pb comum). As melhores estimativas para um dique de basalto com alto Ti-P-Sr e para o Gabro José Fernandes são de 133.95 ± 0.16 Ma e 134.93 ± 0.16 Ma, respectivamente. A idade mais consistente para um dique de basalto andesítico é, no entanto, mais jovem (131.31 ± 0.13 Ma) e condizente com idades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ *step-heating* de Renne et al. (1996) com indicações de que o magmatismo do enxame de diques do Arco de Ponta Grossa perdurou por pelo menos 3 m.y.. Uma idade $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ *step-heating* de 133.7 ± 0.1 Ma em flogopita de dique de lamprófiro, localizado próximo ao Complexo Gábrico Bairro da Cruz, é idêntica à obtida por U-Pb no dique de basalto, sugerindo com dados robustos magmatismo toleítico e alcalino concomitantes na região do Arco de Ponta Grossa. A estimativa da idade do Gabro José Fernandes é ~1 m.y. mais antiga do que a obtida nos diques datados e pode indicar que a colocação das intrusões alcalinas é anterior à colocação dos diques.

2. Conclusões

O Gabro José Fernandes apresenta evidências petrográficas, geoquímicas e isotópicas de que a variedade litológica presente está relacionada a uma evolução magmática em sistema aberto com acentuada contribuição crustal em baixas pressões. As evidências petrográficas envolvem zoneamentos minerais e texturas de desequilíbrio com presença de Fe-enstatita. Os dados geoquímicos e isotópicos indicam que cristalização fracionada é um importante processo na evolução das rochas, sendo que a correlação positiva entre o conteúdo de SiO₂ e razões isotópicas iniciais de Sr-Pb, juntamente com a correlação negativa entre SiO₂ e εNd_i, indicam contaminação progressiva do magma com o fracionamento, típico de AFC. Ocorrem diques de basanita com assinatura mais primitiva ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i \leq 0.705$) que cortam rochas mais contaminadas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i \geq 0.706$) e diques com maiores razões isotópicas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i > 0.706$) que cortam rochas cumuláticas com assinatura mais primitiva, potencialmente indicando a existência de pulsos magmáticos com diferentes contribuições crustais. A composição dos minerais ferromagnesianos, em especial de olivina e piroxênio, mostra *trend* com enriquecimento em Fe. O zoneamento observado nesses minerais é acompanhado pelos elementos traços, e as bordas com maiores concentrações de Fe e Ti de cristais de clinopiroxênio também apresentam maior concentração em outros elementos HFS e LILE. O líquido estimado em equilíbrio com os núcleos de fenocristais de clinopiroxênio em diques de basanita apresenta composição mais alcalina em relação ao líquido estimado para os gabros de origem cumulática. O Mg# estimado para o líquido em equilíbrio com cristais de olivina também é maior para os diques de basanita. A isotopia in situ de Sr em cristais de plagioclásio localmente mostra variações nas razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$, indicativa de recarga na câmara magmática com diferentes contribuições crustais. A natureza do contaminante é condizente com rochas (meta)sedimentares devido ao enriquecimento de K₂O em relação à Na₂O, maiores razões Th/La, Th/Nb e presença de componente com baixa razão Th/U em rochas mais contaminadas, indicativa de assinatura típica de crosta superior. Os baixos valores de εNd_i e idades modelo Nd T_{DM} mais antigas de algumas rochas também indicam assimilação de crosta pré-cambriana. Modelos de AFC-mixing mostram que a diversidade isotópica é compatível com a curva de mistura entre magma alcalino basanítico (composição inicial) e composição de rochas metassedimentares do Grupo Votuverava (contaminante principal). Dados de isotopia in situ de Sr em clinopiroxênio mostram que núcleos com textura de reabsorção por vezes apresentam razões mais baixas (<0.705) compatíveis com antecristais que podem apresentar relação com o magma parental. De fato,

as assinaturas isotópicas observadas nesses núcleos são compatíveis com as observadas em fenocristais de diques de basanita, indicando como magma parental um magma alcalino basanítico. A intrusão está relacionada ao magmatismo do Cretáceo Inferior com datação U-Pb em zircão por TIMS de 134.93 ± 0.16 Ma. A idade é cerca de 1 m.y. mais antiga em relação aos diques máficos analisados. Nesse caso um dique de basalto com alto Ti-P-Sr (133.95 ± 0.16 Ma) apresenta idade U-Pb concomitante com datação $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ *step-heating* em flogopita de dique de lamprófito (133.7 ± 0.1 Ma), indicando magmatismo concomitante toleítico e alcalino na região do Arco de Ponta Grossa e uma boa correlação entre os dois métodos analíticos. A idade de colocação de dique de basalto andesítico é, no entanto, mais nova e em conformidade com dados $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ *step-heating* obtidos previamente que indicam que o magmatismo básico no arco perdurou por pelo menos 3 m.y..

Referências

- Ambler, E.P., Ashley, P.M. 1980. Mineralogy and petrology of the Dutchmans Creek gabbroic intrusion, South Carolina: discussion. *American Mineralogist*, 65: 1302-1303.
- Baker, J.A., Macpherson, C.G., Menzies, M.A., Thirlwall, M.F., Al-Kadasi, M., Matthey, D.P. 2000. Resolving crustal and mantle contributions to continental flood volcanism, Yemen; constraints from mineral oxygen isotope data. *Journal of Petrology*, 41(12): 1805-1820.
- Barton, M., Van Gaans, C. 1988. Formation of orthopyroxene-Fe-Ti oxide symplectites in Precambrian intrusives, Rogaland, southwestern Norway. *American Mineralogist*, 73: 1046-1059.
- Beccaluva, L., Barbieri, M., Born, H., Brotzu, P., Coltorti, M., Conte, A., Garbarino, C., Gomes, C.B., Macciota, G., Morbidelli, L., Ruberti, E., Siena, F., Traversa, G. 1992. Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquiá, São Paulo, Brazil. *Journal of Petrology*, 33: 1371-1404.
- Chandrasekharam, D., Vaselli, O., Sheth, H.C., Keshav, S. 2000. Petrogenetic significance of ferro-enstatite orthopyroxene in basaltic dikes from the Tapi rift, Deccan flood basalt province, India. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(3-4): 469-476.

Claeson, D.T. 1998. Coronas, reaction rims, symplectites and emplacement depth of the Rymmen gabbro, Transcandinavian Igneous Belt, southern Sweden. *Mineralogical Magazine*, 62(6): 743-757.

Davidson, P. M., Lindsley, D. H. 1989. Thermodynamic analysis of pyroxene-olivine-quartz equilibria in the system CaO-MgO-FeO-SiO₂. *American Mineralogist*, 74: 18-30.

Davidson, J.P., Morgan, D.J., Charlier, B.L.A., Harlou, R., Hora, J.M. 2007. Microsampling and isotopic analysis of igneous rocks: implications for the study of magmatic systems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 273-311.

DePaolo, D.J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53, 189-202.

Efimov, A.A., Malitch, K.N. 2012. Magnetite-Orthopyroxene symplectites in gabbros of the Urals: a structural track of olivine oxidation. *Geology of ore deposits*, 54 (7): 531-539.

Esperança, S., Crisci, G.M., de Rosa, R., Mazzuoli, R. 1992. The role of the crust in the magmatic evolution of the island of Lipari (Aeolian Islands, Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112: 450-462.

Faleiros, F.M., Pavan, M., 2013. Geologia e recursos minerais da folha Eldorado Paulista-SG.22-X-B-VI, Estado de São Paulo, Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, São Paulo, 128 pp.

Florisbal, L.M., Janasi, V.A., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Heaman, L.M. 2012. Contrasted crustal sources as defined by whole-rock and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of neoproterozoic early post-collisional granitic magmatism within the Southern Brazilian Shear Belt, Camboriú, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 39: 24-43.

Gomes, C.B., Ruberti, E., Comin-Chiaramonti, P., Azzone, R.G. 2011. Alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch, SE Brazil: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 152-168.

Haggerty, S.E. 1976. Oxidation of opaque mineral oxides in basalts.. *Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America*, 3: 1-100.

Harris, C. 1989. Covariance of initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios, δ¹⁸O, and SiO₂ in continental flood basalt suites: The role of contamination and alteration. *Geology*, 17(7): 634-636.

Harris, C. 1995. Oxygen isotope geochemistry of the Mesozoic anorogenic complexes of Damaraland, northwest Namibia: evidence for crustal contamination and its effect on silica saturation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122: 308-321.

Harris, C., Marsh, J.S., Milner, S.C. 1999. Petrology of the alkaline core of the Messum Igneous Complex, Namibia: Evidence for the progressively decreasing effect of crustal contamination. *Journal of Petrology*, 40: 1377-1397.

Kendrick, J.L., Jamieson, R.A. 2016. The fate of olivine in the lower crust: Pseudomorphs after olivine in coronitic metagabbro from the Grenville Orogen, Ontario. *Lithos*, 260: 356-370.

Lepage, L.D. 2003. ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry. *Computer & Geosciences*, 29 (5): 673-678.

Lustrino, M., Melluso, L., Brotzu, P., Gomes, C.B., Morbidelli, L., Muzio, R., Ruberti, E., Tassinari, C.C.G. 2005. Petrogenesis of the Early Cretaceous Valle Chico igneous complex (SE Uruguay): Relationships with Paraná-Etendeka magmatism. *Lithos*, 82: 407-434.

McLennan, S.M., Taylor, S.R. 1980. Th and U in sedimentary rocks: crustal evolution and sedimentary recycling. *Nature*, 285: 621-624.

Mingram, B., Trumbull, R.B., Littman, S., Gerstenberger, H. 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos*, 54, 1-22.

Morbidelli, L., Gomes, C.B., Brotzu, P., D'Acquatica, S., Garbarino, C., Ruberti, E., Traversa, G. 2000. The Pariquera-Açu K-alkaline complex and Southern Brazil lithospheric mantle source characteristics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(2): 129-150.

Plank, T. 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents. *Journal of Petrology*, 46(5): 921-944.

Powell, R. 1984. Inversion of the assimilation and fractional crystallization (AFC) equations; characterization of contaminants from isotope and trace element relationships in volcanic suites. *Journal of the Geological Society*, 141: 447-452.

Renne, P.R., Deckart, K., Ernesto, M., Féraud, G., Piccirillo, E.M., 1996. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Paraná flood volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1-2): 199-211.

Ruberti, E., Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P. 2005. The alkaline magmatism from the Ponta Grossa Arch. In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. (eds.). *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform*. Edusp/Fapesp, São Paulo, pp.473-521.

Smith, D. 1971. Stability of the assemblage iron-rich orthopyroxene-olivine-quartz. *American Journal of Science*, 271: 370-382.

Spencer, K.J., Lindsley, D.H. 1981. A solution model for coexisting iron-titanium oxides. *American Mineralogist*, 66 (11-12): 1189-1201.

Spinelli, F.P. 2007. As rochas alcalinas de Cananéia, litoral sul do estado de São Paulo: estudos mineralógicos, geoquímicos e isotópicos. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Streck, M.J. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69: 595-622.

Tepley III, F.J., Davidson, J.P. 2003. Mineral-scale Sr-isotope constraints on magma evolution and chamber dynamics in the Rum layered intrusion, Scotland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 628-641.

Wedepohl, K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217-1232.

PARTE IV

ANEXOS

MANUSCRITOS CIENTÍFICOS

ANEXO A

MANUSCRITO

“Crustal contamination and its role in the petrogenesis of the alkaline to transitional José Fernandes Gabbro, Paraná Magmatic Province, Brazil: evidence from whole-rock elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry”

Crustal contamination and its role in the petrogenesis of the José Fernandes Gabbro, Paraná Magmatic Province, Brazil: evidence from whole-rock elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry

Vidyã Vieira Almeida^{a,b}, Valdecir de Assis Janasi^a, Frederico Meira Faleiros^a

^aDepartamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brazil

^bGeological Survey of Brazil (CPRM), Superintendência Regional de São Paulo (Sureg/SP)

Abstract

The José Fernandes Gabbro, located at the Ponta Grossa Arch, southeast Brazil, is a shallow ~3 km² intrusion related to the Early Cretaceous (134 Ma) intrusive magmatism of the Paraná Etendeka Magmatic Province. The intrusion is emplaced in Precambrian metasedimentary rocks and shows petrographic, geochemical and isotopic data that indicate an important influence of the crust in the evolution of gabbroic rocks and related synplutonic alkaline dykes. Disequilibrium textures and zoning are identified in minerals throughout the intrusion and are evidence for open system processes. Orthopyroxene (Fe-enstatite) (Mg# 49-69) is identified in reaction rims of iron-rich olivine (Mg# 42-61) and in symplectitic intergrowths together with magnetite and ilmenite. The presence of Fe-enstatite can be related either to the entrance of SiO₂ and Al₂O₃ from the melting of metasedimentary rocks and to nonisochemical reactions of olivine with fluids due to hydration under oxidizing conditions. Geochemical data show that fractional crystallization was an important process for the evolution of the intrusion due to Eu anomalies, indicating fractionation of plagioclase, and negative correlation between whole-rock SiO₂ content with CaO and Mg#. The positive correlation of SiO₂ with Sr-Pb initial ratios show evidence for crustal contamination during fractionation. However, the contamination is heterogeneous throughout the intrusion, as gabbroic rocks are cut by primitive (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i 0.7049) and contaminated dykes (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i 0.707), necessarily indicating that the intrusion was formed by pulses of magma with distinct crustal contributions. The nature of the contaminant are potentially metapelitic rocks due to enrichment of K₂O over Na₂O observed in higher initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (>0.707) samples and by evidence for a low time-integrated Th/U component typical of the upper crust. Assimilation fractional crystallization and mixing models show that the parental magma can be of basanite

composition that evolved to compositions with higher Sr-Pb ratios by fractional crystallization and assimilation of a melt from metasedimentary rocks of the Ribeira Belt.

1. Introduction

The mechanisms of ascent of mantle-derived melts that lead to their emplacement into the continental crust can influence magma signatures depending, among other factors, to the tectonic setting and nature of the host rock, with great potential to present some type of contamination (e.g., Reiners et al., 1996; Halama et al., 2004). The crust is considered to act as a density filter and to influence the trace element concentration of the mafic melt (Lightfoot et al., 1991), potentially generating hybrid magmas with high crustal contribution (Reiners et al., 1996). The crust is also considered to have an important role even in the evolution of mantle-derived nepheline- and olivine-normative magmas emplaced in crustal chambers (Azzone et al., 2016). In volcanic settings, changes in magma series are interpreted to be formed due to a crustal component, with transitions from calc-alkaline to tholeiitic lavas of the same volcanic zone, depending on the time of magma residence in the continental crust (e.g., Hunter, 1998; Hora et al., 2009). Although there is a discussion whether fractional crystallization pre- or post-date contamination (Lightfoot et al., 1991), AFC process (assimilation coupled with fractional crystallization) (e.g., DePaolo, 1981) is commonly displayed by continental basalts (e.g., Shervais, et al., 2007; Chatterjee and Bhattacharji, 2008) and layered intrusions (e.g., Tegner et al., 2005).

In the Paraná-Etendeka Magmatic Province (PEMP), suites from Damaraland, Namibia (e.g., Harris, 1995; Harris et al., 1999; Mingram et al., 2000; Trumbull et al., 2004) and Valle Chico (Laguna Merín rift basin), Uruguay (e.g., Lustrino et al., 2005; Ruberti et al., 2005b; Cernuschi et al., 2015) show similarities, with close relationship of tholeiitic and alkaline rocks composed of considerable amounts of mafic rocks associated with felsic lithotypes, with local occurrence of granitic bodies and with important influence of crustal melting. In Valle Chico complex, besides the involvement of the upper crust in the generation of the felsic rocks, isotopic data also suggests the influence of the lower crust (Lustrino et al., 2005). Some suites are even considered to be eruption centers for quartz latite pyroclasts from the province (e.g., Milner et al., 1995), like the Messum Complex in Namibia (Harris et al., 1999).

In the region of the Ponta Grossa Arch (PGA) (Figure 1 and 2a), south Brazil, the crustal contamination signatures of Mesozoic alkaline suites-complexes are variable and seem related to the nature of the host rock and temperature of the alkaline magma. Some intrusions are emplaced in Precambrian granitic batholiths (e.g., Banhadão, Itapirapuã), migmatites (e.g., Juquiá) and others in metasedimentary rocks (e.g., Jacupiranga, Pariquera-Açu, Cananéia) (e.g., Gomes et al., 2011). The Late Cretaceous Cananéia Massif shows prominent geochemical and isotopic indications of contamination throughout the body (Spinelli, 2007). In this case, the rocks are mainly syenitic and emplaced in metasedimentary geological units considered to have low melting temperatures of about 650-900 °C for pelitic and greywacke composition (e.g., Milord et al., 2000).

In this work we describe an Early Cretaceous (134 Ma) mafic intrusion (José Fernandes Gabbro) located at the PGA, composed of silica-saturated/oversaturated gabbroic rocks cut by alkaline dykes (basanite-phonotephrite-trachybasalt). The intrusion is emplaced in Mesoproterozoic metasedimentary rocks of the Votuverava Group (Faleiros and Pavan, 2013) and show close relationship of rocks with crustal and mantle signatures. Whole-rock major and trace element geochemical data together with Sr-Nd-Pb isotopic ratios were obtained in order to study the nature of the parental magmas and the influence of upper continental crust, with implications to the magmatism of the PEMP.

2. Geological Background

The Ponta Grossa Arch (PGA) (Figure 2a) is a large tectonic structure located in south Brazil formed as a result of a regional Jurassic-Early Cretaceous uplift responsible for the formation of NW-SE magnetic lineaments named from north to south: Guapiara, São Jerônimo-Curiúva, Rio Alonzo and Rio Piquiri (Ferreira et al., 1982; Almeida et al., 1983; Raposo, 1995). The lineaments show prominent NW-SE tholeiitic dyke swarm (Ponta Grossa Dyke Swarm - PGDS) considered as potential feeders of the northern lava flows of the Paraná-Etendeka Magmatic Province (PEMP) that preceded the opening of the South Atlantic Ocean. Early and Late Cretaceous alkaline complexes, pipes and plugs are concentrated between the Guapiara and São Jerônimo-Curiúva lineaments. The alkaline intrusions are emplaced in the Precambrian crystalline basement composed of metamorphic terrains with Paleo- to Neoproterozoic geological units intruded by Ediacaran granites and separated by extensive shear zones (e.g., Faleiros et al., 2011). The alkaline intrusions in general are potassic and some of them are composed of mafic (gabbroic rocks) and ultramafic rocks

(dunite, clinopyroxenite) with cumulate origin and with close relationship with carbonatitic rocks. The 65 km² Jacupiranga Carbonatitic Complex is the largest and most representative alkaline intrusion of this rock association (Gaspar, 1989). Some occurrences are mainly composed of syenitic rocks sometimes with cumulate origin (e.g., Banhadão, Cananéia, Tunas). The alkaline intrusions appear to be both coeval with (e.g. Jacupiranga, Juquiá with ~130 Ma) and much younger than (e.g. Tunas, Cananéia with ~85 Ma) the adjacent Paraná basaltic lavas (Ruberti et al., 2005a, Gomes et al., 2011). ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr initial ratios of Early Cretaceous intrusions are in the range from 0.7049 to 0.7057 (Jacupiranga, Pariquera-Açu) and 0.7049 to 0.7059 to some Late Cretaceous intrusions (Mato Preto and Tunas; Ruberti et al., 2005a). Higher ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr initial ratios interpreted as evidence for crustal contamination are found in rocks from Juquiá (0.7060-0.7078; Beccaluva et al., 1992), syenitic dykes in Tunas (0.7078-0.7081; Gomes et al., 1987) and Cananéia (0.7065-0.7078; Spinelli, 2007). Initial ¹⁴³Nd-¹⁴⁴Nd ratios for all intrusions are in the range 0.5123-0.5127 (Ruberti et al., 2005a).

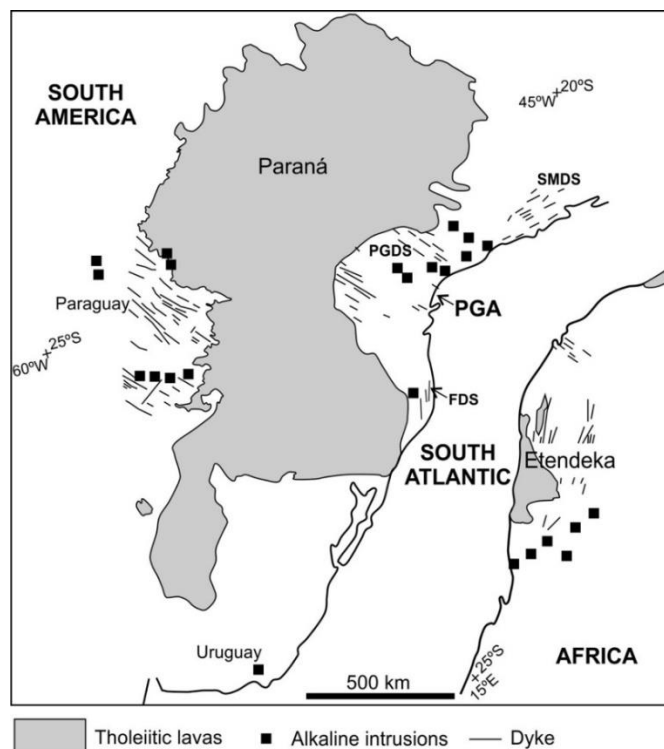


Figure 1. Pre-drift reconstruction of Paraná-Etendeka Magmatic Province (modified from Gibson et al., 2006), showing the spatial distribution of tholeiitic lavas, dyke swarms (Ponta Grossa, PGDS; Serra do Mar, SMDS and Florianópolis, FDS) and Early Cretaceous alkaline intrusions located at Ponta Grossa Arch (PGA), Paraguay, Uruguay and Africa.

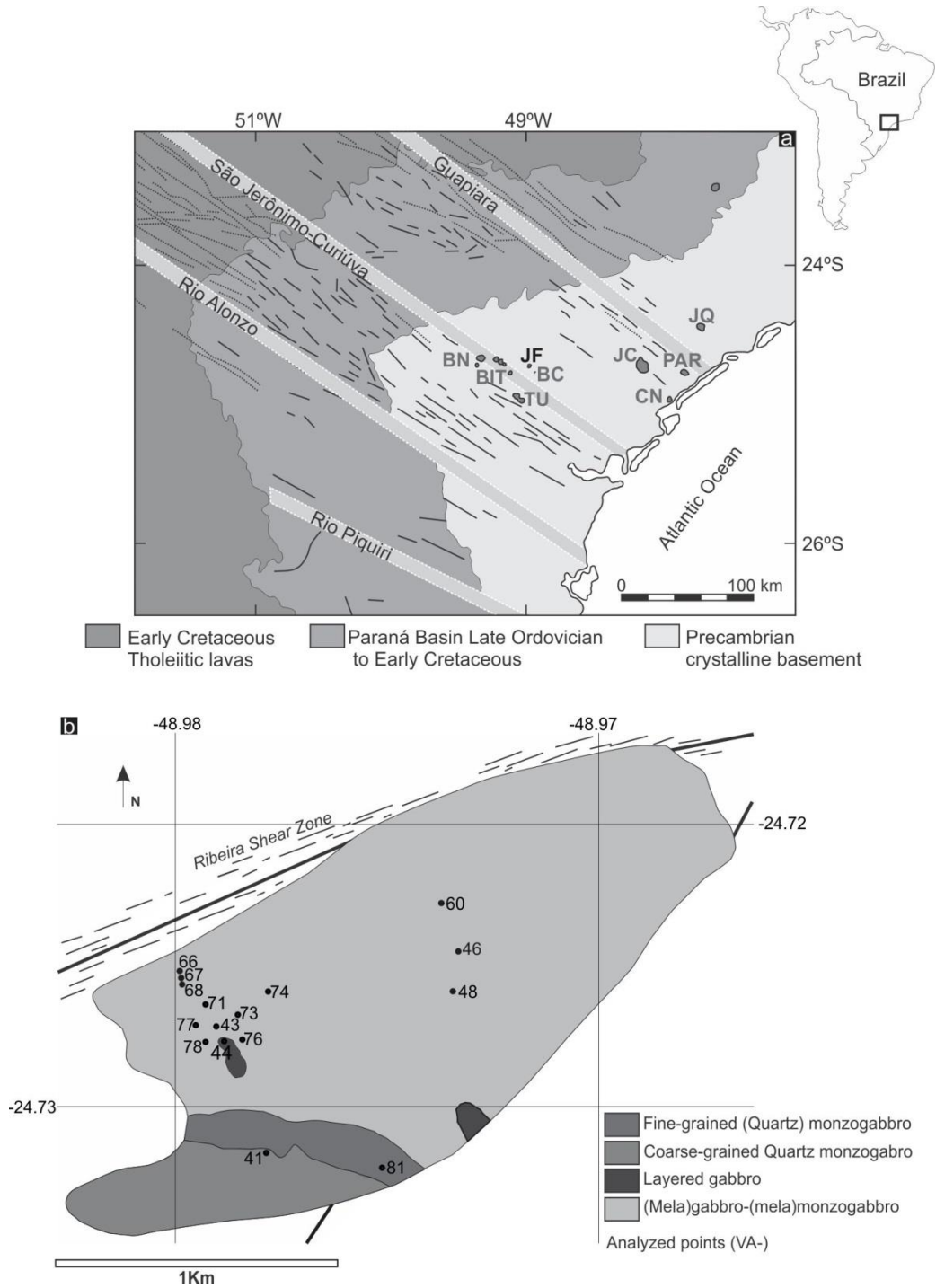


Figure 2. (a) Schematic map of the PGA showing the main magnetic lineaments (Guapiara, São Jerônimo Curiúva, Rio Alonzo and Rio Piquiri) and the main alkaline intrusions (JC – Jacupiranga, JQ – Juquiá, PAR – Pariquera-Açu, CN – Cananéia, BN – Banhadão, BIT – Barra de Itapirapuã, TU – Tunas, BC – Bairro da Cruz, JF – José Fernandes Gabbro). Modified from Rubert et al., (2005). (b) Geological map of the José Fernandes Gabbro.

2.1. The José Fernandes Gabbro

The José Fernandes Gabbro is a ~3 km² mafic intrusion (Figure 2b) located close to alkaline bodies (e.g, Tunas, Banhadão, Mato Preto) near the São Jerônimo-Curiúva Lineament in the PGA. Although the gabbro outcrops in a relatively small area, aerogeophysical data show an expressive magnetic anomaly in the region of the intrusion that comprises a larger area at greater depths.

Initial studies considered the gabbro as part of the Mesozoic tholeiitic magmatism due to mineralogical affinities with tholeiitic intrusive bodies from PEMP (e.g., the presence of two pyroxenes, augite and locally pigeonite) (Pieruceti, 1973; Pieruceti and Gomes, 1975). As a result of our new systematic work, a zircon ID-TIMS U-Pb age of 134 Ma was obtained in a quartz monzogabbro sample (Almeida et al., *submitted*) which fits the intrusion in the context of the Early Cretaceous magmatism of the PEMP.

The gabbro is emplaced in Mesoproterozoic metasedimentary rocks of the Votuverava Group (Açungui Supergroup) (quartzite, phyllite and marble) (Faleiros and Pavan, 2013) and is limited by the Ribeira Shear Zone in the north (Figure 2). The compositions of representative samples from main rock types are presented in Figure 3.

The intrusion is mostly composed of a silica-saturated unit with medium to coarse-grained (mela)gabbro-(mela)monzogabbro with larger, up to 2 cm, clinopyroxene (Cpx) crystals surrounded by small plagioclase (Pl) (Figure 4a). The melagabbros show consistent discontinuities with NW direction that can be interpreted as bedding planes (Figure 4b). Centimetric syenitic pockets are locally observed enclosed in melagabbro (Figure 4c). Fine-grained regions are also found and present medium- to coarse-grained angular fragments of melagabbro (Figure 4d). Medium-grained layered gabbro with vertical or crossed sheeting locally occur (Figure 4f-h). In this case the rock shows an alternation between millimetric to centimetric felsic layers essentially composed of Pl and layers with more concentration of mafic minerals such as Cpx and Ol. Blocks of monzonite are also locally found within the (mela)gabbro-(mela)monzogabbro unit.

Silica-oversaturated rocks occur in the southern portion of the intrusion. Medium- to coarse-grained quartz monzogabbro is in abrupt contact with a fine to medium-grained quartz monzogabbro, locally porphyritic with Pl phenocrysts. The coarse-grained quartz monzogabbro shows locally mm-sized quartz veinlets with a hydrothermal alteration halo in the host rock (Figure 4e, Figure 5a). Carbonatic veinlets occur near the contact of the gabbro with country marbles of the Votuverava Group (Figure 5b).

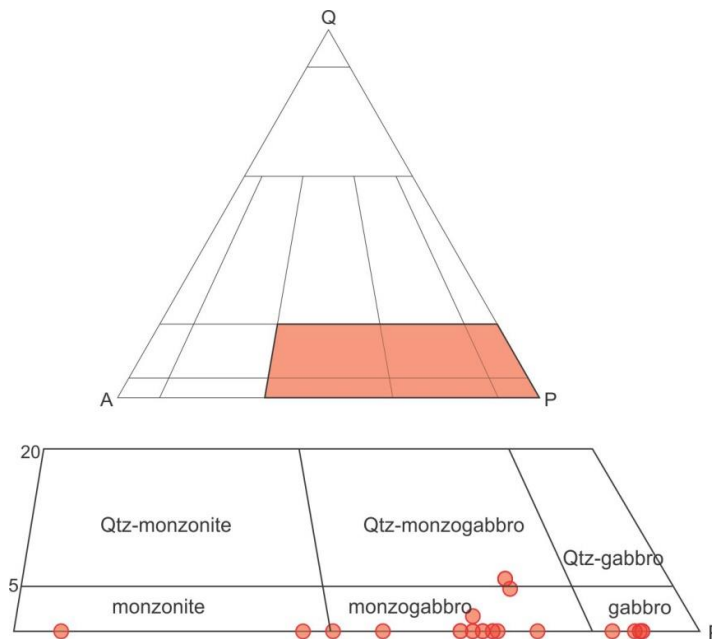


Figure 3. Representative composition of the main rock types described in the José Fernandes Gabbro (QAP diagram, Streckeisen, 1974).

Mafic enclaves with centimetric to decimetric dimension are common in the melagabbro. They are dark-gray and fine-grained with a diversity of shapes, with rounded and angular forms (Figure 5c-f). A dark reaction rim is observed in the contact between the enclave and the host gabbro (Figure 5c-d). Some enclaves show mafic pockets apparently segregated from felsic regions (Figure 5c). However, a layering defined by the alternation between mafic and felsic millimetric layers is also observed (Figure 5d).

Alkaline dykes are observed throughout most of the intrusion (Figure 6a-f), with the notable exception of the fine- to medium-grained quartz monzogabbro. They are up to 1 m thick with NW and WNW average directions. The thickest dykes show an aphanitic border in the contact with the host gabbro. Their compositions are highly variable, and include basanite, tephrite, phonotephrite, trachybasalt and basaltic trachyandesite rocks sometimes with millimetric Cpx and/or Pl phenocrysts embedded in a fine-grained matrix. Some dykes of basanite, trachybasalt and basaltic trachyandesite composition have sinuous contacts with the host rock (Figure 6b, 6d-e), indicative of a synplutonic character. In a melagabbro outcrop, some dykes show curves in the discontinuities of the melagabbro interpreted as bedding planes (Figure 6c-d). This is not observed in the tephrite and phonotephrite dykes (Figure 6a, Figure 6e).

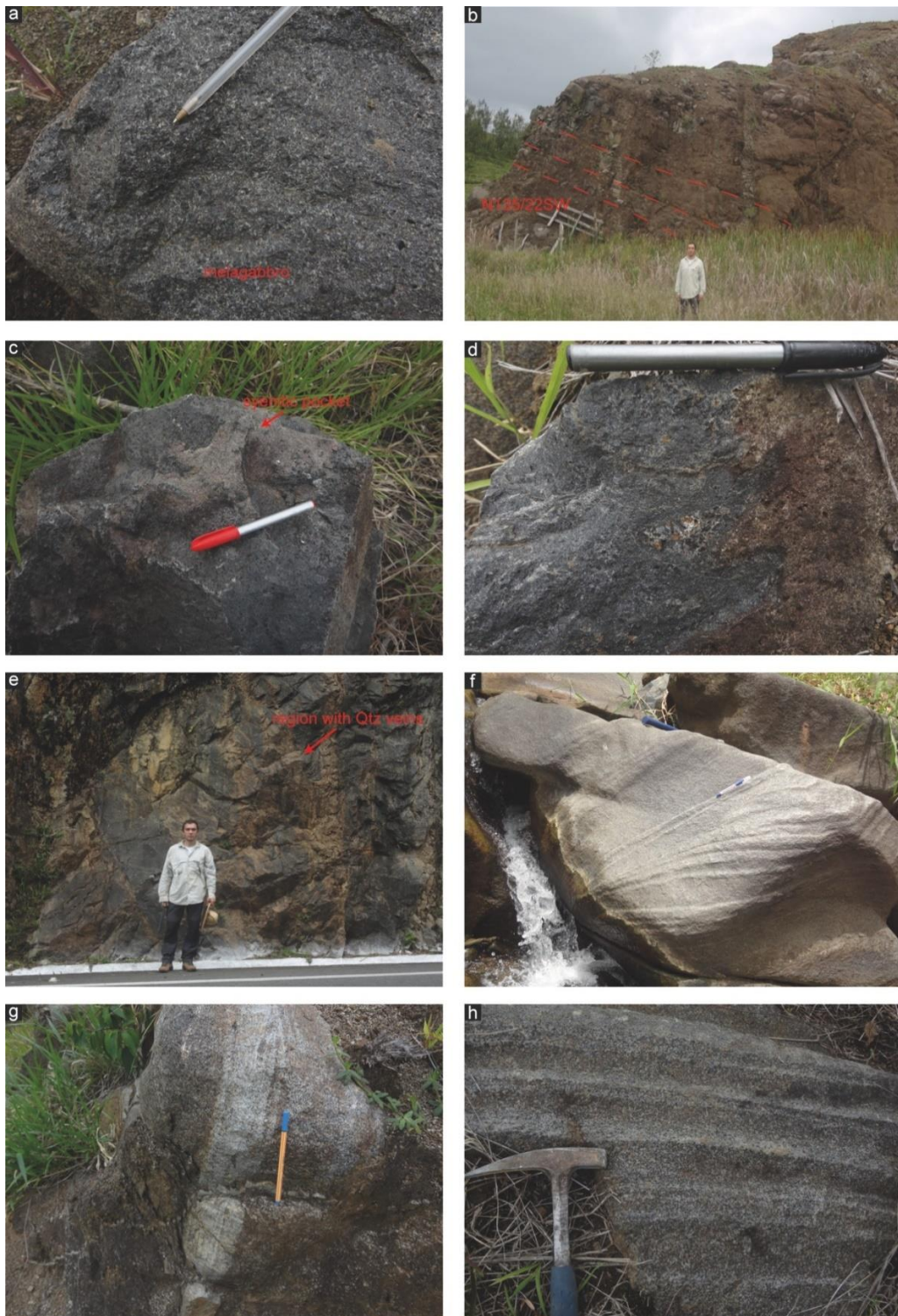


Figure 4. (a) Melagabbro sample showing Cpx crystals surrounded by Pl. (b) Melagabbro-melamonzogabbro outcrop showing consistent discontinuities interpreted as bedding planes. (c) syenitic pocket enclosed in melagabbro rocks. (d) fine-grained region in melagabbro with enclosed fragments of coarse-grained melagabbro. (e) Region in Quartz monzogabbro outcrop with quartz veinlets. (f) Layered gabbro with crossed sheeting. (g) Layered gabbro with vertical sheeting. (h) Layered gabbro block showing the alternation between mafic and felsic layers.

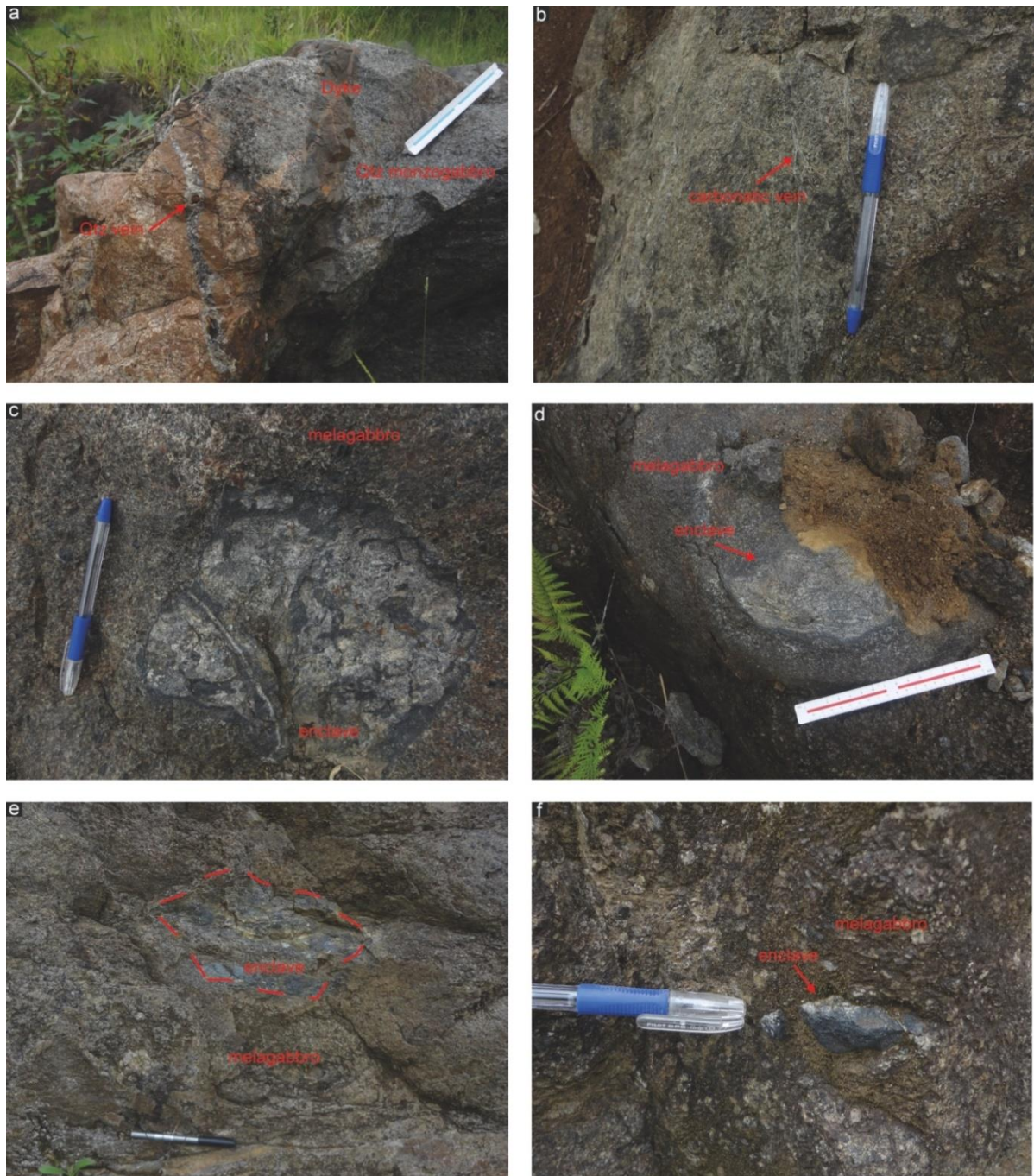


Figure 5. (a) Quartz veinlet with hydrothermal halo within a quartz monzogabbro. (b) Carbonatic veinlets in a gabbro near the contact with country marble from the Votuverava Group. (c) Enclave with dark reaction rim in the contact with the host melagabbro. The enclave shows mafic pockets segregated from felsic regions. (d) Enclave with an alternation between mafic and felsic millimetric layers. The enclave also shows a dark reaction rim. (e) Enclave enclosed in melagabbro. (f) Cm-sized enclave enclosed in melagabbro.

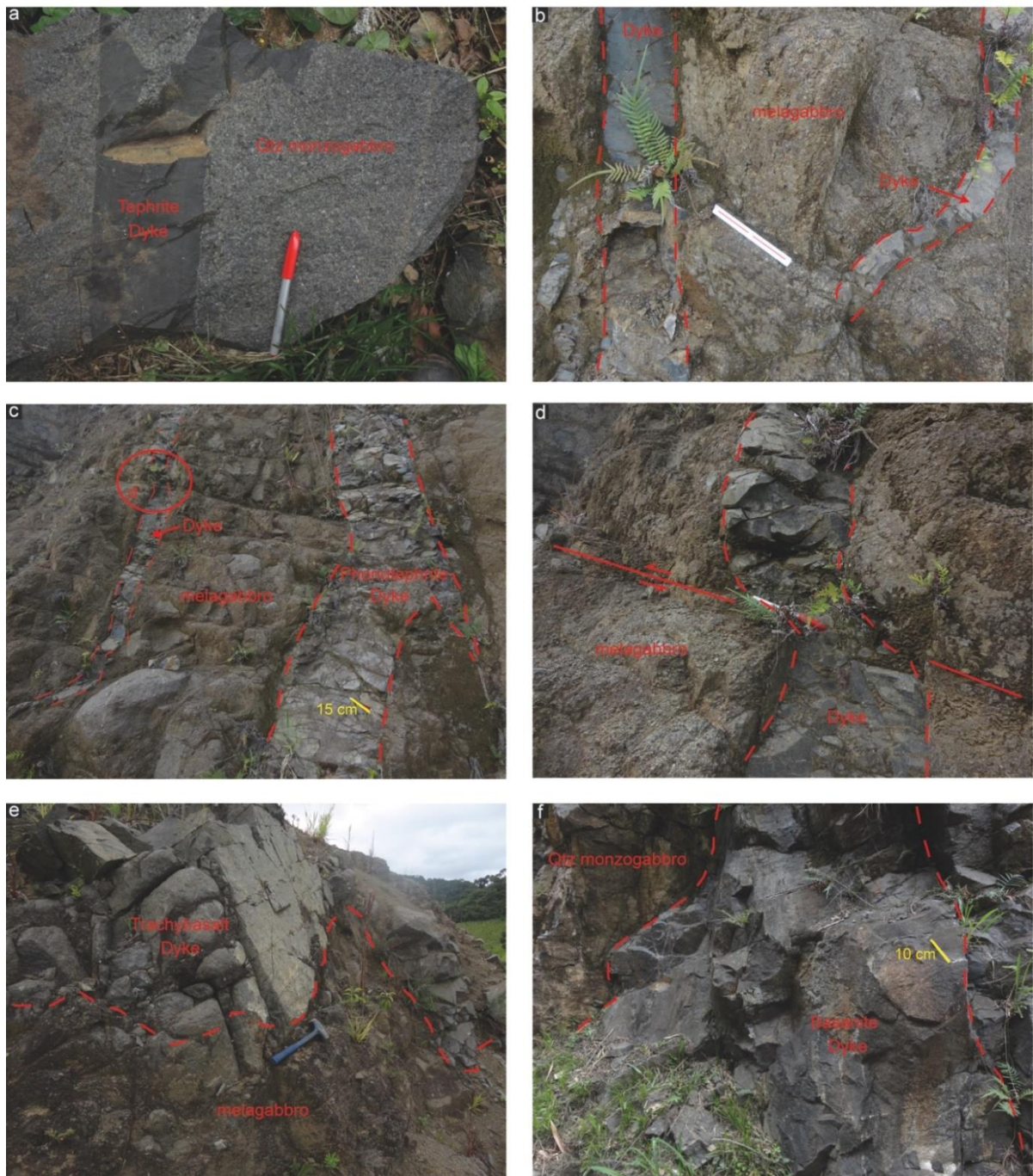


Figure 6. (a) Tephrite dyke intruding a quartz monzogabbro. (b) Altered dykes with sinuous contact with melagabbro. (c) Dykes within melagabbro. (d) Dyke showing a sinuous contact with the host melagabbro in the region of a bedding plane. (e) Trachybasalt dyke with irregular shape. (f) Basanite dyke within a quartz monzogabbro.

3. Analytical Techniques

3.1. Electron Microprobe Analyses in minerals

Major elements in minerals were analyzed by electron microprobe at Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta (JEOL JXA-8900R), at NAP-Geoanalítica, Universidade de São Paulo (JEOL JXA-FE-8530) and at Universidade de Brasília (JEOL JXA-8230). Analyses were performed at 15 kV acceleration voltage and 20 nA beam current; beam diameter was normally 5-10 μm . Standards were natural and synthetic minerals. Data reduction was performed using a CITZAF (Armstrong, 1995) and ZAF corrections.

3.2. Whole-rock major and trace element analyses

Major and trace element whole-rock analyses were obtained at the NAP-Geoanalítica facility, Universidade de São Paulo. The rock samples were crushed using a hydraulic press and then powdered using an agate shatter box. Major and some trace element analysis were performed respectively in fused and pressed pellet discs by X-Ray Fluorescence (XRF) following the methods described by Mori et al. (1999). Additional trace elements, including REE, Th, U and the HFS, were obtained by ICP-MS, after sample dissolution by acid attack ($\text{HF}+\text{HNO}_3$), following the procedures by Navarro et al. (2008).

3.3. Isotope analyses

3.3.1 Whole-rock Sr-Nd-Pb analyses

Sr, Nd and Pb isotopic ratios were obtained at the Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo) facility, Universidade de São Paulo, by thermal ionization mass spectrometry (TIMS) using a VG354 spectrometer equipped with a single Faraday detector. In most cases, the same powders prepared for elemental analyses were used for Sr and Nd isotopic determinations after element separation in ion exchange columns following the procedures of Torquato and Kawashita (1994) and Sato et al. (1995). No spikes were added; Rb/Sr and Sm/Nd isotope ratios were calculated using element concentrations obtained by XRF and ICP-MS, respectively. For Pb isotopic analyses, the samples were crushed to granule size using a steel pestle in order to avoid common Pb contamination. The granule-

sized samples were cleaned using Milli-Q water and HNO₃ before being powdered in a tungsten shatter box. Details of chemical procedures for the Pb isotopic analyses are described in Babinski et al. (1999) and Marques et al. (1999).

4. Petrography

4.1. Main plutonic rocks

Homogeneous, non-layered, quartz-free **gabbros** and **monzogabbros** constitute most of the José Fernandes Gabbro, and may be locally mafic-rich (melanocratic varies, M up to 70%), when they correspond to orthocumulates, according to the classification of Wagner and Brown (1968). These rocks show inequigranular texture with 0.5-2 cm zoned larger euhedral and subhedral Cpx (augite and diopside, Mg# 79-94) (Figure 7a-b) surrounded by a matrix with up to 1 mm Pl (andesine-labradorite, An₄₂₋₆₉) laths (Figure 7c), with oscillatory zoning, associated with small Cpx crystals, biotite (Bt) and opaque minerals (mainly magnetite and ilmenite). Up to 10 % vol. Ol crystals (typically iron-rich; Mg# 45-61) are identified in some of these rocks (Figure 7e). Small anhedral K-feldspar (orthoclase) crystals are concentrated in some portions (Figure 7d) and in interstices and sometimes shows slightly irregular contacts with plagioclase; apatite also occurs in interstices. Small Pl, Ol and opaque minerals (magnetite and ilmenite) are sometimes observed inside large Cpx crystals. Some thin sections show up to 12% vol of Bt crystals concentrated in pockets associated with feldspar (Figure 7e). In these samples the larger Cpx crystals show prominent zones with Bt intergrowths (Figure 7f-g). The fine-grained enclaves (Figure 8a) enclosed in melagabbro have alternating mafic layers composed of small Cpx crystals (diopside, locally augite, Mg# 72-94) and subordinated Ol (Mg# 56-57) with straight contacts forming triple junctions (Figure 8b), sometimes with interstitial Pl, and thin layers composed of small Pl crystals (labradorite, An₅₀₋₅₉) also with straight contacts with a mosaic texture (Figure 8c). Larger euhedral Cpx crystals are found in some portions of the enclaves.

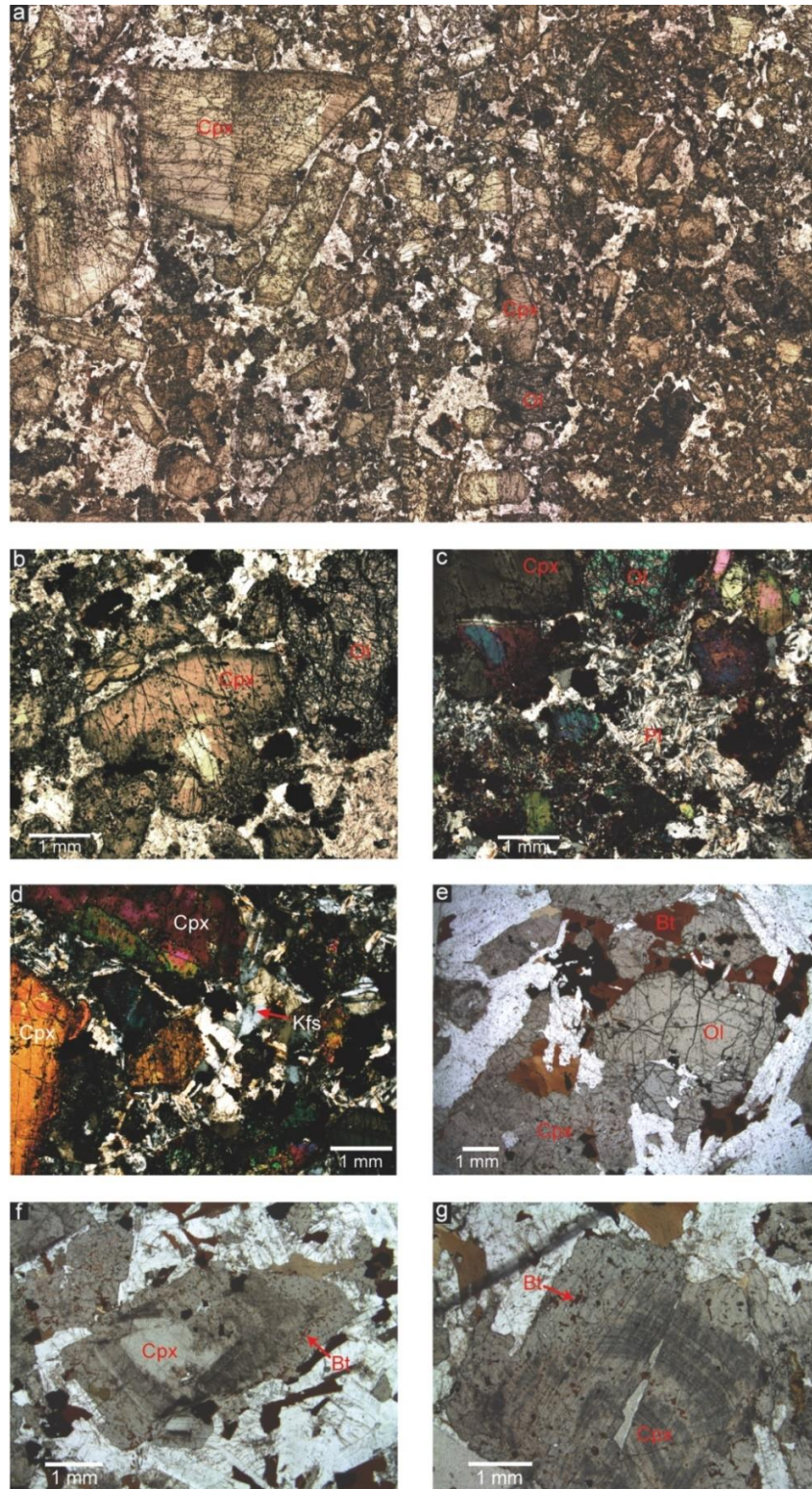


Figure 7. Transmitted-light photomicrographs of melagabbro-melamonzogabbro samples. (a) Thin section of melamonzogabbro sample showing the inequigranular texture with larger Cpx crystals. (b) Zoned Cpx crystal in contact with Ol. (c) Pl crystals concentrated at the matrix of melamonzogabbro. (d) K-feldspar crystals in the matrix of melamonzogabbro. (e) Bt crystals surrounding Ol of a melagabbro sample. (f) Zoned Cpx crystal with brighter cores and rims with intergrowths with Bt. (g) Cpx crystal with oscillatory zoning and rims with intergrowths with Bt.

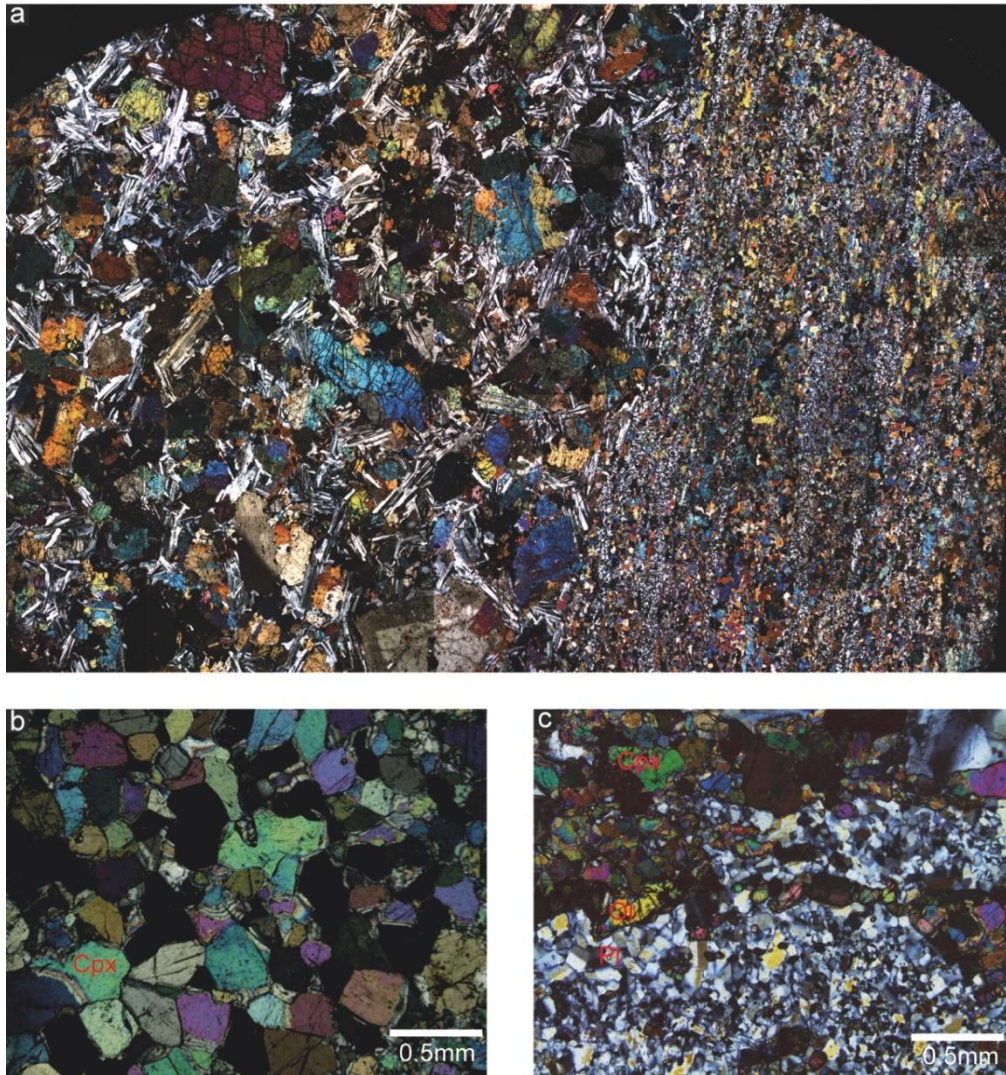


Figure 8. Transmitted-light photomicrographs of enclaves enclosed in melagabbro-melamozogabbro. (a) Thin section showing the contact between melagabbro (left) and fine-grained enclave (right). (b) Cpx crystals with straight contacts forming triple junctions in mafic layer from an enclave. (c) Layer with concentration of Pl crystals in enclave.

In thin section the medium-grained **layered gabbros** are composed of subcentimetric anorthositic layers with concentration of euhedral and subhedral Pl (andesine-labradorite, An_{48-67}) laths, with up to 3 mm, oriented parallel to layering (Figure 9a). K-feldspar (orthoclase, Or_{65-77}), with up to 2 mm, is often present in interstices and sometimes consists of poikilitic crystals with smaller inclusions of Pl (Figure 9c). These anorthositic layers alternate with layers where Pl is accompanied by Cpx (augite-diopside, Mg# 75-89) and Ol (Mg# 46-61). Cpx (up to 3 mm) is euhedral and subhedral, and may show corroded light cores mantled by wide brownish rims (Figure 9b), and associated anhedral Ol crystals (up to 1.5 mm). Reaction rims of hornblende (Hb) occur in some Cpx crystals. Interstitial Bt (up to 1 mm) occurs locally.

The medium-grained **monzonite**, found locally as metric blocks within (mela)gabbro-(mela)monzogabbro unit, presents up to 30% vol. of mafic minerals. The thin section shows poikilitic K-feldspar (orthoclase Or₅₉₋₆₇) (Figure 10f), with up to 3 mm, involving small Cpx (augite, Mg# 65-78) and Pl (andesine-labradorite, An₃₈₋₅₃).

The **medium- to coarse-grained quartz monzogabbro** presents up to 50 % vol. mafic minerals concentrated in mafic aggregates separated by regions composed of subhedral, with up to 5 mm, Pl laths (labradorite cores, An₅₀₋₅₈ and andesine-labradorite rims, An₃₁₋₅₃), sometimes with oscillatory zoning (Figure 10a) and up to 2 mm anhedral K-feldspar (orthoclase, Or₅₄₋₅₉) (Figure 10b). Up to 3% vol of quartz occurs in interstices (Figure 10c). Fine-grained regions with concentration of Pl are locally found (Figure 10d). The mafic aggregates are composed of brownish subhedral and anhedral Cpx (augite Mg# 56-77 and locally pigeonite Mg# 55), with 1 to 4 mm, with oscillatory zoning and reaction rims of hornblende (Hb) and Bt. Up to 4% vol. of up to 2 mm iron-rich Ol (Mg# 42-44) may occur (Figure 10e). Smaller greenish Cpx crystals are in irregular contact with brownish Cpx.

The **fine- to medium-grained quartz monzogabbro** shows up to 40% vol of mafic minerals. The texture is locally inequigranular with subhedral Pl phenocrysts (An₄₉₋₅₉) (Figure 10g), with up to 5 mm, with partially corroded rims and with prominent oscillatory zoning. The fine-grained matrix is composed of subhedral Pl crystals, with up to 1 mm, with concentric extinction and oscillatory zoning. Small K-feldspar (orthoclase, Or₆₇₋₇₅) occurs in interstices, associated with small quartz crystals. Mafic aggregates are composed of opaque minerals and small (<<1 mm) colorless to slightly brown Cpx (augite, Mg# 65) frequently with reaction rims of green Hb and Bt (Figure 10h).

The larger Cpx crystals found in the gabbroic samples show prominent zoning that consists of brighter rounded cores, sometimes with resorption textures (Figure 7b, 7f, 9b), surrounded by a thick brownish rim with oscillatory zoning and intergrowth with small (Bt) grains. The Cpx crystals also show a thin greenish rim near the contact with the matrix. In some melagabbro, monzogabbro and quartz monzogabbro samples iron-rich olivine shows locally reaction rims composed of Opx (Fe-enstatite, Mg# 49-69, Table 1) with biotite borders (Figure 11c-d). Fe-enstatite also forms symplectitic intergrowths associated with worm-like magnetite and ilmenite crystals surrounding iron-rich Ol (Figure 11a-b, e-f); biotite also appears at the rims of these intergrowths (Figure 11f). The Opx has variable compositions, with higher MgO (up to 24 wt%) in melagabbro-melamonzogabbro and lower (up to 18 wt%) in quartz monzogabbro (Table 1).

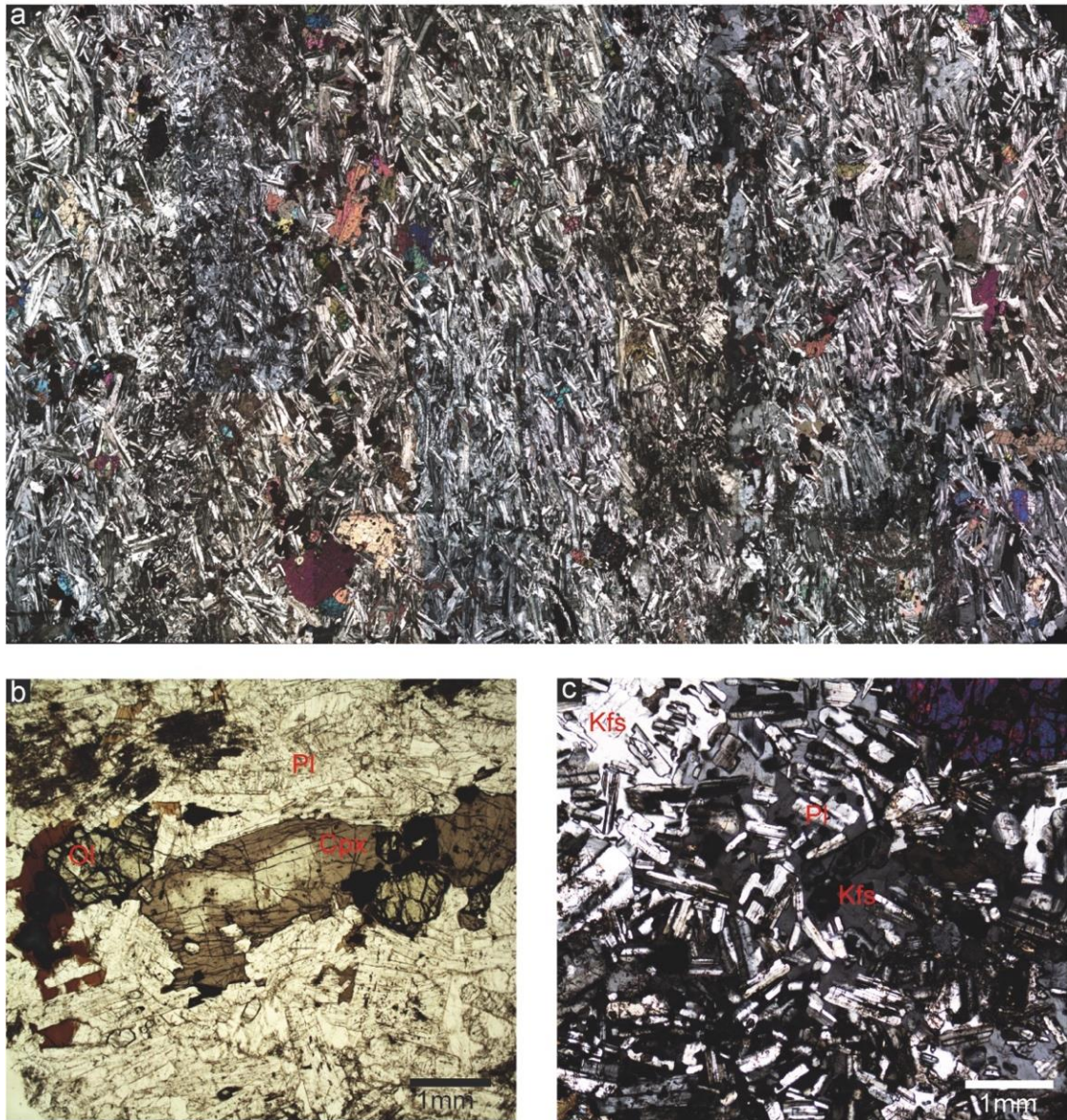


Figure 9. Transmitted-light photomicrographs of layered gabbro. (a) Thin section of layered gabbro sample. (b) Zoned Cpx crystal with brighter core and brownish rim in contact with Ol. (c) Poikilitic K-feldspar crystals with smaller inclusions of Pl.

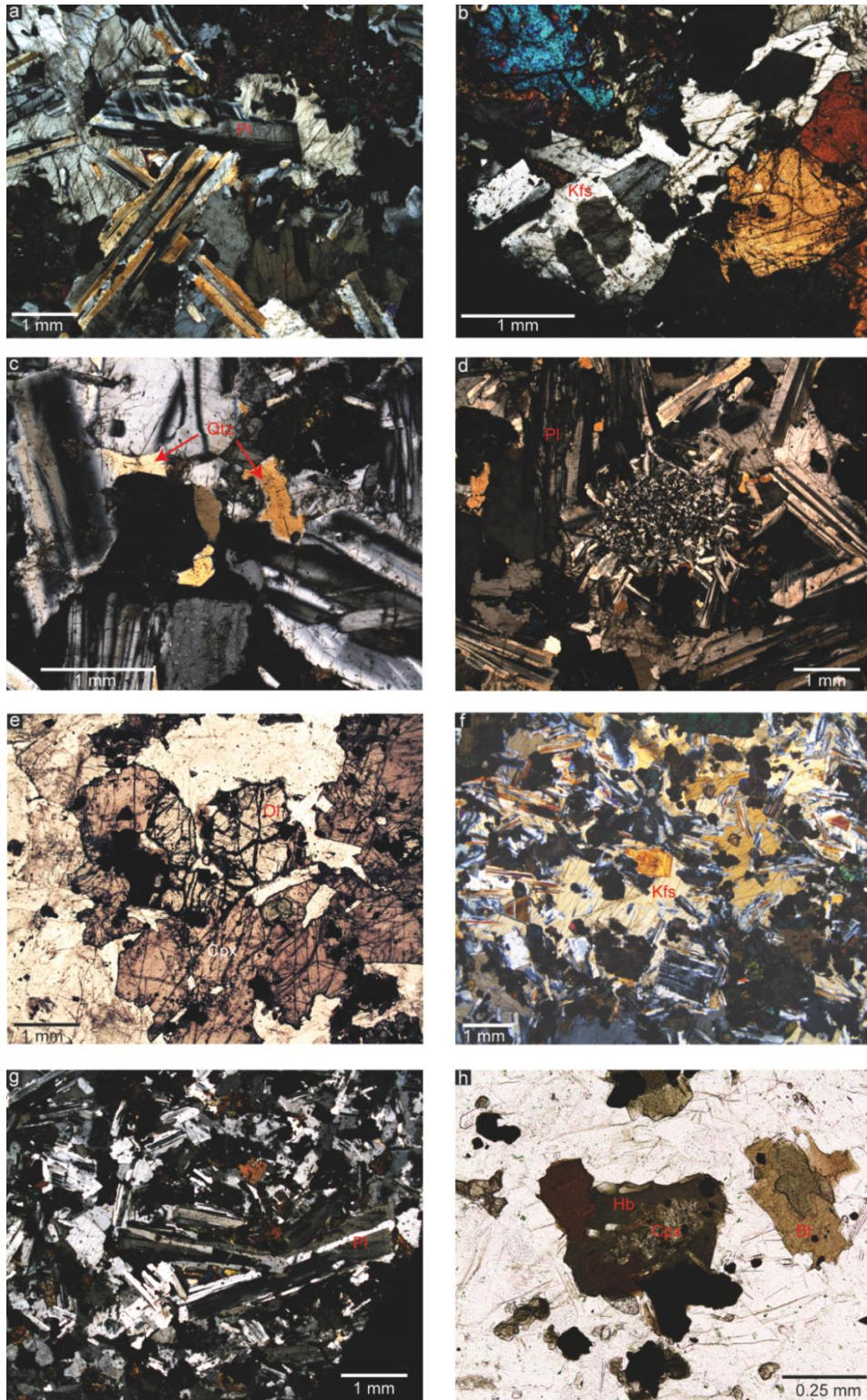


Figure 10. Transmitted-light photomicrographs of medium- to coarse-grained Quartz monzogabbro (a-e), monzonite (f) and fine- to medium-grained monzogabbro (g). (a) Pl crystal with oscillatory zoning. (b) Region with concentration of K-feldspar crystals. (c) Interstitial quartz. (d) Fine-grained portion with concentration of small Pl crystals. (e) Ol crystal in contact with Cpx. (f) Poikilitic K-feldspar with smaller Pl inclusions. (g) Inequigranular texture in monzogabbro with larger Pl crystals. (h) Cpx with reaction rim formed by Hb.

4.2. *Dykes and country rocks*

Some metric dykes show an aphanitic border at the contact with the host gabbro (Figure 12a). In this case, Pl and Cpx xenocrysts are observed in this region (Figure 12a). Basanite dykes that cut quartz monzogabbro are porphyritic, with mm-sized Cpx (diopside, Mg# 82-91) and sometimes Ol phenocrysts (Mg# 83-86) (Figure 12b) set in a fine-grained matrix composed of Cpx (diopside, Mg# 82-88) and opaque minerals, including sulfides, associated with albite (Ab₉₄₋₉₅) and locally K-feldspar (Or₉₀₋₉₅) in interstices. Basanite dykes also show prehnite and pumpellyite in the matrix. Kaesurtite occurs in samples of basanite and phonotephrite composition (Figure 12c-d). In phonotephrite, some Cpx and Pl occur in aggregates (Figure 12d), while kaesurtite occurs in the matrix associated with Pl (labradorite, An₆₁ and bytownite An₇₀₋₇₉), Bt and opaque minerals (magnetite and sulfides). Pl (labradorite, An₅₂₋₆₄) and Cpx (diopside, Mg# 83-92) phenocrysts/xenocrysts occur in trachybasalt and basaltic trachyandesite dykes (Figure 12g-h) and show reaction rims with concentration of opaque minerals; Pl may locally occur in aggregates (Figure 12h).

The country rocks are metasedimentary rocks of the Votuverava Group mainly composed of quartzites, mica schist and marble with low to medium metamorphic grade.

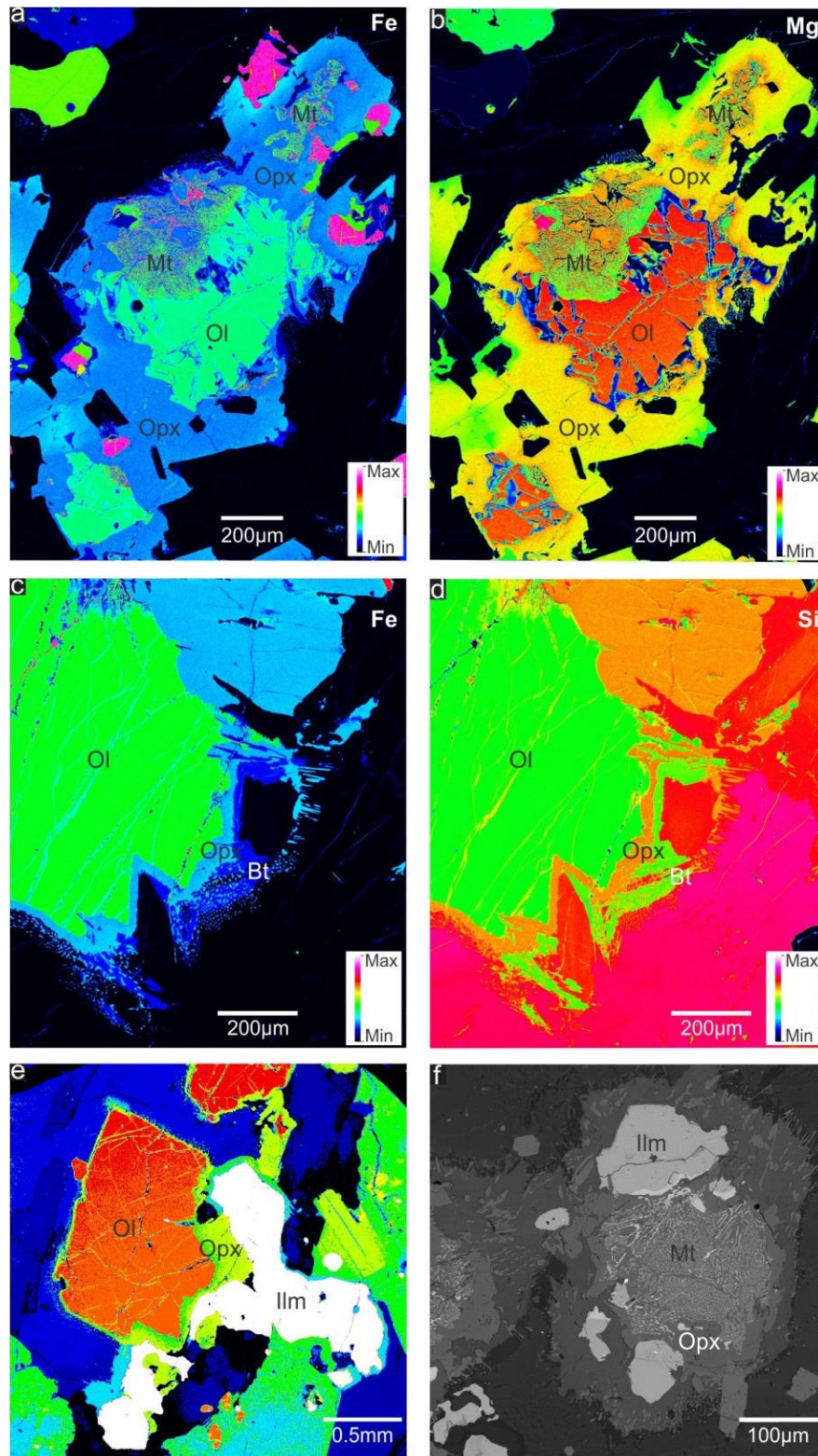


Figure 11. (a) Fe and (b) Mg X-ray compositional maps of Opx crystal surrounding Ol and locally with symplectitic intergrowth with magnetite (Mt). (c) Fe and (d) Si X-ray compositional maps of Ol crystal with reaction rim formed by Opx and Bt. (e) False-color BSE (backscattered electron) image of Ol with reaction rim formed by Opx. (f) BSE image of symplectitic intergrowth between Opx and magnetite in a Quartz monzogabbro.

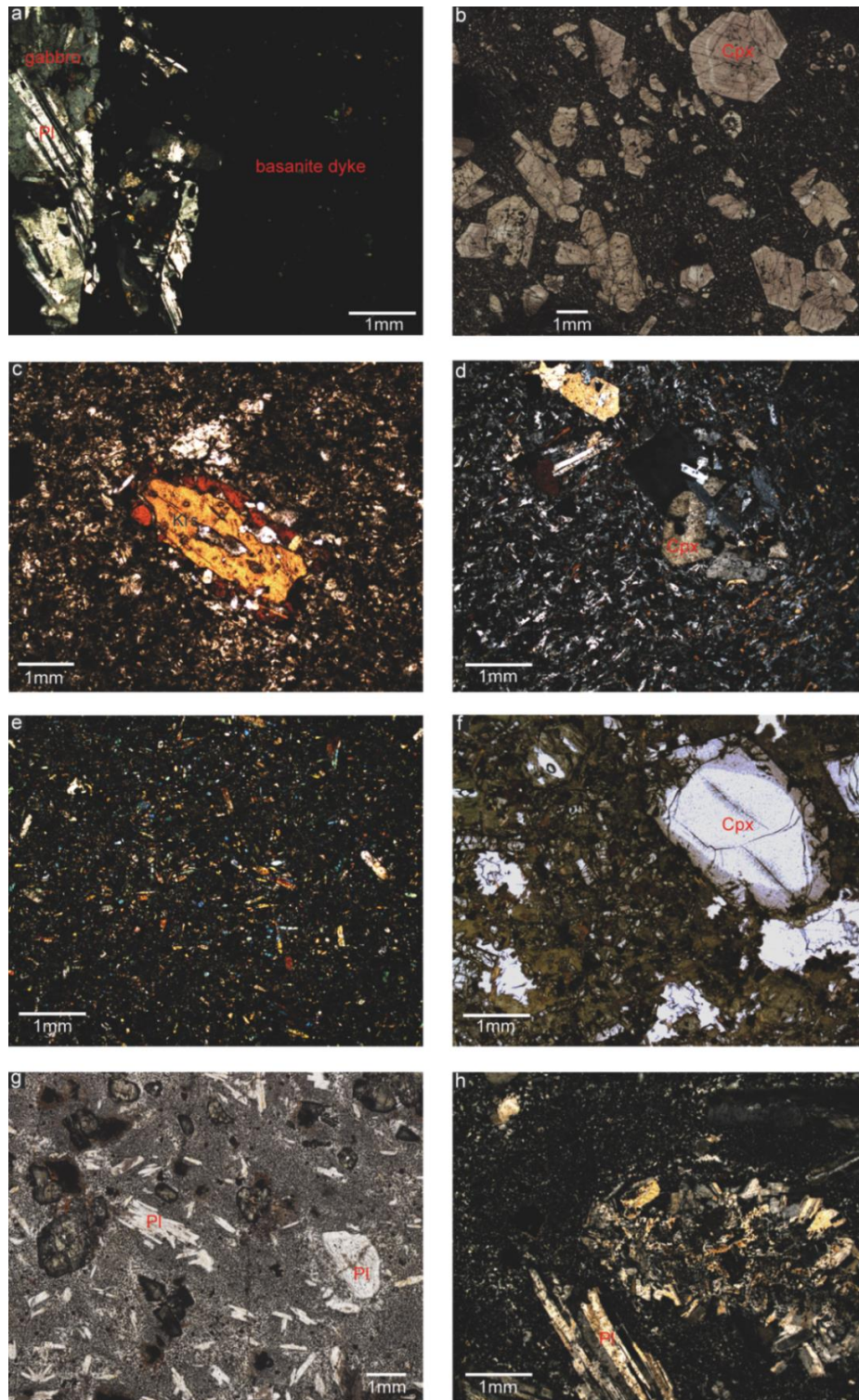


Figure 12. Transmitted-light photomicrographs of alkaline dykes enclosed in the gabbroic rocks. (a) Aphanitic border at the contact between basanite dyke and quartz monzogabbro. (b) Cpx phenocrysts embedded in a fine-grained matrix in a basanite dyke enclosed in quartz monzogabbro. (c) Kaesurtite (Krs) microphenocryst surrounded by Bt in basanite. (d) Cpx and Pl phenocrysts embedded in a matrix with kaesurtite crystals associated with Pl. (e) basanite dyke with Cpx crystals. (f) Zoned Cpx phenocryst (broad light core, thin brownish rim) in basanite dyke. (g) Trachybasalt dyke with Pl and Cpx phenocrysts. (h) Pl aggregates in trachybasalt dyke.

5. Elemental Geochemistry

5.1. Major and trace elements

The gabbroic rocks show considerable variation of SiO₂ content, with some silica-saturated samples of melagabbro-melamonzogabbro (e.g., VA43RA) and layered gabbro (e.g., VA71) showing lower concentration of SiO₂ (43-46 wt%) (Figures 13 and 14, Table 2), LILE (large ion lithophile elements) (e.g., 491-620 ppm Ba, 2-37 ppm La) and some HFS (high field strength) elements (e.g., 2.6-5 ppm Th, 18.6-29 ppm Nb) (Table 3). Samples with intermediate composition with higher concentration of SiO₂, LILE and HFS elements, are monzonite (52 wt% SiO₂, 1669 ppm Ba, 10 ppm Th, 43 ppm Nb, VA48A), medium- to coarse-grained quartz monzogabbro (53 wt% SiO₂, 1072 ppm Ba, 13 ppm Th, 49 ppm Nb, VA41A) and fine- to medium-grained quartz monzogabbro (56 wt% SiO₂, 1154 ppm Ba, 18 ppm Th, 50 ppm Nb, VA41B) (tables 2 and 3).

Most of the samples plot in the alkaline field of the TAS diagram (Le Bas et al., 1986) (Figure 13), with positive correlation between SiO₂ and K₂O (1.6-4.5 wt%) (Figure 14). A negative correlation is observed between SiO₂ with Fe₂O₃ (7-16 wt%) and CaO (5.7-13 wt%) contents (Figure 14). Samples from the same outcrop also show considerable geochemical variation, such as the VA43RA and VA43RD melamonzogabbros, as the latter show higher SiO₂ (49 wt%) content and lower MgO (9 wt%) and CaO (11 wt%) relative to the former. The geochemistry of the layered gabbro samples (VA44RA, VA71) is also quite variable (44-50 wt% SiO₂, 2-8 wt% MgO, 491-1098 ppm Ba, 1177-2009 ppm Sr), as a result of the distinct proportions of mafic and felsic layers.

The dyke rocks consistently belong to the alkaline series, and define trends along basanite-tephrite-phonotephrite and alkali basalt-trachybasalt-basaltic trachyandesite fields in the TAS diagram, overlapping the few more alkali-rich gabbroic rocks (Figure 13). The correlations with Mg# ($100 * \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO}_T)_{\text{molec proportion}}$), which covers the same range as the gabbroic rocks (37-63), and the other oxides follows similar trends as the gabbros with positive correlations between Mg# with CaO, Ni and Cr (Figure 15). However, the dykes show a trend more enriched in Na₂O, P₂O₅ and Nb relative to Mg#, which is indicative of their more alkaline nature relative to the gabbroic samples (Figure 15). Ba, Sr, Th and Nb contents of the dykes show the following ranges from 1039 to 1167 ppm, 611 to 951 ppm, 5 to 13 ppm and 44 to 58 ppm, respectively, with higher contents in trachybasalt and trachyandesite samples. Two dykes are clearly more alkaline, and have tephrite (VA41C) and

phonotephrite (VA43D1) composition. The more extreme alkali-rich character of these dykes (3-4 wt% K₂O and 3-4 wt% Na₂O) is accompanied by lower Mg# (~36) and higher LILE (up to 3279 ppm Ba, 1489 ppm Sr, 97 ppm La, 15 ppm Th) and HFS contents (up to 85 ppm Nb, 6 ppm Ta).

A positive correlation occurs between Th/La with Th/Nb ratios, while a negative correlation is observed between Th/La and Ce/Pb (Figure 16). A basanite dyke (VA41D2) show anomalous behavior due to its lower Ce/Pb relative to Th/La (Figure 16). The Th/La ratios also show positive correlation with SiO₂ content, but some samples, including melamonzogabbro (VA43RD) and layered gabbro (VA44RA), show low Th/La ratios despite of their higher SiO₂ content (Figure 16).

Major and trace element data of metasedimentary rocks from the Votuverava Group are those from Faleiros and Pavan (2013) (Table 4). The samples are enriched in silica with SiO₂, Fe₂O₃, CaO, Na₂O and K₂O contents ranging from 60 to 80 wt%, 4.7 to 8 wt%, 0.03 to 0.9 wt%, 0.4 to 1.6 wt% and 2.2 to 5.6 wt%, respectively. LILE and HFS elements contents are variable with Ba, La, Nb and Th contents ranging from 428 to 1175 ppm, 33.7 to 43 ppm, 13 to 16 ppm and 10 to 16 ppm, respectively.

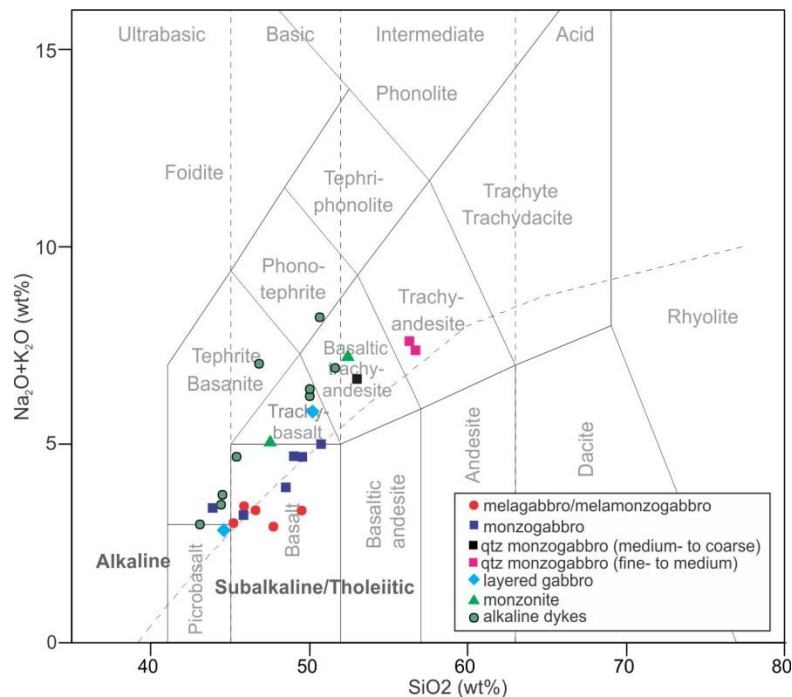


Figure 13. TAS diagram (Le Bas et al., 1986) with classification of gabbroic rocks and alkaline dykes.

5.2. CIPW norms

The CIPW norms (Hutchison, 1974, 1975) of the gabbroic samples usually present normative quartz (0.1-9%) in samples that show higher SiO₂ content (from 47 to 56 wt%) (Table 5). Samples with higher proportion of normative quartz (4-9 wt%) are those with modal quartz (quartz monzogabbro). Normative nepheline is not observed in the gabbroic samples, while normative olivine corresponds to 3 to 7.5 wt% in samples with lower SiO₂ content (<47 wt%), usually more mafic, with the exception of a layered gabbro sample (VA44RA) with 50 wt% SiO₂. Medium- to coarse-grained and fine- to medium-grained quartz monzogabbro and some monzogabbro (e.g., VA66) samples do not show normative olivine, although modal olivine (iron-rich) is observed. All gabbroic samples show normative hypersthene (Hy) (0.6-14 wt%) with higher proportion in melagabbro and monzogabbro samples (14 wt%, VA76, VA73).

In alkaline dykes, normative Hy is only observed in trachybasalt (5 and 9 wt%) and basaltic trachyandesite (6 wt%). Basanite (0.7-2.8 wt%) and tephrite (1.7 wt%) show normative nepheline, while normative olivine is observed in most dyke samples (2-12 wt%) with the exception of trachybasalt (VA43RB) and basaltic trachyandesite (VA46K). Higher proportion of normative olivine is observed in alkali basalt (12 wt%, VA41D1).

5.3. Spidergrams and Rare Earth Elements (REE)

Multi-element spidergrams of gabbroic rocks show an overall enrichment in incompatible elements from Ba to Sr (Figure 17), with higher concentrations of some elements (e.g., Ba, Th) in SiO₂-oversaturated samples (quartz monzogabbro) that have steeper incompatible element patterns. Pronounced positive Sr anomalies are observed in layered gabbro sample (VA44RA) and may be attributed to accumulation of plagioclase (Figure 17a). Negative P anomalies are observed in a layered gabbro (VA71) and in some melagabbro (e.g., VA46A) and monzogabbro (VA60A) samples. Negative Nb and Sr anomalies are more pronounced in quartz monzogabbro (Figure 17c). Monzonite shows negative anomalies of the HFS elements (Nb, Zr, Th), with the exception of Ti (Figure 17c).

The spidergrams of phonotephrite and tephrite dykes illustrate that these rocks have the highest concentrations of all incompatible elements, and show steeper patterns compared to the other dykes (basanite, trachybasalt) (Figure 17e). Positive anomalies of Th are observed in many dyke samples and are prominent in basanite dykes.

All gabbroic rocks show fractionated REE patterns reflected in $(La/Yb)_N$ ratios that vary from 15 to 39 (Figure 17b,d). Enrichment in all REE is shown by quartz monzogabbro and monzonite. Mafic samples like melagabbro-melamonzogabbro (VA43RA) and some monzogabbros (e.g., VA73) are usually the less fractionated ($La/Yb_N = 15-21$), whereas samples with higher SiO_2 content, like a layered gabbro sample ($La/Yb_N = 39$, VA44RA) and quartz monzogabbro ($La/Yb_N = 25-27$, VA41A, VA41B) (Figure 17d) show higher fractionation. Positive Eu anomalies are identified in layered gabbro ($Eu_N/Eu^* = 1.2$ and 1.8) also reflecting the accumulation of plagioclase (e.g., Weill and Drake, 1973) (Figure 17b). Slightly negative Eu anomalies are present in Si-oversaturated samples (e.g., $Eu_N/Eu^* = 0.7$, VA81).

All dyke samples show fractionated REE patterns with variable $(La/Yb)_N$ ratios (from 21 to 40) (Figure 17f). Higher concentration of all REE is shown by phonotephrite and tephrite whereas basanites show $(La/Yb)_N$ ratios of 25 (VA43D3) and 40 (VA41D2). Trachybasalt and basaltic trachyandesite show $(La/Yb)_N$ of 21-25 and 31, respectively, while tephrite and phonotephrites show $(La/Yb)_N$ around 33.

Multi-element spidergrams of the samples from the Votuverava Group (Faleiros and Pavan, 2013) (Figure 17g) show enrichment from Rb to K and prominent Nb, Sr, Ti and P negative anomalies. REE patterns from the Votuverava Group (Figure 17h) show $(La/Yb)_N$ ratios from 7 to 12, with flatter patterns among HREE (heavy rare earth elements) ($(Gd/Lu)_N$ from 1.2-2.4). Negative Eu anomalies are observed in all samples ($Eu_N/Eu^* = 0.5-0.6$).

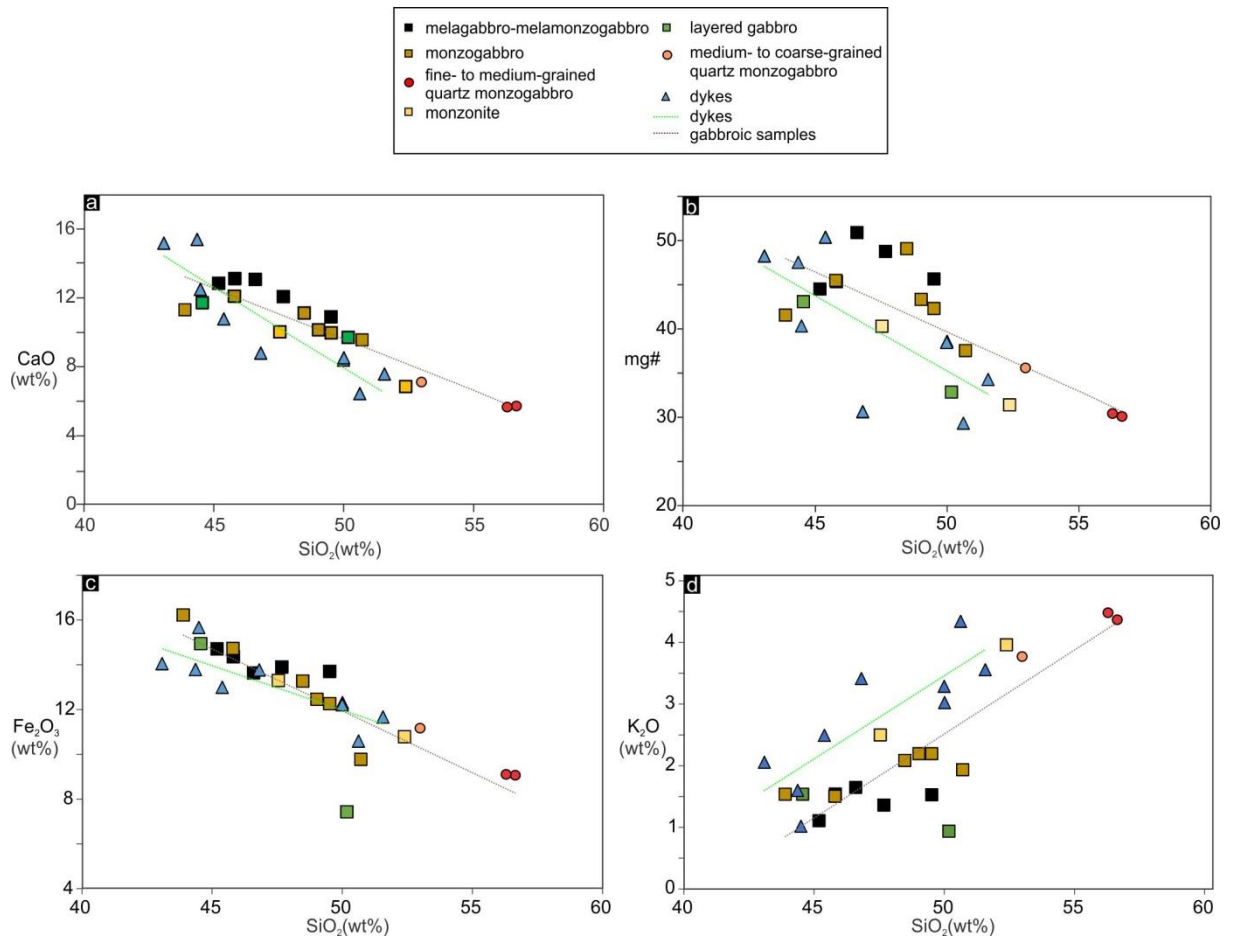


Figure 14. Variation diagrams showing the correlation of SiO₂ with other elements (a-d).

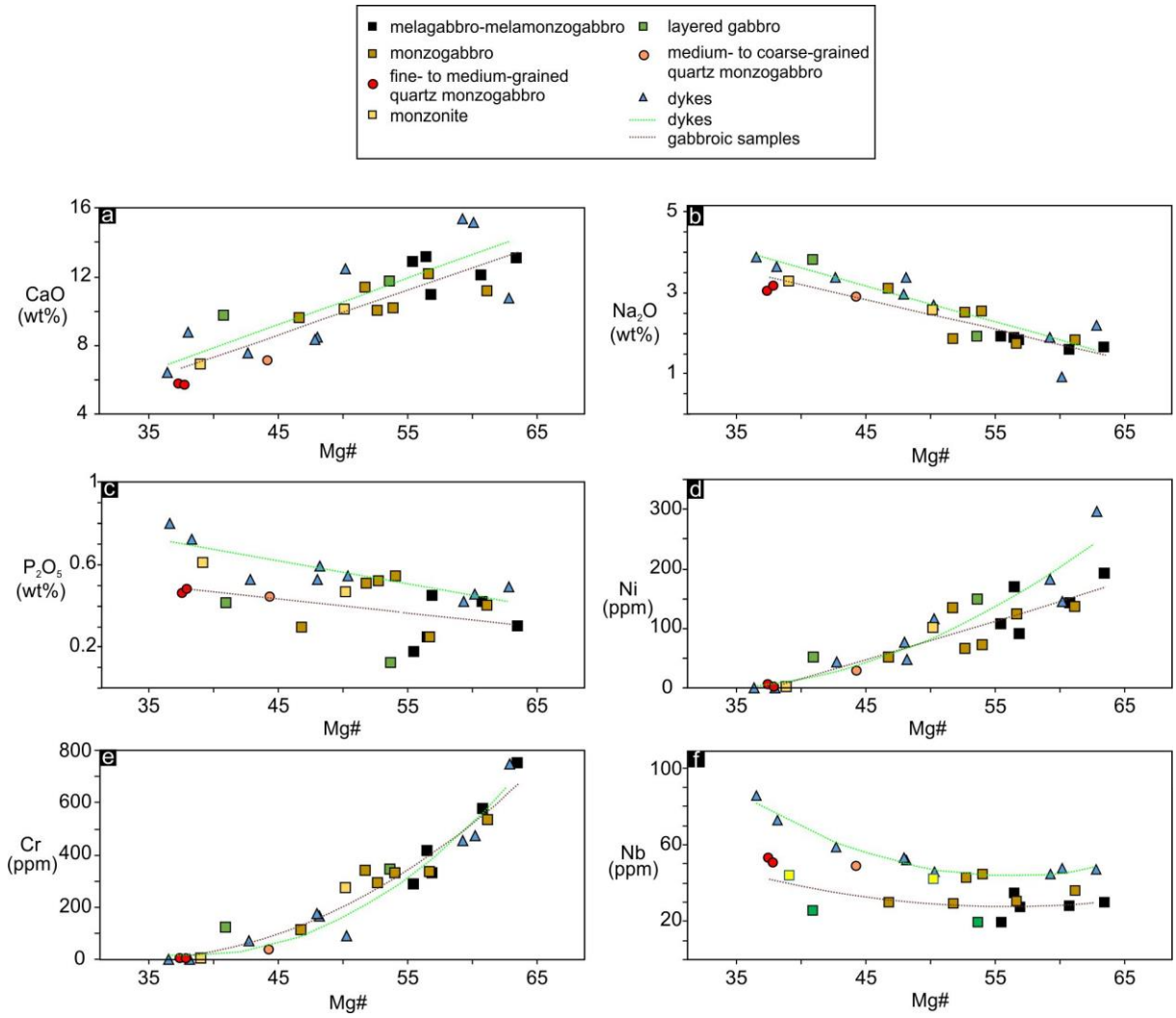


Figure 15. Variation diagrams showing the correlation of Mg# with major and trace elements (a-f).

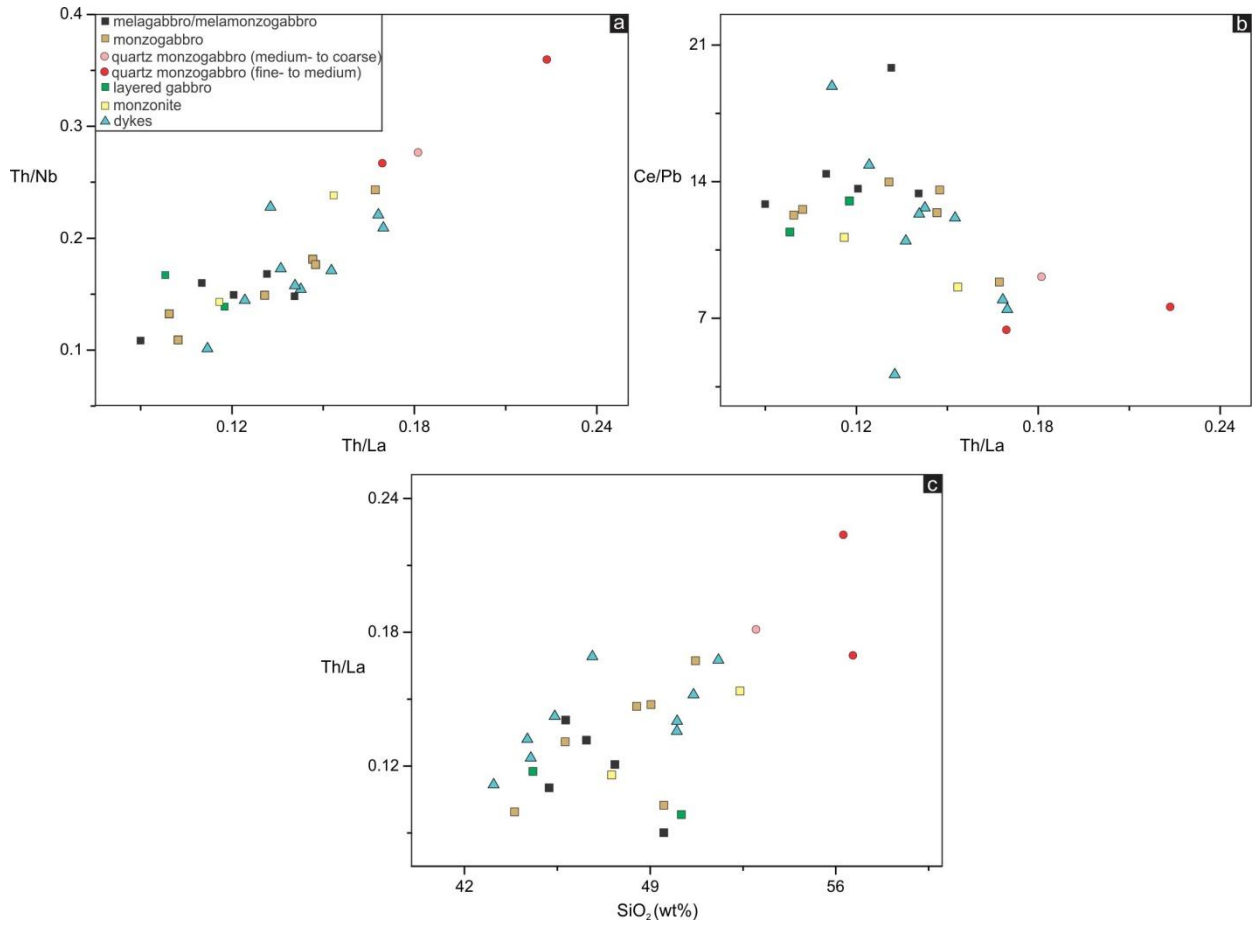


Figure 16. Variation diagrams showing the correlation between Th/La ratios with (a) Th/Nb, (b) Ce/Pb and (c) SiO₂.

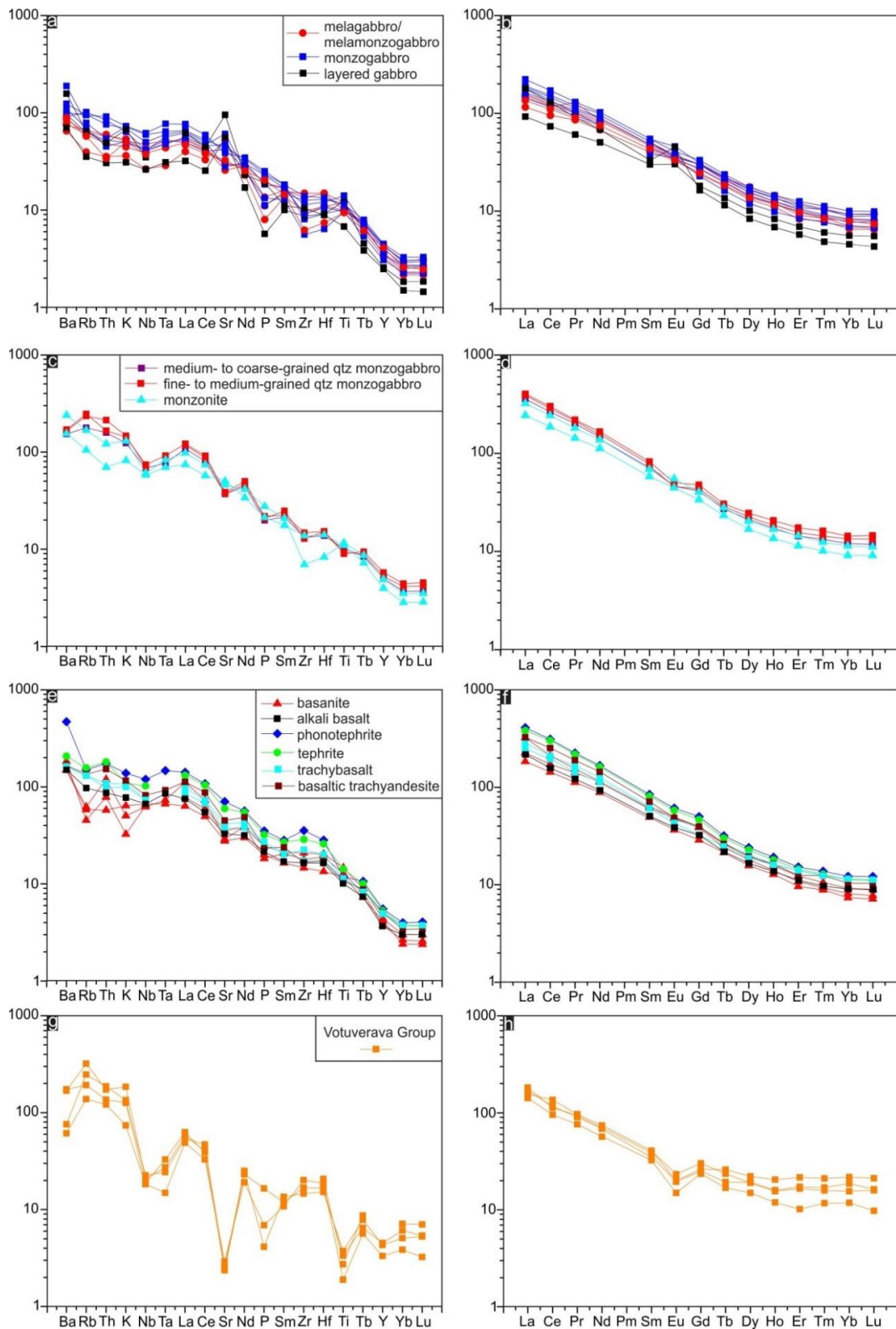


Figure 17. Multi-element spidergrams normalized to the primitive mantle of Sun and McDonough (1989) of the gabbroic rocks (a, c), alkaline dykes (e) and host rocks from the Votuverava Group (g). REE patterns normalized to the chondrite of McDonough and Sun (1995) of the gabbroic rocks (b, d), alkaline dykes (f) and host rocks from the Votuverava Group (h).

6. Sr-Nd-Pb isotope geochemistry

Initial Sr-Nd-Pb isotope ratios of the José Fernandes gabbroic rocks show wide variation ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7051\text{-}0.7111$; $\epsilon\text{Nd}_i = -5.9$ to -10.6 ; $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.11\text{-}18.67$). Well-defined correlations of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ and ϵNd_i with SiO_2 and Mg# as differentiation indexes (Fig. 18a-c) are clear indications of AFC processes involving a crust-like (high SiO_2 , low Mg#, radiogenic Sr and Pb, unradiogenic Nd component).

The highest $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (0.7092-0.7111) are those of the Si-oversaturated samples, but high values are also shown by monzogabbro VA60A (0.7083) and monzonite VA48A (0.7095), both corresponding to the samples with the lowest Mg# in their group (Figure 18c). The lowest $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ are shown by the most primitive melagabbros (0.7051-0.7071; Mg# = 45-51) and also by layered gabbro VA44RA (0.7065) whose Mg# is low (41) and typical of derivation from a fractionated magma.

The Sr isotope signature of the dykes is less variable and within the more primitive range of the gabbroic rocks. Samples of varied composition and covering all the Mg# range have $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ from 0.7049 to 0.7057. The exceptions are two samples of trachybasalt enclosed in melamonzogabbro (VA43) with higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (0.7066-0.7068) and Mg# 48; Figure 18c).

A very well-defined negative correlation is observed between ϵNd_i and SiO_2 (Figure 18b), and the observed groupings are the same as for $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$: least negative ϵNd_i values by the melagabbros and layered gabbro (-5.2 to -6.8), more negative (-9.6 to -10.6) by the Si-oversaturated rocks, and intermediate values (-8.5 to -8.8) by the monzogabbro and monzonite samples. Again the dykes are less “crust-like”, as they show less negative ϵNd_i (higher Mg# basanites and alkali basalt, -0.7 to -2.4; more fractionated rocks, ~ -4.0), and the trachybasalts have more negative and identical $\epsilon\text{Nd}_i = -6.8$. Corresponding Nd T_{DM} vary from 740-930 Ma for the more primitive alkaline dykes to 1030-1350 Ma in the gabbroic samples, the highest values being associated with the Si-oversaturated rocks (Figure 18d).

The behavior of Pb isotopes is shown in Figure 18 e-f. Within the gabbroic rock suite, positive correlations are well defined between ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$), ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$) and ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_i$) ratios that show the following ranges: 18.11-18.67, 15.57-15.65, 38.50-38.72, respectively, with higher Pb isotopic ratios in SiO_2 -oversaturated samples when compared to the more primitive melamonzogabbro and layered gabbro (Figure 18e-f). A positive correlation with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ and SiO_2 and negative correlation with ϵNd_i and Mg#, points to contamination with a radiogenic Pb crust. All analyzed samples from the dyke suite have less radiogenic Pb (e.g.,

($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i = 17.45-18.07). A single linear trend ($R^2 = 0.936$) can be traced for the ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i x ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i correlation, whereas for ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i x ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$)_i the linear trend defined by the dykes is deflected to lower $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ values, indicative of a low time-integrated Th/U component.

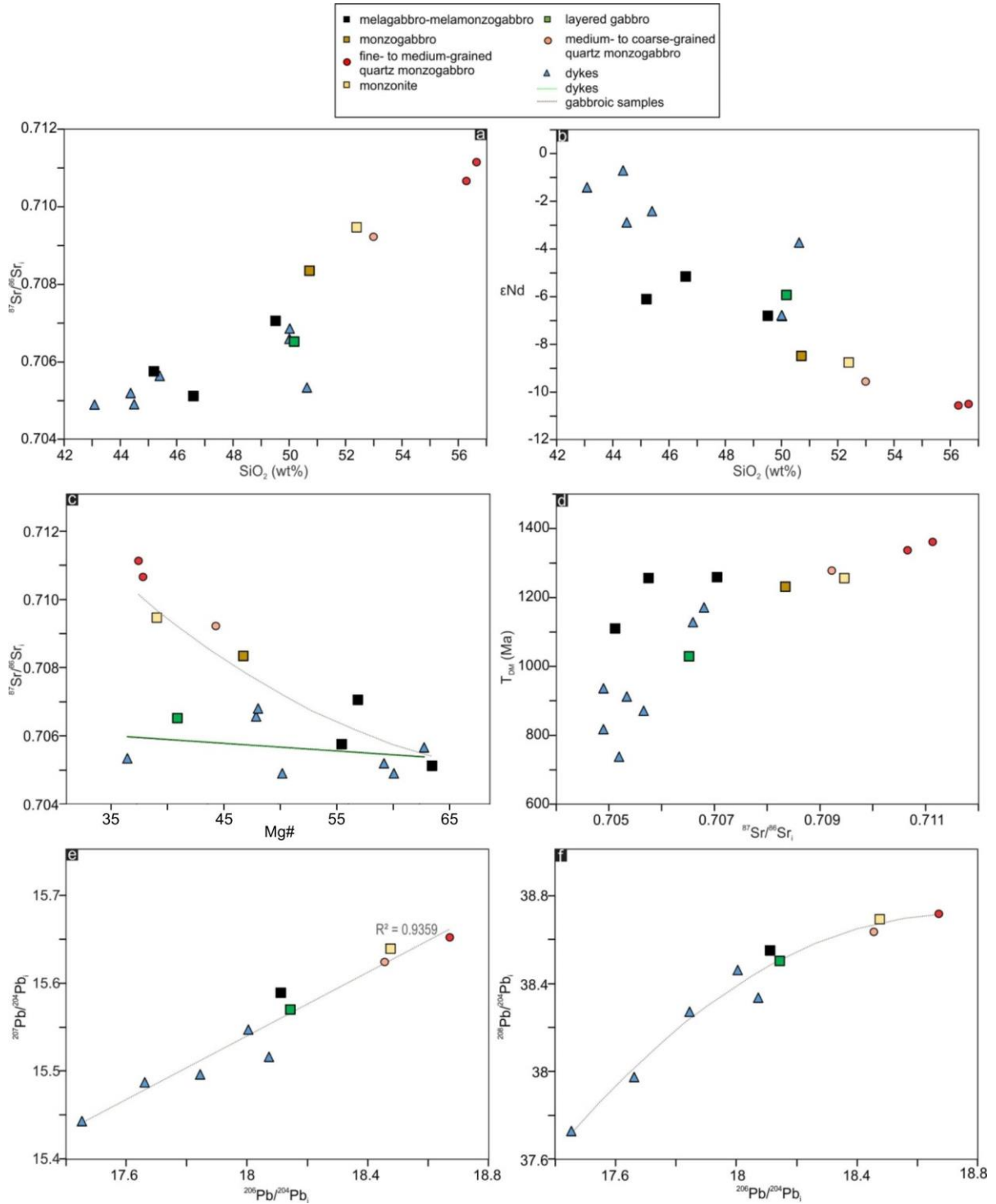


Figure 18. Variation diagrams showing the correlations of whole-rock isotope ratios.

Table 1. Representative composition of orthopyroxene from José Fernandes Gabbro.

Sample Lithotype	VA81 QMG	VA60 MG	VA48A MON	VA43RD M-G	VA73 MG	VA66A MG
SiO ₂	51.020	51.750	51.180	53.380	52.580	52.590
TiO ₂	0.495	0.225	0.368	0.214	0.281	0.000
Al ₂ O ₃	1.051	0.754	0.764	0.827	0.830	0.476
Cr ₂ O ₃	0.000	0.016	0.026	0.015	0.000	0.014
FeO	27.720	26.200	28.320	20.420	22.980	24.580
MnO	0.877	0.670	0.937	0.584	0.674	0.777
NiO	0.000	0.010	0.000	0.022	0.032	0.010
MgO	17.950	19.470	17.690	24.100	22.190	21.200
CaO	1.900	1.530	1.690	0.895	1.430	0.573
Na ₂ O	0.048	0.018	0.044	0.053	0.076	0.014
K ₂ O	0.000	0.000	0.000	0.010	0.014	0.000
Total	101.060	100.640	101.020	100.520	101.090	100.230
Si	1.935	1.953	1.947	1.957	1.941	1.973
Al	0.047	0.034	0.034	0.036	0.036	0.021
Fe ³⁺	0.018	0.014	0.018	0.008	0.023	0.006
Total (T)	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.040	0.035	0.034	0.035	0.049	0.028
Ti	0.014	0.006	0.011	0.006	0.008	0.000
Cr	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Mg	0.946	0.958	0.955	0.958	0.942	0.972
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total (M1)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Mg	0.069	0.138	0.049	0.359	0.279	0.214
Fe ²⁺	0.822	0.778	0.849	0.583	0.637	0.737
Mn	0.028	0.021	0.030	0.018	0.021	0.025
Ca	0.077	0.062	0.069	0.035	0.057	0.023
Na	0.004	0.001	0.003	0.004	0.005	0.001
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Total (M2)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Wo	4.030	3.200	3.590	1.820	2.950	1.180
En	53.020	56.600	52.220	68.040	63.770	60.930
Fs	42.950	40.200	44.190	30.140	33.280	37.890
Mg#	55.25	58.47	54.17	69.30	65.71	61.66

Table 2. Whole-rock major and trace elements for José Fernandes Gabbro samples obtained by XRF.

Sample Lithotype	VA43RA M-MG	VA43 RD M-MG	VA46A M-G	VA46B M-G	VA76 M-G	VA66A MG	VA67B MG	VA77A MON	VA78A MG	VA73 MG	VA48A MON	VA60A MG	VA44RA LG
SiO ₂	45.79	48.97	44.46	45.21	47.02	48.76	48.95	47.01	45.41	48.40	51.74	50.35	49.94
TiO ₂	2.15	2.03	2.60	2.60	2.16	2.21	2.48	2.38	2.49	2.09	2.52	2.08	1.47
Al ₂ O ₃	8.59	10.56	11.78	10.64	9.56	13.45	12.99	14.07	11.33	9.92	15.73	17.93	22.17
Fe ₂ O ₃	13.39	13.54	14.46	14.16	13.70	12.07	12.43	13.14	14.60	13.24	10.65	9.70	7.39
MnO	0.22	0.23	0.211	0.19	0.25	0.22	0.23	0.20	0.23	0.23	0.18	0.15	0.10
MgO	11.76	9.04	9.11	9.31	10.73	6.81	7.38	6.70	9.67	10.55	3.46	4.31	2.59
CaO	12.83	10.76	12.63	12.93	11.90	9.81	10.12	9.91	11.98	11.09	6.76	9.48	9.65
Na ₂ O	1.62	1.80	1.86	1.86	1.54	2.46	2.52	2.53	1.71	1.81	3.21	3.07	3.77
K ₂ O	1.62	1.51	1.09	1.52	1.34	2.16	2.19	2.47	1.49	2.08	3.91	1.92	2.02
P ₂ O ₅	0.29	0.44	0.17	0.24	0.41	0.51	0.54	0.46	0.24	0.40	0.60	0.29	0.41
Loi	0.33	0.42	0.19	0.39	0.10	0.43	<0.01	<0.01	0.04	0.32	0.31	0.15	0.42
Total	98.59	99.31	98.56	99.06	98.72	98.89	99.83	98.87	99.19	100.14	99.07	99.43	99.94
Ba	630	657	520	578	581	1313	855	1085	689	718	1597	612	1138
Ce	62	69	<35	81	57	81	107	93	82	86	131	85	77
Co	60	51	49	56	60	39	43	46	58	56	24	30	21
Cr	750	328	285	413	575	289	327	273	334	530	<13	110	120
Cu	67	29	42	200	29	41	40	98	44	43	11	38	101
Ga	15	17	18	16	13	17	20	21	18	15	22	21	25
La	37	34	<28	47	45	34	58	48	38	39	73	46	45
Nb	31	22	19	32	26	38	41	36	27	33	40	26	19
Nd	46	34	25	41	33	41	49	45	33	43	57	34	28
Ni	192	90	106	168	141	65	71	100	123	136	<5	51	50
Pb	19	<4	22	21	19	15	<4	<4	<4	<4	<4	<4	<4
Rb	42	35	28	43	38	50	62	64	38	58	108	63	38
Sc	48	39	39	41	44	30	35	30	40	42	20	24	15
Sr	549	689	1108	651	613	890	839	1062	879	588	1003	1305	1973
Th	18	<7	15	15	14	13	<7	<7	<7	<7	<7	<7	<7
U	10	<3	10	12	12	7	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3
V	383	363	501	485	405	293	308	385	478	363	282	200	173
Y	19	17	17	17	20	19	22	17	16	20	23	14	9
Zn	87	90	86	81	91	93	87	87	88	86	91	70	50
Zr	168	119	127	172	142	158	233	179	151	182	231	185	126
Cl	260	544	<50	121	223	193	1067	969	568	1065	1378	919	478
F	813	<500	<500	<500	<500	<500	<500	<500	<500	<500	<500	<500	<500
S	<550	<550	<550	905	<550	601	<550	<550	<550	<550	667	<550	<550
Mg#	63.5	57.0	55.5	56.6	60.8	52.8	54.1	50.3	56.8	61.2	39.2	46.8	41.0

MG – monzogabbro; M-G – melagabbro; M-MG – melamonzogabbro; LG – Layered gabbro; MON – monzonite;

Table 2. (continued).

Sample	VA71	VA74	VA41A	VA41B	VA81	VA41D1	VA41D2	VA41C	VA43D1	VA43D3	VA43D5	VA43RB	VA46K	VA67D1
Lithotype	LG	MG	CQMG	FQMG	FQMG	AB	BT	T	PT	BT	TB	TB	BTA	BT
SiO ₂	44.24	43.65	52.15	55.55	55.64	42.31	42.35	45.21	48.71	43.00	49.86	49.20	50.67	40.52
TiO ₂	2.68	3.04	2.21	2.02	1.95	2.17	2.78	3.08	2.58	3.19	2.48	2.43	2.33	2.59
Al ₂ O ₃	14.05	12.52	14.51	15.62	15.53	11.26	8.89	14.64	16.71	11.19	13.69	14.08	14.52	10.01
Fe ₂ O ₃	14.83	16.13	10.98	8.98	8.90	12.10	13.15	13.29	10.18	15.13	12.26	12.01	11.45	13.20
MnO	0.23	0.23	0.18	0.16	0.16	0.18	0.23	0.21	0.20	0.22	0.21	0.18	0.19	0.20
MgO	8.69	8.76	4.42	2.77	2.70	10.31	9.65	4.14	2.96	7.72	5.74	5.58	4.31	10.05
CaO	11.62	11.24	6.99	5.58	5.61	10.03	14.67	8.48	6.18	12.06	8.48	8.24	7.44	14.24
Na ₂ O	1.88	1.84	2.83	3.10	2.98	2.04	1.80	3.51	3.74	2.61	3.36	2.91	3.32	0.86
K ₂ O	0.93	1.53	3.71	4.42	4.29	2.32	1.52	3.29	4.17	0.98	3.01	3.23	3.49	1.93
P ₂ O ₅	0.12	0.50	0.43	0.47	0.45	0.46	0.40	0.70	0.77	0.53	0.59	0.52	0.52	0.43
Loi	<0.01	0.02	0.33	0.40	0.10	5.54	3.33	1.66	2.36	1.97	0.37	0.37	0.20	5.17
Total	99.27	99.47	98.74	99.08	98.32	98.73	98.77	98.22	98.56	98.60	100.05	98.76	98.44	99.20
Ba	490	767	1094	1196	1098	1099	1134	1458	3079	1393	1168	1176	1162	1116
Ce	31	66	116	148	147	78	123	156	172	115	121	112	146	67
Co	57	61	31	18	15	52	55	34	15	39	32	26	30	54
Cr	341	338	35	<13	<13	750	455	<13	<13	89	166	176	70	474
Cu	13	96	37	10	9	78	140	16	9	144	11	38	41	75
Ga	20	20	20	21	20	16	15	20	20	18	22	20	20	17
La	<28	36	59	75	65	53	63	86	91	50	67	68	72	43
Nb	17	26	44	47	45	50	46	68	84	46	45	50	51	42
Nd	20	36	53	73	73	34	54	75	63	66	50	55	59	44
Ni	147	133	27	<5	5	296	182	<5	<5	117	48	77	44	145
Pb	<4	<4	25	25	26	15	38	36	24	23	<4	23	29	19
Rb	20	41	110	150	149	67	42	101	93	30	82	84	87	35
Sc	33	35	25	14	15	30	45	22	14	37	28	25	19	37
Sr	1132	984	772	811	784	743	644	1265	1473	768	808	916	939	557
Th	<7	<7	22	25	21	19	22	28	26	22	<7	23	20	16
U	<3	<3	8	7	10	8	10	4	4	10	<3	7	10	15
V	490	565	278	209	193	308	424	393	181	515	288	306	281	372
Y	11	17	23	27	27	20	21	27	27	22	24	25	24	20
Zn	88	100	94	82	82	82	90	115	97	97	95	89	114	59
Zr	107	151	267	290	269	198	208	335	359	234	249	259	286	160
Cl	423	993	255	387	580	<50	85	806	126	<50	1198	<50	<50	944
F	<500	<500	1251	1475	<500	1284	1367	1530	1469	1421	<500	1359	<500	<500
S	<550	<550	<550	<550	<550	1061	5798	2032	747	<550	<550	<550	<550	1210
Mg#	53.7	51.8	44.4	37.9	37.6	62.8	59.3	38.2	36.6	50.3	48.1	47.9	42.7	60.1

MG – monzogabbro; LG – Layered gabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro; AB – alkali basalt; BT – basanite; T – tephrite; PT – phonotephrite; TB – trachybasalt; BTA – basaltic trachyandesite.

Table 3. Whole-rock trace elements for José Fernandes Gabbro samples obtained by ICP-MS.

Sample Lithotype	VA43RA M-MG	VA43 RD M-MG	VA46A M-G	VA46B M-G	VA76 M-G	VA66A MG	VA67B MG	VA77A MON	VA78A MG	VA73 MG	VA48A MON	VA60A MG	VA44RA LG	VA71 LG	VA74 MG
Rb	39.8	36.4	25	41.8	38.0	50.0	60.2	66.6	39.6	60.8	106	64.6	40.5	22.5	43.8
Sr	542	689	1107	633	627	913	811	1061	888	589	969	1278	2009	1177	1001
Y	15.9	18.7	15.0	16.1	19.2	19.9	20.4	18.1	16.2	19.4	22.4	13.9	11.2	11.7	18.2
Zr	150	69.5	110	166	101	90.0	155	154	141	102	78.0	62.5	117	96.9	127
Nb	29.2	26.6	18.8	34.2	27.5	42.4	44.0	41.4	29.9	35.6	43.3	29.3	24.9	18.6	29.0
Ta	2.00		1.17	2.09	1.79	2.63	3.17	2.86	2.14	2.46	3.40	2.32		1.27	1.95
Cs	0.68	1.19	0.57	0.75	1.36	2.31	2.31	1.35	0.96	2.19	3.01	2.14	0.89	0.73	0.94
Ba	595	620	454	521	539	1318	865	1080	674	694	1669	634	1098	491	767
La	37.2	32.1	27.4	36.1	34.0	45.1	52.6	51.1	34.0	43.9	67.3	42.7	42.4	21.9	38.6
Ce	76.8	67.5	58.4	75.0	72.8	93.4	105	101	71.0	88.6	132	83.4	79.0	45.0	80.7
Pr	9.62	8.30	7.96	9.35	11.8	11.2	12.1	11.9	8.77	10.6	14.9	9.35	8.46	5.62	10.0
Nd	38.7	34.2	31.0	36.8	39.0	45.3	46.8	46.0	35.4	41.5	56.3	34.5	31.2	23.0	40.8
Sm	7.12	6.43	6.05	6.91	7.51	8.05	8.10	7.82	6.57	7.46	9.26	5.65	4.91	4.44	7.43
Eu	2.04	1.88	1.86	1.92	2.04	2.58	2.29	2.31	1.95	1.98	2.82	1.99	2.54	1.70	2.11
Gd	5.95	4.86	4.69	5.42	5.98	6.15	6.60	6.17	5.34	6.00	7.38	4.52	3.25	3.59	5.94
Tb	0.74	0.66	0.65	0.71	0.79	0.81	0.86	0.78	0.71	0.79	0.94	0.58	0.41	0.49	0.77
Dy	3.85	3.37	3.23	3.56	4.33	4.10	4.31	3.89	3.48	4.03	4.69	2.93	2.05	2.48	3.79
Ho	0.69	0.64	0.60	0.66	0.79	0.75	0.79	0.70	0.65	0.74	0.86	0.54	0.37	0.45	0.69
Er	1.63	1.55	1.32	1.44	1.91	1.74	2.01	1.73	1.57	1.86	2.17	1.36	0.92	1.11	1.69
Tm	0.22	0.21	0.19	0.21	0.26	0.26	0.28	0.24	0.21	0.25	0.29	0.19	0.12	0.15	0.23
Yb	1.31	1.27	1.06	1.13	1.48	1.42	1.61	1.40	1.24	1.49	1.73	1.12	0.73	0.90	1.34
Lu	0.20	0.18	0.16	0.17	0.23	0.22	0.24	0.21	0.19	0.23	0.26	0.17	0.11	0.14	0.20
Hf	4.59	2.29	3.35	4.59	3.39	2.82	4.14	4.35	3.99	3.27	2.57	1.98	2.74	2.82	3.73
Pb	3.87	5.25	4.06	5.60	5.34	7.43	7.74	9.09	5.08	7.14	15.2	9.42	6.92	3.46	6.57
Th	4.90	2.89	3.01	5.07	4.10	4.62	7.76	5.92	4.44	6.44	10.3	7.13	4.16	2.58	3.84
U	1.08	0.64	0.65	1.08	0.86	0.92	1.54	1.33	0.95	1.25	2.41	1.57	0.95	0.57	0.84
W	0.80		0.49	0.63	0.67	0.83	1.38	0.90	0.72	1.23	1.30	1.15		0.47	0.66

MG – monzogabbro; M-G – melagabbro; M-MG – melamonzogabbro; LG – Layered gabbro; MON – monzonite;

Table 3. (continued).

Sample Lithotype	VA41A CQMG	VA41B FQMG	VA81 FQMG	VA41D1 AB	VA41D2 B	VA41C T	VA43D1 PT	VA43D3 B	VA43D5 TB	VA43RB TB	VA46K BTA	VA67D1 BT
Rb	112	149	156	61.40	39.5	99.8	94.9	28.8	83.1	82.8	85.7	37.0
Sr	781	792	816	687.0	611	1261	1489	750	785	888	951	585
Y	22.6	23.8	26.2	16.50	17.0	24.2	25.1	20.0	22.8	22.0	23.1	18.8
Zr	148	165	144	182.0	200	323	397	234	251	195	187	164
Nb	48.6	50.3	52.8	47.30	44.4	72.9	85.5	45.7	52.3	53.4	58.5	47.6
Ta	3.15		3.76	3.48	3.00		6.03				3.79	2.74
Cs	2.61	5.26	5.45	5.10	4.97	3.01	1.61	0.67	2.78	1.98	1.37	4.98
Ba	1072	1154	1183	1040	1059	1447	3279	1286	1137	1124	1167	1039
La	74.2	80.9	83.1	51.40	76.6	90.4	97.1	53.7	58.9	68.0	77.3	43.7
Ce	143	154	162	96.80	130	185	192	106	120	129	155	88.0
Pr	16.5	17.6	18.0	11.29	14.3	20.2	20.9	13.1	13.4	15.4	17.6	10.4
Nd	59.8	62.7	67.6	42.60	52.9	74.1	76.5	51.9	51.6	57.7	65.9	40.7
Sm	9.55	9.93	11.0	7.50	9.11	12.0	12.5	9.49	8.97	9.59	10.6	7.31
Eu	2.39	2.37	2.59	2.18	2.68	3.28	3.45	2.78	2.42	2.62	2.74	2.07
Gd	7.54	7.94	8.67	6.44	7.66	9.29	9.98	7.89	6.42	7.78	7.88	5.74
Tb	0.91	0.96	1.02	0.79	0.88	1.08	1.15	0.97	0.89	0.94	0.95	0.77
Dy	4.88	5.17	5.61	4.10	4.47	5.62	5.92	4.90	4.60	4.99	4.78	3.88
Ho	0.88	0.94	1.05	0.75	0.76	0.98	1.05	0.86	0.88	0.89	0.89	0.70
Er	2.16	2.34	2.61	1.78	1.72	2.31	2.44	1.97	2.24	2.23	1.99	1.54
Tm	0.31	0.33	0.37	0.24	0.23	0.32	0.34	0.26	0.31	0.31	0.31	0.22
Yb	1.83	2.04	2.18	1.46	1.30	1.82	1.97	1.48	1.86	1.82	1.68	1.18
Lu	0.27	0.31	0.34	0.22	0.19	0.27	0.30	0.22	0.28	0.27	0.25	0.18
Hf	4.25	4.71	4.69	5.03	5.88	7.99	8.74	6.26	6.23	5.43	5.31	4.16
Pb	15.6	20.3	25.3	7.60	30.9	24.8	15.8	7.10	9.65	11.7	19.4	4.64
Th	13.4	18.1	14.1	7.33	10.2	15.4	14.8	6.67	8.29	9.26	13.0	4.89
U	3.08	4.60	5.02	1.45	1.38	3.22	2.81	1.20	1.75	1.78	3.21	1.03
W	1.60		1.61	1.03	4.21		4.67				1.90	1.08

CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro; AB – alkali basalt; BT – basanite; T – tephrite; PT – phonotephrite; TB – trachybasalt; BTA – basaltic trachyandesite.

Table 4. Major and trace elements of metasedimentary rocks from the Mesoproterozoic Votuverava Group. Analyses from Faleiros and Pavan (2013).

Sample	FM278	FM279A	FM279B	FM284
SiO ₂	69.82	60.38	80.33	68.83
TiO ₂	0.59	0.73	0.41	0.81
Al ₂ O ₃	14.23	19.07	10.19	15.87
Fe ₂ O ₃	5.76	7.99	4.73	4.95
MnO	0.15	0.10	0.09	0.14
MgO	1.57	2.06	0.94	1.03
CaO	0.43	0.40	0.89	0.03
Na ₂ O	0.84	0.44	1.65	0.84
K ₂ O	4.05	5.57	2.22	3.80
P ₂ O ₅	0.09	0.36	0.15	<0.01
Loi	2.3	2.68	0.74	2.65
Total	99.87	99.79	102.35	98.95
Rb	157	203	87.8	122
Sr	52.9	49.9	61.7	53.7
Y		20.52	15.12	19.69
Zr		189	226	164
Nb	16.1	14.9	13.05	13.33
Ta	1.0	1.12	0.61	1.35
Cs	7.1	5.17	2.61	2.89
Ba	531	1175	428	1212
La	37.2	39.8	33.7	43.1
Ce	83.3	71.6	58.6	69
Pr	8.98	8.39	7.08	8.77
Nd	33.9	31.4	25.9	31.9
Sm	6.0	5.3	4.8	6
Eu	1.13	1.1	0.84	1.31
Gd	5.22	4.98	4.7	6
Tb	0.94	0.7	0.61	0.85
Dy	5.43	4.73	3.67	4.67
Ho	1.12	0.87	0.65	0.85
Er	3.45	2.77	1.63	2.64
Tm	0.52	0.42	0.29	0.39
Yb	3.51	3.0	1.9	2.5
Lu	0.52	0.4	0.24	0.39
Hf	6.4	5.13	5.78	4.69
Pb	5.8	4.7	3.1	5.2
Th	15.9	14.7	10.3	11.6
U	2.8	3.43	2.46	2.57
W	1.8	3.1	0.9	11

Table 5. CIPW norms of representative samples of the José Fernandes Gabbro.

Sample	VA43RA	VA43 RD	VA46A	VA46B	VA76	VA66A	VA67B	VA77A	VA78A	VA73	VA48A	VA60A	VA44 RA	VA71
Q	0.000	4.879	0.000	0.000	1.508	2.113	1.021	0.000	0.000	0.100	2.925	2.624	0.000	0.000
Or	9.743	9.024	6.548	9.104	8.030	12.964	12.965	14.764	8.881	12.315	23.398	11.429	11.996	5.536
Ab	13.951	15.402	15.999	15.952	13.213	21.141	21.360	21.653	14.594	15.344	27.504	26.167	32.056	16.024
An	11.583	16.457	20.915	16.413	15.428	19.578	17.695	19.965	19.000	12.823	17.177	29.687	37.787	27.349
Ne	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Di	34.641	22.072	25.898	30.038	27.296	15.181	16.567	14.892	24.523	25.930	3.591	7.059	2.230	16.653
Hy	3.027	12.538	4.804	1.727	14.446	10.189	10.734	5.322	8.825	14.306	7.062	7.541	0.559	9.544
OI	7.515	0.000	4.385	5.502	0.000	0.000	0.000	3.261	2.873	0.000	0.000	0.000	3.426	3.181
Il	0.479	0.502	0.459	0.418	0.553	0.478	0.486	0.435	0.490	0.504	0.381	0.317	0.221	0.491
Hm	13.627	13.692	14.699	14.351	13.891	12.258	12.451	13.290	14.725	13.264	10.784	9.771	7.426	14.938
Tn	4.743	4.403	5.888	5.936	4.665	4.897	5.460	5.340	5.525	4.492	5.769	4.734	3.335	5.997
Pf	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ap	0.711	1.059	0.419	0.576	0.997	1.232	1.293	1.107	0.581	0.947	1.444	0.690	0.988	0.296
Total	100.020	100.027	100.013	100.017	100.026	100.031	100.032	100.028	100.017	100.025	100.035	100.018	100.024	100.011
Sample	VA74	VA41A	VA41B	VA81	VA41 D1	VA41 D2	VA41C	VA43 D1	VA43 D3	VA43 D5	VA43RB	VA46K	VA67 D1	
Q	0.000	4.653	7.888	9.128	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.086	1.244	0.000	
Or	9.092	22.279	26.471	25.813	14.713	9.412	20.136	25.617	5.993	17.846	19.402	20.994	12.130	
Ab	15.656	24.333	26.583	25.674	17.069	10.736	27.629	32.897	22.855	28.523	25.028	28.596	6.411	
An	21.503	16.188	15.860	16.624	15.790	12.246	14.990	17.142	16.478	13.425	16.076	14.666	18.880	
Ne	0.000	0.000	0.000	0.000	0.788	2.829	1.696	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.719	
Di	16.785	7.091	1.974	1.911	21.002	40.545	10.574	0.792	24.307	13.291	11.002	9.311	34.611	
Hy	7.687	7.900	6.077	5.961	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	5.159	9.026	6.611	0.000	
OI	4.536	0.000	0.000	0.000	12.488	4.477	4.049	5.114	6.049	2.118	0.000	0.000	7.413	
Il	0.506	0.400	0.345	0.355	0.413	0.520	0.474	0.454	0.480	0.451	0.398	0.418	0.444	
Hm	16.219	11.157	9.100	9.062	12.984	13.778	13.764	10.582	15.657	12.299	12.207	11.655	14.038	
Tn	6.861	4.989	4.590	4.410	0.000	0.000	0.000	4.579	5.608	5.516	5.549	5.290	0.000	
Pf	0.000	0.000	0.000	0.000	3.604	4.495	5.008	0.980	1.306	0.000	0.000	0.000	4.285	
Ap	1.186	1.037	1.140	1.088	1.179	0.988	1.722	1.888	1.299	1.407	1.257	1.246	1.096	
Total	100.031	100.026	100.028	100.027	100.030	100.027	100.042	100.045	100.033	100.035	100.031	100.031	100.028	

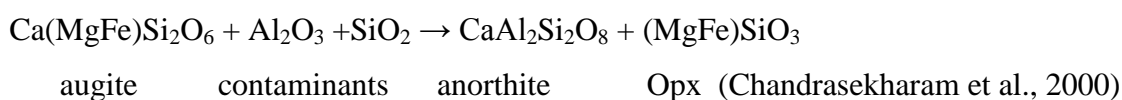
Table 6. Sr-Nd-Pb whole-rock isotope data of representative samples from José Fernandes Gabbro; Sr and Nd initial ratios were calculated for 134 Ma.

Sample	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(t)	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±	εNd(t)	TDM (Ma)
VA43RA	39.79	542.40	0.212	0.70553	0.00004	0.70512	7.12	38.68	0.1113	0.512299	0.000006	-5.16	1110
VA43RD	36.40	689.00	0.153	0.70735	0.00002	0.70705	6.43	34.23	0.1136	0.512216	0.000007	-6.81	1259
VA46A	25.03	1107.27	0.065	0.70588	0.00002	0.70576	6.05	30.96	0.1182	0.512256	0.000007	-6.10	1256
VA48A	85.24	1007.01	0.245	0.70993	0.00003	0.70947	9.26	56.29	0.0995	0.512104	0.000007	-8.76	1253
VA60A	51.59	1336.40	0.112	0.70856	0.00002	0.70835	5.65	34.48	0.0992	0.512118	0.000006	-8.47	1231
VA44RA	40.50	2009.00	0.058	0.70664	0.00002	0.70652	4.91	31.22	0.0951	0.512245	0.000007	-5.93	1029
VA41A	112.44	780.54	0.417	0.71002	0.00006	0.70922	9.55	59.82	0.0965	0.512060	0.000006	-9.55	1278
VA41B	148.86	792.13	0.544	0.71170	0.00005	0.71066	9.93	62.70	0.0957	0.512008	0.000007	-10.56	1337
VA81	156.36	816.22	0.555	0.71219	0.00002	0.71113	11.01	67.63	0.0985	0.512013	0.000005	-10.50	1361
VA41D1	61.40	687	0.259	0.70615	0.00005	0.70566	7.50	42.60	0.1065	0.512435	0.000007	-2.41	871
VA41D2	39.47	611.43	0.187	0.70555	0.00007	0.70520	9.11	52.86	0.1043	0.512521	0.000007	-0.71	738
VA43D1	94.92	1488.85	0.184	0.70569	0.00006	0.70534	12.51	76.53	0.0988	0.512361	0.000005	-3.73	911
VA43D3	28.78	750.23	0.111	0.70512	0.00005	0.70490	9.49	51.91	0.1105	0.512415	0.000006	-3.98	934
VA43D5	83.10	785.00	0.306	0.70739	0.00002	0.70680	8.97	51.62	0.1051	0.512209	0.000007	-6.79	1171
VA43RB	82.84	887.97	0.267	0.70711	0.00007	0.70659	9.59	57.70	0.1005	0.512206	0.000007	-6.78	1128
VA67D1	37.01	585.19	0.183	0.70525	0.00002	0.70490	7.31	40.65	0.1087	0.512488	0.000006	-1.42	815
Sample	Th	U	Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pbm	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pbm	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pbm	²³² Th/ ²³⁸ U	²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pbi	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pbi	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pbi		
VA43RD	2.89	0.64	5.25	18.276	15.597	38.791	4.650	7.779	18.113	15.589	38.550		
VA48A	10.3	2.41	15.2	18.690	15.649	38.993	4.432	10.181	18.476	15.639	38.693		
VA44RA	4.16	0.95	6.92	18.327	15.579	38.767	4.549	8.698	18.144	15.570	38.504		
VA41A	13.4	3.08	15.6	18.723	15.637	39.015	4.515	12.675	18.456	15.624	38.635		
VA41B	18.10	4.60	20.32	18.980	15.667	39.115	4.063	14.633	18.672	15.652	38.719		
VA41D1	7.33	1.45	7.60	17.914	15.499	38.391	5.224	12.004	17.662	15.487	37.974		
VA41D2	10.2	1.38	30.9	18.133	15.519	38.478	7.591	2.826	18.074	15.516	38.336		
VA43D1	14.82	2.81	15.77	18.083	15.507	38.681	5.451	11.287	17.846	15.496	38.271		
VA43D5	8.29	1.75	9.65	18.246	15.559	38.837	4.909	11.507	18.005	15.547	38.461		
VA67D1	4.89	1.03	4.64	17.745	15.459	38.181	4.920	13.842	17.454	15.444	37.728		

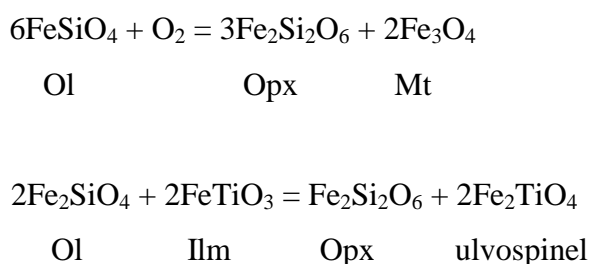
7. Discussion

7.1. Petrographic features indicative of open-system behavior

Abundance of minerals with disequilibrium textures (compositional zoning and reaction rims) is considered indicative of intrusive rocks that were subjected to open system processes (e.g., Streck, 2008). In the José Fernandes Gabbro, larger Pl and Cpx crystals commonly show oscillatory zoning, but many Cpx crystals show light rounded cores mantled by thick brownish rims and intergrowths with tiny biotite crystals. Reaction rims are also found around iron-rich Ol crystals, made up of Opx (Fe-enstatite) that may be associated with Ilm and/or form symplectitic intergrowths with worm-like Mt. In Deccan basalts, the local presence of Fe-enstatite has been interpreted as being related to the entrance of melts with granitic composition derived from metasedimentary host rocks (shale) in the basic magma (Chandrasekharam et al., 2000). In this case, a reaction involving Ol and augite with the addition of SiO₂ and Al₂O₃ from contaminants would be like:



Although the metasedimentary host rocks of the José Fernandes Gabbro are also potential contaminants of the mafic magma, the Fe-enstatite from our rocks is mostly associated with Fe-Ti oxides. Opx-Mt-Ilm symplectites described in olivine gabbros and metagabbros (Ambler and Ashley, 1980; Claeson, 1998; Efimov and Malitch, 2012; Kendrick and Jamieson, 2016) are often considered as a product of a non-isochemical replacement (Claeson, 1998; Barton and Van Gaans, 1988) related to the following reactions that involve metastable iron-rich olivine under oxidizing conditions (Lindsley et al., 1990):



The intergrowths may also result from a reaction of olivine with residual melt (e.g., Ambler and Ashley, 1980). In gabbro-ultramafic complexes from the Urals, the presence of free oxygen is related to the dissociation of water that penetrated into solid, hot gabbro, causing hydration (Efimov and Malitch, 2012). In a metagabbro from Ontario, the symplectites were formed at higher pressures with the involvement of high temperature fluids

(Kendrick and Jamieson, 2016). In the José Fernandes Gabbro, hydration is evidenced by the common presence of biotite concentrated in pockets, in intergrowths located at Cpx rims and in reaction rims of Fe-Enstatite and associated intergrowths with Mt. The presence of hornblende is also observed in reaction rims of Cpx from some rocks (quartz monzogabbro). Although Opx and the symplectites might have been formed at great depths, this may be discarded because of the presence of coexisting iron-rich olivine with quartz and locally pigeonite in evolved quartz monzogabbros that implies a previous evolution at lower pressures and high temperatures (Smith, 1971; Davidson and Lindsley, 1989).

7.2. Heterogeneous crustal contamination and nature of the contaminant

Geochemistry of the José Fernandes gabbroic rocks shows clear evidence that fractional crystallization was an important process for the evolution of the intrusion, e.g. the development of negative Eu anomalies, resulting from plagioclase fractionation (e.g., Weill and Drake, 1973), negative correlation between SiO₂ with CaO and Mg# and consistent behavior of compatible elements (Ni, Cr).

Geochemical and isotopic signatures are variable between gabbroic rocks and alkaline dykes. The consistent positive correlation of whole-rock SiO₂ content with Sr-Pb initial ratios together with negative correlation with εNd_i is clear evidence of contamination of the magma along with fractionation, i.e., a classical AFC process (Harris, 1989; Baker et al., 2000). However, the contamination signature is heterogeneous among the rocks, even in gabbroic samples from the same outcrop. High ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i gabbroic rocks (quartz monzogabbro, 0.709) are cut by dykes with less radiogenic signature (basanite, tephrite with ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i = 0.704-0.705), while melagabbro rocks with lower ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i ratios (0.705) are cut by dykes with distinct Sr-Nd-Pb isotopic signatures, including dykes with higher ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i (0.707), necessarily indicating that the intrusion was formed by different pulses of magma.

In the Messum Complex, a decreasing effect of crustal contamination is observed among the alkaline rocks and interpreted as being related to the crystallization of the magma against the wall of a conduit that prevented the contact between later magmas with the contaminant (Harris et al., 1999). This might be the case for the alkaline dykes with more primitive isotope signature intruded in the José Fernandes Gabbro. However, the isotopic data actually show that an alternation of magmatic pulses with different crustal contributions more probably occurred.

Highly contaminated rocks ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i > 0.707$) showing, besides a higher SiO_2 content, an enrichment of K_2O over Na_2O can be related to the contamination by metapelites (e.g., Esperança et al., 1992). This is also evidenced by higher Th/Nb, Th/La and lower Ce/Pb ratios of these rocks (Figure 16), typically attributed to the influence of sediments (Plank, 2005). However, some samples with higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (VA43RD, VA44RA) show lower Th/La ratios relative to higher SiO_2 content (49-50 wt%), which can indicate that the concentration of Th has a mineralogical control. The Pb isotopes also provide a strong evidence of the presence of a low time-integrated Th/U component in contaminated samples that is typical of the upper crust (e.g., Wedepohl, 1995). Samples with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i > 0.708$ show consistent older model ages (Nd T_{DM} 1400-1200 Ma) relative to more primitive samples (Nd T_{DM} 900-700 Ma) which can be related to an inheritance from an old contaminant source also constrained by lower values of ϵNd_i (-11) (Florisbal et al., 2012). Although host rocks of the José Fernandes Gabbro are from the Mesoproterozoic Votuverava Group, a contamination at depth, for instance during ascent, is suggested by the persistent contaminated signature observed throughout the intrusion.

7.3. Parental magmas

As the geochemistry of cumulatic rocks does not represent the evolution of the liquid, dykes are potential candidates to represent this composition (Duchesne and Charlier, 2005). Dykes from the present study, interpreted to be of synplutonic origin and that could represent primitive melts, are those of basanite composition with mantle-derived signatures constrained by lower initial Sr-Pb isotopic ratios together with higher ϵNd . It is well known that, parental magmas of some alkaline suites in the PGA (e.g., Juquiá) are of basanite composition and generated cumulatic rocks through fractional crystallization (Beccaluva et al., 1992). AFC processes are considered relevant for the evolution of Cananéia alkaline massif and dykes in Juquiá and Tunas from the PGA due to the positive correlation between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ and SiO_2 content (Spinelli, 2007; Gomes et al., 2011). To better constrain the contribution of crustal contamination on the geochemistry of gabbroic rocks and alkaline dykes of José Fernandes Gabbro, AFC-mixing models were performed using FC-AFC-FCA and mixing modeler (Ersoy and Helvact, 2010) with the equations of DePaolo (1981) and Powell (1984). The contamination potentially involved melting of different lithologies, but for the models the composition of the contaminant were considered the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.83162) and

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (0.511471) ratios of phyllite from the Votuverava Group (Siga Jr. et al., 2011). The Sr-Nd ratios of the contaminant were calculated to 134 Ma. The basanite VA43D3 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 0.7049, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 0.51232) was used as starting composition (Figure 19). The AFC model curve was generated using an r factor (ratio of assimilated material to crystallized material) of 0.3 that is considered by some works a reasonable value for gabbroic and cumulatic rocks (e.g., Tegner et al., 2005). The samples show a trend that fits the mixing curve, indicating that an alkaline magma evolved to compositions with higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and lower $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ by assimilation of a melt from Precambrian metasedimentary rocks of the Ribeira Belt together with fractional crystallization.

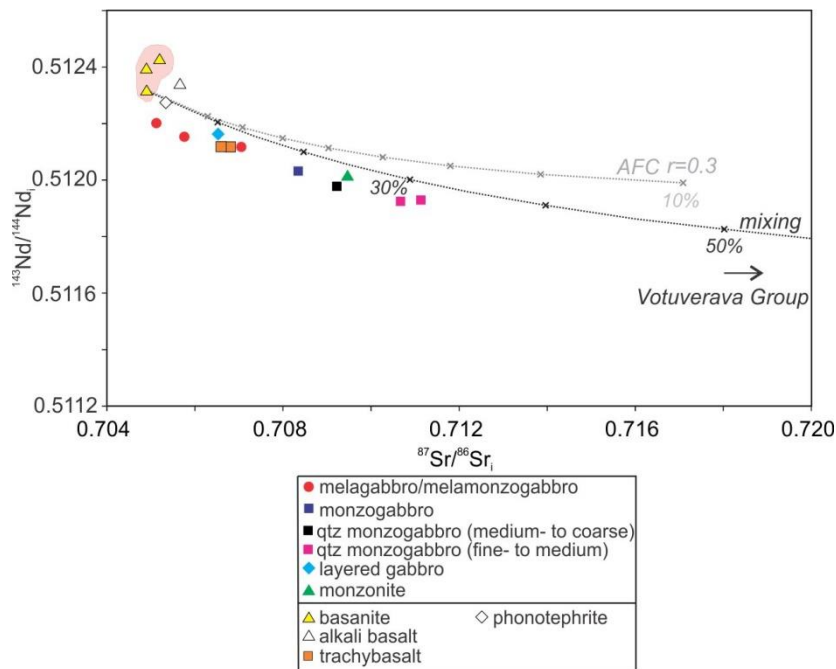


Figure 19. AFC-mixing models for José Fernandes Gabbro samples considering basanite VA43D3 as starting composition. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios of the contaminant are from phyllite of the Votuverava Group from Siga Jr. et al. (2011).

7.4. Relationship of José Fernandes Gabbro with Early Cretaceous intrusive magmatism of the PGA.

The Early and Late Cretaceous alkaline magmatism of Ponta Grossa Arch is considered by many authors as products of low melting degrees (4-6%) of an upper mantle source composed of garnet peridotite and phlogopite-bearing garnet peridotite with evidence of important metasomatism in the lithospheric mantle (Gomes et al., 2011). Contributions of the EM1 and depleted HIMU mantle components were identified in some intrusions from the

PGA (e.g., Banhadão), interpreted as derived from a heterogeneous lithospheric source with different degrees of enrichment (e.g., Ruberti et al., 2005; Ruberti et al., 2012). Primitive samples from the José Fernandes Gabbro of basanite and melagabbro composition plot in the EM1 compositional field also with a contribution of the depleted HIMU component (Figure 20a-b). The isotopic data is also within the compositional range of tholeiitic magmatism of the Paraná Magmatic Province and associated Early Cretaceous alkaline-carbonatitic complexes (Figure 20 a-c). More contaminated samples (e.g., with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i > 0.707$) trend towards the EM2 field (Figure 20c).

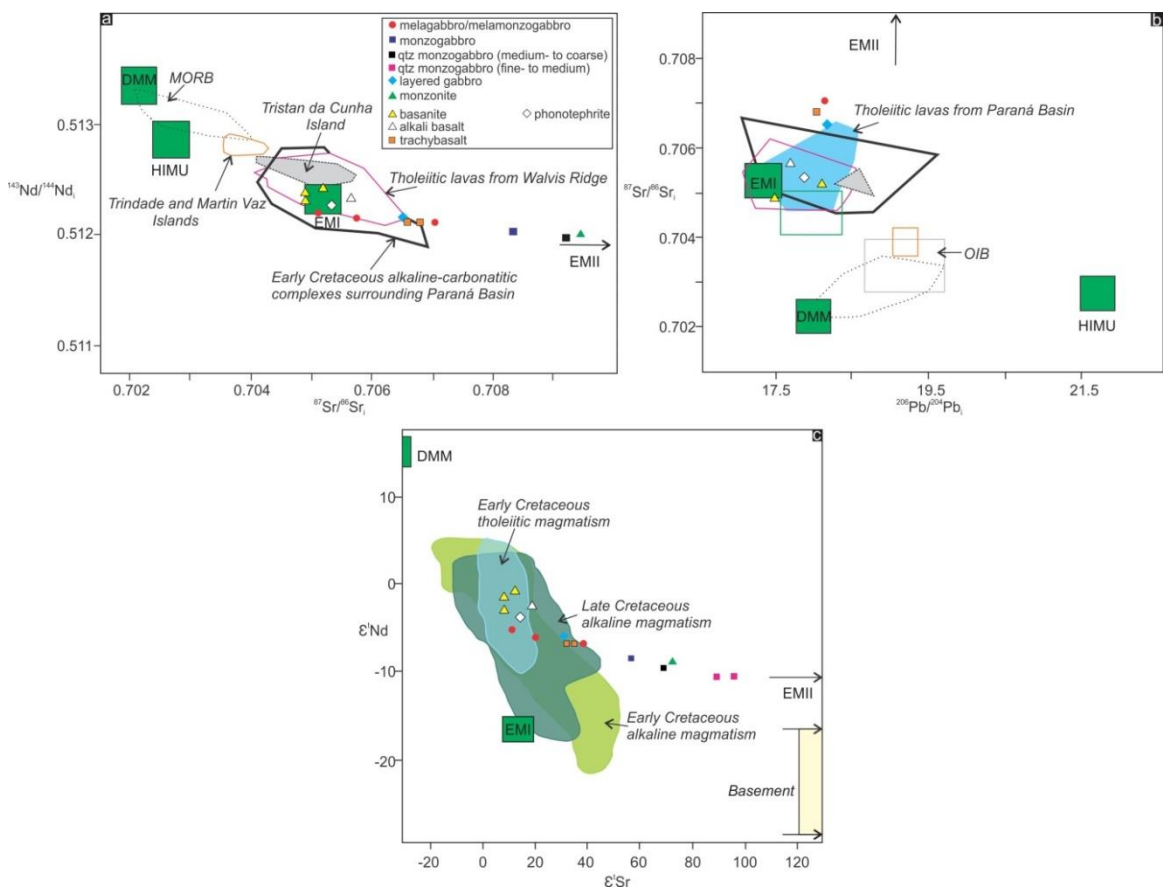


Figure 20. Sr-Nd-Pb isotopic diagrams showing the relationship of José Fernandes Gabbro samples with isotopic compositional fields of Early Cretaceous alkaline-carbonatitic complexes, tholeiitic lavas and mantle reservoirs. The compositional fields are from Comin-Chiaramonti et al. (2005) and references therein, while mantle reservoirs are from Hart (1988) and Hart et al. (1992).

8. Conclusions

Petrographic, geochemical and isotopic data indicate an important influence of the crust in the evolution of gabbroic rocks and related synplutonic alkaline dykes of José Fernandes Gabbro. Disequilibrium textures and zoning are identified in minerals throughout the intrusion as evidence for open system processes, including the presence of Opx (Fe-enstatite), identified in reaction rims of iron-rich olivine and in symplectitic intergrowths. The presence of Opx can be related either to the entrance of SiO₂ and Al₂O₃ from the melting of metasedimentary rocks and/or to reactions of olivine with fluids due to hydration under oxidizing conditions. Fractional crystallization was an important process for the evolution of the intrusion, and is constrained by geochemical data with evidence for Pl, Cpx and Ol fractionation together with negative correlation between SiO₂ with CaO and Mg#. Positive correlation of SiO₂ content with Sr-Pb initial ratios is evidence for crustal contamination during fractionation. The contamination is heterogeneous among the rocks, as gabbroic rocks are cut by dykes with more primitive (<0.705) and more evolved (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i (>0.706) signatures, implying that the intrusion was formed by pulses of magma with distinct crustal contributions. The contaminants are potentially metapelitic rocks as indicated by enrichment of K₂O over Na₂O and by evidence of a low time-integrated Th/U component typical of the upper crust. AFC-mixing models show that the parental magma can be of basanite composition that evolved to compositions with higher Sr-Pb ratios by fractional crystallization and assimilation of a melt from metasedimentary rocks of the Ribeira Belt.

Acknowledgements

The authors thank FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) for financial support (Thematic Project, Proc. 2012/06082-6,) and Prof. Rogério Guitarrari Azzone for suggestions on treatment of geochemical data.

References

Almeida, V.V., Janasi, V.A., Heaman, L.M., Shaulis, B., Hollanda, M.H.B.M., Renne, P.R. (*submitted*). Contemporaneous alkaline and tholeiitic magmatism in the Ponta Grossa Arch, Paraná-Etendeka Magmatic Province: constraints from precise U-Pb zircon/baddeleyite and ⁴⁰Ar/³⁹Ar phlogopite dating of the José Fernandes Gabbro and mafic dykes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Almeida, F.F.M. 1983. Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana. *Revista Brasileira de Geociências*, 13: 139-158.

Ambler, E.P., Ashley, P.M. 1980. Mineralogy and petrology of the Dutchmans Creek gabbroic intrusion, South Carolina: discussion. *American Mineralogist*, 65: 1302-1303.

Armstrong, J.T. 1995. CITZAF: a package of correction programs for the quantitative electron microbeam X-ray-analysis of thick polished materials, thin films, and particles. *Microbeam Analysis*, 4, 177-200.

Azzone, R.G., Munoz, P.M., Enrich, G.E.R., Alves, A., Ruberti, E., Gomes, C.B. 2016. Petrographic, geochemical and isotopic evidence of crustal assimilation processes in the Ponte Nova alkaline mafic-ultramafic massif, SE Brazil. *Lithos*, 260: 58-75.

Babinski, M., van Schmus, W. R., Chemale Jr., F. 1999. Pb-Pb dating and Pb isotope geochemistry of Neoproterozoic carbonate rocks from the São Francisco basin, Brazil: Implications for the mobility of Pb isotopes during tectonism and metamorphism. *Chemical Geology*, 160: 175-199.

Baker, J.A., Macpherson, C.G., Menzies, M.A., Thirlwall, M.F., Al-Kadasi, M., Matthey, D.P. 2000. Resolving crustal and mantle contributions to continental flood volcanism, Yemen; constraints from mineral oxygen isotope data. *Journal of Petrology*, 41(12): 1805-1820.

Barton, M., Van Gaans, C. 1988. Formation of orthopyroxene-Fe-Ti oxide symplectites in Precambrian intrusives, Rogaland, southwestern Norway. *American Mineralogist*, 73: 1046-1059.

Beccaluva, L., Barbieri, M., Born, H., Brotzu, P., Coltorti, M., Conte, A., Garbarino, C., Gomes, C.B., Macciota, G., Morbidelli, L., Ruberti, E., Siena, F., Traversa, G. 1992. Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquiá, São Paulo, Brazil. *Journal of Petrology*, 33: 1371-1404.

Cernuschi, F., Dilles, J.H., Kent, A.J.R., Schroer, G., Raab, A.K., Conti, B., Muzio, R. 2015. Geology, geochemistry and geochronology of the Cretaceous Lascano East intrusive complex and magmatic evolution of the Laguna Merín basin, Uruguay. *Gondwana Research*, 28: 837-857.

Chandrasekharam, D., Vaselli, O., Sheth, H.C., Keshav, S. 2000. Petrogenetic significance of ferro-enstatite orthopyroxene in basaltic dikes from the Tapi rift, Deccan flood basalt province, India. *Earth and Planetary Science Letters*, 179(3-4): 469-476.

Chatterjee, N., Bhattacharji, S. 2008. Trace element variations in Deccan basalts: roles of mantle melting, fractional crystallization and crustal assimilation. *Journal Geological Society of India*, 71: 171-188.

Claeson, D.T. 1998. Coronas, reaction rims, symplectites and emplacement depth of the Rymmen gabbro, Transcandinavian Igneous Belt, southern Sweden. *Mineralogical Magazine*, 62(6): 743-757.

Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B., Marques, L.S., Censi, P., Ruberti, E., Antonini, P. 2005. Carbonatites from southeastern Brazil: geochemistry, O-C, Sr-Nd-Pb isotopes and relationships with the magmatism from the Paraná-Angola-Namibia Province. In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. (eds.). *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazillian Platform*. Edusp/Fapesp, 657-688.

Davidson, P. M., Lindsley, D. H. 1989. Thermodynamic analysis of pyroxene-olivine-quartz equilibria in the system CaO-MgO-FeO-SiO₂. *American Mineralogist*, 74: 18-30.

DePaolo, D.J. 1981. Trace element and isotopic effects of combined wall-rock assimilation and fractional crystallization. *Earth and Planetary Science Letters*, 53, 189-202.

Duchesne, J.C., Charlier, B. 2005. Geochemistry of cumulates from the Bjerkreim-Sokndal layered intrusion (S. Norway). Part I: Constraints from major elements on the mechanism of cumulate formation and on the jotunite liquid line of descent. *Lithos*, 83: 229-254.

Efimov, A.A., Malitch, K.N. 2012. Magnetite-Orthopyroxene symplectites in gabbros of the Urals: a structural track of olivine oxidation. *Geology of ore deposits*, 54 (7): 531-539.

Ersoy, Y., Helvacı, C. 2010. FC-AFC-FCA and mixing modeler: A Microsoft Excel spreadsheet program for modeling geochemical differentiation of magma by crystal fractionation, crustal assimilation and mixing. *Computer & Geosciences*, 36: 383-390.

Esperança, S., Crisci, G.M., de Rosa, R., Mazzuoli, R. 1992. The role of the crust in the magmatic evolution of the island of Lipari (Aeolian Islands, Italy). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 112: 450-462.

Faleiros, F.M., Campanha, G.A.C., Martins, L., Valch, S.R.F. 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., Pavan, M., 2013. Geologia e recursos minerais da folha Eldorado Paulista–SG.22-X-B-VI, Estado de São Paulo, Escala 1:100.000. Programa Geologia do Brasil, CPRM-Serviço Geológico do Brasil, São Paulo, 128 pp.

Ferreira, F.J.F. 1982. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 169p.

Florisbal, L.M., Janasi, V.A., Bitencourt, M.F., Nardi, L.V.S., Heaman, L.M. 2012. Contrasted crustal sources as defined by whole-rock and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry of neoproterozoic early post-collisional granitic magmatism within the Southern Brazilian Shear Belt, Camboriú, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 39: 24-43.

Gaspar, J.C., 1989. Geologie et mineralogie du complexe carbonatique de Jacupiranga, Brésil. Ph.D. thesis, University of Orleans, 377p.

Gibson, S.A., Thompson, R.N., Day, J.A. 2006. Timescales and mechanisms of plume-lithosphere interactions: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and geochemistry of alkaline igneous rocks from the Paraná-Etendeka large igneous province. *Earth and Planetary Science Letters*, 251: 1-17.

Gomes, C. B., Barbieri, M., Beccaluva, L., Brotzu, P., Conte, A., Garbarino, C., Macciotta, G., Melluso, L., Morbidelli, L., Ruberti, E., Scheibe, L. F., Tamura, R. M., Traversa, G. 1987. Petrological and geochemical studies of alkaline rocks from continental Brazil: 2. The Tunas massif, state of Paraná. *Geochimica Brasiliensis*, 1 (2): 201-234.

Gomes, C.B., Ruberti, E., Comin-Chiaramonti, P., Azzone, R.G. 2011. Alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch, SE Brazil: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 152-168.

Halama, R., Marks, M., Brüggmann, G., Siebel, W., Wenzel, T., Markl, G. 2004. Crustal contamination of mafic magmas: evidence from a petrological, geochemical and Sr-

Nd-Os-O isotopic study of the Proterozoic Isortoq dike swarm, South Greenland. *Lithos*, 74: 199-232.

Harris, C. 1989. Covariance of initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios, $\delta^{18}\text{O}$, and SiO_2 in continental flood basalt suites: The role of contamination and alteration. *Geology*, 17(7): 634-636.

Harris, C. 1995. Oxygen isotope geochemistry of the Mesozoic anorogenic complexes of Damaraland, northwest Namibia: evidence for crustal contamination and its effect on silica saturation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122: 308-321.

Harris, C., Marsh, J.S., Milner, S.C. 1999. Petrology of the alkaline core of the Messum Igneous Complex, Namibia: Evidence for the progressively decreasing effect of crustal contamination. *Journal of Petrology*, 40: 1377-1397.

Hart, S. R. 1988. Heterogeneous mantle domains—Signatures, genesis and mixing chronologies. *Earth and Planetary Science Letters*, 90: 273-296.

Hart, S.R., Hauri, E.H., Oschmann, L.A., Whitehead, J.A., 1992. Mantle plumes and entrainment: isotopic evidence. *Science*, 256: 517-520.

Hora, J.M., Singer, B.S., Wörner, G., Beard, B.L., Jicha, B.R., Johnson, C.M. 2009. Shallow and deep crustal control on differentiation of calc-alkaline and tholeiitic magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 285: 75-86.

Hunter, A.G. 1998. Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso volcano, SW Japan. *Journal of Petrology*, 39(7): 1255-1284.

Hutchison, C.S. 1974. *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*. John Wiley & Sons, New York, 1-527.

Hutchison, C.S. 1975. The norm, its variations, their calculation and relationships. *Schweiz Mineral Petrogr Mitt*, 55: 243-256.

Kendrick, J.L., Jamieson, R.A. 2016. The fate of olivine in the lower crust: Pseudomorphs after olivine in coronitic metagabbro from the Grenville Orogen, Ontario. *Lithos*, 260: 356-370.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.

Lightfoot, P.C., Sutcliffe, R.H., Doherty, W., 1991. Crustal contamination identified in Keweenawan Osler Group Tholeiites, Ontario: a trace element perspective. *Journal of Geology*, 99, 739-760.

Lindsley, D.H., Frost, B.R., Andersen, D.J., Davidson, P.M. 1990. Fe-Ti oxide-silicate equilibria: Assemblages with orthopyroxene. *In*: R.J. Spencer and I-Ming Chou. Fluid-Mineral Interactions: A tribute to H.P. Eugster. The Geochemical Society, Special Publication, n. 2.

Lustrino, M., Melluso, L., Brotzu, P., Gomes, C.B., Morbidelli, L., Muzio, R., Ruberti, E., Tassinari, C.C.G. 2005. Petrogenesis of the Early Cretaceous Valle Chico igneous complex (SE Uruguay): Relationships with Paraná-Etendeka magmatism. *Lithos*, 82: 407-434.

Marques, L. S., Dupré, B., Piccirillo, E. M. 1999. Mantle source compositions of the Paraná Magmatic Province (southern Brazil): evidence from trace element and Sr–Nd–Pb isotope geochemistry. *Journal of Geodynamics*, 28: 429–459.

McDonough, W.F., Sun, S.-s. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253.

Milner, S.C., Duncan, A.R., Whittingham, A.M., Ewart, A. 1995. Trans-Atlantic correlation of erupted sequences and individual silicic volcanic units within the Paraná-Etendeka igneous province. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69: 137-157.

Milord, I., Sawyer, E.W., Brown, M. 2000. Formation of diatexite migmatite and granite magma during anatexis of semi-pelitic metasedimentary rocks: an example from St. Malo, France. *Journal of Petrology*, 42(3): 487-505.

Mingram, B., Trumbull, R.B., Littman, S., Gerstenberger, H. 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos*, 54, 1-22.

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

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 efficiency of microwave oven sample decomposition procedures. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(2): 167-180.

Pieruceti, J.A. 1973. A intrusão básica de José Fernandes, PR. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.

Pieruceti, J.A., Gomes, C.B. 1975. Aspectos mineralógico-petrográficos da intrusão de José Fernandes, PR. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 47:439-450.

Plank, T. 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents. *Journal of Petrology*, 46(5): 921-944.

Powell, R. 1984. Inversion of the assimilation and fractional crystallization (AFC) equations; characterization of contaminants from isotope and trace element relationships in volcanic suites. *Journal of the Geological Society*, 141: 447-452.

Raposo, M.I.B. 1995. Episódios intrusivos no Arco de Ponta Grossa, determinados através de um estudo paleomagnético. *Revista Brasileira de Geociências*, 24(1): 3-19.

Reiners, P.W., Nelson, B.K., Nelson, S.W. 1996. Evidence for multiple mechanisms of crustal contamination of magma from compositionally zoned plutons and associated ultramafic intrusions of the Alaska range. *Journal of Petrology*, 37(2): 261-292.

Ruberti, E., Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P. 2005a. The alkaline magmatism from the Ponta Grossa Arch. *In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. (eds.). Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazillian Platform*. Edusp/Fapesp, São Paulo, pp.473-521.

Ruberti, E., Gomes, C.B., Tassinari, C.C.G., Antonini, P., Comin-Chiaramonti, P. 2005b. The Early Cretaceous Valle Chico Complex (Mariscal, SE Uruguay). *In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. (eds.). Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazillian Platform*. Edusp/Fapesp, São Paulo, pp. 591-627.

Ruberti, E., Enrich, G.E.R., Azzone, R.G., Comin-Chiaramonti, P., De Min, A., Gomes, C.B. 2012. The Banhadão Alkaline Complex, Southeastern Brazil: source and evolution of potassic SiO₂-undersaturated high-Ca and low-Ca magmatic series. *Mineralogy and Petrology*, 104: 63-80.

Sato, K.; Tassinari, C.C.G.; Kawashita, K., Petronilho, L. 1995. Método geocronológico Sm-Nd no IGC-USP e suas aplicações. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 67: 315-336.

Shervais, J.W., Hanan, B.B., Vetter, S.K. 2007. Assimilation of consanguineous mafic intrusions: layered crustal sill complexes as reactive filters for continental basalts. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract V54A-07.

Siga Jr., O., Basei, M.A.S., Sato, K., Passarelli, C.R., Nutman, A., McReath, I., Prazeres Filho, H.J. 2011. Calymmian (1.50-1.45 Ga) magmatic records in Votuverava and Perau sequences, south-southeastern Brazil: Zircon ages and Nd-Sr isotopic geochemistry. *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 301-308.

Smith, D. 1971. Stability of the assemblage iron-rich orthopyroxene-olivine-quartz. *American Journal of Science*, 271: 370-382.

Spinelli, F.P. 2007. As rochas alcalinas de Cananéia, litoral sul do estado de São Paulo: estudos mineralógicos, geoquímicos e isotópicos. Tese de doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Streck, M.J. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69: 595-622.

Streckeisen, A. 1974. Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geologische Rundschau*, 63(2): 773-786.

Sun, S.-s., McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *In: Magmatism in the ocean basins*. Saunders, A.D., Norry, M.J. (eds.). Geological Society of London, London, 42: 313-345.

Tegner, C., Wilson, J.R., Robins, B. 2005. Crustal assimilation in basalt and jotunite: Constraints from layered intrusions. *Lithos*, 83(3-4), 299-316.

Torquato, J.R., Kawashita, K. 1994. Geologia Nuclear V – O método Rb-Sr. *Revista de Geologia*, 46p.

Trumbull, R.B., Harris, C., Frindt, S., Wigand, M. 2004. Oxygen and neodymium isotope evidence for source diversity in Cretaceous anorogenic granites from Namibia and implications for A-type granite genesis. *Lithos*, 73, 21-40.

Wagner, L.R., Brown, G.M. 1968. Layered igneous rocks. San Francisco, W.H. Freeman. 588p.

Wedepohl, K.H. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217-1232.

Weill, D.F., Drake, M.J. 1973. Europium Anomaly in Plagioclase Feldspar: Experimental Results and Semiquantitative Model. *Science*, 180 (4090): 1059–1060.

ANEXO B

MANUSCRITO

“Signatures of parental melts and crustal processes constrained by in situ Sr-Pb isotopes and trace element distribution in minerals from the José Fernandes Gabbro, Ponta Grossa Arch, Brazil”

Signatures of parental melts and crustal processes constrained by in situ Sr-Pb isotopes and trace element distribution in minerals from the José Fernandes Gabbro, Ponta Grossa Arch, Brazil

Vidyã Vieira Almeida^{a,b}, Valdecir de Assis Janasi^a, Larry Michael Heaman^c

^aDepartamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brazil

^bGeological Survey of Brazil (CPRM), Superintendência Regional de São Paulo (Sureg/SP)

^cDepartment of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada

Abstract

Signatures of parental melts and crustal processes were obtained through in situ Sr-Pb isotopes and trace element distribution in minerals from the José Fernandes Gabbro, related to the 134 Ma magmatism at the Ponta Grossa Arch, southeast-south Brazil. The intrusion was formed by pulses with different crustal contributions with strong geochemical evidence for assimilation fractional crystallization in the generation of the rocks. The composition of clinopyroxene, orthopyroxene and olivine from gabbroic rocks follow a Fe-enrichment trend related to fractional crystallization. Chemical zoning is a common feature in minerals, especially in clinopyroxene and plagioclase. Whereas plagioclase shows oscillatory zoning with fluctuations of the An content, clinopyroxene shows brighter rounded cores with resorption textures with more primitive composition (Mg# 85-92) and brownish rims with oscillatory zoning and with lower Mg# (77-83) and higher TiO₂ content (up to 1.7 wt%). Clinopyroxene often shows enrichment of light rare earth elements ((La/Yb)_N 3-7 in cores) with a convex-upward shape ((La/Nd)_N<1). The major-element zoning in clinopyroxene is accompanied by differences in trace elements, as the primitive cores show higher Cr (up to 7664 ppm), while rims are more enriched in high field strength elements (up to 99 ppm Zr in melamonzogabbro) and rare earth elements (e.g., up to 13 ppm La in layered gabbro). Silica-oversaturated rocks (quartz monzogabbro), present as a southwestern small body, show small clinopyroxene crystals with negative Eu anomalies, often identified in low-Ca pyroxene. The highest Mg# of the melt in equilibrium with Ol were estimated for basanite dykes (Mg# 60 and 66) which is similar to the values estimated for basanites from Juquiá alkaline intrusion. Among the gabbroic samples only the melt in equilibrium with Ol from melamonzogabbro

shows similarly high Mg# (59). The melt in equilibrium with clinopyroxene relict cores shows trace-element signatures typical of a more alkaline composition as those of the basanite dyke (higher Nb and REE). In situ Sr isotopes of some plagioclase crystals indicate variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios, suggesting magma recharges with different crustal contributions. Significant Sr isotopic zoning in larger clinopyroxene crystals are observed in cores with lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (≤ 0.705), in disequilibrium with whole-rock isotopic ratios, and rims with higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (≥ 0.706) crystallized from a contaminated liquid. The cores can represent relicts of recycled earlier-formed cumulate phases subsequently rimmed by material that is in equilibrium with the host magma. These lower in situ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios are similar to the isotopic ratios found in clinopyroxene phenocrysts ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ 0.704-0.705) from basanite dykes and can be evidence that a parental basanite magma generated at least part of the gabbroic rocks. The oxygen isotope signature of zircon from quartz monzogabbro ($\delta^{18}\text{O}=6.7$ - 7.5%) also reflects a crust-contaminated liquid. Positive correlations among Pb isotopic ratios of K-feldspar from gabbroic samples yield further in situ evidence for assimilation fractional crystallization processes.

1. Introduction

Chemical and isotope analyses of minerals is of great importance to unravel the complexities in the evolution of plutonic rocks. In the case of mafic intrusions, they can reveal isotopic disequilibrium among mineral phases (e.g., Mathez and Waight, 2003, McBirney and Creaser, 2003), nature of parental magmas (e.g., Azzone et al., 2013) along with evidence for fractional crystallization and contamination (e.g., Tepley III and Davidson, 2003; Azzone et al., 2016). In the Ponta Grossa Arch (PGA), south-southeast of Brazil, the latter processes are often reported in alkaline suites related to the Early Cretaceous intrusive magmatism of the Paraná-Etendeka Magmatic Province (PEMP), with the main parental magmas inferred as of ankaratrite (Jacupiranga), basanite (Juquiá) and theralite (Pariquera-Açu) composition (Beccaluva et al., 1992; Morbidelli et al., 2000; Ruberti et al., 2005).

The José Fernandes Gabbro (Figure 1b) is related to the 134 Ma intrusive magmatism at the PGA. The intrusion shows geochemical features that can be related to both alkaline and tholeiitic magmatism from the PEMP, and whole-rock chemistry indicates important crustal contributions on its evolution (Almeida et al., unpublished). In this work, in situ analyses of trace elements and Sr-Pb-O isotopes were performed in minerals aiming to constrain the

signatures of the parental magmas involved in the generation of the gabbroic rocks and of crustal contamination processes. Recent literature has shown that interaction between fractional crystallization and crustal contamination can be deciphered by the preservation of isotopic heterogeneities in magmatic crystals (e.g., Tepley III and Davidson, 2003).

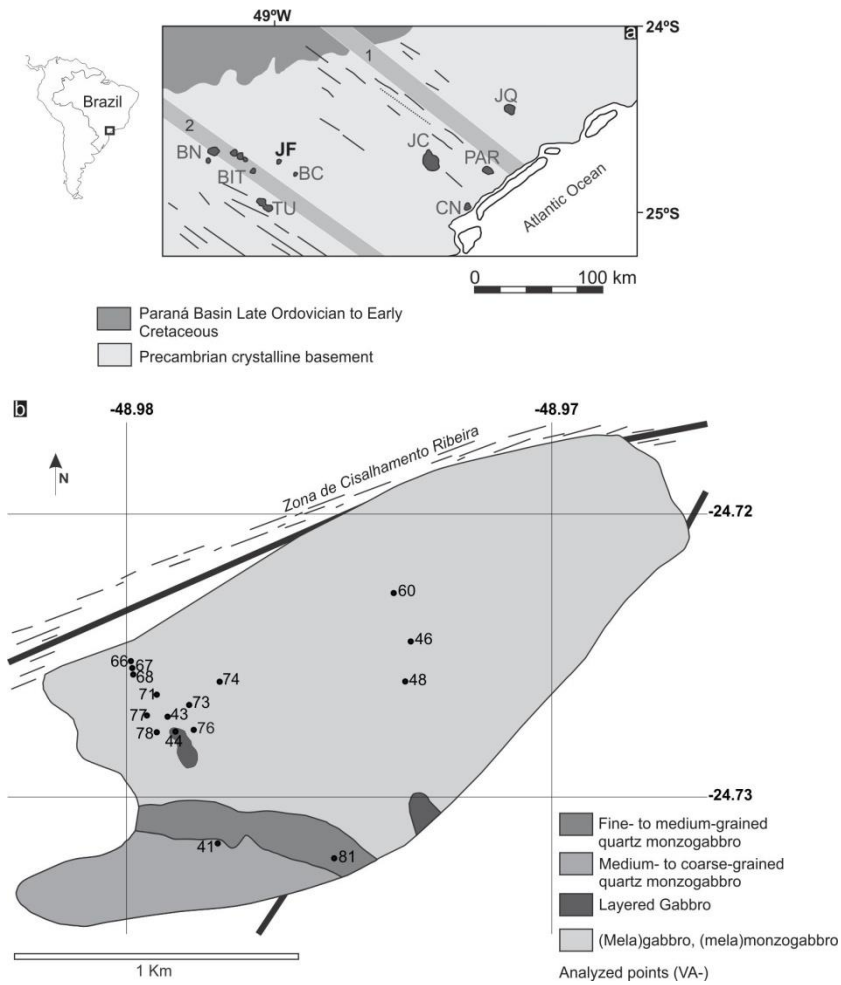


Figure 1. (a) Schematic map of the Ponta Grossa Arch showing the magnetic alignments (1- Guapiara, 2- São Jerônimo Curiúva) and the main alkaline intrusions (JC – Jacupiranga, JQ – Juquiá, PAR – Pariquera-Açu, CN – Cananéia, BN – Banhadão, BIT – Barra de Itapirapuã, TU – Tunas, BC – Bairro da Cruz, JF – José Fernandes Gabbro) (Modified from Ruberti et al., 2005). (b) Geological map of the José Fernandes Gabbro.

2. Geological Background

2.1. The José Fernandes Gabbro

The José Fernandes Gabbro (Figure 1b) is located close to alkaline stocks near the São Jerônimo-Curiúva Lineament at the Ponta Grossa Arch (PGA) (e.g., Tunas, Banhadão, Mato Preto) (Figure 1a), southeast-south Brazil. The Early and Late Cretaceous alkaline intrusions at the PGA are mainly potassic and have been the subject of several works focusing especially on their petrogenesis (e.g., Ruberti et al., 2005; Gomes et al., 2011; Azzone et al., 2013) and geochronology (e.g., Ruberti, 1984; Sonoki and Garda, 1988). The José Fernandes Gabbro was recently dated by U-Pb TIMS in zircon at 134.93 ± 0.16 Ma (Almeida et al., *submitted*), which fits the intrusion in the context of the Early Cretaceous magmatism of the PGA, closely related to the PEMP magmatism. The gabbro is emplaced in Mesoproterozoic metasedimentary rocks of the Votuverava Group (quartzite, phyllite and marble) and is limited by the Ribeira Shear Zone to the north (Figure 1b). Most of the intrusion is composed of a silica-saturated unit of inequigranular medium to coarse-grained (mela)gabbro-(mela)monzogabbro with local occurrence of medium-grained layered gabbro. The southern portion of the intrusion is formed by silica-oversaturated quartz monzogabbro that is fine- to medium-grained at the contact with the main gabbro unit, which is suggestive of a chilled margin and therefore a younger pulse. The intrusion is cut by abundant alkaline dykes of varied composition (basanite, tephrite, phonotephrite, trachybasalt) whose contacts show irregular shapes, indicative of a synplutonic origin.

The gabbros are always hypersthene-normative and there is petrographic and geochemical evidence for the entrance of SiO_2 and Al_2O_3 from the melting of country rocks; non-isochemical reactions of olivine (Ol) with fluids under oxidizing conditions is also evidence for open system processes. Geochemical data show that fractional crystallization was an important process for the evolution of the intrusion. The positive correlation of SiO_2 with Sr-Pb initial ratios attest for crustal contamination during fractionation. Both quartz monzogabbro varieties, a local monzonite rock, and trachybasalt dykes are the most contaminated samples with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i > 0.707$. Contamination is heterogeneous throughout the intrusion, as gabbroic rocks are cut by more primitive (basanite with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i 0.7049$) and contaminated dykes (trachybasalt $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i 0.707$), indicating that the intrusion was formed by pulses of magma with distinct crustal contribution. The contaminant was inferred as

potentially metapelitic rocks due to enrichment of K₂O over Na₂O observed in higher initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (>0.707) samples that also show higher Th/La and Th/Nb.

3. Analytical Techniques

3.1. Electron microprobe and trace element in minerals

Major elements in minerals were analyzed in electron microprobe at Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta (JEOL JXA-8900R), at NAP-Geoanalítica, Universidade de São Paulo (JEOL JXA-FE-8530) and at Universidade de Brasília (JEOL JXA-8230). Analyses were performed at 15 kV acceleration voltage and 20 nA beam current; beam diameter was normally 5-10 μm. Standards were natural and synthetic minerals. Data reduction was performed using a CITZAF (Armstrong, 1995) and ZAF corrections.

Trace elements in minerals were analyzed in a LA-Q-ICP-MS at NAP-Geoanalítica, Universidade de São Paulo, using a Parkin-Elmer ELAN-600 quadrupole ICP-MS coupled with a 216 nm Nd-YAG New-Wave laser ablation system, with a spatial resolution of 50 μm. NIST 612 glass and BHVO basalt were used as calibration standards. The concentration of Ca from the electron microprobe analyses was used as internal standard for clinopyroxene (Cpx) and plagioclase (Pl) analyses, while the concentration of Mg and Si were used as internal standards for olivine and K-feldspar (Kfs) analyses, respectively.

3.2 Sr-Pb isotopic ratios in minerals

Sr and Pb isotopic determinations in minerals were performed at Canadian Centre for Isotopic Microanalysis (CCIM), at University of Alberta, using a Nu Plasma multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometer (LA-MC-ICP-MS) with a New Wave UP213 laser ablation system. Sr isotopic analyses were performed in Pl and Cpx crystals while Pb isotopic analyses were performed in Kfs crystals. The data were obtained in 60 μm-thick polished thin sections in raster mode. Labradorite was used as calibration standard for Pl and Cpx analyses and NIST-612 glass was used as calibration standard for Kfs analyses.

3.3. Oxygen isotopes in zircon

Zircon crystals of one rock sample (VA81) were submitted to oxygen isotopes determinations at CCIM, University of Alberta, using a Cameca IMS 1280 multicollector ion microprobe. A $^{133}\text{Cs}^+$ primary beam was operated with impact energy of 20 keV and beam current of 2.5 – 3.0 nA. The $\sim 12\ \mu\text{m}$ diameter probe was rastered ($20 \times 20\ \mu\text{m}$) for 60 s prior to acquisition, and then $5 \times 5\ \mu\text{m}$ during acquisition, forming rectangular analyzed areas $\sim 15 \times 18\ \mu\text{m}$ across and $\sim 2\ \mu\text{m}$ deep. The normal incidence electron gun was utilized for charge compensation. Negative secondary ions were extracted through 10 kV into the secondary (Transfer) column. Transfer conditions included a $122\ \mu\text{m}$ entrance slit, a $5 \times 5\ \text{mm}$ pre-ESA (field) aperture, and 100x sample magnification at the field aperture, transmitting all regions of the sputtered area. No energy filtering was employed. The mass/charge separated oxygen ions were detected simultaneously in Faraday cups L'2 ($^{16}\text{O}^-$) and H'2 ($^{18}\text{O}^-$) at mass resolutions ($m/\Delta m$ at 10%) of 1975 and 2275, respectively. Secondary ion count rates for $^{16}\text{O}^-$ and $^{18}\text{O}^-$ were typically $\sim 3 \times 10^9$ and 6×10^6 counts/s utilizing $10^{10}\ \Omega$ and $10^{11}\ \Omega$ amplifier circuits, respectively. Faraday cup baselines were measured at the start of the analytical session. A single analysis took 4 minutes, including pre-analysis rastering, automated secondary ion tuning, and 75 s of continuous peak counting.

Instrumental mass fractionation was monitored by repeated analysis of a zircon primary reference material (RM), S0081 (UAMT1) with $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +4.87$ (R. Stern, unpublished data) and a secondary zircon RM, S0022 (TEM2) zircon with $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +8.2\ \text{‰}$ (Black et al., 2004). One analysis of the primary and secondary RM was taken after every 4 and 8 unknowns, respectively. The data set of $^{18}\text{O}^-/^{16}\text{O}^-$ for S0081 zircon (N=60) was processed collectively for the 15 hr analytical session (IP15012), yielding a standard deviation of 0.06 ‰ after correction for minor systematic linear drift (0.2 ‰). The individual spot uncertainties at 95% confidence for $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ reported include errors relating to within-spot counting statistics, between-spot (geometric) effects, and correction for instrumental mass fractionation, and average $\pm 0.16\ \text{‰}$. The secondary RM, S0022 (N=20), processed as an unknown, yielded a mean $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}} = +8.25 \pm 0.03$ (MSWD = 0.85).

4. Petrography of the main rock types

Samples from the silica-saturated unit with (mela)gabbro-(mela)monzogabbro composition often show inequigranular texture with larger Cpx surrounded by small Pl laths, associated with Cpx, biotite (Bt) and opaque minerals (mainly magnetite and ilmenite). Small Kfs sometimes show slightly irregular contacts with the Pl laths. Up to 10 % vol larger olivine (Ol) crystals are identified in these rocks. Medium-grained layered gabbro are composed of anorthositic layers with concentration of Pl laths oriented in the direction of the layering. Kfs are often present in interstices. The anorthositic layers are alternated with layers with Pl crystals associated with mafic minerals such as Cpx and Ol. Bt crystals are sometimes observed in interstices. The medium- to coarse-grained quartz monzogabbro presents up to 50 % vol mafic minerals concentrated in mafic aggregates with Cpx and up to 4% vol of iron-rich Ol separated by regions composed of laths of Pl with up to 5 mm. Kfs crystals, with up to 2 mm, are also observed. The interstices show up to 3% vol of quartz.

The medium-grained monzonite, found locally in the intrusion, presents up to 30% vol of mafic minerals. The thin section shows poikilitic Kfs crystals, with up to 3 mm, involving small Cpx and Pl. The fine- to medium-grained quartz monzogabbro shows up to 40% vol of mafic minerals. The texture are sometimes inequigranular with Pl phenocrysts, with up to 5 mm, with partially corroded rims. The fine-grained matrix is composed of Pl crystals, with small Kfs in interstices, where quartz is also found. Small Cpx frequently show reaction rims formed by green Hb and Bt. Opx (Fe-Enstatite) are found in melagabbro, monzogabbro and quartz monzogabbro samples in reaction rims of iron-rich Ol, with Bt at the border and in symplectitic intergrowths associated with vermicular magnetite and ilmenite crystals.

Basanite dykes present inequigranular texture, with milimetric Cpx and sometimes Ol phenocrysts immersed in a fine-grained matrix composed of Cpx and opaque minerals, including sulfides, associated with albite, locally Kfs and also prehnite and pumpellyite. Kaesurtite crystals are observed in basanite and phonotephrite samples. In phonotephrite, Cpx and Pl aggregates are observed, while kaesurtite is identified in the matrix associated with Pl, Bt and opaque minerals (magnetite and sulfides). Pl and Cpx phenocrysts/xenocrysts occur in trachybasalt and basaltic trachyandesite dykes.

4.1. Mineral zoning

Larger Pl crystals from all gabbroic rocks show frequent oscillatory zoning (Figure 2a-b) and in some cases also concentric extinction. Larger Cpx crystals also show frequent oscillatory zoning (Figure 2c, e). The presence of Cpx crystals with brighter rounded cores is frequent. These cores sometimes show resorption textures and is surrounded by a thick brownish rim with oscillatory zoning and with intergrowth with small Bt grains (Figure 2d-e). Thin greenish rims of larger Cpx are found at the border of brownish rims (Figure 2f). Cpx phenocrysts of alkaline dykes also show both oscillatory zoning and brighter cores with brownish rims as identified in their host rocks.

5. Mineral chemistry

5.1. Major Elements

Feldspars

The composition of Pl from gabbro, layered gabbro and monzogabbro samples including more mafic-rich varieties (with M up to 70%) are in general andesine-labradorite (Figure 3) with variable An content in cores (An_{40-67}) (Table 1), reflecting the crystallization of plagioclase in different moments, while the composition of the rims varies from An_{33} to An_{69} . Fluctuations of An content are also observed along crystals from core to rim as oscillatory zoning. Pl from enclaves enclosed in melamonzogabbro show An_{46-59} , while crystals from a syenitic pocket show An_{53-63} . Fine- to medium-grained and medium- to coarse-grained quartz monzogabbro show Pl crystals with An_{49-59} with rims usually with lower An content (An_{31-54}). Monzonite crystals show An content varying from An_{38} to An_{53} . Pl from phonotephrite dyke are labradorite-bytownite crystals with higher An content (An_{61-79}), while interstitial Pl show lower An (An_{34} and An_{55}). Phenocrysts/xenocrysts from trachybasalt show An content varying from An_{53} to An_{64} , locally with oligoclase at the rim (An_{24}).

Alkali-feldspar shows variable composition but this in part can be a result from exsolution (not observed at the optical microscope). In gabbro, layered gabbro and monzogabbro, the compositions of Kfs are in the range from Or_{49} to Or_{80} (Figure 3, Table 2). Kfs crystals from fine- to medium-grained quartz monzogabbro show higher Or content (Or_{67-75}) relative to those from medium- to coarse-grained quartz monzogabbro (Or_{54-59}). In general, the BaO content of Kfs is highly variable (0.1-2.5 wt%) among the crystals from the gabbroic

samples. Crystals from layered gabbro (VA44RA) show higher BaO (up to 2.5 wt%). Kfs are also found in the matrix of basanite (Or₉₀₋₉₅), phonotephrite (Or₆₄ and Or₉₀) and trachybasalt (Or₅₄), mostly as interstitial crystals with lower BaO (up to 0.7 wt%). The syenitic pocket enclosed in melamonzogabbro shows crystals with Or₄₆₋₆₇, while enclaves show crystals with Or₆₄₋₆₆. Albite is present in the matrix of basanite (Ab₈₇₋₉₈) and phonotephrite (Ab₈₇₋₉₅) and is also identified in monzonite and as interstitial crystals in enclaves enclosed in melamonzogabbro.

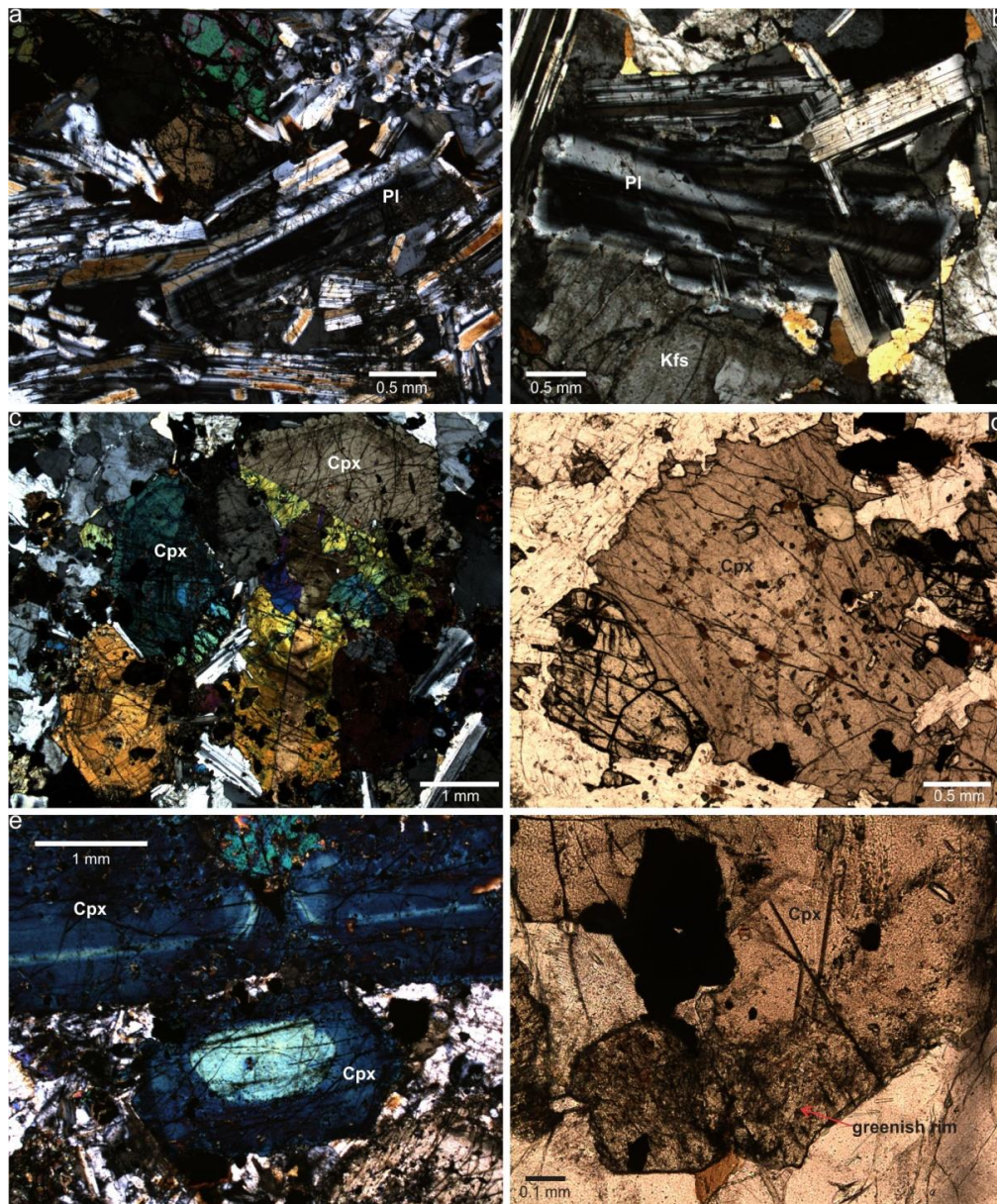


Figure 2. (a) Pl with oscillatory zoning in layered gabbro. (b) Pl with oscillatory zoning in contact with K-feldspar (Kfs) in quartz monzogabbro. (c) Aggregate with concentration of Cpx with oscillatory zoning in quartz monzogabbro. (d) Cpx with brighter core and brownish rim with zones with concentration of Bt in layered gabbro. (e) Larger Cpx with oscillatory zoning and smaller Cpx with brighter core and brownish rim in melamonzogabbro. (f) Greenish reaction rim of Cpx crystal.

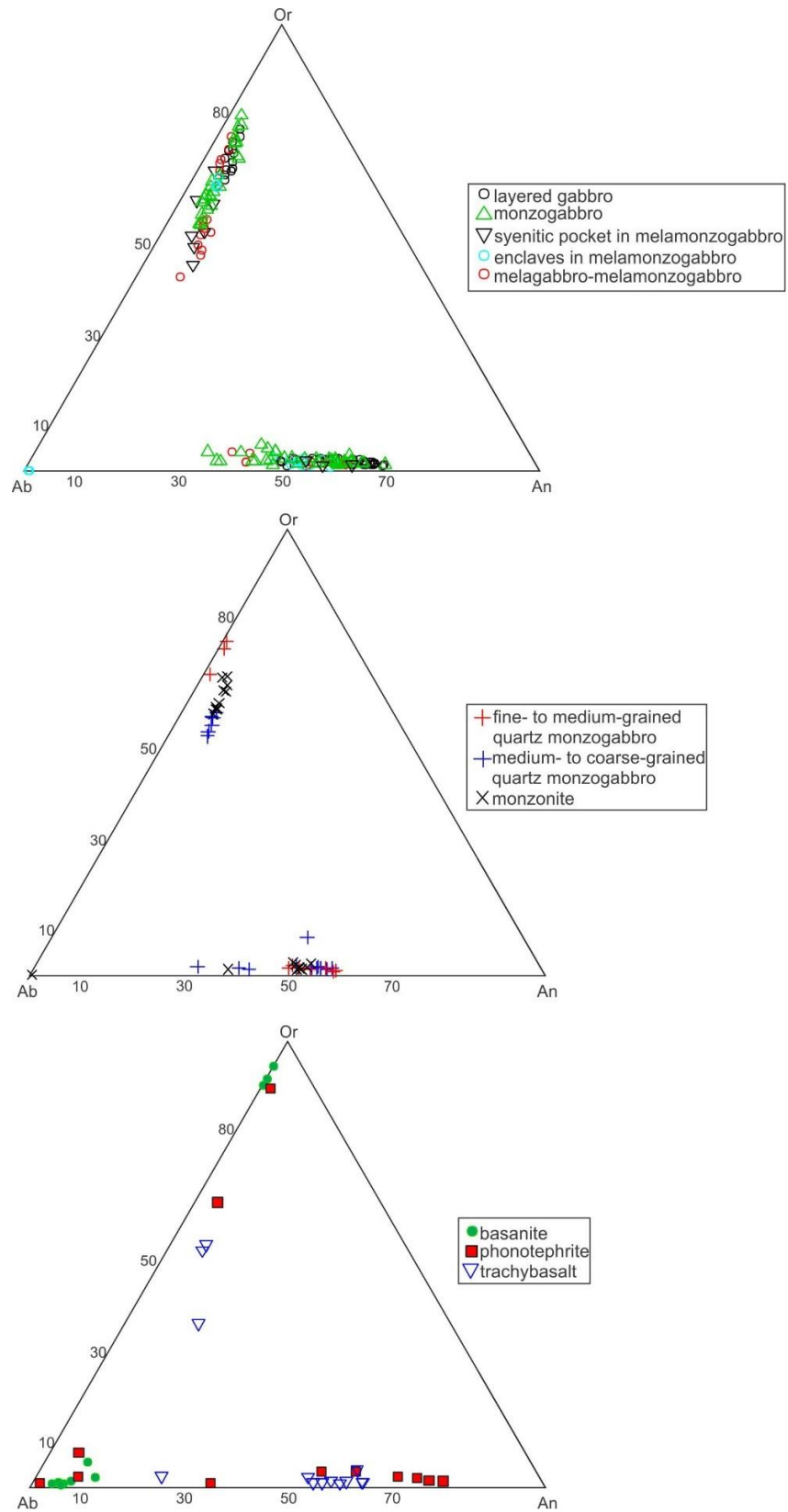


Figure 3. Plagioclase and alkali feldspar from gabbroic rocks and alkaline dykes in the Ab-Or-An component diagram.

Table 1. Representative composition of plagioclase from gabbroic samples and alkaline dykes. Structural formulas are calculated on the basis of 32 oxygens.

Sample	VA43RA	VA46A	VA43RC	VA43xen2	VA44RA	VA44RA	VA71	VA74	VA66A	VA48A	VA48A	VA81	VA41A	VA41A	VA43D1	VA43D5	VA43D5
Lithotype	M-MG	M-G	SY	EC	LG	LG	LG	MG	MG	MON	MON	FQMG	CQMG	CQMG	PT	TB	TB
Location	core	rim	Core	core	core	Rim	core	Core	Rim	Core	rim	core	Core	Rim	core	core	rim
SiO ₂	57.06	58.55	53.88	54.32	51.21	52.13	50.53	51.21	59.16	54.41	54.54	53.91	54.41	53.79	47.00	53.43	62.48
TiO ₂		0.05	0.09	0.05			0.10	0.13	0.03	0.07	0.09	0.09			0.05	0.12	0.07
Al ₂ O ₃	26.76	25.69	28.33	28.35	30.99	29.36	29.99	30.65	24.94	26.84	27.90	28.12	27.65	28.27	32.41	28.72	23.20
FeO	0.57	0.41	0.54	0.45	0.38	0.29	0.41	0.27	0.27	1.22	0.26	0.40	0.32	0.29	0.55	0.57	0.42
Cr ₂ O ₃		0.00	0.00						0.00	0.01	0.01	0.02			0.00	0.01	0.00
MnO	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
NiO		0.00	0.00						0.03	0.01	0.01	0.00			0.00	0.00	0.00
MgO	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	0.04	0.01	0.00	0.77	0.00	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00	0.00
CaO	8.81	7.91	11.15	10.44	13.59	12.20	13.36	12.79	6.84	10.10	10.80	11.00	10.61	11.02	15.82	11.82	5.03
Na ₂ O	6.47	6.57	5.09	5.10	3.62	4.31	3.56	3.68	7.04	5.18	5.35	5.10	5.47	5.03	2.10	4.64	8.40
K ₂ O	0.38	0.75	0.44	0.38	0.25	0.39	0.38	0.29	0.75	0.25	0.26	0.28	0.42	0.30	0.25	0.29	0.46
SrO	0.25	0.35	0.23	0.32	0.32	0.30	0.37	0.32	0.18	0.12	0.15	0.24	0.23	0.24	0.38	0.25	0.09
BaO	0.03	0.02	0.06	0.09	0.03	0.15	0.05	0.09	0.04	0.02	0.00	0.08	0.16	0.10	0.02	0.03	0.03
Total	100.34	100.33	99.83	99.52	100.40	99.15	98.80	99.44	99.30	99.01	99.37	99.22	99.29	99.09	98.59	99.89	100.18
Si	10.255	10.496	9.809	9.885	9.312	9.578	9.352	9.379	10.666	9.968	9.928	9.852	9.942	9.840	8.783	9.724	11.088
Al	5.665	5.424	6.074	6.075	6.637	6.352	6.537	6.611	5.295	5.791	5.981	6.052	5.950	6.090	7.133	6.156	4.848
Ti	0.000	0.006	0.012	0.007	0.000	0.000	0.015	0.018	0.004	0.010	0.012	0.012	0.000	0.000	0.007	0.016	0.009
Fe ₂	0.086	0.061	0.082	0.068	0.058	0.045	0.064	0.041	0.041	0.187	0.040	0.060	0.049	0.045	0.086	0.086	0.063
Mn	0.000	0.005	0.003	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.003	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.002	0.000
Mg	0.003	0.000	0.000	0.008	0.004	0.000	0.011	0.002	0.000	0.210	0.000	0.000	0.002	0.011	0.003	0.000	0.000
Ba	0.002	0.001	0.004	0.006	0.002	0.011	0.004	0.007	0.003	0.001	0.000	0.005	0.011	0.007	0.001	0.002	0.002
Ca	1.696	1.519	2.175	2.035	2.647	2.402	2.649	2.510	1.321	1.983	2.106	2.154	2.077	2.159	3.168	2.305	0.956
Na	2.254	2.284	1.797	1.800	1.276	1.537	1.278	1.307	2.461	1.840	1.888	1.807	1.938	1.785	0.761	1.637	2.890
K	0.086	0.172	0.102	0.088	0.058	0.090	0.090	0.068	0.173	0.058	0.060	0.064	0.099	0.071	0.060	0.068	0.104
Cations	20.047	19.968	20.058	19.972	19.994	20.019	20.000	19.943	19.967	20.050	20.015	20.006	20.069	20.008	20.002	19.996	19.960
Ab	55.8	57.5	44.1	45.9	32.1	38.1	31.8	33.6	62.2	47.4	46.6	44.9	47.1	44.5	19.1	40.8	73.2
An	42.0	38.2	53.4	51.9	66.5	59.6	65.9	64.6	33.4	51.1	51.9	53.5	50.5	53.8	79.4	57.5	24.2
Or	2.1	4.3	2.5	2.2	1.5	2.2	2.2	1.8	4.4	1.5	1.5	1.6	2.4	1.8	1.5	1.7	2.6

M-MG – melamonzogabbro; M-G – melagabbro; SY – syenitic pocket; EC – enclave; MG – monzogabbro; LG – Layered gabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro; PT – phonotephrite; TB – trachybasalt; inter- interstitial.

Table 2. Representative composition of K-feldspar and albite from gabbroic samples and alkaline dykes. Structural formulas are calculated on the basis of 32 oxygens.

Sample	VA43RA	VA43RD	VA43xen2	VA44RA	VA71	VA43RC	VA48A	VA48A	VA81	VA41A	VA67D1	VA43D5	VA48A	VA43xen4	VA43D1
Lithotype	M-MG	M-MG	EC	LG	LG	SY	MON	MON	FQMG	CQMG	BT	TB	MON	EC	PT
Location	core	core	core	core	core	Core	core	rim	Core	Core	Core	Core	core	inter	inter
SiO ₂	63.60	63.96	64.21	62.18	62.01	64.53	63.64	63.27	65.55	63.11	63.68	64.71	67.99	68.02	64.61
TiO ₂		0.06	0.07		0.14	0.13	0.10	0.16	0.00		0.01	0.15	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	19.89	19.09	19.79	20.36	19.55	18.86	19.15	19.65	18.64	20.16	19.12	19.80	19.53	20.10	21.38
FeO	0.56	0.09	0.15	0.12	0.70	0.54	0.21	0.20	0.13	0.31	0.04	0.41	0.19	0.01	0.40
Cr ₂ O ₃		0.01				0.02	0.01	0.00	0.00		0.00	0.00	0.02		0.00
MnO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02
NiO		0.00				0.01	0.00	0.02	0.00		0.00	0.01	0.00		0.00
MgO	0.00	0.01	0.00	0.01	0.30	0.12	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.00	0.02
CaO	1.32	0.50	1.00	1.22	0.85	0.57	1.10	1.20	0.12	1.42	0.00	1.33	0.04	0.16	1.60
Na ₂ O	4.13	2.41	3.49	2.69	2.26	3.96	3.17	3.27	2.60	4.19	0.58	4.17	11.40	11.36	10.00
K ₂ O	9.40	12.31	11.05	10.85	12.42	10.02	10.75	10.44	12.24	9.17	15.71	9.00	0.03	0.02	0.43
SrO	0.09	0.25	0.28	0.23	0.33	0.12	0.19	0.22	0.12	0.12	0.10	0.16	0.00	0.08	0.22
BaO	0.93	0.56	0.41	2.49	0.91	0.34	0.32	1.00	0.32	1.47	0.11	0.38	0.00	0.00	0.05
Total	99.91	99.25	100.45	100.14	99.49	99.23	98.69	99.45	99.73	99.94	99.35	100.13	99.33	99.76	98.73
Si	11.652	11.834	11.709	11.540	11.575	11.846	11.779	11.679	11.998	11.593	11.854	11.734	11.955	11.904	11.535
Al	4.291	4.159	4.250	4.450	4.298	4.077	4.174	4.271	4.018	4.361	4.192	4.228	4.044	4.143	4.495
Ti	0.000	0.008	0.010	0.000	0.020	0.018	0.014	0.022	0.000	0.000	0.001	0.021	0.000	0.000	0.000
Fe ₂	0.086	0.014	0.023	0.018	0.109	0.083	0.033	0.031	0.020	0.048	0.006	0.063	0.028	0.001	0.060
Mn	0.000	0.000	0.000	0.001	0.004	0.002	0.002	0.003	0.001	0.000	0.000	0.002	0.003	0.001	0.003
Mg	0.000	0.003	0.000	0.003	0.083	0.033	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.029	0.001	0.005
Ba	0.067	0.041	0.029	0.181	0.066	0.024	0.023	0.072	0.023	0.106	0.008	0.027	0.000	0.000	0.003
Ca	0.258	0.099	0.195	0.242	0.169	0.112	0.218	0.237	0.024	0.279	0.000	0.259	0.008	0.031	0.306
Na	1.468	0.865	1.234	0.970	0.818	1.410	1.138	1.170	0.923	1.493	0.209	1.466	3.887	3.855	3.462
K	2.196	2.906	2.571	2.569	2.958	2.347	2.538	2.458	2.858	2.148	3.731	2.082	0.007	0.005	0.098
Cations	20.018	19.929	20.021	19.974	20.100	19.952	19.930	19.943	19.865	20.028	20.001	19.882	19.961	19.941	19.967
Ab	37.4	22.4	30.9	25.7	20.7	36.4	29.2	30.3	24.3	38.1	5.3	38.5	99.6	99.1	89.5
An	6.6	2.6	4.9	6.4	4.3	2.9	5.6	6.1	0.6	7.1	0.0	6.8	0.2	0.8	7.9
Or	56.0	75.1	64.3	67.9	75.0	60.7	65.2	63.6	75.1	54.8	94.7	54.7	0.2	0.1	2.5

M-MG – melamonzogabbro; M-G – melagabbro; SY – syenitic pocket; EC – enclave; MG – monzogabbro; LG – Layered gabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro; PT – phonotephrite; TB – trachybasalt; inter- interstitial.

Olivine

Olivine crystals show variable composition between rock types (Table 3). Among gabbroic rocks higher Mg# ($100 \cdot \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$) values are found in crystals from a melamonzogabbro sample (VA43RA) (82). However, another sample from the same outcrop (VA43RD) shows Olivine with lower Mg# (57-59). Small Olivine crystals from enclaves enclosed in melamonzogabbro also show lower Mg# (56-57). The typical composition of Olivine is enriched in Fe in the other samples, like melagabbro (Mg# 59 and 61), monzogabbro (Mg# 46-60) and quartz monzogabbro Mg# (42-44), in the latter iron-rich Olivine coexist with quartz. Olivine from layered gabbro show different Mg# among the samples, with VA71 sample showing crystals with higher Mg# (58-61) relative to those analyzed in VA44RA (43-51). Olivine phenocrysts from basanite dyke show higher Mg# (86). A negative correlation between MnO content of Olivine crystals and Mg# is well defined (Figure 4).

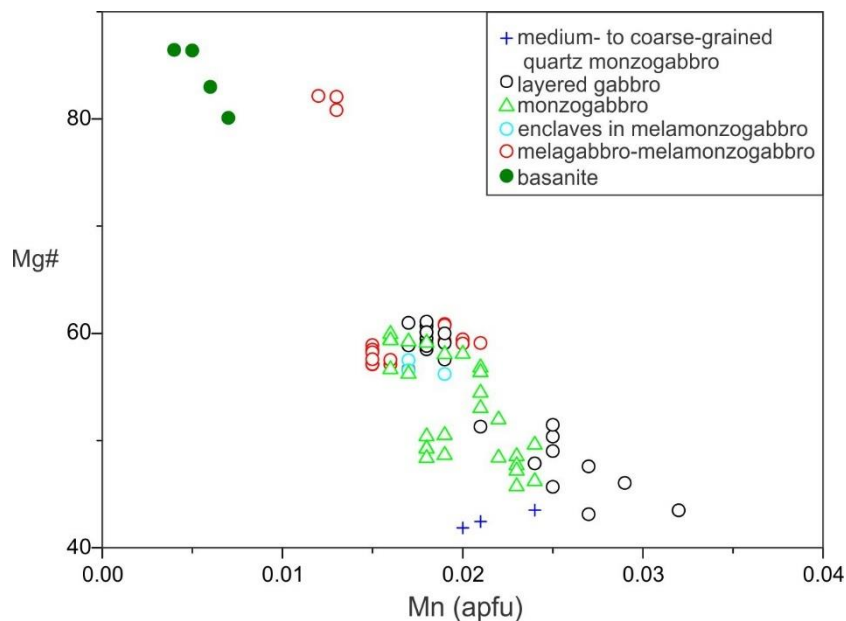


Figure 4. Correlation between Mn content (apfu) and Mg# of Olivine crystals from gabbroic samples and basanite dyke.

Table 3. Representative composition of olivine from gabbroic samples and basanite dyke. Structural formulas are calculated on the basis of 4 oxygens and 3 cations.

Sample	VA43RA	VA43RD4	VA43xen2	VA44RA	VA71	VA60	VA73	VA41A	VA41D2	VA41D2
Lithotype	M-MG	M-MG	EC	LG	LG	MG	MG	CQMG	BT	BT
Location	core	core	core	core	Core	core		core		
SiO ₂	39.68	35.99	35.34	33.24	35.95	34.73	36.23	33.89	39.74	40.43
TiO ₂	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.03	0.01	0.02	0.01	0.02
Al ₂ O ₃	0.01	0.01	0.03	0.00	0.03	0.03	0.02	0.00	0.04	0.06
FeO	16.91	36.87	36.37	44.57	34.10	42.18	35.19	46.83	15.90	12.91
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.04	0.05
MnO	0.60	0.67	0.73	1.16	0.79	0.76	0.76	0.84	0.27	0.23
NiO	0.04	0.07	0.03	0.06	0.08	0.05	0.04	0.05	0.24	0.27
MgO	43.38	27.54	27.62	21.32	29.54	22.98	28.54	19.37	43.47	45.94
CaO	0.10	0.08	0.06	0.12	0.10	0.07	0.11	0.04	0.44	0.45
Na ₂ O	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03	0.03
K ₂ O		0.00	0.02		0.01	0.01	0.00		0.00	0.01
SrO		0.01				0.01	0.00		0.00	0.00
BaO		0.00				0.00	0.00		0.01	0.00
Total	100.73	101.29	100.20	100.52	100.61	100.88	100.92	101.08	100.19	100.40
Si	0.999	0.995	0.988	0.972	0.989	0.993	0.997	0.992	1.002	1.003
Al	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.002
Ti	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ₂	0.356	0.853	0.851	1.090	0.785	1.009	0.810	1.146	0.335	0.268
Mn	0.013	0.016	0.017	0.029	0.018	0.018	0.018	0.021	0.006	0.005
Mg	1.628	1.135	1.151	0.930	1.212	0.980	1.171	0.845	1.634	1.699
Ca	0.003	0.002	0.002	0.004	0.003	0.002	0.003	0.001	0.012	0.012
Na	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.005	0.005
Cations	3.000	3.005	3.012	3.028	3.011	3.006	3.002	3.007	2.996	2.995
Fe#	17.94	42.91	42.51	53.96	39.31	50.73	40.89	57.56	17.01	13.62
Mg#	82.06	57.09	57.49	46.04	60.69	49.27	59.11	42.44	82.99	86.38
Mg#liq.	58.64	29.20	29.54	20.92	32.37	23.14	30.95	18.60	60.20	66.29

M-MG – melamonzogabbro; EC – enclave; MG – monzogabbro; LG – Layered gabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; BT – basanite.

Pyroxene

Opx (Fe-Enstatite) associated with magnetite in symplectitic intergrowths and reaction rims of Ol, already described in Almeida et al. (unpublished), show a Mg# ranging from 49 to 69 with up to 0.5 wt% TiO₂ (Figure 5b, Table 4). Opx with lower Mg# are found in more evolved samples (quartz monzogabbro) (Figure 5b, Table 4). The composition of Cpx from the gabbroic samples show a Fe-enrichment trend (Figure 5a, Table 5) from crystals with higher Mg# (augite-diopside, 79-94) and CaO content from melamonzogabbro-melagabbro to crystals with lower Mg# (56-77) from medium- to coarse-grained quartz monzogabbro, that also locally show pigeonite (Mg# 55, 1.9 wt% TiO₂) (Figure 5a). Cpx crystals from a syenitic pocket enclosed in melamonzogabbro in general show higher Mg# (83-91). Cpx from layered gabbro show variable Mg# (71-85); such great variation is also observed in monzogabbro (Mg# 63-94) and monzonite crystals (Mg# 61-79). The prominent zoning usually observed in large Cpx crystals from melagabbro-melamonzogabbro, monzogabbro and layered gabbro

(figures 6a-f, 7a-d, 8a-b, 9a) is defined by irregular zones at the cores with higher Mg# and lower TiO₂ mantled by thick brownish rims with oscillatory zoning and lower Mg# and higher TiO₂. This is exemplified by sample VA46A, with cores: Mg#= 85-92, TiO₂= 0.5-1.0, versus rims: Mg#= 77-83, TiO₂ up to 1.7 wt%. Diopside phenocrysts from basanite dykes also show cores with higher Mg# (91, figures 5c, 9c) and rims with lower Mg# (86, Figure 9c) and higher concentration of TiO₂ (3 wt%). Oscillatory zoning is identified in some phenocrysts (Figure 9b). Cpx phenocrysts from trachybasalt dykes show Mg# from 83 to 92 and also cores with higher Mg# (figures 5c, 9d).

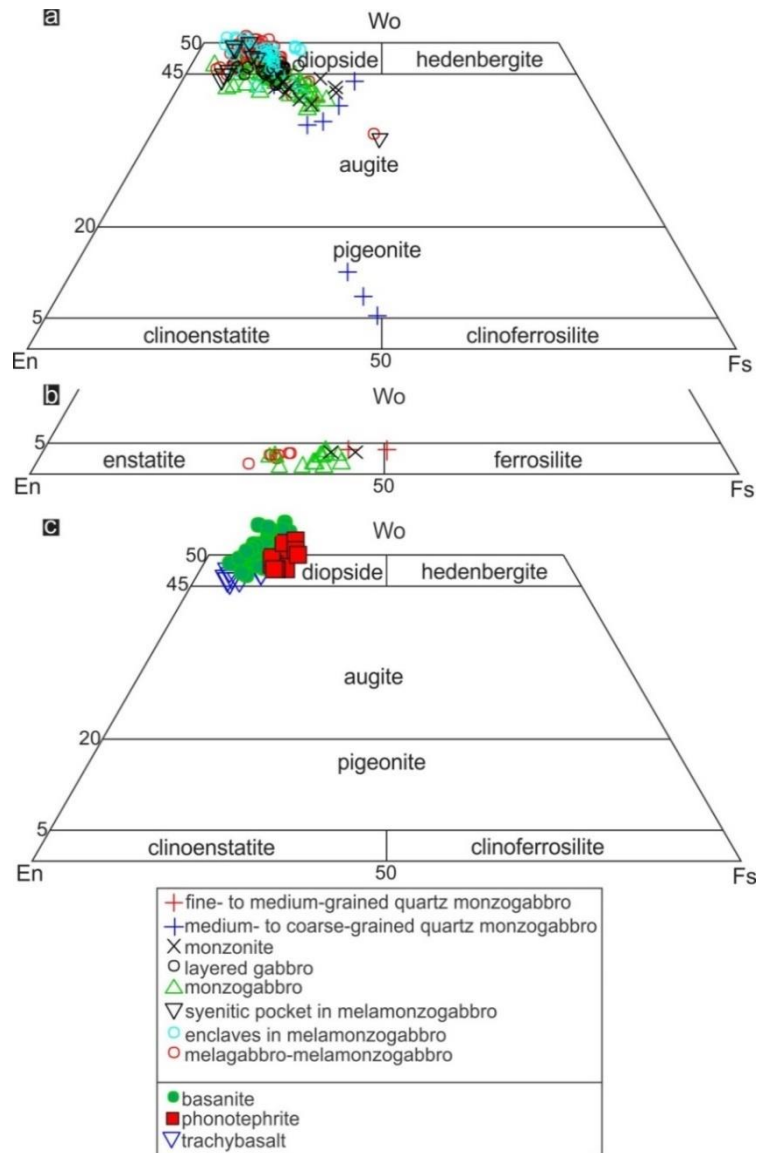


Figure 5. (a) Composition of clinopyroxene from gabbroic samples in En-Wo-Fs diagram of Morimoto (1988). (b) Composition of orthopyroxene from gabbroic samples. (c) Composition of clinopyroxene from alkaline dykes.

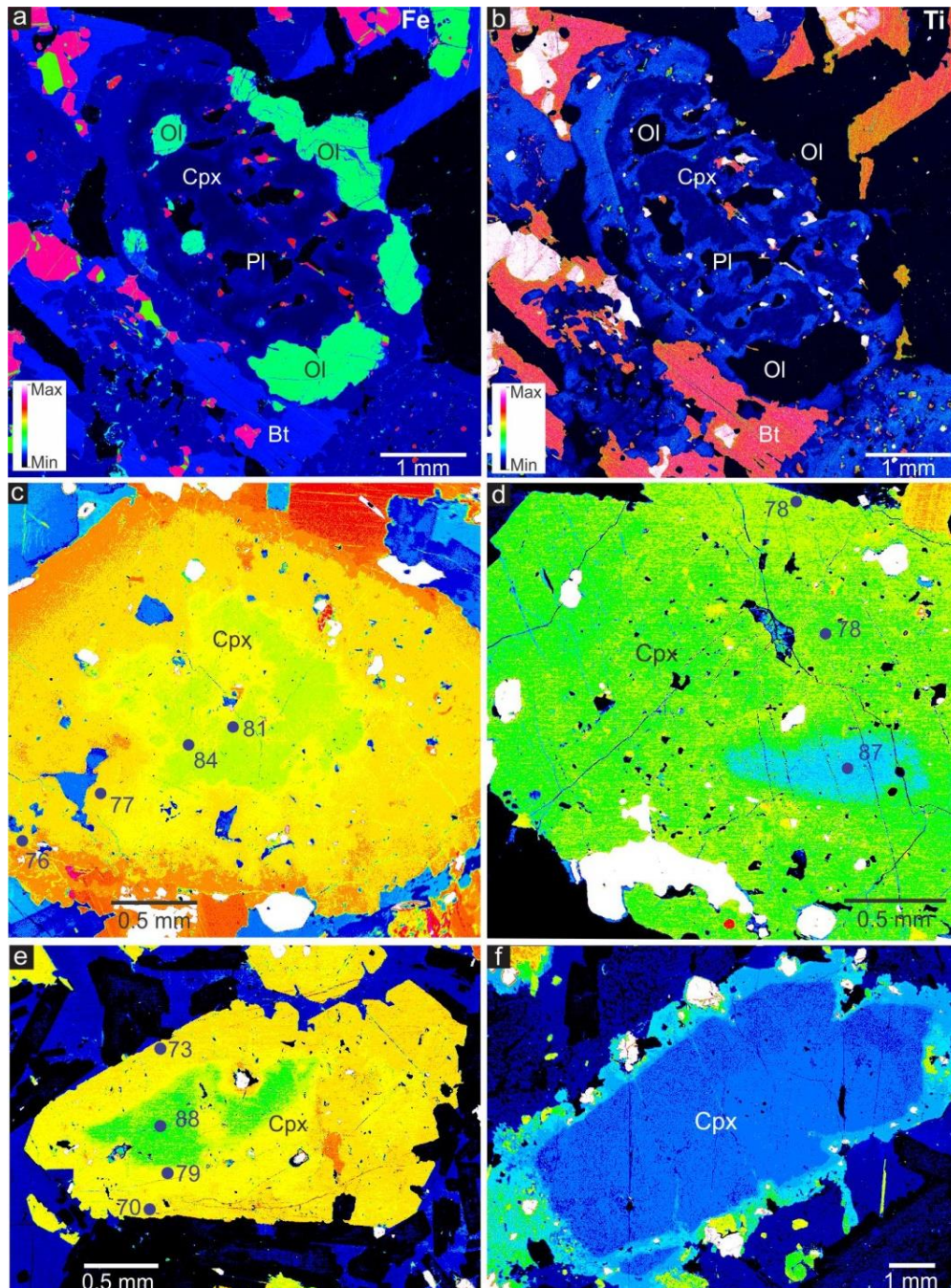


Figure 6. (a) Fe and (b) Ti X-ray compositional maps showing the chemical zoning of a clinopyroxene crystal from a melagabbro (VA46A). False-color BSE images of clinopyroxene crystals from (c, d) monzogabbro (VA74), (e) melamonzogabbro showing resorbed cores and (f) medium- to coarse-grained quartz monzogabbro (VA41A), showing inclusion-rich overgrowth. Numbers in blue are the Mg# from microprobe analyses.

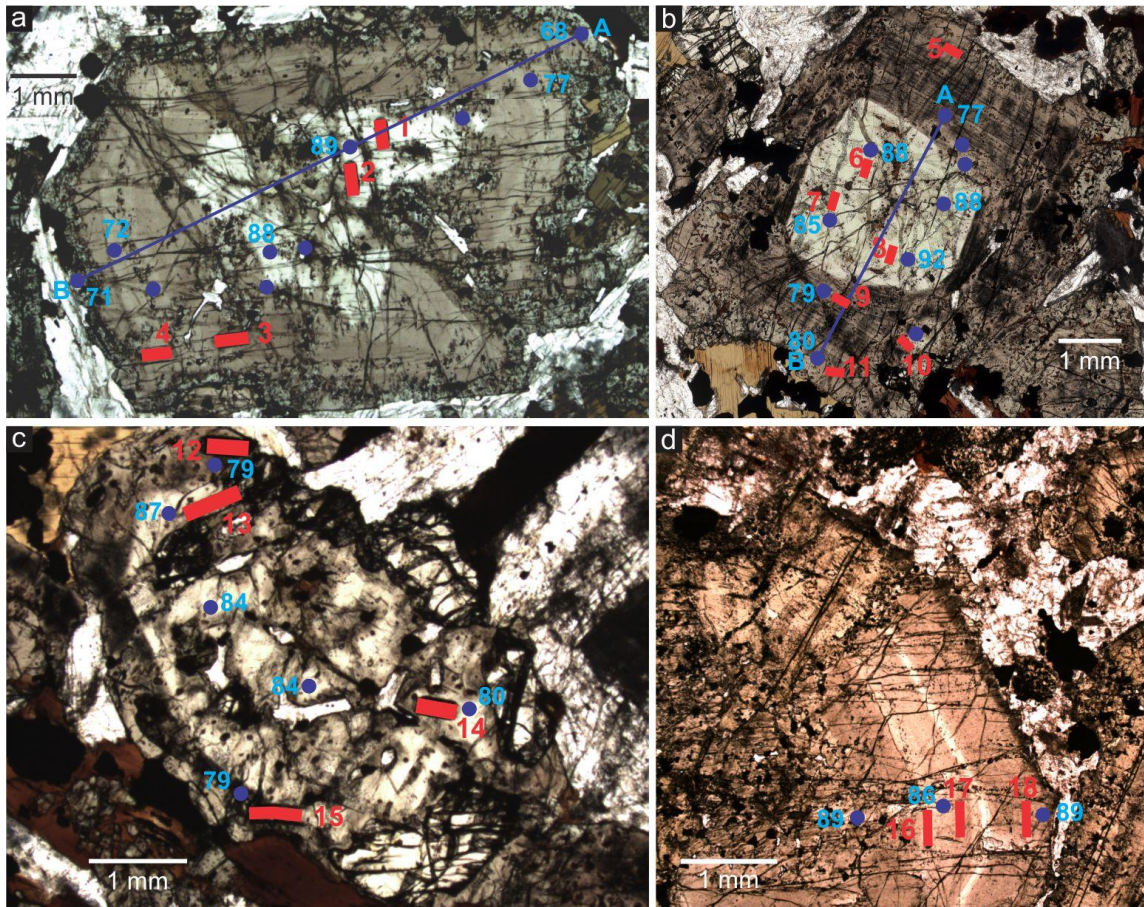


Figure 7. Clinopyroxene crystals of melagabbro-melamonzogabbro samples with resorbed cores (a, b, c) and oscillatory rims (a, b, d) with indication of Mg# values from electron microprobe analyses (blue) and location of rasters for Sr isotope analyses (red).

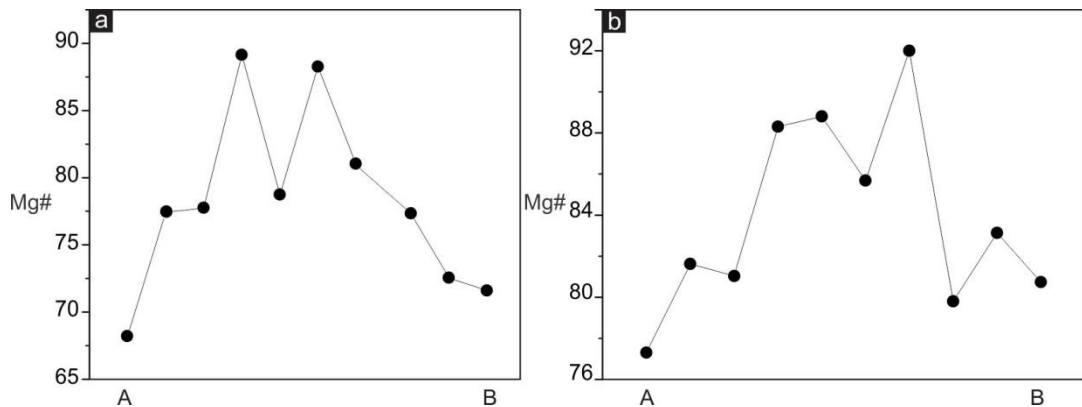


Figure 8. Mg# variation from rim to rim of clinopyroxene crystals from (a) figure 7a and (b) figure 7b.

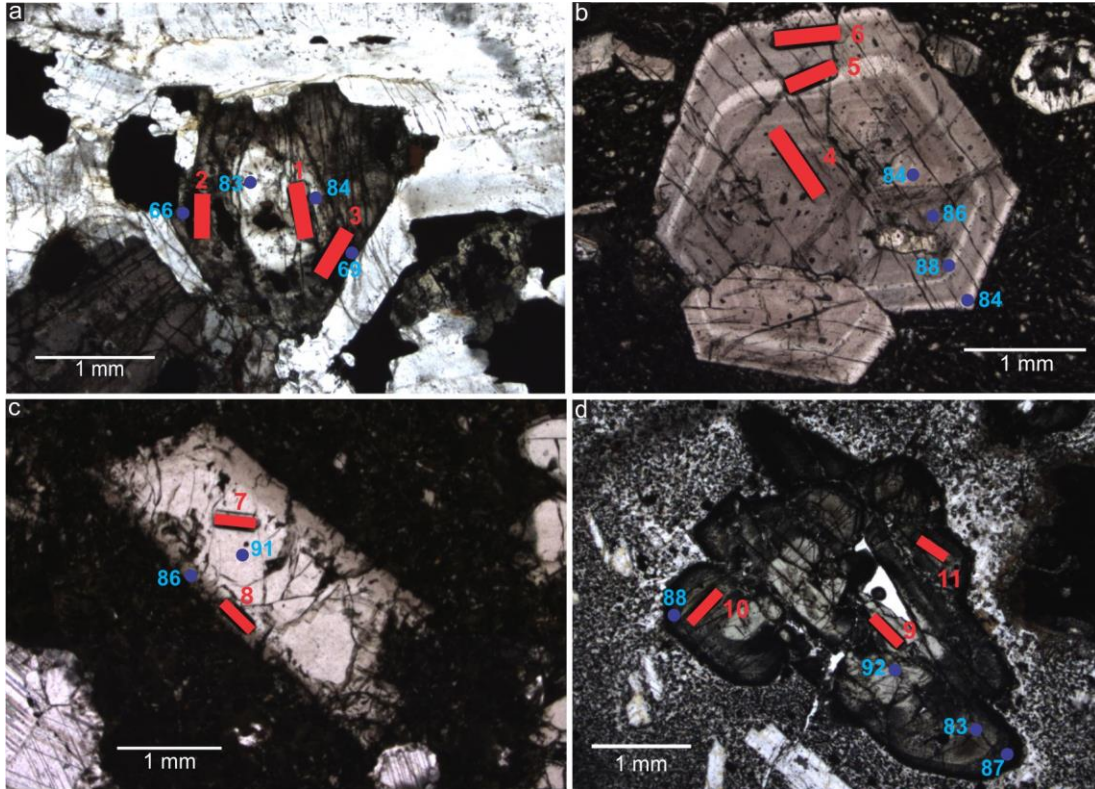


Figure 9. Clinopyroxene crystals from (a) monzogabbro, (b, c) basanite dyke and (d) trachybasalt dyke with Mg# values from microprobe analyses (in blue) and the position of rasters for Sr isotope analyses (in red).

Biotite and amphibole

Bt crystals from gabbroic samples show Mg# ranging from 48 to 69 (Table 6, Figure 10a). Higher Mg# are found in crystals from layered gabbro (55-69) and melagabbro (63-65). Typical TiO₂ content is between 5 and 8 wt%, with higher contents in crystals from melagabbro (up to 8.3 wt%) and layered gabbro (up to 8.7 wt%) relative to those found in monzonite (4.7-5.5 wt%). Bt from basanite dykes show Mg# range from 55 to 66 with TiO₂ contents from 5.2 to 6.5 wt%. Calcic amphibole crystals ((Ca + Na)_B ≥ 1.0) identified in the matrix of phonotephrite and basanite dykes are essentially kaesurtite and ferrokaesurtite crystals (Ca_B ≥ 1.50; (Na+K)_A ≥ 0.50; Ti ≥ 0.50) with up to 7 wt% TiO₂ (Table 6, Figure 10b); crystals in basanite dykes are locally ferropargasite (Ti < 0.50, Figure 10c).

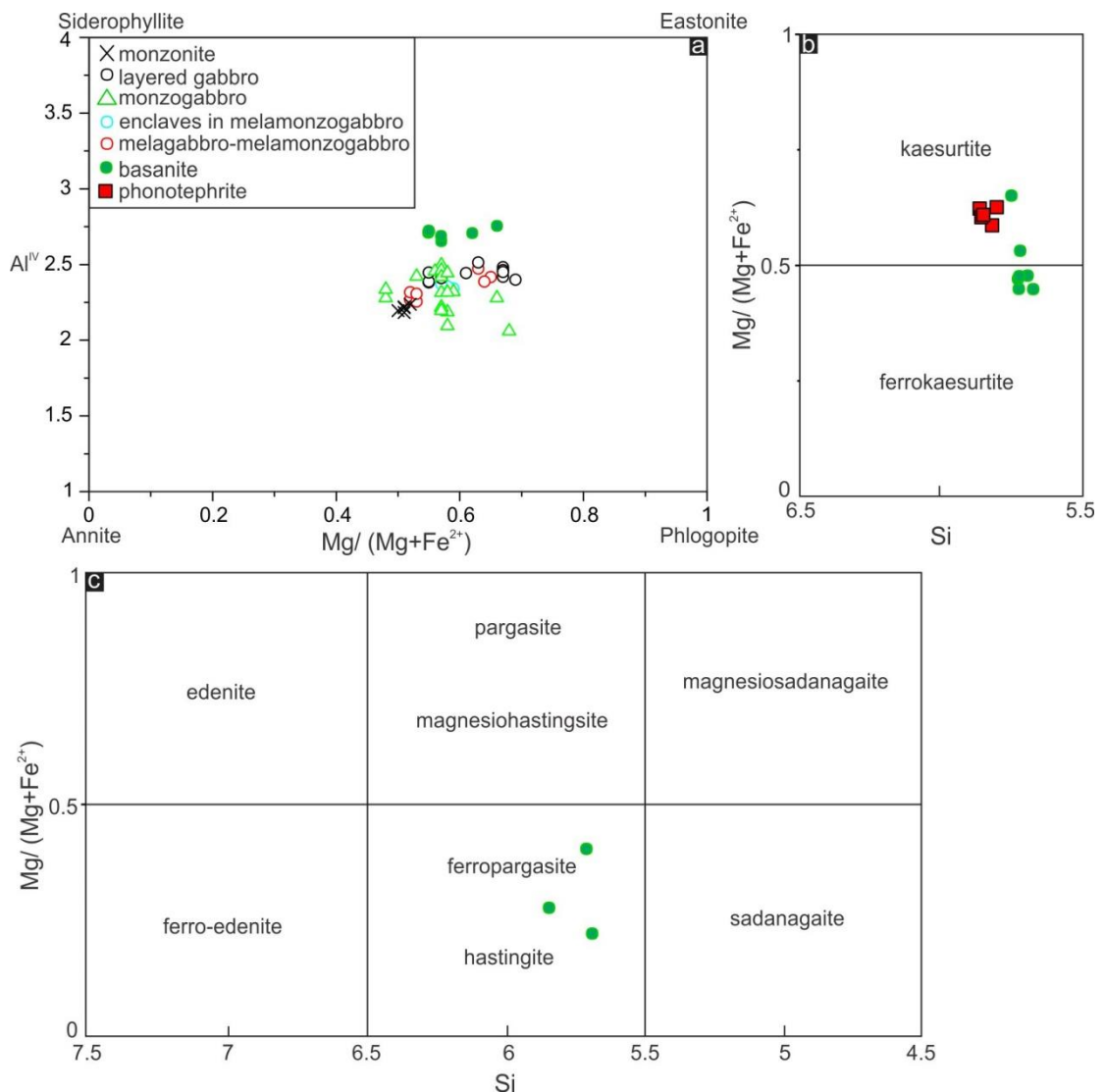


Figure 10. (a) Composition of biotite crystals from gabbroic samples relative to Mg# and Al content. (b) Composition of calcic amphibole ($(Ca_B \geq 1.50; (Na+K)_A \geq 0.50; Ti \geq 0.50)$) from alkaline dykes according to the nomenclature of Leake (1997). (c) Composition of calcic amphibole from basanite with $Ti < 0.50$.

5.2. Fe-Ti oxides and estimates of temperature and oxygen fugacity

Temperature and oxygen fugacity (fO_2) estimates for the studied rocks were obtained through ilmenite and magnetite pairs (Figure 11, Table 7) using the equations of Spencer and Lindsley (1981) in ILMAT spreadsheet (Lepage, 2003). Molecular fractions were calculated using the method of Carmichael (1967). The TiO_2 and MgO contents of magnetite and ilmenite are variable depending on the rock type. Ilmenite from the studied syenitic pocket (VA43RC) enclosed in melamonzogabbro show the highest MgO content (12 wt%); the magnetite from the same sample also show the highest proportion of ulvospinel (67%). The temperature estimate from this sample yielded higher values (1208 and 1407 °C) with fO_2

from 10^{-8} to 10^{-5} bar. Lower temperatures in the range from 573 to 742 °C were obtained for the other samples of melamonzogabbro (VA43RD), monzogabbro (VA60, VA74), monzonite (VA48A), layered gabbro (VA71) and fine- to medium-grained quartz monzogabbro (VA81) with f_{O_2} from 10^{-21} bar to 10^{-16} bar. These temperatures estimates show clear evidence for re-equilibration. Magnetite from melamonzogabbro show variable proportion of ulvospinel (1.8% and 26.3%). In this case the temperature estimate obtained to lower-TiO₂ magnetite is lower (573 °C). In general, the oxygen fugacity estimates are aligned along the QFM buffer (Figure 12) that is common for mafic rocks (Haggerty, 1976).

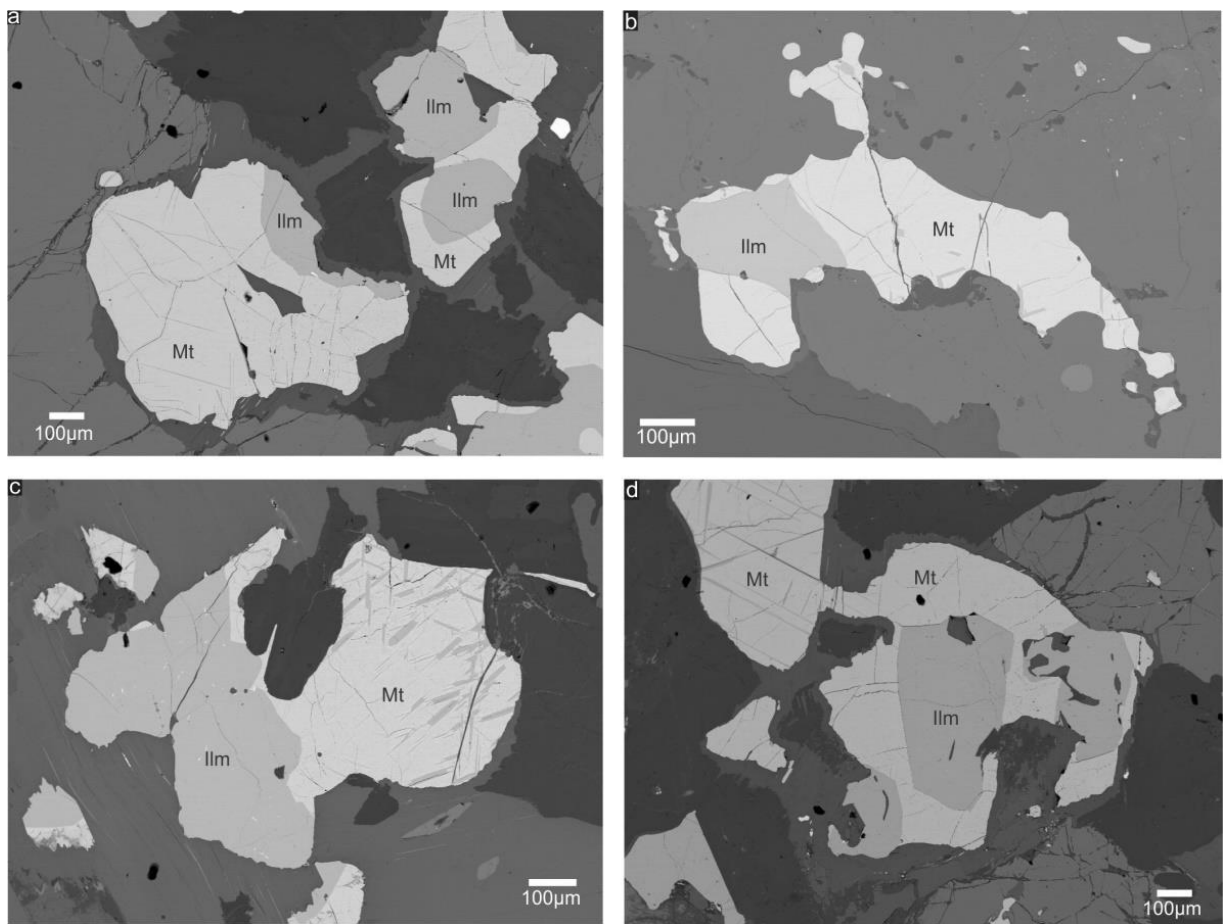


Figure 11. BSE images of Mt and Ilm grains of José Fernandes Gabbro samples.

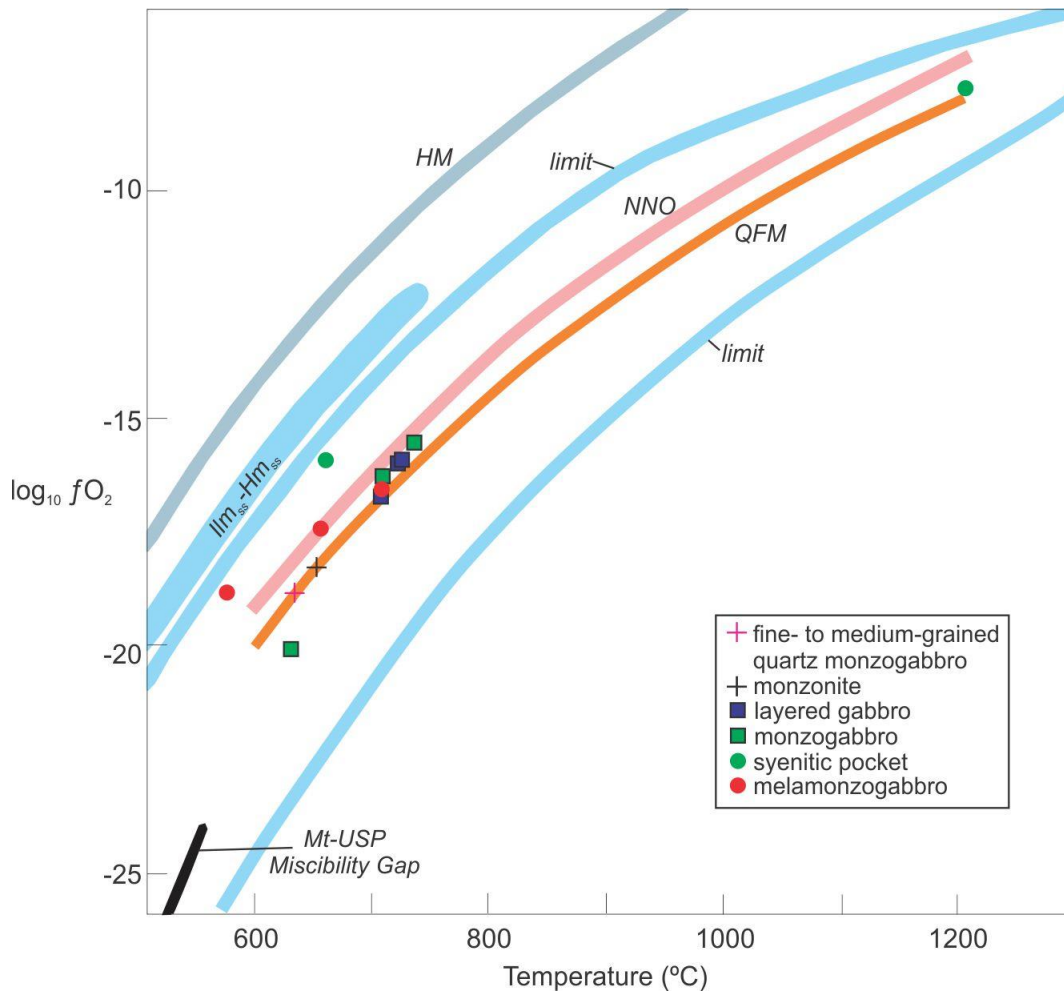


Figure 12. Oxygen fugacity estimates for gabbroic rocks obtained using the equations of Spencer and Lindsley (1981) for magnetite-ilmenite pairs from gabbroic rocks.

Table 4. Representative composition of orthopyroxene from José Fernandes Gabbro. Structural formulas are calculated on the basis of 6 oxygens and 4 cations.

Sample	VA81	VA60	VA48A	VA43RD	VA73	VA66A
Lithotype	FQMG	MG	MON	M-MG	MG	MG
SiO ₂	51.02	51.75	51.18	53.38	52.58	52.59
TiO ₂	0.49	0.22	0.37	0.21	0.28	0.00
Al ₂ O ₃	1.05	0.75	0.76	0.83	0.83	0.48
Cr ₂ O ₃	0.00	0.02	0.03	0.01	0.00	0.01
FeO	27.72	26.20	28.32	20.42	22.98	24.58
MnO	0.88	0.67	0.94	0.58	0.67	0.78
NiO	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.01
MgO	17.95	19.47	17.69	24.10	22.19	21.20
CaO	1.90	1.53	1.69	0.89	1.43	0.57
Na ₂ O	0.05	0.02	0.04	0.05	0.08	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00
Total	101.00	100.60	101.02	100.52	101.09	100.23
Si	1.935	1.953	1.947	1.957	1.941	1.973
Al	0.047	0.034	0.034	0.036	0.036	0.021
Fe ³⁺	0.018	0.014	0.018	0.008	0.023	0.006
Total (T)	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
Al	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.040	0.035	0.034	0.035	0.049	0.028
Ti	0.014	0.006	0.011	0.006	0.008	0.000
Cr	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000
Mg	0.946	0.958	0.955	0.958	0.942	0.972
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total (M1)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Mg	0.069	0.138	0.049	0.359	0.279	0.214
Fe ²⁺	0.822	0.778	0.849	0.583	0.637	0.737
Mn	0.028	0.021	0.030	0.018	0.021	0.025
Ca	0.077	0.062	0.069	0.035	0.057	0.023
Na	0.004	0.001	0.003	0.004	0.005	0.001
K	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Total (M2)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Wo	4.03	3.20	3.59	1.82	2.95	1.18
En	53.02	56.60	52.22	68.04	63.77	60.93
Fs	42.95	40.20	44.19	30.14	33.28	37.89
Mg#	55.25	58.47	54.17	69.30	65.71	61.66

MG – monzogabbro; LG – Layered gabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro.

Table 5. Representative composition of clinopyroxene from gabbroic samples and alkaline dykes. Structural formulas are calculated on the basis of 6 oxygens and 4 cations.

Sample	VA46A	VA46A	VA46A	VA43RD	VA43RD	VA43xen2	VA43RC	VA44RA	VA44RA	VA60	VA60	VA48A	VA48A	VA41A	VA41A	VA41A	VA81
Lithotype	M-G	M-G	M-G	M-MG	M-MG	EC	SY	LG	LG	MG	MG	MON	MON	CQMG	CQMG	CQMG	FQMG
Location	core	core	Rim	core	rim	Core	core	Core	rim	core	rim	core	Rim	core	core	rim	core
SiO ₂	50.90	51.93	49.73	52.25	52.27	52.20	48.64	52.47	51.28	50.34	51.42	50.40	50.73	50.30	51.24	51.00	51.17
TiO ₂	1.04	0.51	1.44	0.65	0.25	0.18	1.63	0.52	1.05	1.37	0.58	1.28	0.85	1.90	0.80	0.32	0.62
Al ₂ O ₃	3.95	2.88	4.10	2.20	0.84	3.16	4.63	2.30	2.75	3.40	1.96	2.67	1.93	0.77	1.70	0.67	1.53
Cr ₂ O ₃	0.57	1.19	0.04	0.27	0.00	0.00	0.23	0.96	0.00	0.22	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
FeO	6.13	4.45	8.34	5.44	11.74	4.20	7.05	6.17	9.83	7.15	11.92	10.03	12.28	25.30	14.77	27.47	13.93
MnO	0.17	0.12	0.23	0.15	0.35	0.16	0.27	0.17	0.34	0.20	0.37	0.30	0.50	0.75	0.51	0.77	0.53
NiO	0.03	0.05	0.00	0.03	0.01	0.00	0.02	0.12	0.00	0.02	0.01	0.03	0.00	0.14	0.00	0.01	0.00
MgO	15.13	16.82	13.87	16.55	13.16	15.73	14.53	15.78	12.98	14.74	13.74	14.51	13.71	16.42	13.43	16.33	13.02
CaO	21.53	21.63	21.61	22.00	20.87	24.75	21.65	22.05	21.71	21.85	19.36	19.82	18.83	5.89	17.49	4.03	18.97
Na ₂ O	0.54	0.45	0.48	0.27	0.26	0.03	0.70	0.33	0.38	0.33	0.27	0.35	0.36	0.14	0.23	0.04	0.30
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Total	100.00	100.04	99.84	99.82	99.75	100.40	99.34	100.86	100.33	99.62	99.68	99.43	99.19	101.62	100.16	100.63	100.08
Si (T)	1.872	1.895	1.849	1.917	1.971	1.903	1.804	1.917	1.914	1.869	1.936	1.889	1.921	1.905	1.937	1.954	1.933
Al (T)	0.128	0.105	0.152	0.083	0.029	0.097	0.196	0.084	0.086	0.131	0.064	0.112	0.079	0.034	0.064	0.030	0.067
Fe ³⁺ (T)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.056	0.000	0.016	0.000
Al (M1)	0.043	0.018	0.028	0.012	0.009	0.039	0.007	0.016	0.035	0.018	0.023	0.006	0.007	0.000	0.012	0.000	0.002
Fe ³⁺ (M1)	0.050	0.056	0.076	0.047	0.026	0.050	0.140	0.035	0.020	0.054	0.028	0.057	0.051	0.000	0.023	0.030	0.052
Ti (M1)	0.029	0.014	0.040	0.018	0.007	0.005	0.045	0.014	0.030	0.038	0.016	0.036	0.024	0.054	0.023	0.009	0.018
Cr (M1)	0.017	0.034	0.001	0.008	0.000	0.000	0.007	0.028	0.000	0.006	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni (M1)	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000
Mg (M1)	0.830	0.875	0.769	0.905	0.740	0.855	0.801	0.859	0.722	0.816	0.771	0.811	0.774	0.927	0.757	0.933	0.733
Fe ²⁺ (M1)	0.031	0.000	0.086	0.010	0.218	0.052	0.000	0.045	0.194	0.067	0.161	0.088	0.144	0.014	0.186	0.028	0.195
Mn (M1)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg (M2)	0.000	0.039	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺ (M2)	0.107	0.080	0.098	0.111	0.126	0.027	0.078	0.109	0.094	0.101	0.187	0.169	0.194	0.731	0.258	0.807	0.193
Mn (M2)	0.005	0.004	0.007	0.005	0.011	0.005	0.009	0.005	0.011	0.006	0.012	0.010	0.016	0.024	0.016	0.025	0.017
Ca (M2)	0.848	0.846	0.861	0.865	0.843	0.967	0.860	0.863	0.868	0.869	0.781	0.796	0.764	0.239	0.708	0.165	0.768
Na (M2)	0.039	0.032	0.035	0.019	0.019	0.002	0.050	0.023	0.027	0.024	0.020	0.026	0.027	0.010	0.017	0.003	0.022
K (M2)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Total	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Wo	46.7	45.96	47.48	45.75	43.75	50.89	49.38	46	46.23	46.9	41.11	42.7	40.72	12.51	37.1	8.55	40.65
En	45.66	49.72	42.4	47.88	38.39	45	46.11	45.81	38.46	44.02	40.59	43.5	41.26	48.51	39.64	48.26	38.82
Fs	7.63	4.32	10.12	6.37	17.86	4.12	4.5	8.18	15.3	9.08	18.3	13.8	18.02	38.99	23.26	43.19	20.53
Q	95.9	96.66	96.31	98.02	98.06	99.81	94.57	97.6	97.16	97.51	97.97	97.32	97.23	98.97	98.23	99.72	97.75
Jd	1.9	0.83	1	0.41	0.48	0.08	0.24	0.74	1.82	0.62	0.92	0.27	0.32	0	0.62	0	0.07
Ae	2.2	2.52	2.69	1.57	1.46	0.11	5.19	1.66	1.02	1.87	1.11	2.41	2.45	1.03	1.15	0.28	2.19
Mg#	85.68	92.00	80.74	88.26	68.24	91.62	91.11	84.85	71.53	82.91	68.92	75.92	69.60	55.44	63.02	52.77	65.41

M-MG – melamonzogabbro; M-G – melagabbro; SY – syenitic pocket; EC – enclave; MG – monzogabbro; LG – Layered gabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro.

Table 5. (continued)

Sample	VA43D5	VA43D5	VA43D1	VA43D1	VA67D1	VA67D1	VA41D2	VA41D2
Lithotype	TB	TB	PT	PT	BT	BT	BT	BT
Location	Rim	core	core	Core	Core	rim	int	Rim
SiO ₂	50.15	50.43	49.24	46.97	50.66	45.16	48.15	50.54
TiO ₂	1.39	1.04	1.60	2.41	1.05	3.09	2.13	1.33
Al ₂ O ₃	2.89	3.32	4.37	6.26	4.66	7.97	5.34	3.09
Cr ₂ O ₃	0.14	0.07	0.02	0.00	0.63	0.06	0.31	0.02
FeO	8.41	6.85	7.60	8.07	5.56	8.04	7.15	6.36
MnO	0.54	0.48	0.22	0.21	0.08	0.15	0.13	0.10
NiO	0.01	0.01	0.01	0.02	0.08	0.00	0.05	0.02
MgO	15.33	15.59	13.42	12.37	15.26	12.19	13.34	15.00
CaO	20.61	21.26	22.00	22.06	22.72	23.52	22.76	23.01
Na ₂ O	0.73	0.72	0.38	0.46	0.52	0.31	0.41	0.26
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.21	99.78	98.86	98.82	101.20	100.49	99.76	99.73
Si (T)	1.848	1.855	1.850	1.772	1.837	1.677	1.792	1.869
Al (T)	0.126	0.144	0.150	0.229	0.163	0.324	0.208	0.131
Fe3+ (T)	0.027	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Al (M1)	0.000	0.000	0.043	0.050	0.036	0.025	0.026	0.004
Fe3+ (M1)	0.122	0.136	0.044	0.075	0.087	0.145	0.082	0.070
Ti (M1)	0.039	0.029	0.045	0.068	0.029	0.086	0.060	0.037
Cr (M1)	0.004	0.002	0.001	0.000	0.018	0.002	0.009	0.001
Ni (M1)	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.001	0.001
Mg (M1)	0.835	0.833	0.752	0.696	0.825	0.675	0.740	0.827
Fe2+ (M1)	0.000	0.000	0.115	0.111	0.003	0.067	0.081	0.060
Mn (M1)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg (M2)	0.007	0.022	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe2+ (M2)	0.111	0.074	0.080	0.069	0.079	0.038	0.059	0.066
Mn (M2)	0.017	0.015	0.007	0.007	0.002	0.005	0.004	0.003
Ca (M2)	0.814	0.838	0.886	0.891	0.883	0.935	0.908	0.912
Na (M2)	0.052	0.052	0.028	0.033	0.036	0.023	0.029	0.019
K (M2)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Wo	46.06	47.42	48.34	50.46	49.34	54.54	50.75	48.88
Em	47.67	48.39	41.03	39.37	46.11	39.34	41.39	44.34
Fs	6.26	4.19	10.63	10.17	4.55	6.12	7.86	6.78
Q	94.45	94.49	97.04	96.36	96.11	97.45	96.83	98.03
Jd	0.00	0.00	1.47	1.45	1.14	0.38	0.77	0.11
Ae	5.55	5.51	1.49	2.19	2.75	2.17	2.40	1.86
Mg#	88.39	92.02	79.42	79.47	91.01	86.53	84.04	86.73

PT – phonotephrite; TB – trachybasalt; BT – basanite; int- between core and rim.

Table 6. Representative composition of biotite and amphibole. Structural formulas of biotite are calculated on the basis of 22 oxygens, while amphibole are calculated on the basis of 23 oxygens and 13 cations (13 and CNK).

Sample	VA46A	VA48A	VA66A	VA71	VA74	VA67D1	Sample	VA43D1	VA43D1	VA67D1	VA67D1
Lithotype	M-G	MON	MG	LG	MG	BT	Lithotype	PT	PT	BT	BT
Mineral	bt	Bt	Bt	bt	bt	Bt	Mineral	amph	Amph	amph	amph
SiO ₂	35.53	37.25	36.19	36.88	35.79	34.94	SiO ₂	37.90	38.01	37.56	36.37
TiO ₂	8.28	5.11	5.64	5.00	7.55	6.17	TiO ₂	6.78	6.71	5.16	3.95
Al ₂ O ₃	13.94	12.35	12.85	13.95	13.84	15.23	Al ₂ O ₃	12.60	12.64	13.76	13.67
FeO	14.00	19.92	20.24	13.51	16.86	14.65	FeO	12.36	11.79	11.31	21.76
Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.05			0.00	Cr ₂ O ₃	0.02	0.00	0.00	0.00
MnO	0.06	0.15	0.09	0.08	0.06	0.19	MnO	0.21	0.22	0.23	0.50
NiO	0.01	0.00	0.03			0.00	NiO	0.00	0.01	0.01	0.01
MgO	13.26	11.55	10.57	15.37	11.92	13.38	MgO	10.56	10.92	11.80	4.69
CaO	0.00	0.00	0.00	0.05	0.03	0.03	CaO	12.15	12.26	12.05	11.75
Na ₂ O	0.57	0.17	0.25	0.23	0.19	0.61	Na ₂ O	2.02	2.12	1.87	2.04
K ₂ O	8.40	9.23	9.19	9.69	9.94	8.31	K ₂ O	1.64	1.53	2.17	1.93
SrO	0.02	0.00	0.01			0.04	SrO	0.19	0.18	0.20	0.30
BaO	1.07	0.11	0.17	0.08	0.25	2.20	BaO	0.14	0.16	0.44	0.18
Total	95.15	95.84	95.28	94.85	96.44	95.75	Total	96.57	96.55	96.56	97.15
Si	5.352	5.686	5.583	5.530	5.393	5.292	TSi	5.858	5.864	5.752	5.833
AlIV	2.473	2.220	2.335	2.463	2.456	2.708	TAI	2.142	2.136	2.248	2.167
AlVI	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	CAI	0.151	0.160	0.233	0.415
Ti	0.938	0.587	0.654	0.564	0.856	0.703	CCr	0.002	0.000	0.000	0.000
Fe ²	1.763	2.543	2.611	1.694	2.125	1.856	CTi	0.788	0.779	0.594	0.477
Cr	0.002	0.000	0.006	0.000	0.000	0	CMg	2.433	2.511	2.694	1.121
Mn	0.008	0.019	0.012	0.010	0.008	0.024	CFe ²	1.598	1.521	1.448	2.919
Mg	2.977	2.628	2.431	3.436	2.678	3.021	CMn	0.027	0.029	0.030	0.068
Ba	0.063	0.007	0.010	0.005	0.015	0.131	BCa	2.000	2.000	1.977	2.000
Ca	0.000	0.000	0.000	0.008	0.004	0.005	BNa	0.000	0.000	0.023	0.000
Na	0.166	0.050	0.075	0.068	0.056	0.179	ACa	0.012	0.026	0.000	0.019
K	1.614	1.797	1.809	1.854	1.911	1.606	ANa	0.605	0.634	0.532	0.634
Total	15.356	15.537	15.526	15.632	15.502	15.533	AK	0.323	0.301	0.424	0.395
Mg#	0.63	0.51	0.48	0.67	0.56	0.62	Total	15.941	15.962	15.956	16.049

M-G – melagabbro; M-MG – melamonzogabbro; EC – enclave; MG – monzogabbro; LG – Layered gabbro; PT - phonotephrite; BT – basanite.

Table 7. Representative composition of magnetite and ilmenite from José Fernandes Gabbro. Structural formulas of magnetite are calculated on the basis of 4 oxygens and 3 cations, while ilmenite are calculated on the basis of 3 oxygens and 2 cations.

Sample	VA74	VA71	VA81	VA43RC	VA43RD	VA43RD	VA74	VA71	VA81	VA43RC	VA43RD
Lithotype	MG	LG	FQMG	SP	M-MG	M-MG	MG	LG	FQMG	SP	M-MG
Mineral	Mt	Mt	Mt	Mt	Mt	Mt	Ilm	Ilm	Ilm	Ilm	Ilm
SiO ₂	0.06	0.07	0.12	0.03	0.20	0.07	0.02	0.07	0.04	0.02	0.04
TiO ₂	10.77	11.48	4.27	23.47	0.34	9.06	49.14	49.32	49.75	49.39	49.25
Al ₂ O ₃	3.85	3.37	1.16	0.37	0.69	2.21	0.06	0.04	0.07	0.04	0.04
Fe ₂ O ₃ (T)	85.67	85.25									
Cr ₂ O ₃	0.59	0.48	0.13	0.29	0.06	0.75	0.05	0.06	0.03	0.10	0.04
FeO(T)			85.90	64.40	90.54	79.91	48.28	45.64	47.36	34.28	46.64
MnO	0.52	0.41	0.19	0.84	0.07	0.30	0.88	0.83	0.86	3.47	0.93
MgO	1.14	1.07	0.09	4.24	0.36	0.89	1.37	2.57	0.82	11.67	1.78
CaO	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.00	0.28	0.01	0.01	0.01
Na ₂ O	0.03	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.03
K ₂ O	0.004	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
BaO			0.02	0.00	0.01	0.00			0.01	0.00	0.03
ZnO	0.09	0.11					0.00	0.00			
NiO			0.03	0.00	0.03	0.03			0.00	0.01	0.00
Nb ₂ O ₃	0.00	0.00					0.25	0.04			
Total	102.7	102.3	91.9	93.7	92.3	93.27	100.04	98.86	98.99	99.02	98.80
Fe ₂ O ₃	42.42	41.30	57.38	22.33	66.43	47.01	8.20	7.74	5.46	15.72	7.13
FeO	38.92	39.55	34.27	44.31	30.76	37.61	40.90	38.67	42.44	20.13	40.23
Si	0.002	0.003	0.005	0.001	0.008	0.003	0.000	0.002	0.001	0.001	0.001
Ti	0.304	0.327	0.125	0.668	0.010	0.260	0.920	0.924	0.945	0.861	0.930
Al	0.170	0.150	0.053	0.016	0.031	0.099	0.002	0.001	0.002	0.001	0.001
Fe ⁺³	1.199	1.176	1.682	0.636	1.930	1.351	0.154	0.145	0.104	0.274	0.135
Cr	0.018	0.014	0.004	0.009	0.002	0.023	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001
Fe ⁺²	1.222	1.252	1.117	1.402	0.994	1.201	0.851	0.806	0.897	0.390	0.845
Mn	0.017	0.013	0.006	0.027	0.002	0.010	0.018	0.018	0.018	0.068	0.020
Mg	0.064	0.060	0.006	0.239	0.020	0.051	0.051	0.095	0.031	0.403	0.067
Ca	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000
Na	0.002	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ba	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nb	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.000	0.000
Total	3.001	3.000	3.001	3.001	3.001	3.001	2.000	2.000	2.001	2.001	2.001
Usp	30.64	32.95	12.98	66.93	1.78	26.29					
Ilm							92.03	92.59	94.65	86.12	92.13

MG – monzogabbro; M-MG – melamonzogabbro; LG – Layered gabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro; SP – syenitic pocket.

5.3. Trace Elements

Feldspar

Among gabbroic samples, Pl crystals with higher concentration of Mn are found in melamonzogabbro (16-21 ppm) and layered gabbro (28-65 ppm) relative to quartz monzogabbro (4-7 ppm) (Table 8). Higher concentration of Sr is observed in crystals from layered gabbro (1550-3500 ppm), that show more concentration of light rare earth elements (LREE) (e.g., 9-35 ppm La, 1.3-3 ppm Eu) also observed in melamonzogabbro crystals (e.g., 9-31 ppm La) (Figure 13a). Although Pl from quartz monzogabbro show the lowest content of LREE (e.g., 0.6-2 ppm La), Sr (310-560 ppm) and Pb (0.7-1.6 ppm), Kfs crystals from this sample are more enriched in these elements (7-10 ppm La, 846-2356 ppm Sr, 11-22.5 ppm Pb) and in some cases show more concentration relative to Kfs from melamonzogabbro (8-9.5 ppm La, 970-1195 ppm Sr, 10-14.8 ppm Pb) and layered gabbro (3.5-8.7 ppm La, 1739-2833 ppm Sr, 7.7-16.4 ppm Pb), indicating that the distribution of the elements among the two minerals (Pl/Kfs) are distinct between the samples (Table 9). Rb (105-268 ppm) and Ba (up to 20080 ppm) show more concentration in Kfs relative to Pl in all the samples. Positive Eu anomalies are well defined in all Pl and Kfs crystals from the gabbroic rocks (Figure 13a-b).

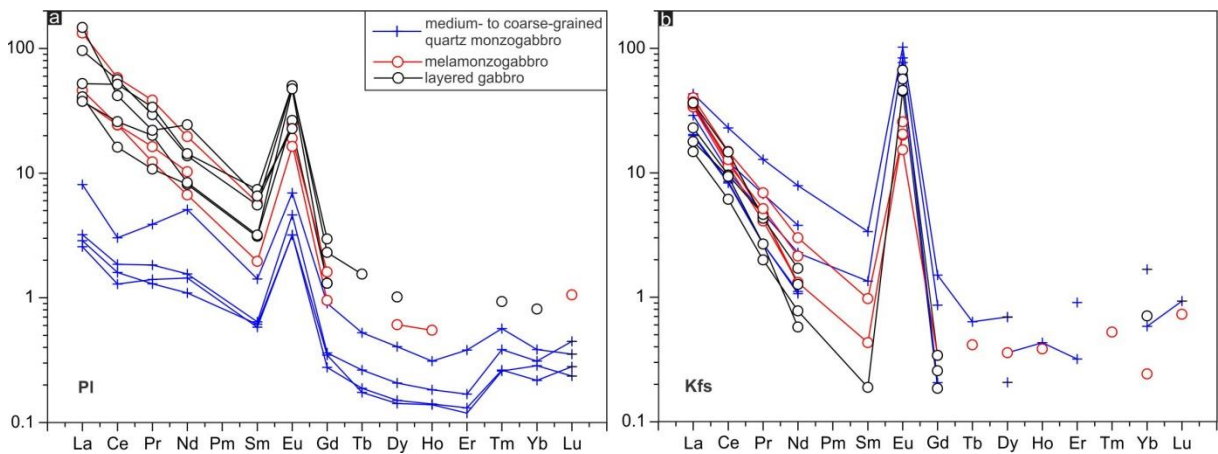


Figure 13. REE patterns of (a) plagioclase and (b) K-feldspar normalized to the chondrite of McDonough and Sun (1995).

Table 8. Trace element composition of feldspar (plagioclase and K-feldspar) from gabbroic samples.

Sample	VA41A	VA41A	VA41A	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA41A	VA41A
Lithotype	CQMG	CQMG	CQMG	M-MG	M-MG	M-MG	LG	LG	LG	CQMG	CQMG
Mineral	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	PI	Kfs	Kfs
Location	rim	core	Rim	rim	core	core	int	rim	core	core	core
Sc	0.20	0.19	0.44	0.85	1.18	<dl	0.67	<dl	2.50	1.24	0.99
Ti	112	97	272	753	739	920	875	744	1320	1700	1604
V	0.28	0.21	0.97	1.84	2.16	2.01	1.55	0.86	2.27	1.39	1.26
Mn	4.10	4.15	5.76	17.89	20.62	16.18	64.85	39.61	39.32	5.24	2.17
Fe	863	826	2192	4478	4488	4266	1822	4010	3090	1882	1844
Zn	1.52	1.17	2.07	<dl	2.59	6.36	3.03	5.86	8.01	4.97	4.50
Ga	2.43	2.19	3.20	21.29	28.90	26.97	21.11	30.17	37.57	19.01	10.85
Rb	0.24	0.81	0.66	0.73	1.15	1.69	1.04	1.97	2.27	179.89	229.23
Sr	403	310	561	1253	1367	1764	1552	2298	3506	2356	2353
Y	0.05	0.06	0.17	0.48	0.27	0.81	0.33	0.32	0.32	1.86	0.43
Zr	0.05	3.30	1.92	2.88	0.60	8.49	0.28	0.20	<dl	0.41	0.23
Nb	0.02	0.05	0.27	0.45	0.15	2.34	<dl	0.07	0.03	0.13	<dl
Cs	0.01	0.08	0.02	0.05	<dl	0.18	0.05	0.03	<dl	0.33	0.61
Ba	103	110	230	364	437	405	422	630	720	20080	10987
La	0.61	0.68	1.92	9.06	10.94	31.43	9.69	22.71	8.90	10.23	8.18
Ce	0.79	0.98	1.86	14.89	14.95	35.63	9.88	34.33	15.88	14.04	7.52
Pr	0.13	0.12	0.36	1.51	1.14	3.57	1.00	2.73	1.86	1.19	0.63
Nd	0.66	0.50	2.33	4.69	3.05	8.95	3.72	6.28	3.83	3.61	1.73
Sm	0.09	0.09	0.21	<dl	0.29	0.86	0.46	0.82	0.47	0.50	<dl
Eu	0.18	0.18	0.39	1.07	0.92	1.40	1.49	2.80	2.66	5.75	4.32
Gd	0.07	0.06	0.18	0.32	0.19	<dl	<dl	0.46	0.26	0.30	<dl
Tb	0.01	0.01	0.02	<dl	<dl	<dl	<dl	0.06	<dl	0.02	<dl
Dy	0.04	0.04	0.10	0.15	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	0.17	0.17
Ho	0.01	0.01	0.02	0.03	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Er	0.02	0.02	0.06	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	0.15	<dl
Tm	0.01	0.01	0.01	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Yb	0.05	0.04	0.06	<dl	<dl	<dl	<dl	0.13	<dl	0.27	<dl
Lu	0.01	0.01	0.01	<dl	0.03	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Hf	0.08	0.14	0.22	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	0.27	<dl
Ta	0.01	0.01	0.03	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	0.14	0.21
Pb	0.68	0.85	1.56	7.48	6.15	6.08	5.33	8.23	6.82	17.62	22.49
Th	0.02	0.07	0.07	0.10	0.10	0.60	<dl	<dl	<dl	0.12	<dl
U	0.01	0.02	0.02	<dl	0.05	0.14	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl

CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; M-MG – melamonzogabbro; LG – Layered gabbro; <dl – below detection limit.

Table 8. (continued).

Sample	VA41A	VA41A	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA
Lithotype	CQMG	CQMG	M-MG	M-MG	M-MG	LG	LG	LG
Mineral	Kfs	Kfs	Kfs	Kfs	Kfs	Kfs	Kfs	Kfs
Location	rim	Core	core	core	core	Int	Rim	Core
Sc	0.89	0.71	0.72	0.84	<dl	1.49	1	0.94
Ti	976	910	1195	1312	1530	1162	1143	1597
V	0.92	0.66	1.03	1.57	1.05	0.39	0.67	0.65
Mn	2.28	0.76	<dl	1.35	1.37	2.15	1.57	1.45
Fe	1484	1350	3387	3245	2859	1290	1059	1483
Zn	1.05	1.61	<dl	1.55	<dl	0.52	2.92	4
Ga	13.29	13.86	6.55	9.72	8.58	14.75	10.16	14.38
Rb	195.76	182.29	136.07	147.76	145.94	266.19	141.33	193.72
Sr	1053	846	1172	1195	1330	1739	1673	2000
Y	0.27	0.16	0.24	0.26	0.41	0.15	0.81	0.86
Zr	0.2	0.2	0.31	0.39	0.44	0.35	0.16	0.28
Nb	0.07	0.05	<dl	0.09	0.11	0.09	0.05	0.07
Cs	0.47	0.32	1.14	0.87	1.17	1.49	0.56	0.53
Ba	5837	2789	2569	6356	7623	2938	14414	14867
La	4.72	4.81	9.49	8.79	7.99	8.64	3.5	4.22
Ce	5.07	5.21	9.09	7.25	6.91	9.01	3.75	5.73
Pr	0.25	0.25	0.64	0.48	0.38	0.4	0.19	0.25
Nd	0.51	0.49	1.37	0.98	0.6	0.78	0.36	0.26
Sm	<dl	<dl	0.14	<dl	0.06	<dl	0.03	<dl
Eu	3.45	3.23	1.13	1.44	1.15	2.54	2.58	3.19
Gd	0.04	<dl	<dl	<dl	<dl	0.04	0.05	0.07
Tb	<dl	<dl	0.02	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Dy	0.05	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Ho	<dl	<dl	0.02	<dl	<dl	<dl	0.004	<dl
Er	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Tm	<dl	<dl	0.01	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Yb	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Lu	<dl	<dl	<dl	<dl	0.02	<dl	<dl	<dl
Hf	0.13	<dl	<dl	0.26	0.12	0.11	0.43	0.35
Ta	0.23	0.18	0.16	0.19	0.33	0.11	0.44	0.56
Pb	19.73	17.82	11.66	14.75	13.7	16.44	7.66	12.11
Th	<dl	0.03	<dl	<dl	0.02	<dl	<dl	<dl
U	<dl	<dl	0.02	<dl	<dl	0.01	<dl	<dl

CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; M-MG – melamonzogabbro; LG – Layered gabbro.

Table 9. Distribution ratios of trace elements (concentration in plagioclase/concentration in K-feldspar) considering average composition of the analyzed crystals.

Sample	VA41A	VA43RA	VA44RA
Lithotype	CQMG	M-MG	LG
Mn	1.53	8.94	22.16
Fe	0.83	1.51	2.00
Zn	0.52	2.89	1.66
Ga	0.19	3.24	1.89
Rb	0.004	0.01	0.01
Sr	0.28	1.25	1.13
Y	0.12	2.13	0.65
Zr	0.49	12.71	0.75
Nb	1.02	10.38	0.57
Cs	0.08	0.12	0.03
Ba	0.02	0.09	0.05
La	0.14	1.98	3.25
Ce	0.16	2.81	3.85
Pr	0.35	4.31	6.82
Nd	0.71	6.27	12.74
Sm	0.34	5.53	27.21
Eu	0.06	0.99	0.73
Ta	0.08		
Pb	0.05	0.53	0.45

CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; M-MG – melamonzogabbro; LG – layered gabbro.

Olivine

The trace-element contents of olivine are very sensitive to rock type. High Mg# Ol from melamonzogabbro VA43RA shows high contents of compatible elements as Ni (914 ppm), Cr (52 ppm), and Cu (7 ppm) compared to iron-rich (Mg# 42-46) olivine from layered gabbro (304-353 ppm Ni, 1-3 ppm Cr, 0.08 ppm Cu) and quartz monzogabbro (139-179 ppm Ni, 1-1.7 ppm Cr) (Table 10). Sc, Y and the HREE are enriched in the more fractionated rocks (e.g., up to 1 ppm Yb and up to 0.3 ppm Er in quartz monzogabbro and layered gabbro).

Table 10. Trace element composition of olivine from gabbroic samples.

Sample Lithotype	VA41A CQMG	VA41A CQMG	VA41A CQMG	VA43RA M-MG	VA44RA LG	VA44RA LG
P	114.26	152.25	154.15	38.77	104.71	160
Ca	478	505	448	605	774	785
Sc	8.59	7.7	7.98	1.79	4.59	5.1
Ti	171	168	170	199	190	214
V	2.3	2.51	1.65	9.58	2.87	1.47
Cr	1.02	1.75	1.33	52.17	0.98	1.19
Co	248	232	251	263	222	213
Ni	179	139	152	914	304	353
Cu	<dl	<dl	<dl	7.22	0.08	<dl
Zn	446.77	395.61	414.06	240.66	321.1	312.07
Rb	<0.057	<dl	<dl	0.53	<dl	<dl
Sr	0.2	<dl	0.17	0.45	0.13	0.03
Y	2.2	1.45	1.48	0.15	1.74	1.88
Zr	2	1	1	2	2	1
Nb	<dl	<dl	0.04	0.33	<dl	0.02
Ba	0.05	<dl	<dl	0.63	<dl	<dl
La	0.01	0.01	<dl	0.25	<dl	0.01
Ce	0.02	<dl	0.01	0.81	<dl	<dl
Pr	0.01	<dl	<dl	0.06	<dl	0.01
Nd	<dl	0.04	<dl	0.22	<dl	<dl
Sm	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Eu	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Gd	<dl	<dl	<dl	<dl	0.03	0.03
Tb	0.02	0.01	0.01	<dl	0.02	0.02
Dy	0.16	0.1	0.07	<dl	0.12	0.11
Ho	0.05	0.04	0.05	<dl	0.06	0.05
Er	0.31	0.28	0.2	0.03	0.29	0.36
Tm	0.09	0.09	0.11	<dl	0.09	0.1
Yb	0.98	0.69	0.69	0.09	0.62	0.95
Lu	0.2	0.15	0.19	<dl	0.18	0.21
Hf	<dl	<dl	<dl	0.1	0.08	<dl
Ta	<dl	<dl	<dl	0.01	<dl	<dl
Pb	0.06	<dl	<dl	0.44	<dl	<dl
Th	<dl	<dl	<dl	0.21	<dl	<dl
U	<dl	<dl	<dl	0.1	<dl	<dl

CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; M-MG – melamonzogabbro; LG – Layered gabbro.

Clinopyroxene

Larger Cpx crystals from melamonzogabbro (VA43RA) show higher Mg# cores with lower Zr (up to 25 ppm), Y (up to 7 ppm) and higher Cr (up to 7664 ppm) contents, indicative of a more primitive composition (Table 11) (Figure 14a-f). These cores also show REE patterns with LREE enrichment ($(La/Yb)_N$ from 3 to 7) with a convex-upward shape among the LREE ($(La/Nd)_N < 1$) (Figure 15a). Lower Mg# rims with higher TiO_2 content, show higher concentration of other HFSE (up to 99 ppm Zr) (Figure 14c) and REE (up to 9 ppm La), with LREE enrichment ($(La/Yb)_N$ from 4 to 6) and $(La/Nd)_N < 1$ (Figure 15a). Similar REE patterns are found in Cpx phenocrysts of a basanite dyke (VA67D1), where higher Mg# cores show $(La/Yb)_N$ from 4 to 6, while high- TiO_2 rims show higher concentration of other HFSE (e.g., 196 ppm Zr) and REE (e.g., 13 ppm La), with $(La/Yb)_N$ up to 7 (figures 14 and 15b). REE patterns of Cpx from a layered gabbro (VA44RA) show $(La/Yb)_N$ from 3 to 5 (Figure 15c). These crystals also show higher Mg# cores with up to 2626 ppm Cr. Cpx from medium- to coarse-grained quartz monzogabbro are more enriched in REE relative to the other samples and show the following distinct REE patterns: smaller crystals and rims of larger crystals show flatter REE patterns ($(La/Yb)_N$ from 2 to 3), with prominent negative Eu anomalies (Figure 15d) that are not identified in the core of larger crystals where $(La/Yb)_N$ is up to 3 (Figure 15d). Multi-element spidergrams of the Cpx crystals show an overall enrichment in LILE and some HFS elements from lower Mg# zones-rims of the crystals from the analyzed samples (Figure 16a-d). Negative P anomalies are often identified in Cpx, while lower Mg# zones also show Sr and Ti negative anomalies in crystals from layered gabbro and medium- to coarse-grained quartz monzogabbro (Figure 16c-d).

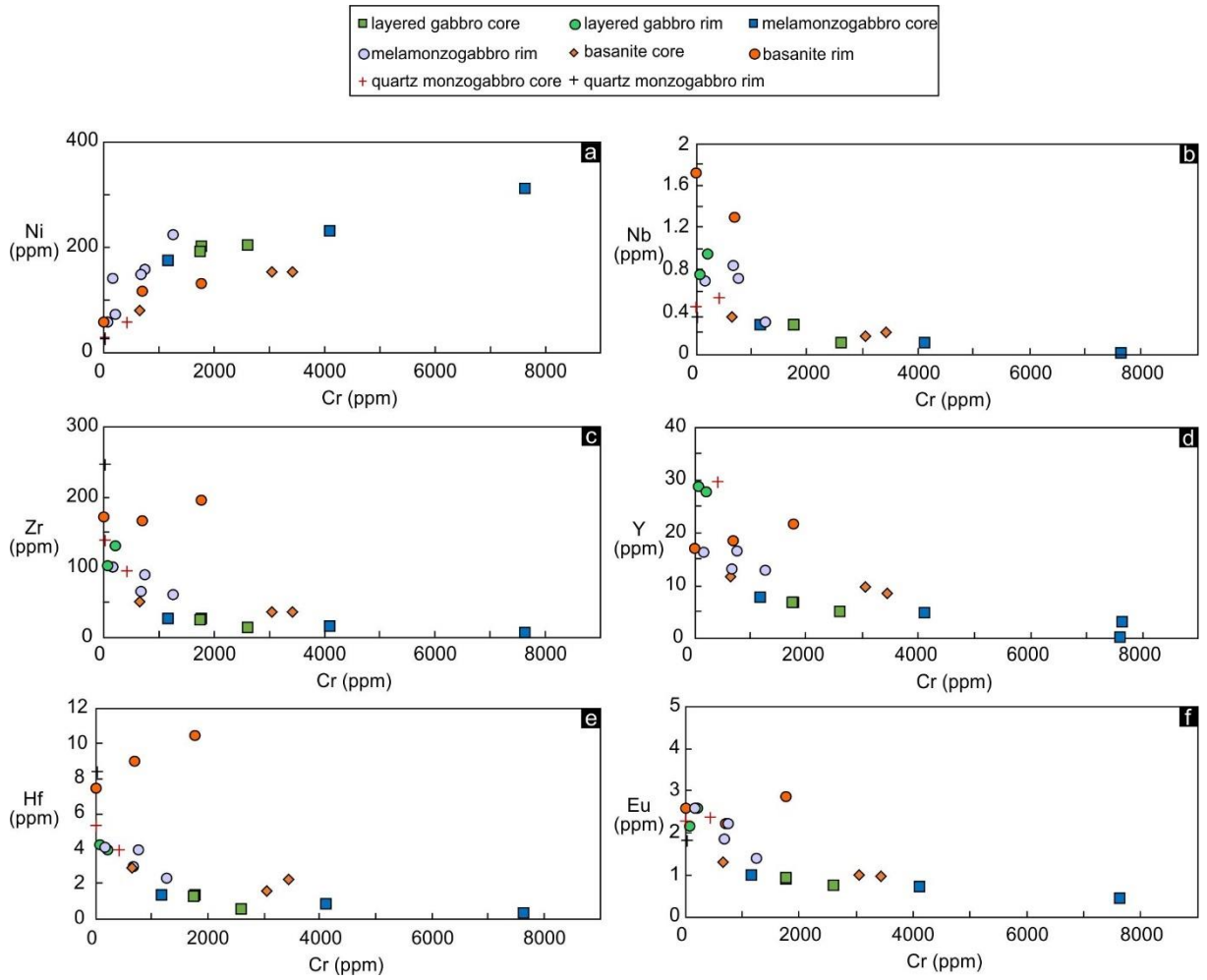


Figure 14. Variation diagrams showing the relationship of the concentration of Cr with other elements in relict cores and rims of Cpx crystals.

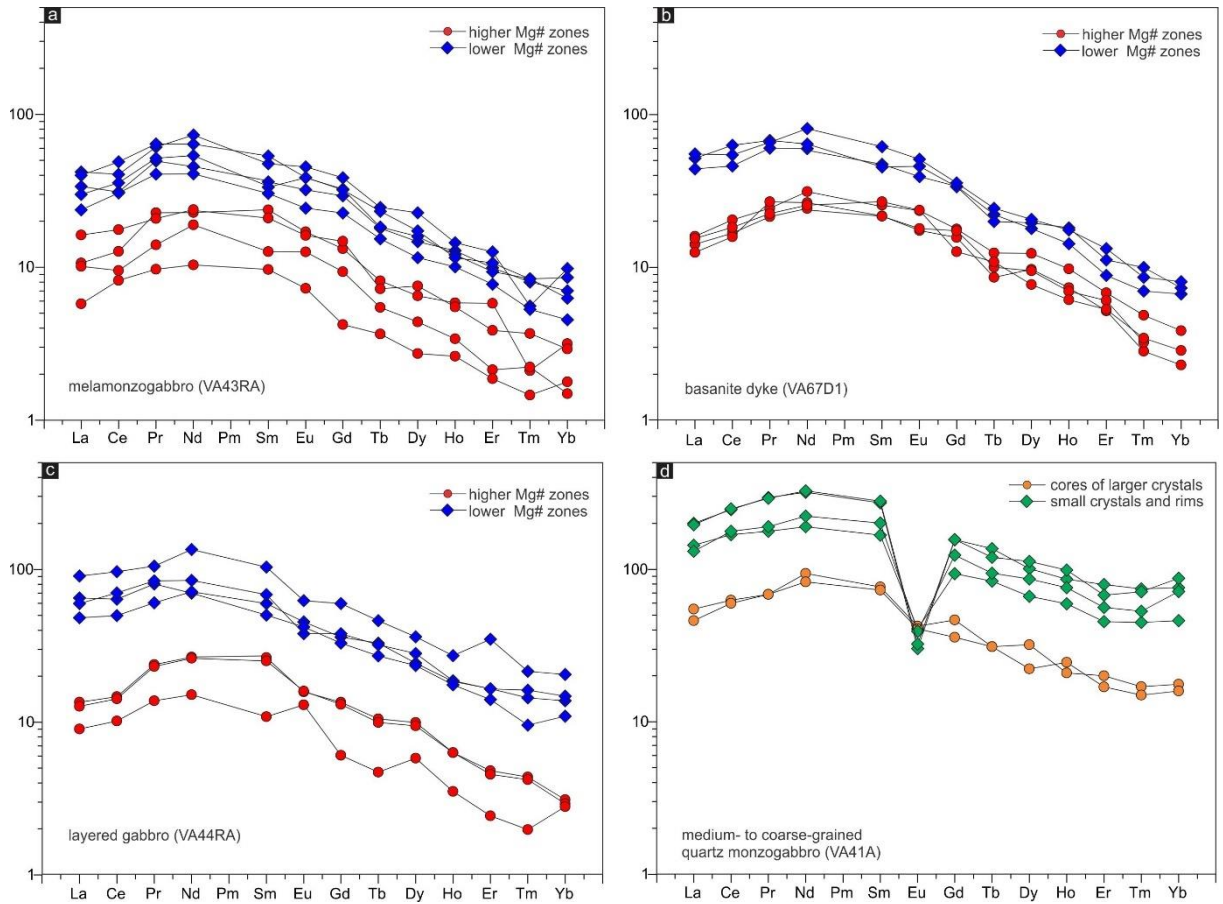


Figure 15. Chondrite-normalized (McDonough and Sun, 1995) REE patterns of clinopyroxene from the José Fernandes melamonzogabbro (a), basanite (b), layered gabbro (c) and quartz monzogabbro (d).

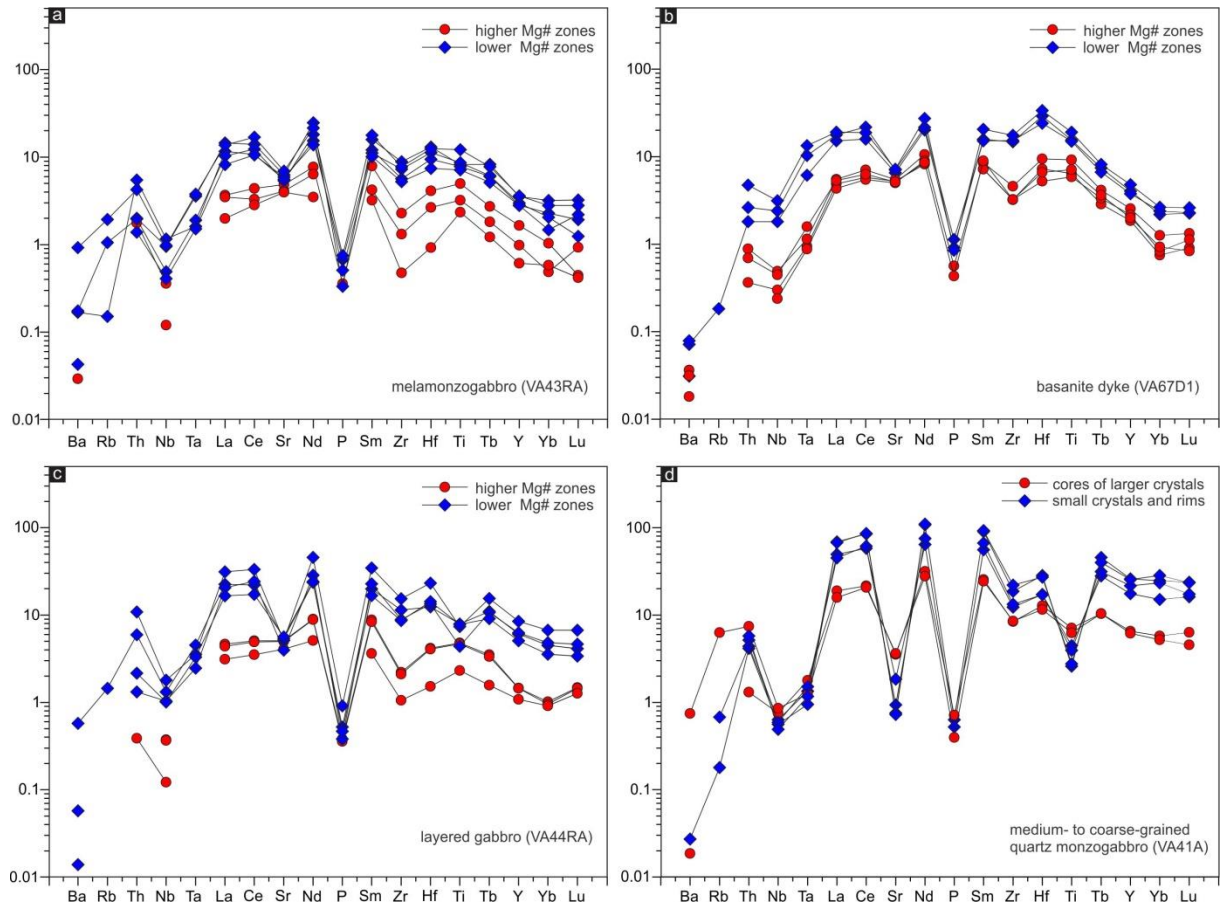


Figure 16. Multi-element spidergrams normalized to the primitive mantle (Sun & McDonough, 1989) of clinopyroxene crystals from melamonzogabbro (a), basanite (b), layered gabbro (c), quartz monzogabbro (d).

Table 11. Trace element composition of clinopyroxene from gabbroic samples and basanite dyke.

Sample Lithotype Location	VA41A CQMG Core	VA41A CQMG core	VA41A CQMG rim	VA44RA LG core	VA44RA LG Core	VA44RA LG Rim	VA44RA LG core	VA44RA LG Rim	VA43RA M-MG core	VA43RA M-MG Rim	VA43RA M-MG rim	VA43RA M-MG core	VA43RA M-MG int	VA43RA M-MG core	VA43RA M-MG rim
Sc	125	111	105	112	111	95	76	70	138	93	112	82	90	51	127
Ti	5824	9213	3585	6246	6083	10308	3005	5710	6485	10686	10164	4194	9277	3053	15797
V	280	372	237	240	232	357	167	239	254	374	358	168	404	163	570
Cr	16	426	20	1794	1780	237	2627	108	1189	193	700	4128	1282	7664	782
Mn	2780	2109	3338	877	856	1397	752	1212	954	1279	1115	701	1129	868	1146
Co	44.11	48.59	53.19	47.9	46.53	38.73	32.92	27.61	42.19	40.98	45.13	33.04	44.96	33	40.53
Ni	27.7	59.2	26.3	199.6	191.0	70.3	203.0	56.4	171.9	139.3	147.1	228.4	222.5	309.6	155.7
Zn	103.9	56.2	112.2	25.0	24.1	40.9	18.7	35.2	23.9	33.1	43.2	20.7	36.3	16.1	31.1
Rb	0.43	<dl	<dl	<dl	<dl	0.92	<dl	<dl	<dl	<dl	0.1	<dl	<dl	<dl	1.23
Sr	39.0	74.8	15.4	106.9	104.9	112.4	85.8	83.6	102.7	132.1	117.4	86.3	124.4	83.9	146.4
Y	80.1	29.8	115.98	6.65	6.59	27.63	4.92	28.52	7.51	16.15	12.81	4.47	12.71	2.79	16.42
Zr	138.37	94.34	246.65	24.82	23.52	127.89	11.81	99.52	25.54	99.08	63.26	14.79	58.78	5.33	87.01
Nb	0.45	0.54	0.35	0.27	0.26	0.94	0.09	0.74	0.26	0.68	0.83	0.09	0.29	<dl	0.7
Cs	0.05	<dl	0.05	<dl	<dl	0.16	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	0.17
Ba	<dl	0.13	<dl	<dl	<dl	4.01	<dl	0.1	<dl	0.3	1.18	<dl	<dl	0.21	6.46
La	34.07	13.01	46.41	3.2	3.01	15.41	2.14	14.16	2.53	9.96	8	2.4	5.63	1.37	9.45
Ce	103.35	38.48	152.27	9	8.71	39.09	6.24	43.03	7.8	24.87	19.04	5.84	18.78	5.03	30.04
Pr	16.43	6.34	27.1	2.21	2.15	7.44	1.28	7.81	2.11	5.68	4.59	1.3	3.77	0.9	5.95
Nd	86.83	42.82	149.16	12.18	11.99	31.95	6.9	38.79	10.44	33.51	20.81	8.65	18.64	4.73	29.18
Sm	24.8	11.34	41.29	3.92	3.72	8.86	1.61	10.13	3.51	7.03	5.35	1.87	4.5	1.43	7.91
Eu	2.29	2.38	1.82	0.89	0.9	2.55	0.73	2.14	0.96	2.55	1.81	0.71	1.37	0.41	2.18
Gd	18.59	9.27	31.23	2.69	2.6	7.19	1.21	7.56	2.63	7.67	5.83	1.86	4.5	0.84	6.39
Tb	3.02	1.12	4.32	0.38	0.36	1.19	0.17	1.16	0.29	0.89	0.65	0.2	0.56	0.13	0.84
Dy	16.36	7.87	27.67	2.45	2.33	6	1.43	6.93	1.6	5.6	3.62	1.08	2.84	0.67	4.25
Ho	3.24	1.14	5.39	0.35	0.35	1.01	0.19	1.02	0.32	0.79	0.7	0.19	0.55	0.14	0.63
Er	7.27	3.2	10.81	0.77	0.73	2.65	0.39	2.64	0.93	2.02	1.59	0.34	1.24	0.3	1.71
Tm	1.11	0.42	1.76	0.11	0.1	0.36	0.05	0.4	0.05	0.14	0.2	0.06	0.13	0.04	0.21
Yb	7.42	2.84	14.04	0.5	0.47	2.22	0.45	2.38	0.51	1.58	1.13	0.24	0.73	0.29	1.38
Lu	1.2	0.47	1.74	0.11	0.11	0.3	0.09	0.34	0.03	0.24	0.14	0.07	0.16	0.03	0.21
Hf	5.34	3.95	8.4	1.29	1.26	3.84	0.47	4.14	1.27	4.02	2.91	0.82	2.29	0.29	3.85
Ta	0.06	0.07	0.05	<dl	<dl	0.19	<dl	0.1	<dl	0.15	0.07	<dl	0.06	<dl	0.16
Pb	0.62	0.28	0.49	<dl	0.06	0.5	<dl	0.1	<dl	0.24	0.19	0.06	0.15	0.11	0.92
Th	0.37	0.11	0.49	<dl	<dl	0.51	<dl	0.11	0.15	0.17	0.47	<dl	0.12	<dl	0.36
U	0.07	<dl	0.08	<dl	<dl	0.13	<dl	0.02	<dl	0.02	0.08	<dl	<dl	<dl	0.04

CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; M-MG – melamonzogabbro; LG – Layered gabbro.

Table 11. (continued).

Sample	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1
Lithotype	BT	BT	BT	BT	BT	BT
Location	core	rim	core	rim	core	Rim
Sc	93	167	91	76	82	178
Ti	8352	20066	11959	19442	7616	24825
V	230	328	343	311	244	384
Cr	3432	701	653	3	3058	1774
Mn	669	768	765	794	851	858
Co	30.73	35.78	32.29	30.72	39.92	35.73
Ni	152.5	116.6	80.3	57.1	152.3	131.4
Zn	24.1	25.6	22.7	25.2	19.7	28.2
Rb	<dl	0.12	<dl	<dl	<dl	<dl
Sr	110.4	138.0	115.9	149.3	105.9	152.1
Y	8.46	18.4	11.59	17.11	9.83	21.77
Zr	36.14	166.16	51.47	171.37	36.37	196.4
Nb	0.21	1.29	0.35	1.71	0.17	2.23
Cs	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl
Ba	0.25	0.5	<dl	0.22	0.13	0.55
La	3.36	10.46	3.79	12.25	2.97	13.06
Ce	10.27	28.2	12.55	38.55	9.73	33.4
Pr	1.99	5.59	2.26	6.29	2.49	6.1
Nd	11.11	27.37	14.3	29.33	12.12	36.95
Sm	3.21	6.99	3.78	6.72	3.2	9.12
Eu	0.98	2.21	1.32	2.58	1.01	2.87
Gd	3.12	6.76	3.54	6.7	3.46	7.1
Tb	0.31	0.8	0.45	0.72	0.36	0.88
Dy	2.39	4.41	3.04	4.82	2.34	5.07
Ho	0.4	0.78	0.53	0.99	0.38	0.96
Er	0.83	1.42	1.09	1.79	0.97	2.12
Tm	0.07	0.17	0.12	0.25	0.08	0.21
Yb	0.37	1.08	0.62	1.18	0.41	1.3
Lu	0.07	0.17	0.1	0.17	0.08	0.19
Hf	2.23	9.01	2.91	7.44	1.62	10.43
Ta	0.04	0.25	0.05	0.42	0.04	0.55
Pb	<dl	0.12	<dl	<dl	0.09	0.13
Th	0.03	0.15	0.08	0.22	<dl	0.4
U	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl	<dl

BT – basanite.

6. In situ isotope geochemistry in minerals

6.1. Sr isotopes in plagioclase and clinopyroxene

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios (Figure 17, Table 12) of larger plagioclase are lower in melagabbro-melamonzogabbro (average 0.70629), and higher in quartz monzogabbro (0.70998). Whole-rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of some samples, such as layered gabbro (VA44RA) and trachybasalt (VA43D5), are only similar to the lowest values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of Pl crystals (Figure 17, Table 13). Isotopic zoning is observed in some crystals, with higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ near the rims (average 0.7084) relative to the cores (0.7068) in plagioclase from monzogabbro VA60 (Figure 18a, b, d). The opposite relation is observed in layered gabbro VA44RA, where lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (0.7062) occur near the rim of a crystal whereas the core has $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i = 0.7083$

(Figure 18c, d). In both cases the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of the whole-rock are similar to the composition of the rims, showing that the cores are in disequilibrium.

Cpx crystals from the José Fernandes Gabbro show widely varying $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios, defining the same trend shown by whole-rocks and plagioclase, from the average of 0.7058 in melagabbro-melamonzogabbro reaching the highest $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios in quartz monzogabbro (average 0.7111) (Figure 19; Table 14). Phenocrysts from basanite dykes have the lowest $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios (average 0.7047). Isotopic zoning is observed specially in large crystals and phenocrysts up to 1 cm wide (figures 20 and 21) that show trace-element chemical zoning, with lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios (e.g., <0.705) in resorbed higher Mg# zones and higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (e.g., >0.706) in rims with higher TiO_2 (figures 20 and 21). Phenocrysts from basanite dykes have cores with the lowest $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (0.7038-0.7049) (Figure 21), and their rims may have slightly higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ (up to 0.7053) (Figure 21). These lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios are similar to the found in some resorbed Mg# zones from Cpx of gabbroic samples. Whole-rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios often correspond to the average of the *in situ* isotopic signature of Cpx (Figure 21, Table 13). However, the whole-rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ of monzogabbro VA60A overlaps only the ratios of Cpx rims (Figure 21c), as also shown by plagioclase.

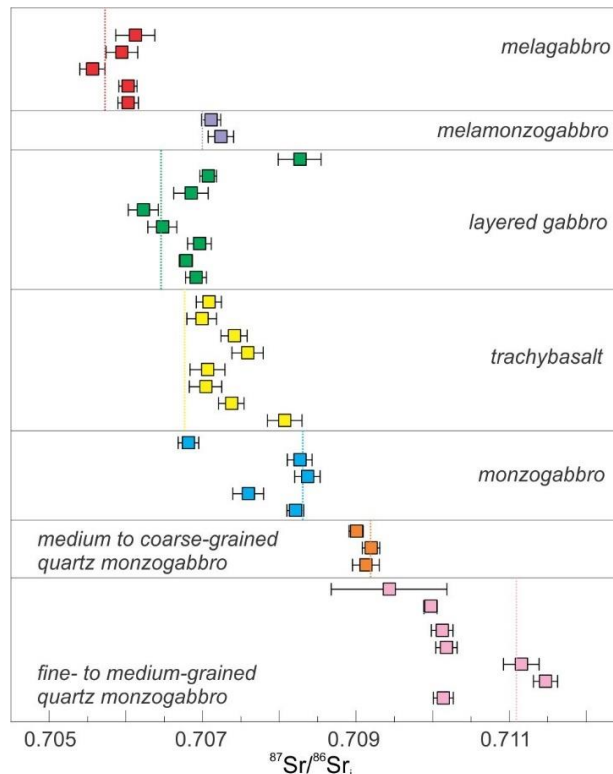


Figure 17. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ of plagioclase crystals of gabbroic rocks from the José Fernandes Gabbro. The dotted lines represent whole-rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of the respective samples. Error bars are 1σ .

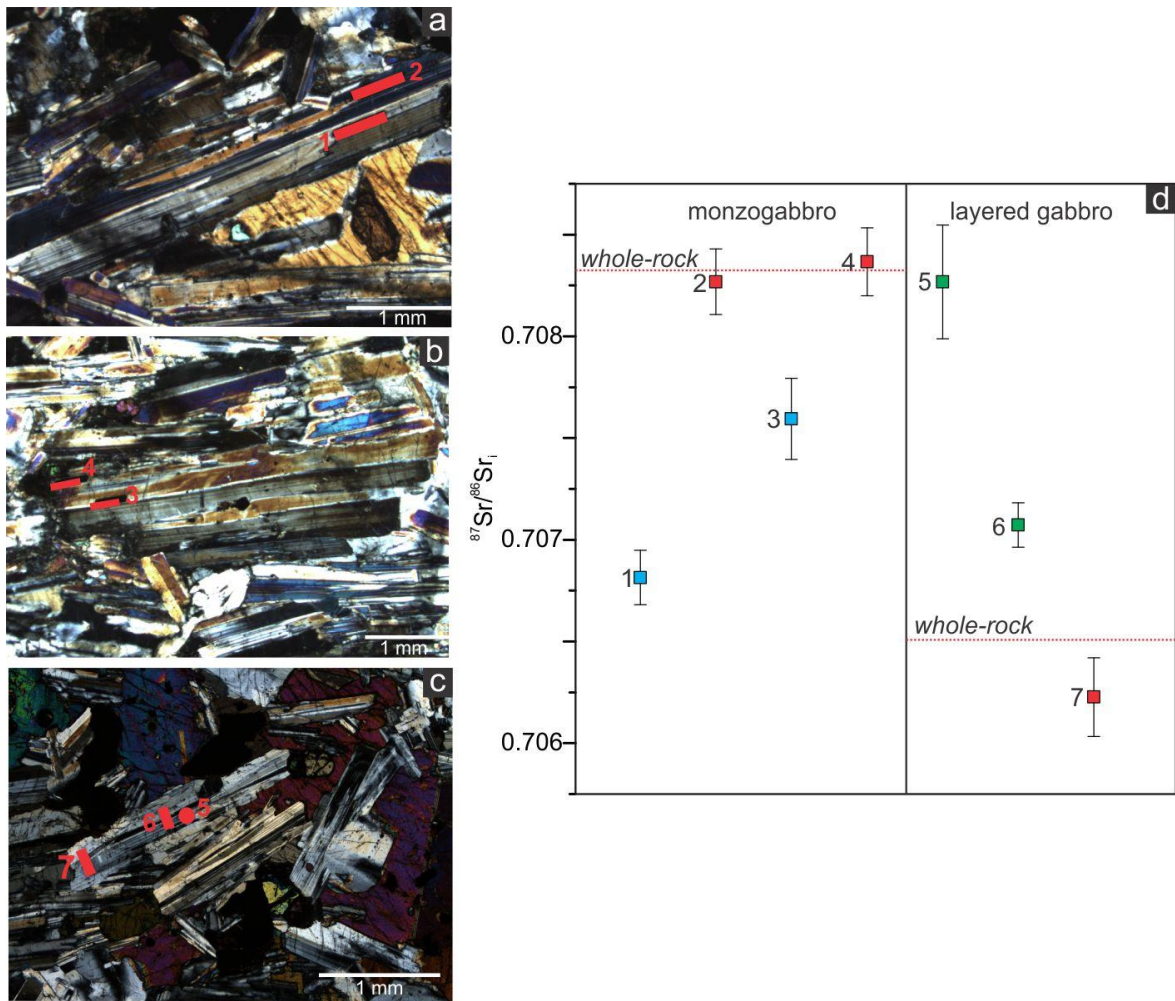


Figure 18. Plagioclase crystals of monzogabbro (a, b) and layered gabbro (c) with the position of laser rasters. (d) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ of plagioclase crystals. The dotted lines represent whole-rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of the respective samples. The numbers referred to the laser rasters indicated in a, b and c. Error bars are 1σ .

Table 12. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of plagioclase crystals from gabbroic samples and phenocrysts in trachybasalt dyke.

Sample	Lithotype	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1s	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$
VA46A_PL1_1	M-G	0.003	0.70613	0.00026	0.70612
VA46A_PL1_2	M-G	0.003	0.70595	0.00021	0.70595
VA46A_PL4_1	M-G	0.005	0.70557	0.00017	0.70556
VA46A_PL4_2	M-G	0.005	0.70604	0.00012	0.70603
VA46A_PL4_3	M-G	0.005	0.70604	0.00014	0.70603
VA43_RD_pl3_1	M-MG	0.003	0.70712	0.00013	0.70711
VA43_RD_pl3_2	M-MG	0.012	0.70726	0.00017	0.70724
VA60A_PL4_1n	MG	0.012	0.70684	0.00013	0.70681
VA60A_PL4_2b	MG	0.004	0.70827	0.00016	0.70827
VA60A_PL2_1b	MG	0.021	0.70841	0.00017	0.70836
VA60A_PL2_2n	MG	0.015	0.70762	0.0002	0.70759
VA60A_PL1_1	MG	0.025	0.70825	0.00011	0.70821
VA41A_PL6_1	CQMG	0.020	0.70904	0.00009	0.709
VA41A_PL6_2	CQMG	0.012	0.70922	0.00011	0.70919
VA41A_PL2_1	CQMG	0.047	0.70921	0.00017	0.70913
VA44_RA_pl7_1n	LG	0.152	0.70855	0.00028	0.70826
VA44_RA_pl7_1an	LG	0.107	0.70727	0.00011	0.70706
VA44_RA_pl7_1bb	LG	0.019	0.70688	0.00023	0.70685
VA44_RA_pl7_2b	LG	0.007	0.70624	0.00019	0.70623
VA44_RA_pl7_3	LG	0.007	0.70649	0.00019	0.70647
VA44_RA_pl7_3a	LG	0.009	0.70698	0.00016	0.70696
VA44_RA_pl6_1	LG	0.006	0.70679	0.00008	0.70678
VA44_RA_pl6_2	LG	0.059	0.70702	0.00014	0.70691
VA81_PL1_1	FQMG	0.012	0.70945	0.00076	0.70943
VA81_PL1_1	FQMG	0.011	0.70999	0.00009	0.70997
VA81_PL1_2	FQMG	0.010	0.71014	0.00014	0.71012
VA81_PL1_3	FQMG	0.015	0.71021	0.00014	0.71018
VA81_PL3_1	FQMG	0.008	0.71117	0.00023	0.71115
VA81_PL3_2	FQMG	0.008	0.71148	0.00016	0.71147
VA81_PL3_3	FQMG	0.025	0.71018	0.00013	0.71014
VA43_D5_PL3_2	TB	0.007	0.70709	0.00016	0.70708
VA43_D5_PL3_1	TB	0.011	0.70701	0.00019	0.70699
VA43_D5_PL3_3	TB	0.005	0.70742	0.00017	0.70741
VA43_D5_PL3_4	TB	0.014	0.70761	0.0002	0.70758
VA43_D5_PL4_1	TB	0.009	0.70708	0.00023	0.70706
VA43_D5_PL4_2	TB	0.013	0.70706	0.00021	0.70704
VA43_D5_PL5_1int	TB	0.011	0.70739	0.00017	0.70737
VA43_D5_PL5_2n	TB	0.140	0.70833	0.00023	0.70806

M-G – melagabbro; M-MG – melamonzogabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro; LG – layered gabbro; TB – trachybasalt.

Table 13. Sr-Nd-Pb whole-rock isotope data of representative samples from José Fernandes Gabbro presented in Almeida et al. (*unpublished*); Sr and Nd initial ratios were calculated for 134 Ma.

Sample	Rb (ppm)	Sr (ppm)	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(t)	Sm	Nd	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±	εNd(t)	TDM (Ma)
VA43RA	39.79	542.40	0.212	0.70553	0.00004	0.70512	7.12	38.68	0.1113	0.512299	0.000006	-5.16	1110
VA43RD	36.40	689.00	0.153	0.70735	0.00002	0.70705	6.43	34.23	0.1136	0.512216	0.000007	-6.81	1259
VA46A	25.03	1107.27	0.065	0.70588	0.00002	0.70576	6.05	30.96	0.1182	0.512256	0.000007	-6.10	1256
VA48A	85.24	1007.01	0.245	0.70993	0.00003	0.70947	9.26	56.29	0.0995	0.512104	0.000007	-8.76	1253
VA60A	51.59	1336.40	0.112	0.70856	0.00002	0.70835	5.65	34.48	0.0992	0.512118	0.000006	-8.47	1231
VA44RA	40.50	2009.00	0.058	0.70664	0.00002	0.70652	4.91	31.22	0.0951	0.512245	0.000007	-5.93	1029
VA41A	112.44	780.54	0.417	0.71002	0.00006	0.70922	9.55	59.82	0.0965	0.512060	0.000006	-9.55	1278
VA41B	148.86	792.13	0.544	0.71170	0.00005	0.71066	9.93	62.70	0.0957	0.512008	0.000007	-10.56	1337
VA81	156.36	816.22	0.555	0.71219	0.00002	0.71113	11.01	67.63	0.0985	0.512013	0.000005	-10.50	1361
VA41D1	61.40	687	0.259	0.70615	0.00005	0.70566	7.50	42.60	0.1065	0.512435	0.000007	-2.41	871
VA41D2	39.47	611.43	0.187	0.70555	0.00007	0.70520	9.11	52.86	0.1043	0.512521	0.000007	-0.71	738
VA43D1	94.92	1488.85	0.184	0.70569	0.00006	0.70534	12.51	76.53	0.0988	0.512361	0.000005	-3.73	911
VA43D3	28.78	750.23	0.111	0.70512	0.00005	0.70490	9.49	51.91	0.1105	0.512415	0.000006	-3.98	934
VA43D5	83.10	785.00	0.306	0.70739	0.00002	0.70680	8.97	51.62	0.1051	0.512209	0.000007	-6.79	1171
VA43RB	82.84	887.97	0.267	0.70711	0.00007	0.70659	9.59	57.70	0.1005	0.512206	0.000007	-6.78	1128
VA67D1	37.01	585.19	0.183	0.70525	0.00002	0.70490	7.31	40.65	0.1087	0.512488	0.000006	-1.42	815
Sample	Th	U	Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pbm	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pbm	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pbm	²³² Th/ ²³⁸ U	²³⁸ U/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pbi	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pbi	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pbi		
VA43RD	2.89	0.64	5.25	18.276	15.597	38.791	4.650	7.779	18.113	15.589	38.550		
VA48A	10.3	2.41	15.2	18.690	15.649	38.993	4.432	10.181	18.476	15.639	38.693		
VA44RA	4.16	0.95	6.92	18.327	15.579	38.767	4.549	8.698	18.144	15.570	38.504		
VA41A	13.4	3.08	15.6	18.723	15.637	39.015	4.515	12.675	18.456	15.624	38.635		
VA41B	18.10	4.60	20.32	18.980	15.667	39.115	4.063	14.633	18.672	15.652	38.719		
VA41D1	7.33	1.45	7.60	17.914	15.499	38.391	5.224	12.004	17.662	15.487	37.974		
VA41D2	10.2	1.38	30.9	18.133	15.519	38.478	7.591	2.826	18.074	15.516	38.336		
VA43D1	14.82	2.81	15.77	18.083	15.507	38.681	5.451	11.287	17.846	15.496	38.271		
VA43D5	8.29	1.75	9.65	18.246	15.559	38.837	4.909	11.507	18.005	15.547	38.461		
VA67D1	4.89	1.03	4.64	17.745	15.459	38.181	4.920	13.842	17.454	15.444	37.728		

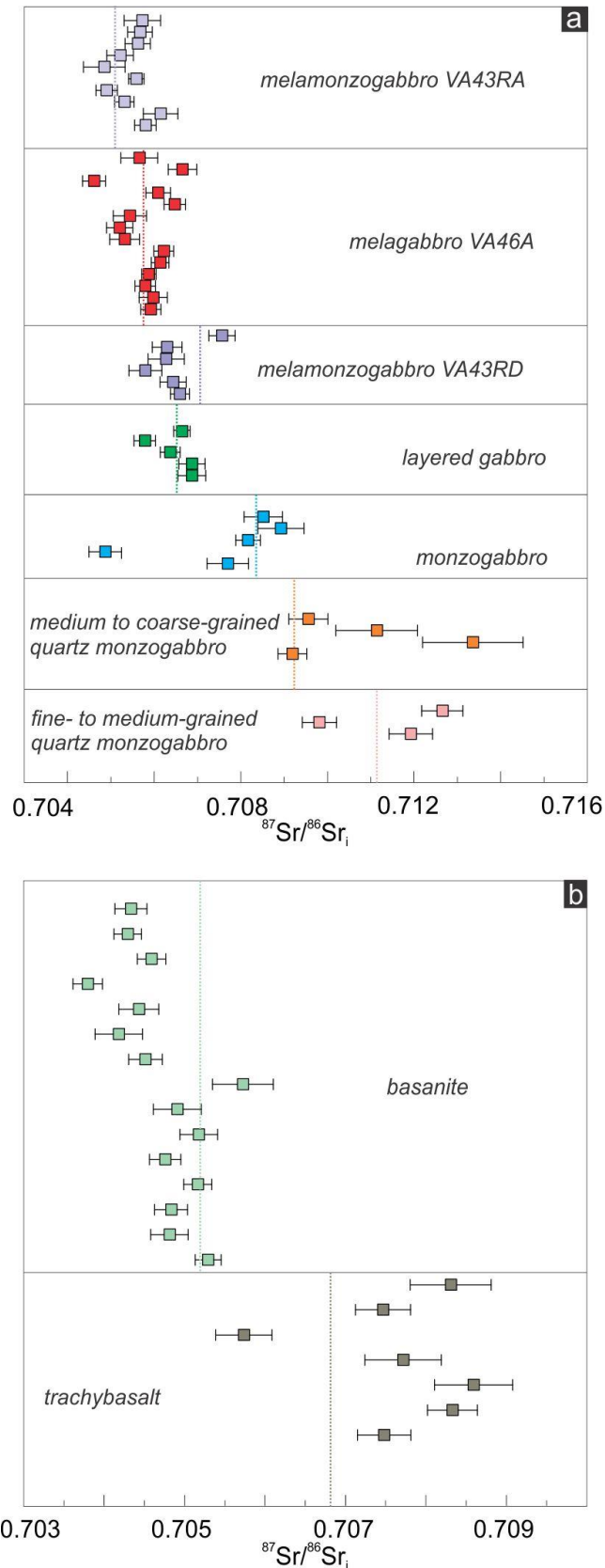


Figure 19. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ of clinopyroxene crystals of (a) gabbroic rocks and (b) dykes. The dotted lines represent whole-rock $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of the respective samples. Error bars are 1σ .

Table 14. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of clinopyroxene crystals from gabbroic samples and phenocrysts from basanite dykes.

Sample	Lithotype	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1s	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$	Sample	Lithotype	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	1s	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$
VA46A_CPX3_1	M-G	0.031	0.70571	0.00042	0.70565	VA44RA_Cpx2_3	LG	0.009	0.70638	0.00023	0.70637
VA46A_CPX3_2	M-G	0.009	0.70667	0.00033	0.70665	VA44RA_Cpx4_1	LG	0.019	0.7069	0.0003	0.70687
VA46A_CPX3_3	M-G	0.009	0.70463	0.00026	0.70461	VA44RA_Cpx4_2	LG	0.535	0.70785	0.00032	0.70683
VA46A_CPX3_4	M-G	0.172	0.70641	0.00028	0.70608	VA43RD_Cpx2_2	M-MG	0.012	0.70759	0.0003	0.70756
VA46A_CPX2_1	M-G	0.039	0.70655	0.00025	0.70647	VA43RD_Cpx2_3	M-MG	0.013	0.70632	0.00034	0.7063
VA46A_CPX2_2	M-G	0.009	0.70545	0.00038	0.70544	VA43RD_Cpx2_4	M-MG	0.034	0.70633	0.00042	0.70627
VA46A_CPX2_3	M-G	0.017	0.70523	0.0003	0.7052	VA43RD_Cpx2_5	M-MG	0.028	0.70585	0.00038	0.70579
VA46A_CPX2_4	M-G	0.015	0.70534	0.00034	0.70531	VA43RD_Cpx1_1	M-MG	0.010	0.70645	0.00031	0.70643
VA46A_CPX2_5	M-G	0.003	0.70623	0.00023	0.70622	VA43RD_Cpx1_2	M-MG	0.059	0.7067	0.00022	0.70659
VA46A_CPX2_6	M-G	0.003	0.70614	0.0002	0.70614	VA43RA_Cpx1_1	M-MG	0.054	0.70582	0.00042	0.70572
VA46A_CPX2_7	M-G	0.025	0.70592	0.00017	0.70587	VA43RA_Cpx1_2	M-MG	0.220	0.70608	0.00029	0.70566
VA46A_CPX5_1	M-G	0.003	0.7058	0.00024	0.70579	VA43RA_Cpx1_3	M-MG	0.087	0.70578	0.00029	0.70561
VA46A_CPX5_2	M-G	0.004	0.70598	0.00033	0.70598	VA43RA_Cpx6_1	M-MG	0.140	0.70547	0.0003	0.7052
VA46A_CPX5_3	M-G	0.020	0.70596	0.00023	0.70592	VA43RA_Cpx6_2	M-MG	0.493	0.70575	0.00048	0.70481
VA60A_CPX3_1	MG	0.219	0.70892	0.00044	0.7085	VA43RA_Cpx3_1	M-MG	0.003	0.70559	0.00018	0.70558
VA60A_CPX3_2	MG	0.068	0.70905	0.00053	0.70892	VA43RA_Cpx3_2	M-MG	0.011	0.70492	0.00025	0.7049
VA60A_CPX7_1	MG	0.091	0.70833	0.00028	0.70816	VA43RA_Cpx3_3	M-MG	0.014	0.70534	0.00023	0.70531
VA60A_CPX7_2	MG	0.011	0.70489	0.00038	0.70487	VA43RA_Cpx2_1	M-MG	0.262	0.70663	0.0004	0.70613
VA60A_CPX7_3	MG	0.495	0.7086	0.00048	0.70766	VA43RA_Cpx2_2	M-MG	0.102	0.70598	0.00025	0.70579
VA41A_CPX5_1	CQMG	0.202	0.70993	0.00045	0.70954	VA67D1_CPX1_1	BT	0.012	0.70575	0.00038	0.70572
VA41A_CPX5_2	CQMG	0.922	0.71283	0.00094	0.71107	VA67D1_CPX2_1	BT	0.000	0.70491	0.0003	0.70491
VA41A_CPX7_1	CQMG	1.765	0.71659	0.00116	0.71323	VA67D1_CPX2_2	BT	0.068	0.7053	0.00023	0.70517
VA41A_CPX4_1	CQMG	0.067	0.70931	0.00033	0.70919	VA67D1_CPX4_1	BT	0.000	0.70476	0.0002	0.70476
VA43D5_CPX1_1	TB	0.241	0.70875	0.0005	0.70829	VA67D1_CPX4_2	BT	0.001	0.70517	0.00018	0.70516
VA43D5_CPX1_2	TB	0.124	0.7077	0.00034	0.70746	VA67D1_CPX4_3	BT	0.002	0.70484	0.00021	0.70483
VA43D5_CPX2_1	TB	0.019	0.70577	0.00035	0.70573	VA67D1_CPX3_1	BT	0.001	0.70481	0.00023	0.70481
VA43D5_CPX2_2	TB	0.034	0.70778	0.00048	0.70771	VA67D1_CPX3_2	BT	0.035	0.70536	0.00016	0.70529
VA43D5_CPX2_3	TB	0.006	0.7086	0.00049	0.70859	VA41D2_CPX1_1	BT	0.002	0.70434	0.0002	0.70433
VA43D5_CPX6_1	TB	0.007	0.70834	0.00031	0.70833	VA41D2_CPX1_2	BT	0.003	0.7043	0.00017	0.70429
VA43D5_CPX6_2	TB	0.028	0.70753	0.00033	0.70748	VA41D2_CPX1_3	BT	0.001	0.70459	0.00018	0.70459
VA81_CPX2_1	FQMG	0.186	0.71299	0.00048	0.71264	VA41D2_CPX2_1	BT	0.007	0.70381	0.00018	0.70379
VA81_CPX4_1	FQMG	0.249	0.71027	0.00039	0.7098	VA41D2_CPX2_2	BT	0.072	0.70456	0.00025	0.70443
VA81_CPX4_2	FQMG	0.141	0.71218	0.0005	0.71191	VA41D2_CPX3_1	BT	0.009	0.7042	0.0003	0.70418
VA44RA_cpx2_1	LG	0.014	0.70666	0.00019	0.70664	VA41D2_CPX3_2	BT	0.013	0.70454	0.00021	0.70451
VA44RA_cpx2_2	LG	0.011	0.7058	0.00025	0.70578						

M-G – melagabbro; MG – monzogabbro; M-MG – melamonzogabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro; FQMG – fine- to medium-grained quartz monzogabbro; LG – layered gabbro; TB – trachybasalt; BT – basanite.

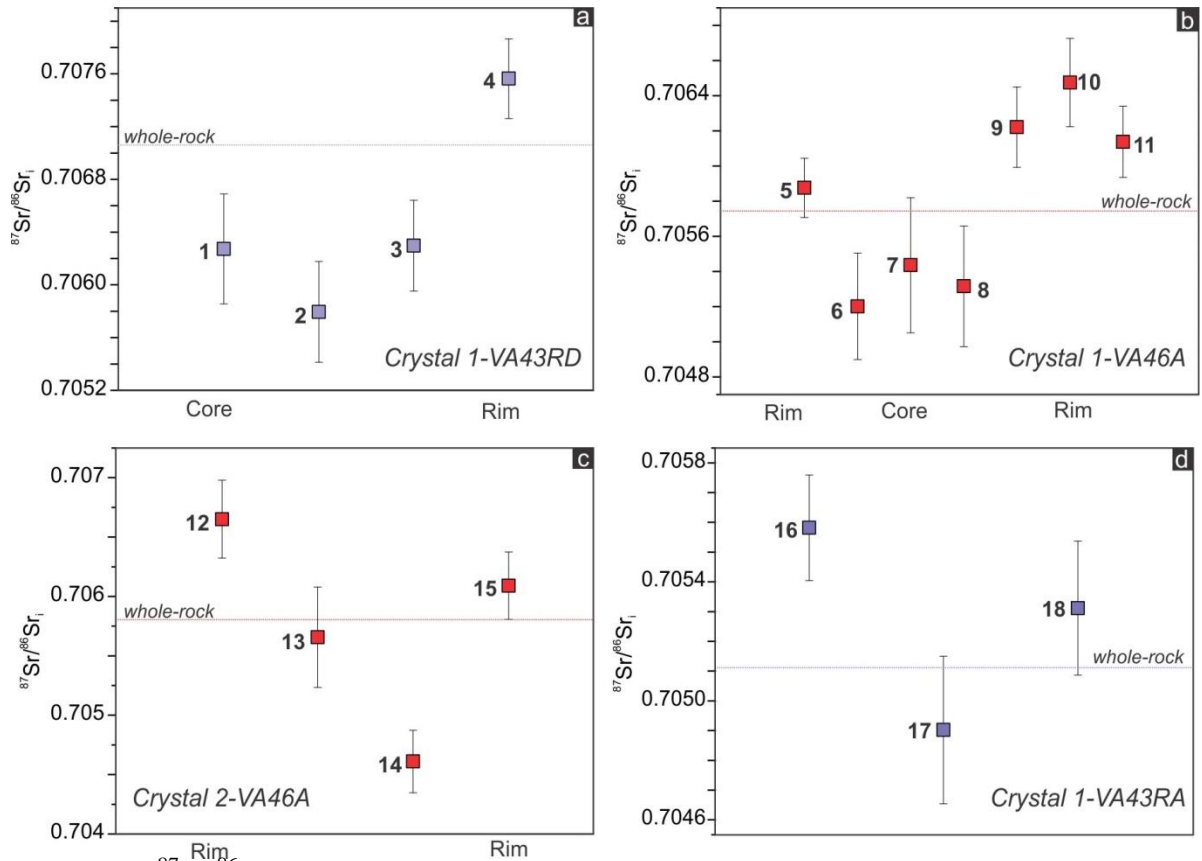


Figure 20. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of clinopyroxene crystals from melagabbro-melamonzogabbro samples. The numbers referred to the rasters in figure 7. Error bars are 1σ .

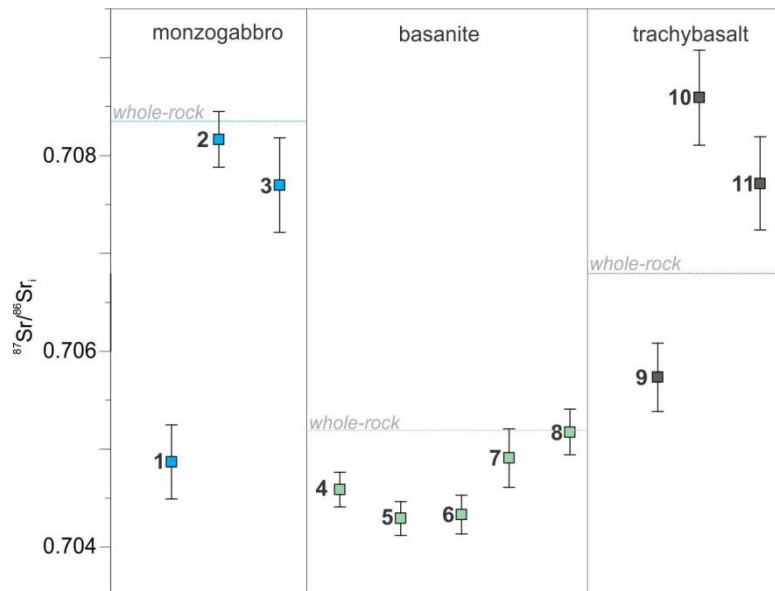


Figure 21. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios of clinopyroxene crystals from monzogabbro, basanite and trachybasalt samples. The numbers referred to the rasters indicated in figure 9. Error bars are 1σ .

6.2. *Pb isotopes in alkali feldspar*

Pb isotopic ratios from Kfs from the José Fernandes Gabbro are variable (Figure 22). The lower ratios were measured in Kfs from a syenitic pocket enclosed in melamonzogabbro (average $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.9$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.5$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.3$); Kfs from a melamonzogabbro from the same outcrop are slightly more radiogenic (VA43RA; average 18.3, 15.6, 38.4, respectively). More radiogenic ratios are found in Kfs from more evolved rocks such as monzonite, monzogabbro and quartz monzogabbro (18.5-18.8, 15.6-15.7, 38.7-39.0) (Figure 22a-b, Table 15). Positive correlations are well defined between the Pb isotope ratios according to rock types (Figure 22a-b) and follow the same trend observed in whole-rock Pb isotopes, where for $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i \times (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_i$ the linear trend defined is deflected to lower $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ values, indicative of a low time-integrated Th/U component (Almeida et al., *unpublished*).

6.3. *Oxygen isotopes in zircon*

Oxygen isotopes were determined in euhedral homogeneous, up to 200 μm long zircon crystals from a fine- to medium-grained quartz monzogabbro (VA81) that were dated at ~ 134 Ma by U-Pb TIMS. The $\delta^{18}\text{O}$ range from $6.73 \pm 0.16\text{‰}$ to $7.51 \pm 0.22\text{‰}$ (2σ) (Figure 23, Table 16); no core-rim differences were identified.

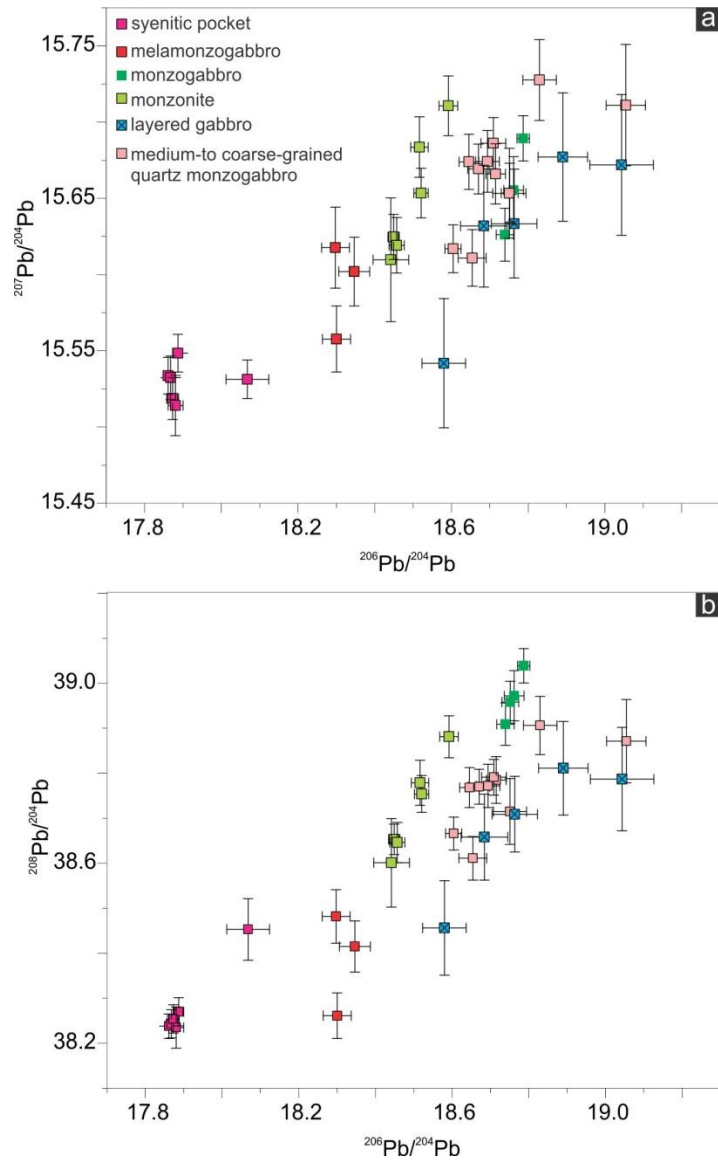


Figure 22. Pb isotopic signatures of K-feldspar crystals according to rock type. (a) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and (b) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ vs $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios. Error bars are 1σ .

Table 15. Pb isotope ratios of K-feldspar crystals from gabbroic samples and syenitic pocket enclosed in melamonzogabbro.

Sample	Lithotype	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	1σ
VA48A_FK1_1int	MON	18.5166	0.0225	15.6837	0.0199	38.7789	0.0500
VA48A_FK1_2int	MON	18.5205	0.0186	15.6535	0.0162	38.7544	0.0409
VA48A_FK2_1n	MON	18.4489	0.0147	15.6247	0.0148	38.6534	0.0336
VA48A_FK2_2b	MON	18.4568	0.0198	15.6192	0.0182	38.6461	0.0449
VA48A_FK3_1n	MON	18.5922	0.0241	15.7108	0.0196	38.8806	0.0465
VA48A_FK3_2b	MON	18.4421	0.0468	15.6097	0.0406	38.6011	0.0984
VA43_RC_FK2_1	EC	17.8865	0.0138	15.5484	0.0124	38.2701	0.0312
VA43_RC_FK2_2	EC	17.8611	0.0115	15.5337	0.0120	38.2378	0.0273
VA43_RC_FK1_1	EC	18.0677	0.0558	15.5313	0.0127	38.4532	0.0684
VA43_RC_FK1_2	EC	17.8681	0.0133	15.5323	0.0143	38.2434	0.0311
VA43_RC_FK3_1	EC	17.8732	0.0155	15.5187	0.0138	38.2540	0.0318
VA43_RC_FK3_2	EC	17.8806	0.0197	15.5141	0.0198	38.2346	0.0455
VA60A_FK6_1b	MG	18.7393	0.0224	15.6262	0.0174	38.9086	0.0470
VA60A_FK6_2n	MG	18.7519	0.0220	15.6535	0.0195	38.9580	0.0466
VA60A_FK8_1b	MG	18.7620	0.0254	15.6553	0.0220	38.9715	0.0559
VA60A_FK8_2n	MG	18.7869	0.0161	15.6894	0.0148	39.0393	0.0381
VA43RA_FK5_2n	M-MG	18.2976	0.0361	15.6176	0.0266	38.4818	0.0594
VA43RA_FK9_2n	M-MG	18.3003	0.0370	15.5577	0.0217	38.2608	0.0506
VA43RA_FK9_1n	M-MG	18.3467	0.0403	15.6020	0.0225	38.4153	0.0566
VA44RA_FK8_2b	LG	18.8904	0.0647	15.6771	0.0421	38.8113	0.1040
VA44RA_FK5_1b	LG	18.5800	0.0570	15.5418	0.0424	38.4562	0.1050
VA44RA_FK5_2b	LG	18.7634	0.0593	15.6334	0.0357	38.7095	0.0842
VA44RA_FK3_1n	LG	18.6844	0.0609	15.6318	0.0399	38.6580	0.0957
VA44RA_FK8_1n	LG	19.0435	0.0827	15.6719	0.0461	38.7872	0.1150
VA41A_FK1_1	CQMG	19.0542	0.0513	15.7112	0.0398	38.8708	0.0925
VA41A_FK2_2int	CQMG	18.6042	0.0208	15.6170	0.0157	38.6665	0.0364
VA41A_FK3_1n	CQMG	18.6541	0.0365	15.6109	0.0186	38.6111	0.0485
VA41A_FK3_2n	CQMG	18.7513	0.0431	15.6534	0.0294	38.7148	0.0731
VA41A_FK3_3int	CQMG	18.7153	0.0255	15.6660	0.0198	38.7853	0.0517
VA41A_FK3_4n	CQMG	18.6454	0.0254	15.6740	0.0181	38.7680	0.0445
VA41A_FK3_5n	CQMG	18.6704	0.0280	15.6693	0.0163	38.7702	0.0388
VA41A_FK8_1int	CQMG	18.6940	0.0306	15.6742	0.0202	38.7716	0.0483
VA41A_FK8_2int	CQMG	18.7094	0.0320	15.6863	0.0168	38.7912	0.0395
VA41A_FK2_1int	CQMG	18.8298	0.0437	15.7277	0.0265	38.9059	0.0647

M-G – melagabbro; MG – monzogabbro; MON – monzonite; M-MG – melamonzogabbro; CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro.

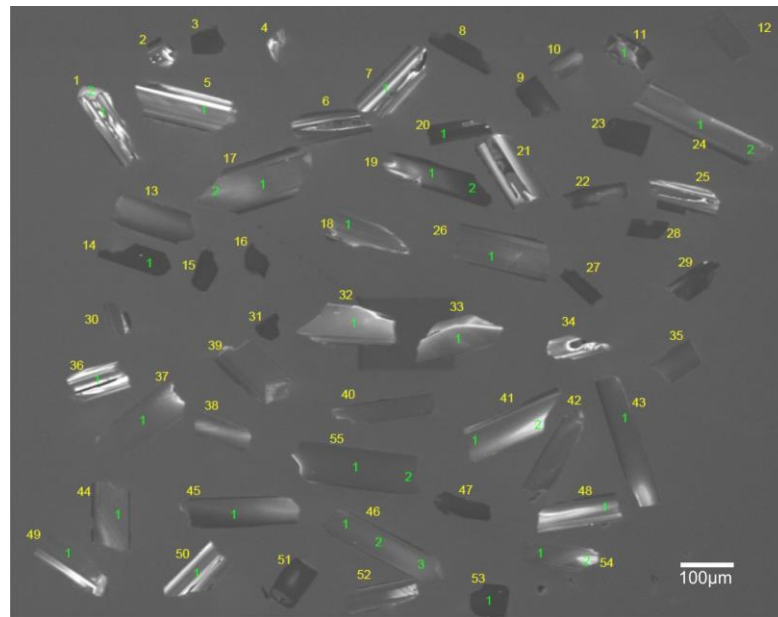


Figure 23. Cathodoluminescence of zircon crystals from fine- to medium-grained quartz monzogabbro sample (VA81) used for oxygen isotope analyses.

Table 16. Oxygen isotopes of zircon crystals from fine- to medium-grained quartz monzogabbro (VA81).

Crystal_point	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	1 σ (%) inter-session	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)	2 σ (‰) inter-session
1_1	0.00201995	0.0071	7.36	0.14
1_2	0.00201990	0.0099	7.33	0.20
5_1	0.00201992	0.0074	7.34	0.15
7_1	0.00202011	0.0070	7.44	0.14
20_1	0.00201869	0.0082	6.73	0.16
11_1	0.00201963	0.0077	7.20	0.15
24_1	0.00201996	0.0106	7.36	0.21
24_2	0.00201981	0.0089	7.29	0.18
26_1	0.00201999	0.0079	7.37	0.16
19_1	0.00201977	0.0073	7.26	0.15
19_2	0.00201943	0.0088	7.10	0.18
18_1	0.00201989	0.0072	7.32	0.14
17_1	0.00201981	0.0091	7.28	0.18
17_2	0.00201976	0.0079	7.26	0.16
14_1	0.00201888	0.0088	6.82	0.18
36_1	0.00202014	0.0096	7.45	0.19
37_1	0.00202026	0.0111	7.51	0.22
44_1	0.00202013	0.0081	7.44	0.16
49_1	0.00202002	0.0078	7.39	0.16
45_1	0.00201962	0.0091	7.19	0.18
50_1	0.00202008	0.0086	7.42	0.17
55_1	0.00202008	0.0085	7.42	0.17
55_2	0.00201968	0.0108	7.22	0.22
32_1	0.00201992	0.0083	7.34	0.17
33_1	0.00202020	0.0076	7.48	0.15
41_1	0.00201983	0.0073	7.30	0.15
41_2	0.00201995	0.0071	7.36	0.14
43_1	0.00201995	0.0090	7.36	0.18
48_1	0.00202015	0.0081	7.45	0.16
54_1	0.00201985	0.0088	7.31	0.18
54_2	0.00202010	0.0070	7.43	0.14
53_1	0.00201916	0.0086	6.96	0.17
46_1	0.00201989	0.0089	7.33	0.18
46_2	0.00201981	0.0103	7.29	0.21
46_3	0.00201971	0.0090	7.24	0.18

7. Discussion

7.1. Significance of chemical zoning and trace element distribution

The presence of marked compositional zoning in minerals considering some elements can indicate that no subsolidus reequilibration occurred due to diffusive exchange (e.g., Azzone et al., 2013). In José Fernandes Gabbro, the evolution trends of Cpx, Opx and Ol from the gabbroic samples indicate a Fe-enrichment that is also observed in whole-rock geochemistry, interpreted as evidence for fractional crystallization (Almeida et al., *unpublished*). The chemical zoning of Pl crystals is related to variations in An content mostly in the form of oscillatory zoning, while the compositional variations observed within Cpx crystals from both gabbroic rocks and alkaline dykes are related to TiO₂ and MgO contents usually with more primitive cores with relict compositions and rims with more evolved signatures. The major-element zoning in Cpx is also coupled with variations in trace element

content. More primitive compositions (higher Mg#) also are Cr-rich, and have lower REE content. Evolved samples such as quartz monzogabbro also show small Cpx crystals with Fe-enrichment and higher REE content while small Cpx crystals show negative Eu anomalies, that is a signature usually found in low-Ca pyroxene depending on the oxygen fugacity (e.g., Schwandt and McKay, 1998). Higher Ni content is also observed in Ol with high Mg# (melamonzogabbro) as a more primitive signature (e.g., Foley et al., 2013), while iron-rich Ol show detectable contents of HFS elements (e.g., Zr) and HREE indicating a more evolved composition (e.g., Bulle and Layne, 2016).

7.2. The composition of the melt

The Mg# values of the melt in equilibrium with Ol from gabbroic samples and alkaline dykes were calculated using the Mg# of Ol crystals and a partition coefficient (Kd) of 0.31 that represents the average of NBO/T (non-bridging oxygen/ tetrahedrally coordinated cations) determined by Mysen (1987) for basanite. The highest Mg# values were estimated for basanite dykes (Mg# 60 and 66) (Table 3), which is in similar to the estimated for basanite from Juquiá alkaline intrusion by Azzone et al. (2013). Among the gabbroic samples only the melt in equilibrium with Ol from melamonzogabbro shows high Mg# (59) similar to the estimated for the basanite dyke (Table 3).

The trace-element composition of the melt in equilibrium with relict cores of Cpx was calculated using the Kd shown in Table 17 also used in Azzone et al. (2013) for the Juquiá alkaline intrusion. All melts show an enrichment of LREE; however, the composition estimated from basanite dyke is richer in elements more typical of alkaline magmatism (higher Nb and REE) relative to the liquid from layered gabbro and melamonzogabbro; the latter is the more depleted in REE (Figure 24). The liquid estimated from the core of Cpx from quartz monzogabbro shows more evolved signatures with higher concentration of trace-elements and a slightly negative Eu anomaly (Figure 24).

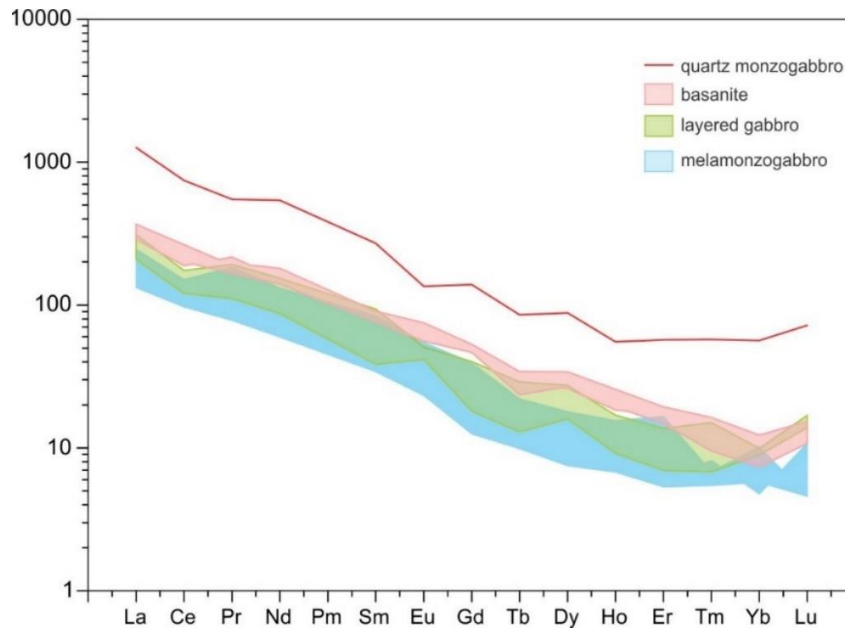


Figure 24. Interval of melt composition estimated from the relict cores of larger Cpx crystals.

Table 17. Compositions of the liquid estimated from relict cores of Cpx using partition coefficients (K_D).

Sample Lithotype	K_D	VA41A CQMG	VA41A CQMG	VA44RA LG	VA43RA M-MG	VA43RA M-MG	VA43RA M-MG	VA67D1 BT	VA67D1 BT
Sc	6.00 ^a	20.9	18.4	12.6	22.9	13.6	8.4	15.5	13.7
Ti	0.83 ^b	7016.6	11100.2	3621.0	7812.8	5053.0	3677.9	10062.5	9176.3
V	0.67 ^a	418.2	555.0	249.0	379.7	250.0	243.0	343.8	363.8
Cr	3.29 ^a	4.9	129.5	798.3	361.3	1254.9	2329.6	1043.3	929.3
Co	0.85 ^a	51.9	57.2	38.7	49.6	38.9	38.8	36.2	47.0
Ni	3.56 ^a	7.8	16.6	57.0	48.3	64.2	87.0	42.8	42.8
Zn	0.24 ^a	433.0	234.0	78.0	99.7	86.3	67.0	100.5	81.9
Sr	0.0963 ^c	405.0	776.5	890.6	1066.9	896.5	871.1	1146.0	1099.3
Y	0.438 ^c	182.9	68.0	11.2	17.1	10.2	6.4	19.3	22.4
Zr	0.121 ^c	1143.6	779.7	97.6	211.1	122.2	44.0	298.7	300.6
Nb	0.0015 ^d	300.0	360.0	60.0	173.3	60.0		140.0	113.3
La	0.0435 ^c	783.2	299.1	49.2	58.2	55.2	31.5	77.2	68.3
Ce	0.0843 ^c	1226.0	456.5	74.0	92.5	69.3	59.7	121.8	115.4
Pr	0.124 ^c	132.5	51.1	10.3	17.0	10.5	7.3	16.0	20.1
Nd	0.173 ^c	501.9	247.5	39.9	60.3	50.0	27.3	64.2	70.1
Sm	0.283 ^c	87.6	40.1	5.7	12.4	6.6	5.1	11.3	11.3
Eu	0.312 ^c	7.3	7.6	2.3	3.1	2.3	1.3	3.1	3.2
Gd	0.336 ^c	55.3	27.6	3.6	7.8	5.5	2.5	9.3	10.3
Tb	0.364 ^c	8.3	3.1	0.5	0.8	0.5	0.4	0.9	1.0
Dy	0.363 ^c	45.1	21.7	3.9	4.4	3.0	1.8	6.6	6.4
Ho	0.378 ^c	8.6	3.0	0.5	0.8	0.5	0.4	1.1	1.0
Er	0.351 ^c	20.7	9.1	1.1	2.6	1.0	0.9	2.4	2.8
Tm	0.297 ^c	3.7	1.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3
Yb	0.313 ^c	23.7	9.1	1.4	1.6	0.8	0.9	1.2	1.3
Lu	0.265 ^c	4.5	1.8	0.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.3
Hf	0.245 ^e	21.8	16.1	1.9	5.2	3.3	1.2	9.1	6.6

^aArzamastev et al. (2009), ^bDobosi and Jenner (1999), ^cFoley et al. (1996), ^dGreen et al. (2000), ^einterpolated data. CQMG – medium- to coarse-grained quartz monzogabbro, LG – layered gabbro, M-MG – melamonzogabbro, BT – basanite.

7.3. Significance of in situ Sr-Pb-O isotopes and relationship with whole-rock isotope geochemistry

The in situ Sr isotope signature of some Pl crystals indicates variations in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios that are locally lower in the rims possibly due to magma recharges with different crustal contributions (Tepley III and Davidson, 2003). The whole-rock isotopic ratios are mostly similar to those of the Pl rims, showing that some cores are in disequilibrium. Larger Cpx crystals show relict cores with $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios considerably lower than the rims and whole-rocks. These cores can be considered as antecrysts and potentially represent recycled earlier-formed cumulate phases that reacted with the magma and were subsequently mantled by new Cpx that is in equilibrium with the host magma (e.g., Davidson et al., 2007). Indeed, these cores show lower $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios similar to the obtained in Cpx phenocrysts from basanite dykes. This assumption can provide evidence that a liquid of basanite composition would have generated at least part of the gabbroic rocks by AFC. The rims of larger Cpx crystals with higher $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$ ratios also show strong evidence for crystallization from a more evolved and contaminated liquid. The whole-rock isotopic ratios in general show values that are intermediate between these isotopic variations, suggesting that the contribution of antecrystic isotopic signatures may be significant and that these phases have a representative volume in the whole-rock.

The oxygen isotope composition of zircon also reflects the effects of crustal contamination processes, as evidenced by higher than mantle values of $\delta^{18}\text{O}$. Positive correlations observed among Pb isotopic ratios of Kfs crystals from gabbroic samples also show further evidence for AFC. Lower ratios are observed in more primitive samples (e.g., melamonzogabbro) while more evolved samples (monzonite, quartz monzogabbro) show progressively higher Pb isotopic ratios with a linear trend deflected to lower $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ values, indicative of a low time-integrated Th/U component also identified in whole-rock Pb isotopic ratios, a signature typical of the upper crust (Almeida et al., *unpublished*).

8. Conclusions

Chemical zoning is a common feature especially in the main minerals from gabbroic rocks and alkaline dykes from José Fernandes Gabbro, especially Cpx and Pl. Oscillatory zoning in Pl is defined by fluctuations of the An content, whereas Cpx shows bright, chemically more primitive cores with higher Mg#, and brownish rims, with oscillatory zoning, characterized by lower Mg# and higher TiO₂. Cpx often shows REE patterns with LREE enrichment and a convex-upward shape ((La/Nd)_N<1). The major element chemical zoning is coupled with trace element variations, as primitive cores show higher Cr, while rims are enriched in HFS elements and REE. Quartz monzogabbro also shows small Cpx crystals with negative Eu anomalies, a signature often identified in low-Ca pyroxene depending on the oxygen fugacity. The highest Mg# values of the melt in equilibrium with Ol were estimated for basanite dykes (Mg# 60 and 66), and are similar to those estimated for basanite from Juquiá alkaline intrusion by Azzone et al. (2013). Among gabbroic samples only the melt in equilibrium with Ol from melamonzogabbro shows higher Mg# (59) which is similar to the estimated for the basanite. The melt in equilibrium with relict cores from Cpx has composition similar to that of the basanite with higher Nb and REE.

The Pl crystals show variations in ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i ratios, that are locally lower in the rims, indicating magma recharges with different crustal contributions. Significant Sr isotopic zoning is observed in large Cpx from gabbroic samples, whose cores with lower ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr_i, in disequilibrium with whole-rock isotopic ratios, can represent relicts of recycled earlier-formed cumulate phases subsequently rimmed by new Cpx that is in equilibrium with the host magma. These cores show isotopic ratios similar to those of Cpx phenocrysts from basanite dykes and provide further evidence that a melt with basanite composition may have generated at least part of the gabbroic rocks. Positive correlations among Pb isotopic ratios of Kfs from gabbroic samples also yielded further evidence for assimilation fractional crystallization processes and the presence of a low time-integrated Th/U contaminant, typical of the upper crust, also indicated by whole-rock Pb isotopic ratios.

Acknowledgments

The authors thank FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) (Thematic Project, Proc. 2012/06082-6) and Science Without Borders scholarship, CNPq

(Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (proc. 202043/2014-2). Barry Shaulis is acknowledged for help with the analytical work and Prof. Rogério Guitarrari Azzone for suggestions on treatment of chemical data and interpretations.

References

Almeida, V.V., Janasi, V.A., Heaman, L.M., Shaulis, B.J., Hollanda, M.H.B.M., Renne, P.R. (submitted). Contemporaneous alkaline and tholeiitic magmatism in the Ponta Grossa Arch, Paraná-Etendeka Magmatic Province: constraints from precise U-Pb zircon/baddeleyite and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite dating of the José Fernandes Gabbro and mafic dykes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Almeida, V.V. (unpublished). Crustal contamination and its role in the petrogenesis of the José Fernandes Gabbro, Paraná Magmatic Province, Brazil: evidence from whole-rock elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry.

Armstrong, J.T. 1995. CITZAF: a package of correction programs for the quantitative electron microbeam X-ray-analysis of thick polished materials, thin films, and particles. *Microbeam Analysis*, 4, 177–200.

Arzamastsev, A.A., Arzamastseva, L.V., Bea, F., Montero, P. 2009. Trace elements in minerals as indicators of the evolution of alkaline ultrabasic dike series: LA-ICPMS data for the magmatic provinces of northeastern Fennoscandia and Germany. *Petrology*, 17: 46-72

Azzone, R.G., Enrich, G.E.R., Gomes, C.B., Ruberti, E. 2013. Trace element composition of parental magmas from mafic-ultramafic cumulates determined by in situ mineral analyses: The Juquiá mafic-ultramafic alkaline-carbonatite massif, SE Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41: 5-21.

Azzone, R.G., Munoz, P.M., Enrich, G.E.R., Alves, A., Ruberti, E., Gomes, C.B. 2016. Petrographic, geochemical and isotopic evidence of crustal assimilation processes in the Ponte Nova alkaline mafic-ultramafic massif, SE Brazil. *Lithos*, 260: 58-75.

Beccaluva, L., Barbieri, M., Born, H., Brotzu, P., Coltorti, M., Conte, A., Garbarino, C., Gomes, C.B., Macciota, G., Morbidelli, L., Ruberti, E., Siena, F., Traversa, G. 1992. Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquiá, São Paulo, Brazil. *Journal of Petrology*, 33: 1371-1404.

Black, L. P., Kamo, S. L., Allen, C. M., Davis, D., Aleinikoff, J. N., Valley, J. W., Mundil, R., Campbell, I. H., Korsch, R. J., Williams, I. S., and Foudoulis, C., 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. *Chemical Geology*, 205: 115-140.

Bulle, F., Layne, G.D. 2016. Multi-element variations in olivine as geochemical signatures of Ni-Cu sulfide mineralization in mafic magma systems – examples from Voisey's Bay and Pants Lake intrusions, Labrador, Canada. *Mineralium Deposita*, 51(1): 49-69.

Davidson, J.P., Morgan, D.J., Charlier, B.L.A., Harlou, R., Hora, J.M. 2007. Microsampling and isotopic analysis of igneous rocks: implications for the study of magmatic systems. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35: 273-311.

Dobosi, G., Jenner, G.A. 1999. Petrologic implications of trace element variation in clinopyroxene megacrysts from the Nógrád volcanic province, north Hungary: a study by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Lithos*, 46: 731-749.

Foley, S.F., Jackson, S.E., Fryer, B.J., Greenough, J.D., Jenner, G.A. 1996. Trace element partition coefficients for clinopyroxene and phlogopite in an alkaline lamprophyre from Newfoundland by LAM-ICP-MS. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 629-638.

Foley, S.F., Prelevic, D., Rehfeldt, T., Jacob, D.E. 2013. Minor and trace elements in olivines as probes into early igneous and mantle melting processes. *Earth and Planetary Earth Sciences*, 363: 181-191.

Gomes, C.B., Ruberti, E., Comin-Chiaramonti, P., Azzone, R.G. 2011. Alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch, SE Brazil: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 152-168.

Green, T., Blundy, J., Adam, J., Yaxley, G. 2000. SIMS determination of trace element partition coefficients between garnet, clinopyroxene and hydrous basaltic liquids at 2-7.5 GPa and 1080-1200 °C. *Lithos*, 53: 165-187.

Haggerty, S.E. 1976. Oxidation of opaque mineral oxides in basalts.. *Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America*, 3: 1-100.

Leake, B.E. (chairman) 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219-246.

Lepage, L.D. 2003. ILMAT: an Excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry. *Computer & Geosciences*, 29 (5): 673-678.

Mathez, E.A., Waight, T.E. 2003. Lead isotopic disequilibrium between sulfide and plagioclase in the Bushveld Complex and the chemical evolution of large layered intrusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(10): 1875-1888.

McBirney, A.R., Creaser, R.A. 2003. The Skaergaard Layered Series, Part VII: Sr and Nd isotopes. *Journal of Petrology*, 44(4): 757-771.

McDonough, W.F., Sun, S.-s. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223-253.

Morbidelli, L., Gomes, C.B., Brotzu, P., D'Acquatica, S., Garbarino, C., Ruberti, E., Traversa, G. 2000. The Pariquera-Açu K-alkaline complex and Southern Brazil lithospheric mantle source characteristics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(2): 129-150.

Morimoto, N. (chairman). 1988. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*, 73: 1123-1133.

Mysen, B.O. 1987. Magmatic silicate melts: relations between bulk composition, structure and properties. In: Mysen, B.O. ed. *Magmatic Processes: Physicochemical Principles*. The Geochemical Society, Special Publication, 1: 375-395.

Ruberti, E., 1984. *Petrologia do maciço alcalino do Banhadão, PR*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo.

Ruberti, E., Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., 2005. The alkaline magmatism from the Ponta Grossa Arch. In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. eds. *Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazillian Platform*. Edusp/Fapesp, São Paulo, pp.473-521.

Schwandt, C.S.; McKay, G.A. Rare earth element partition coefficients from enstatite/melt synthesis experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62 (16): 2845-2848.

Sonoki, I.K., Garda, G.M., 1988. Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. *Boletim do Instituto de Geociências da USP, Série Científica*, 19: 63-85.

Spencer, K.J., Lindsley, D.H. 1981. A solution model for coexisting iron-titanium oxides. *American Mineralogist*, 66 (11-12): 1189-1201.

Streck, M.J. 2008. Mineral textures and zoning as evidence for open system processes. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 69: 595-622.

Sun, S.-s., McDonough, W.F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *In: Magmatism in the ocean basins*. Saunders, A.D., Norry, M.J. (eds.). Geological Society of London, London, 42: 313-345.

Tepley III, F.J., Davidson, J.P. 2003. Mineral-scale Sr-isotope constraints on magma evolution and chamber dynamics in the Rum layered intrusion, Scotland. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 628-641.

ANEXO C

MANUSCRITO

“Contemporaneous alkaline and tholeiitic magmatism in the Ponta Grossa Arch, Paraná-Etendeka Magmatic Province: constraints from precise U-Pb zircon/baddeleyite and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite dating of the José Fernandes Gabbro and mafic dykes”

Manuscrito submetido ao *Journal of Volcanology and Geothermal Research*

Contemporaneous alkaline and tholeiitic magmatism in the Ponta Grossa Arch, Paraná-Etendeka Magmatic Province: constraints from precise U-Pb zircon/baddeleyite and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite dating of the José Fernandes Gabbro and mafic dykes

Vidyã V. Almeida^{a,b}, Valdecir A. Janasi^a, Larry M. Heaman^c, Barry J. Shaulis^{c,d}, Maria Helena B. M. de Hollanda^a, Paul R. Renne^e

^aDepartamento de Mineralogia e Geotectônica, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Brazil

^bGeological Survey of Brazil (CPRM), Superintendência Regional de São Paulo (Sureg/SP)

^cDepartment of Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, Edmonton, Canada

^dCurrently: Lunar Planetary Institute, Houston, Texas, USA

^eBerkeley Geochronology Center, Berkeley, California, USA

Corresponding author

+55 11 3775 5151

email addresses: vidya@usp.br (Vidyã V. Almeida), vajanasi@usp.br (Valdecir A. Janasi)

Abstract

We report the first high-precision ID-TIMS U-Pb baddeleyite/zircon and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating phlogopite age data for diabase and lamprophyre dykes and a mafic intrusion (José Fernandes Gabbro) located within the Ponta Grossa Arch, Brazil, in order to constrain the temporal evolution between Early Cretaceous tholeiitic and alkaline magmatism of the Paraná-Etendeka Magmatic Province. The U-Pb chemically abraded zircon data yielded the best estimate for the emplacement ages for a high Ti-P-Sr basalt dyke (133.95 ± 0.16 Ma) and the José Fernandes Gabbro (134.93 ± 0.16 Ma). The youngest intrusion age of 131.31 ± 0.13 Ma was obtained for a basaltic andesite dyke, which is in agreement with previous $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating data of the Ponta Grossa Dyke Swarm and provide further support that dyke emplacement persisted for at least 3 m.y. A $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite step-heating age of

133.7±0.1 Ma from a lamprophyre dyke is identical within error to the U-Pb age of the high Ti-P-Sr basalt dyke, suggesting a coeval tholeiitic and alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch. However, the emplacement of some alkaline intrusions in this region occurred ~1 m.y. before dyke emplacement and is constrained by the José Fernandes Gabbro.

Keywords

Paraná-Etendeka Magmatic Province; alkaline magmatism; Ponta Grossa Dyke Swarm; ID-TIMS U-Pb dating; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating

1. Introduction

The Paraná-Etendeka Magmatic Province (PEMP) is often considered the classic example of a large igneous province (LIP) that formed during breakup of the supercontinent (Gondwanaland). It fits the most stringent definition of a LIP (Bryan and Ernst, 2008); large volumes of intraplate continental flood basalt (>800,000 km³; Peate and Hawkesworth, 1996) were erupted in a relatively short period of time (<5 m.y.; Thiede and Vasconcelos, 2010; Janasi et al., 2011). Although compilations of all PEMP age information indicates a relatively long duration of volcanism (~15 m.y.), the more robust $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating (e.g., Renne et al., 1992; Thiede and Vasconcelos, 2010) and U-Pb (Janasi et al., 2011; Pinto et al., 2011; Florisbal et al., 2014) dating techniques have demonstrated a relatively rapid Paraná tholeiitic lava pile formation (~3 Ma) initiated at 134 Ma.

In contrast to the amount of geochronological data for the PEMP flood basalts, there are relatively few robust age determinations for the associated alkaline magmatism. In general there are known to be at least two periods of alkaline magmatism in the PEMP (e.g., Gibson et al., 2006; Gomes et al., 2011), one in the Early Cretaceous (~139-118 Ma) and one in the Late Cretaceous (~84-72 Ma). The Early Cretaceous alkaline magmatism is exposed near the edges of Paraná Basin (Eastern Paraguay, Ponta Grossa Arch in Brazil and Uruguay) and in Damaraland, Namibia (e.g., Harris et al., 1999) (Figure 1). In Paraguay, Early Cretaceous intrusions have $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages ranging from 139 Ma to 118 Ma, and therefore both predate and post-date the main tholeiitic magmatism (Gibson et al., 2006; Comin-Chiaramonti et al., 2007; Gomes et al., 2013). In Uruguay, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Pb ages of alkaline intrusions were

emplaced between 133 to 127 Ma (Stewart et al., 1996; Muzio et al., 1999). In Damaraland, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and U-Pb ages of silicic, gabbroic and alkaline plugs range from 132 Ma to 130 Ma and are considered contemporaneous to the adjacent Etendeka lavas (Renne et al., 1996b; Wigand et al., 2004).

The Ponta Grossa Arch (PGA) in south-southeast Brazil is an area where tholeiitic and alkaline magmatism occur in close spatial association, the first represented by the prominent NW-oriented Ponta Grossa Dyke Swarm (PGDS; Figure 1), considered a feeder system to the northern Paraná lavas (Piccirillo et al., 1990; Renne et al., 1996a), and the second occurring as alkaline complexes and plugs that consist of carbonatites, lamprophyres, mafic-ultramafic and syenitic intrusions (e.g., Ruberti et al., 2005; Gomes et al., 2011). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating ages obtained on most dykes from the PGDS by Renne et al. (1996a) [recalculated for the 28.201 Ma age of the Fish Canyon sanidine flux monitor] range from 133 to 131 Ma and are similar to emplacement dates for sills from the northern Paraná Basin (Ernesto et al., 1999).

Among the alkaline intrusions of the PGA, the Jacupiranga Alkaline Complex (e.g., Gaspar, 1989) is the largest (65 km²) and has a biotite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of 132.8 Ma (Basu et al., 1993). In addition, there are a number of other Early Cretaceous alkaline intrusions in the PGA (e.g., Juquiá, Pariquera-Açu, Banhadão) but they lack modern robust geochronological data (e.g., Ruberti, 1984; Sonoki and Garda, 1988; Machado Jr., 2000).

We present the first ID-TIMS U-Pb baddeleyite-zircon ages and a $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating phlogopite age for the transitional to alkaline José Fernandes Gabbro and dykes of tholeiitic to alkaline affinity from the PGA, in order to determine more precisely their space-time relation and the extent of Early Cretaceous alkaline and tholeiitic magmatism at the PGA. The U-Pb dating of coexisting U-bearing minerals increases the potential to better understand the history and thermal evolution of a magma chamber as they can crystallize in different stages of magmatic evolution (e.g., Allibon et al., 2011) and are able to reveal, along with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, the duration of crystallization, cooling histories and discrete emplacement ages of igneous rocks from short-lived magmatic events.

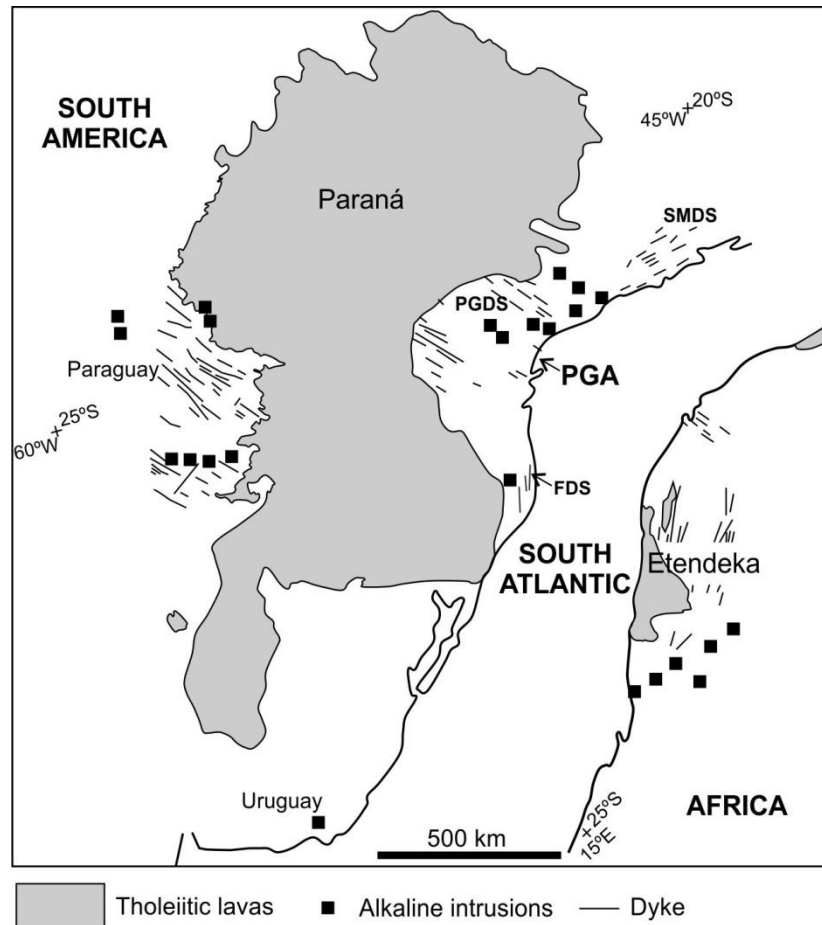


Figure 1. Pre-drift reconstruction of Paraná-Etendeka Magmatic Province (modified from Gibson et al., 2006), showing the spatial distribution of tholeiitic lavas (light grey), dyke swarms of Ponta Grossa (PGDS), Serra do Mar (SMDS) and Florianópolis (FDS) and Early Cretaceous intrusions (black squares) located at the Ponta Grossa Arch (PGA), Paraguay, Uruguay and Africa.

2. Geological Background

2.1. The PGDS and tholeiitic lavas of the Paraná Basin

The PGDS is one of the most notable tectono-magmatic features associated to the PEMP (Pinese, 1989; Piccirillo et al., 1990; Ussami et al., 1991; Raposo and Ernesto, 1995a; Raposo and Ernesto, 1995b; Renne et al., 1996a) composed of hundreds of NW-oriented diabase dykes with variable thickness that are distributed between 4 main magnetic lineaments from north to south: Guapiara, São Jerônimo-Curiúva, Rio Alonzo and Rio Piquiri (Figure 2a). The dykes cut the Precambrian crystalline basement (Figure 3a-b) and pre-volcanic sedimentary rocks from the Paraná Basin (e.g., Piccirillo et al., 1990). To some

authors the PGDS constitute a failed arm of a triple junction (Burke & Dewey, 1973; Herz, 1977; Coutinho, 2008), formed together with the other two dyke swarms: Serra do Mar, to the north (NE-oriented) and Florianópolis, to the south (NNE-oriented) (Figure 1). The majority of dykes in the PGDS are basaltic (87% of the dykes), although subordinately intermediate (~10% of the dykes) and rarely acid (~3%) dykes also occur (Marques and Ernesto, 2004). The overall composition is similar to high-TiO₂ lava-types from northern Paraná Basin: Pitanga (TiO₂>2.9 wt%, Sr>350 ppm, Ti/Y>350, Zr/Y>5.5) and Paranapanema (1.7 wt%<TiO₂<3.2 wt%, 200 ppm<Sr<450 ppm, Ti/Y>330, 2<Zr/Y<7), following the usual nomenclature for the Paraná Magmatic Province (PMP) lavas (e.g., Peate et al., 1992). Low-TiO₂ dykes (TiO₂<2 wt%) occur subordinately (Piccirillo et al., 1988; Marques, 2001).

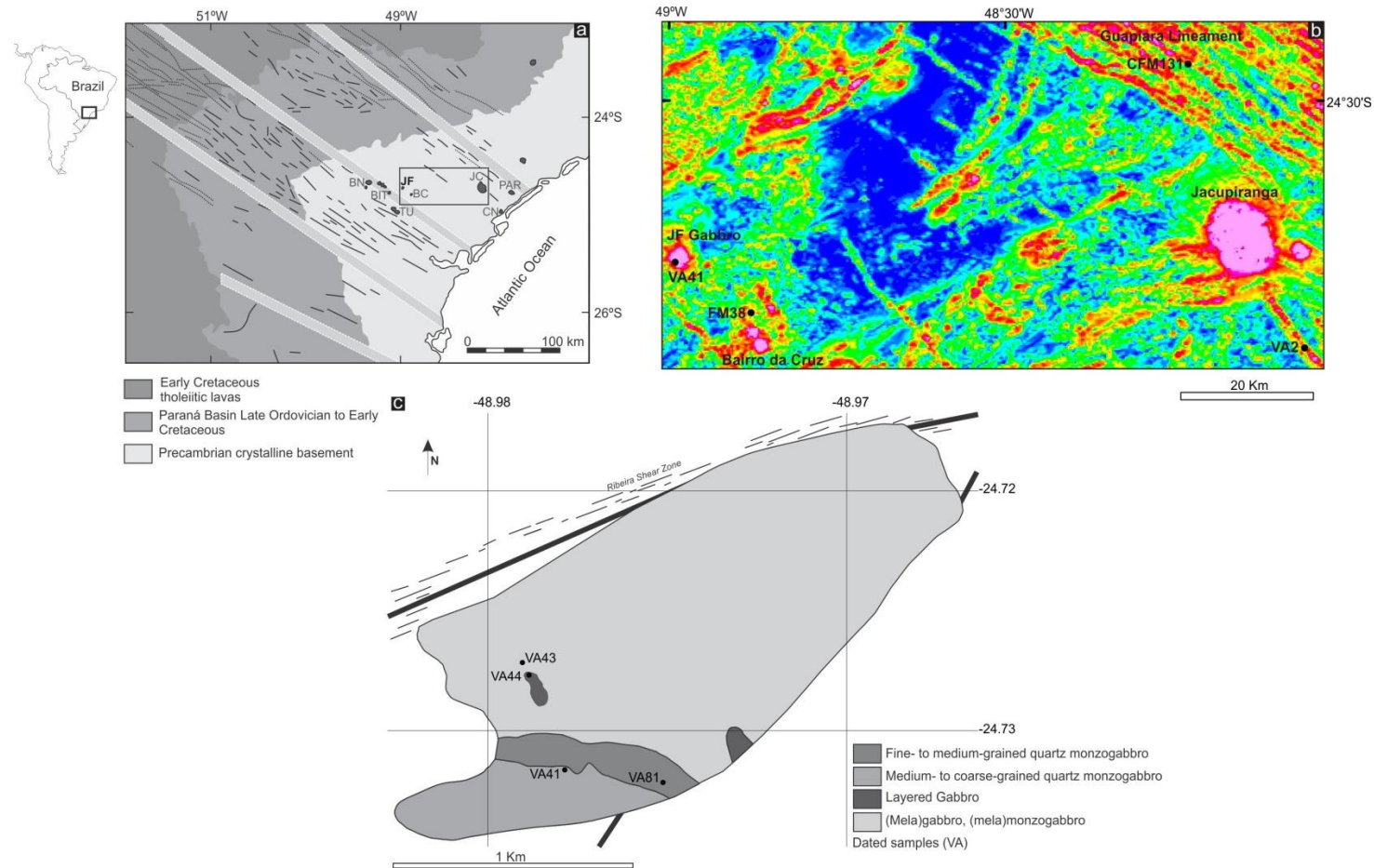


Figure 2. (a) Schematic map of the Ponta Grossa Arch (Ruberti et al., 2005) showing the main magnetic lineaments (Guapiara, São Jerônimo Curiúva, Rio Alonzo and Rio Piquiri) and the main Early and Late Cretaceous alkaline intrusions (JC – Jacupiranga, JQ – Juquiá, PAR – Pariquera-Açu, CN – Cananéia, BN – Banhadão, BIT – Barra de Itapirapuã, TU – Tunas, BC – Bairro da Cruz, JF – José Fernandes Gabbro). (b) Analytic signal of the total magnetic field showing NW-SE magnetic anomalies of the PGDS in the Guapiara Lineament, Jacupiranga Alkaline Intrusion, José Fernandes (JF) Gabbro and Bairro da Cruz (BC) Gabbro (CPRM, Paraná-Santa Catarina Aerogeophysical project, 2011). (c) Geological map of José Fernandes Gabbro.

2.2. Alkaline Magmatism within the PGA and the José Fernandes Gabbro

The region between Guapiara and São Jerônimo-Curiúva lineaments, concentrate alkaline intrusions of the PGA (Figure 2a), enclosed in the Precambrian basement of the Ribeira Belt (e.g., Faleiros et al., 2011). They consist of alkaline suites/complexes (e.g., Jacupiranga, Juquiá, Banhadão) (Gaspar, 1989; Beccaluva et al., 1992; Ruberti et al., 2012), pipes and plugs (e.g., Barra do Teixeira, Cerro Azul, Mato Preto, Sete Quedas) (Ruberti et al., 2005). Alkaline dyke swarms occur between São Jerônimo-Curiúva and Rio Alonzo lineaments (Vasconcelos and Gomes, 1998). The lithotypes vary from mafic-ultramafic, syenitic and carbonatitic with potassic affinity (Gomes et al., 2011).

The José Fernandes Gabbro is a ~3 km² mafic intrusion located close to the alkaline intrusions near São Jerônimo-Curiúva Lineament (e.g., Tunas, Banhadão, Mato Preto and Bairro da Cruz). Although the gabbro outcrops in a relatively small area, aeromagnetic data show a significant magnetic anomaly in the region of the intrusion that indicates the intrusion is relatively large and extends to greater depths (Figure 2b). Previous to this work, a K-Ar age of 190±7 Ma referred in Teixeira (1982) was the only available geochronological data. The gabbro intrudes Mesoproterozoic metasedimentary rocks of the Açungui Supergroup (quartzite, phyllite and marble) and is truncated to the north by the Ribeira Shear Zone (Figure 2c). The intrusion is composed of (mela)gabbro-(mela)monzogabbro, layered gabbro and quartz monzogabbro (Figures 2c, 3c-d), the latter records strong geochemical and isotopic evidence for crustal contamination (Almeida et al., in preparation). A fine- to medium-grained quartz monzogabbro occurs between medium- to coarse-grained quartz monzogabbro and the melagabbro unit, as a chilled margin of the silica-oversaturated unit. Up to 1m-thick NW and WNW alkaline dykes (basanite, alkali basalt, trachybasalt, tephrite and phonotephrite) cut the gabbroic rocks. Some dykes show irregular shapes and contacts with the host rock indicating a synplutonic origin.



Figure 3. (a) Boulders of diabase from a dyke that cuts the crystalline basement. (b) Sharp contact between mafic dyke (bottom) and host rock (top). (c) Boulder of layered gabbro in José Fernandes Gabbro. (d) Outcrop of quartz monzogabbro in the José Fernandes Gabbro.

3. Analytical Techniques

3.1. Whole-rock major and trace element analyses

Major and trace element whole-rock analyses were obtained at the NAP-Geoanalítica facility, Universidade de São Paulo, Brazil. The rock samples were crushed using a hydraulic press and then powdered using an agate shatter box. Major and trace element analyses were performed in fused and pressed pellet discs, respectively, by X-Ray Fluorescence, following the procedures described in Mori et al. (1999). Additional trace elements of lower concentration, including REE and HFS, were analyzed by ICP-MS, after sample dissolution by acid attack (HF-HNO₃) in Parr-type bombs, following the procedures by Navarro et al. (2008).

3.2. ID-TIMS U-Pb baddeleyite-zircon dating

Baddeleyite and zircon separation were performed at CCIM (Canadian Centre for Isotopic Microanalysis), University of Alberta, Canada. Slices of rock samples were crushed with a hammer and then pulverized using a tungsten shatter box. The resulting powder (<100 mesh) was then mixed with water and detergent, placed in an ultrasonic bath for about 20 minutes and then slowly poured by hand in a Wilfley Table, in order to obtain a heavy mineral concentrate. The baddeleyite crystals were hand-picked from this heavy mineral concentrate with the aid of a microscope. For zircon separation, part of the Wilfley Table heavy mineral concentrate was further processed through magnetic (Frantz Isodynamic Magnetic Separator) and gravimetric (Methylene Iodide) methods. The zircon crystals were then hand-selected using a moderate power stereo-microscope. Chemical abrasion (CA-TIMS) was performed on all zircon fractions generally following the procedures of Mattinson (2005); annealing times were 48 hours at 1000°C and chemical abrasion for the first zircon fractions was conducted in 24% HF for 16 hours at 170°C. Some initial zircon analyses still recorded evidence of Pb-loss after this chemical abrasion treatment (e.g., VA2-4z) so additional zircon analyses were conducted in 48% HF for 16 hours at 170°C. The baddeleyite and zircon grains selected for isotope dilution were first cleaned with acetone and dilute (~4N) HNO₃ in beakers and then loaded into PFA Teflon bombs with 48% HF:7N HNO₃ (10:1) plus a measured amount of ²⁰⁵Pb–²³⁵U spike solution, then placed in an oven for 48-72 hours at 190°C. After evaporation to dryness, the samples were converted to chloride form by adding 3N HCl and returning to the oven for another 16 hours at 190°C. The material was then transferred to plastic beakers and 1 drop of H₃PO₄ was added. The traditional anion exchange chromatography was conducted in selected fractions. The U and Pb isotopic analyses were performed on a Triton 1 thermal ionization mass spectrometer operating in multi-SEM detector mode (Sarkar et al., 2015). The isotopic composition of common Pb in excess of the blank (Pb blank is typically <1.5 pg) was estimated from the two-stage model (Stacey and Kramers, 1975). Data reduction was performed using YourLab (Schmitz and Schoene, 2007; Crowley et al., 2007), the predecessor to the Earthtime software Redux (Bowring et al., 2011). Age calculations were performed with ISOPLOT (Ludwig, 1991). The U decay constants and isotopic composition used in the calculations are those recommended by Steiger and Jäger (1977).

3.3. ^{40}Ar - ^{39}Ar step-heating

Phlogopite separation from the lamprophyre dyke was performed at CPGeo (Centro de Pesquisas Geocronológicas), Universidade de São Paulo, Brazil. The rock fragments were crushed using a steel pestle and the particles were separated by sieving. The resulting material was then cleaned with distilled water and acetone before a magnetic separation using a hand-magnet. The material was then passed through a Frantz Isodynamic Magnetic Separator with progressively increased current. The final non-magnetic material was then placed in an ultrasonic bath for about 15 minutes. For phlogopite dating, 2-3 fresh grains were selected for each fraction. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating analyses were performed at Berkeley Geochronological Center; detailed analytical procedures are described in Renne et al. (1998). The grains were loaded as replicates into a 21-pit aluminum disk together with Fish Canyon sanidine standard (Morgan et al., 2013). Neutron-flux irradiation was performed at cadmium line in-core (CLICIT) at Oregon State University TRIGA reactor for 7 hours. Data reduction, correction for nuclear interferences, background, mass discrimination, J-value determination and graphical representation were made using Mass Spec v. 8.131 software (Deino, 2001). Phlogopite and plagioclase plateau ages were calculated considering at least 50% of the Ar released and three consecutive coherent steps with a superposition in 2σ .

4. Sample Description, Petrography and Geochemistry

The samples of the PGDS were collected in the vicinity of the Guapiara Lineament (Figure 2b). Sample VA2 was collected from a dyke, whose associated aeromagnetic anomaly terminates at the edge of the Jacupiranga Alkaline Complex (Figure 2b). The rock samples are medium-grained (1-3 mm) diabase, composed of plagioclase laths and clinopyroxene (augite and pigeonite) in intergranular texture associated with magnetite and ilmenite (Figure 4a). Iron-rich olivine occurs subordinately and apatite occurs as an accessory. The two dated samples (VA2 and CFM131) show micrographic intergrowths with quartz and alkali feldspar in interstices (Figure 4b). Sample CFM131 is a basaltic andesite with 3.2 wt% TiO_2 , 405 ppm Sr, $\text{Ti}/\text{Y}=309$ and $\text{Zr}/\text{Y}=5.3$ (Table 1, Figure 5a), equivalent to the Paranapanema lava type of the northern PMP (Figure 5b). Sample VA2 is a basalt (Figure 5a) with 4.5 wt% TiO_2 , 891 ppm Sr, $\text{Ti}/\text{Y}=892$ and $\text{Zr}/\text{Y}=8.5$. This high Ti-P-Sr signature is reminiscent of the Urubici lava type whose area of occurrence is the southeastern edge of the PMP lava pile, and is absent from the lava sequence exposed west of the PGDS (Figure 5b).

Four samples from the José Fernandes Gabbro were chosen for geochronological studies: a medium- to coarse-grained melamonzogabbro (VA43) and a layered gabbro (VA44), both from the silica-saturated unit that occur in the northern portion of the intrusion, a fine- to medium-grained (VA81) and a coarse-grained (VA41) quartz monzogabbro from the silica-oversaturated unit from the southern region of the intrusion.

The melamonzogabbro (VA43) has an inequigranular texture with up to 2 cm euhedral to subhedral clinopyroxene and less abundant olivine immerse in a groundmass formed by smaller plagioclase laths, clinopyroxene, K-feldspar, Fe-Ti oxides (magnetite and ilmenite) and biotite; apatite occurs in interstices. The medium-grained (up to 3 mm crystal dimensions) layered gabbro (VA44) shows subcentimetric alternation of hololeucocratic layers composed of feldspar (andesine-labradorite and subordinately K-feldspar) and more mafic layers with concentration of plagioclase, clinopyroxene and olivine. Biotite occurs in interstices and apatite is a common accessory.

The fine- to medium-grained silica-oversaturated quartz monzogabbro (VA81) has an inequigranular texture with up to 5 mm plagioclase phenocrysts set in a fine-grained matrix with plagioclase, K-feldspar, clinopyroxene and Fe-Ti oxides; small amounts of quartz occur in interstices. The medium to coarse-grained (up to 5 mm) quartz monzogabbro (VA41) shows clinopyroxene and subordinately iron-rich olivine crystals (Figure 4c) associated with plagioclase laths and interstices with K-feldspar and quartz.

Among silica-saturated samples, the medium- to coarse-grained melamonzogabbro VA43 show lower SiO₂ and Na₂O+K₂O contents (49 wt% and 3.2 wt%, respectively) and higher MgO (9 wt%) relative to layered gabbro sample VA44 (50 wt% SiO₂, 5.8 wt% Na₂O+K₂O and 2.6 wt% MgO). SiO₂ and Na₂O+K₂O contents of silica-oversaturated samples are higher in fine- to medium-grained quartz monzogabbro VA81 (55.6 wt% and 7.3 wt%, respectively) relative to medium- to coarse-grained quartz monzogabbro VA41, suggesting the more evolved character of that sample, also evidenced by its lower MgO content (2.7 wt%). Silica-oversaturated samples show higher contents of most LILE and HFS elements, especially light rare earth elements (e.g., up to 83 ppm La), Th (up to 14 ppm) and U (up to 5 ppm). High Sr concentration is observed in layered gabbro VA44 (2009 ppm), which is indicative of plagioclase accumulation.

Sample FM38b that was subject of phlogopite Ar-Ar dating is a basanite dyke located near the São Jerônimo-Curiúva Lineament, next to the edge of the aeromagnetic anomaly associated with the Bairro da Cruz Alkaline Intrusion (Figure 2b). The sample is

petrographically classified as a phlogopite lamprophyre and shows clinopyroxene, olivine and phlogopite phenocrysts-antecrysts with up to 1 cm, embedded in a matrix essentially composed of clinopyroxene, opaque minerals and interstices with analcime (Figure 4d). Apatite crystals are also found in interstices. The sample show 42.7 wt% SiO₂, 2.7 wt% TiO₂, 9.4 wt% MgO and 5.7 wt% Na₂O+K₂O (Figure 5a; Table 1).

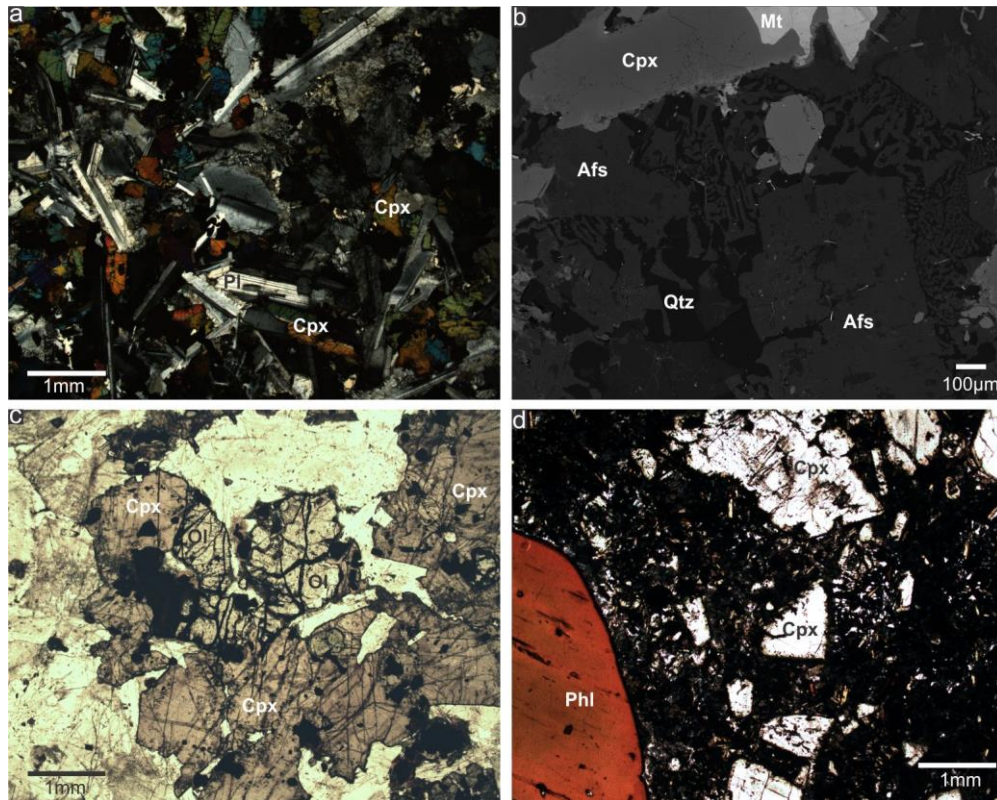


Figure 4. Transmitted-light photomicrographs of the dated samples. (a) Texture of diabase samples of the PGDS (VA2) showing plagioclase (Pl) and clinopyroxene (Cpx) crystals. (b) BSE image of micrographic intergrowth in sample VA2 between Quartz (Qtz) and Alkali feldspar (Afs). (c) Clinopyroxene and olivine (Ol) crystals in Quartz monzogabbro (VA41) of José Fernandes Gabbro. (d) Phlogopite (Phl) and clinopyroxene phenocrysts-antecrysts embedded in matrix of phlogopite lamprophyre dyke.

Table 1. Whole-rock major and trace elements of the PGDS and José Fernandes Gabbro samples.

Sample	XRF																				ICPMS		
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Loi	Total	Co	Cr	Cu	Ga	Ni	V	Y	Zn	Zr	Rb	Sr
VA2	49.34	4.552	12.52	14.48	0.187	4.57	8.19	2.65	1.88	0.694	bd	99.06	31	bd	152	25	34	440	33	121	251	41.3	891
CFM131	52.45	3.087	12.29	13.74	0.219	3.94	6.74	2.65	2.02	0.503	1.33	98.97	42	18	132	23	42	347	63	125	299	50.7	405
VA43	48.97	2.035	10.56	13.54	0.232	9.04	10.76	1.80	1.51	0.442	0.42	99.31	51	328	29	17	90	363	17	90	119	36.4	689
VA44	49.94	1.468	22.17	7.39	0.103	2.59	9.65	3.77	2.02	0.415	0.42	99.94	21	120	101	25	50	173	9	50	126	40.5	2009
VA41	52.15	2.207	14.51	10.98	0.184	4.42	6.99	2.83	3.71	0.431	0.33	98.74	31	35	37	20	27	278	23	94	267	112	781
VA81	55.64	1.948	15.53	8.90	0.163	2.70	5.61	2.98	4.29	0.451	0.10	98.32	15	bd	9	20	5	193	27	82	269	156	816
FM38b	41.73	2.596	12.00	12.14	0.212	9.21	12.19	2.40	3.20	0.697	2.59	98.97	42	266	98	18	142	333	24	94	192	86.6	1181
Sample	ICPMS																						
	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Pb	Th	U
VA2	30.6	259.0	30.9	1.01	629	44.0	96.4	12.7	53.4	10.8	3.43	9.65	1.30	6.89	1.29	3.12	0.42	2.47	0.36	7.10	6.56	4.69	1.03
CFM131	61.2	323.0	27.8	2.00	585	43.9	96.4	12.2	52.3	11.3	3.17	10.90	1.64	9.15	2.01	5.12	0.68	3.93	0.57	8.52	6.87	4.83	1.05
VA43	18.7	69.5	26.6	1.19	620	32.1	67.5	8.3	34.2	6.4	1.88	4.86	0.66	3.37	0.64	1.55	0.21	1.27	0.18	2.29	5.25	2.89	0.64
VA44	11.2	117.0	24.9	0.89	1098	42.4	79.0	8.5	31.2	4.9	2.54	3.25	0.41	2.05	0.37	0.92	0.12	0.73	0.11	2.74	6.92	4.16	0.95
VA41	22.6	148.0	48.6	2.61	1072	74.2	143.0	16.5	59.8	9.5	2.39	7.54	0.91	4.88	0.88	2.16	0.31	1.83	0.27	4.25	15.60	13.40	3.08
VA81	26.2	144.0	52.8	5.45	1183	83.1	162.0	18.0	67.6	11.0	2.59	8.67	1.02	5.61	1.05	2.61	0.37	2.18	0.34	4.69	25.30	14.10	5.02
FM38b	21.5	185.0	54.8	1.97	1686	56.9	104.0	12.2	46.5	8.4	2.51	7.40	0.94	5.07	0.93	2.22	0.30	1.75	0.26	4.96	14.70	7.53	1.53

Bd – below detection limit.

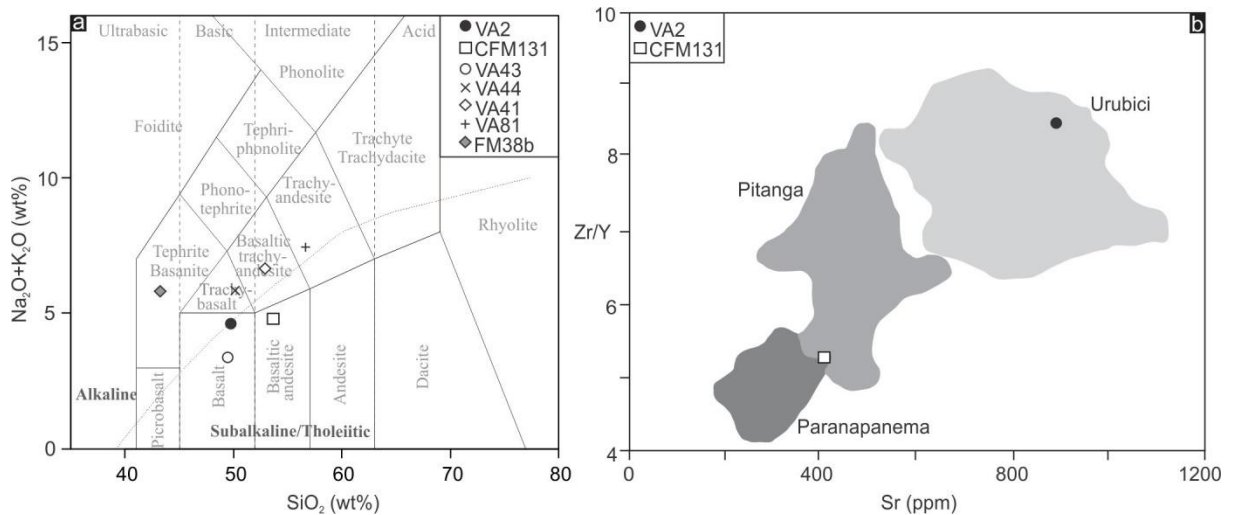


Figure 5. (a) TAS diagram (Le Bas et al., 1986) with geochemical classification of the dated samples. (b) Sr vs. Zr/Y compositions of PGDS samples with the compositional fields of the high-TiO₂ Paraná lava types (Urubici, Pitanga and Paranapanema) based on whole-rock geochemical analyses from Peate et al. (1992).

5. Baddeleyite and zircon in diabase and gabbro samples

Baddeleyite and zircon crystals were identified in thin sections with a combination of BSE (backscattered electron) imaging and EDS (Energy Dispersive Spectrometry) analyses. In the tholeiitic diabase dykes associated with the PGDS, baddeleyite (up to 220 μm) and small zircon crystals (4 μm) are included in late-crystallizing micrographic intergrowths together with quartz and alkali feldspar (Figure 6a-c). The coexistence of baddeleyite and quartz was previously identified in U-Pb dating of volcanic (Janasi et al. 2011) and subvolcanic rocks of the PMP (Florisbal et al., 2014) and seems to be a common feature in the province.

In José Fernandes Gabbro, baddeleyite crystals (up to 60 μm) from the layered gabbro are often associated with ilmenite (Figure 6d), while in quartz monzogabbro it is thinner (up to 20 μm) and usually included in clinopyroxene (Figure 6e). Zircon crystals (up to 80 μm) from the quartz monzogabbro occur as inclusions in K-feldspar and quartz (Figure 6f).

Baddeleyite crystals hand-picked from heavy-mineral concentrates are up to 120 μm in the longest dimension in PGDS samples (Figure 6g-h) and up to 100 μm in José Fernandes Gabbro samples (Figure 6i). Zircon crystals hand-picked from heavy-mineral concentrates are colorless to slightly brown and are up to 260 μm in length in PGDS (Figure 6j-k) and up to 270 μm in José Fernandes Gabbro samples (Figure 6l) where some crystals consist of long narrow prisms and fragments.

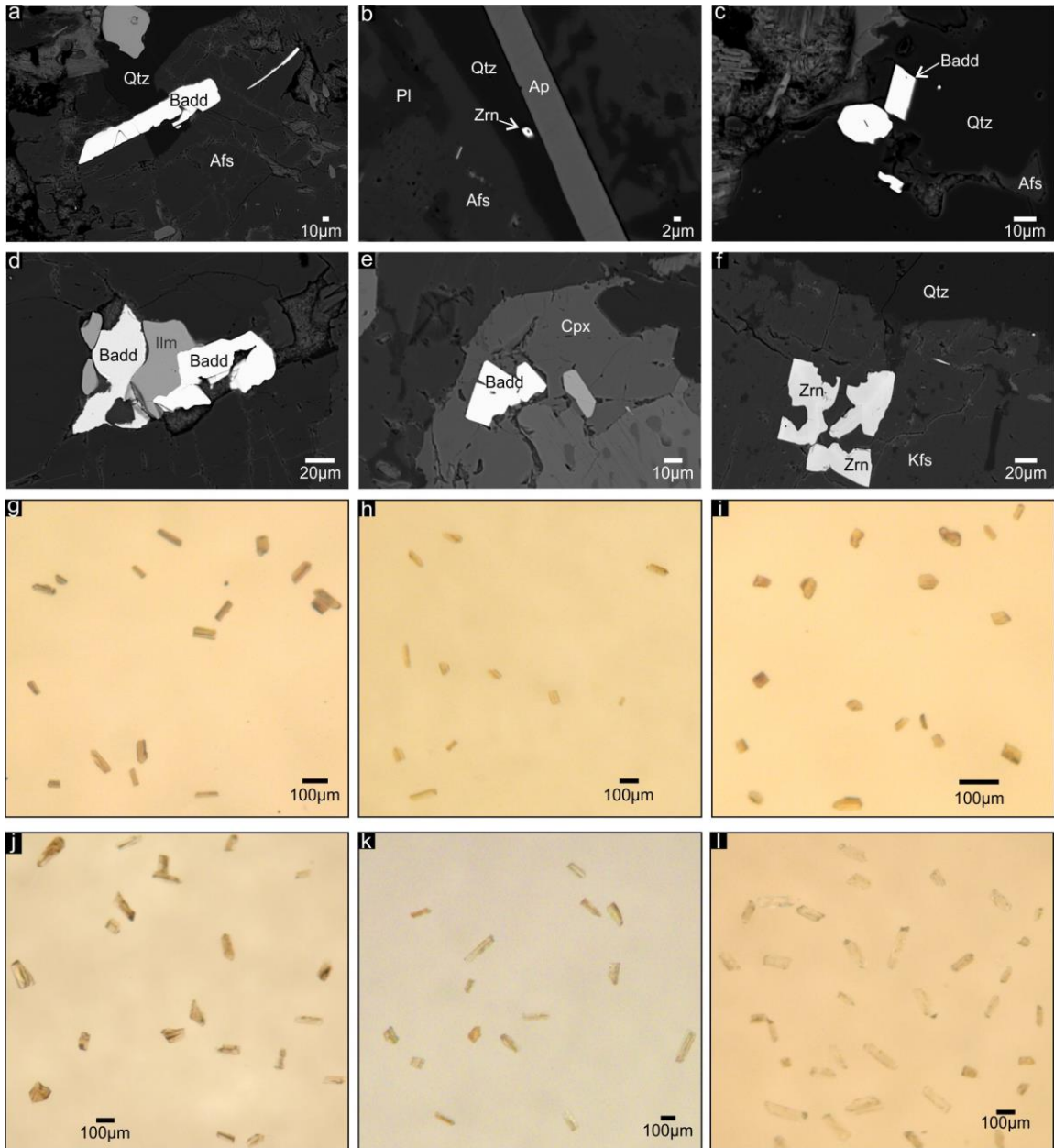


Figure 6. (a, b, c) BSE images of baddeleyite (Badd) and zircon (Zrn) crystals in PGDS samples associated with micrographic intergrowths between quartz (Qtz) and K-feldspar (Kfs). (d) Baddeleyite associated with ilmenite (Ilm) in layered gabbro from José Fernandes Gabbro. (e) Baddeleyite included in clinopyroxene in Quartz monzogabbro. (f) Zircon crystals associated with quartz and K-feldspar in quartz monzogabbro interstices. (g, h) Baddeleyite hand-picked from heavy mineral concentrate from PGDS samples (VA2 and CFM131). (i) Baddeleyite hand-picked from heavy mineral concentrate from quartz monzogabbro sample VA41. (j, k) Zircon crystals hand-picked from PGDS samples (VA2 and CFM131). (l) Zircon crystals hand-picked from fine- to medium-grained quartz monzogabbro sample (VA81).

6. Results

6.1. ID-TIMS U-Pb baddeleyite-zircon ages

6.1.2. José Fernandes Gabbro

6.1.2.1. Quartz monzogabbro (VA41 and VA81) (silica-oversaturated unit)

Two small multi-grain baddeleyite and three chemically abraded zircon fractions (fractions consisted of between 4 and 27 crystals) from sample VA41 were analysed (Table 2). Both minerals have Th/U values consistent with primary crystallization from a mafic magma (0.002-0.025 and 0.82-0.88, respectively). All fractions are concordant but display a range in $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates between 129.3 and 135.2 Ma (Figure 7). The two zircon fractions given the most extreme chemical abrasion treatment (5z and 6z) yield the oldest dates (134.6 ± 0.3 and 135.2 ± 0.2 Ma, respectively) with a weighted mean of 134.93 ± 0.16 Ma (2 sigma), slightly older than the two baddeleyite analyses (2b and 3b) with $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates of 132.7 ± 0.8 and 133.7 ± 0.3 Ma, respectively and the zircon fraction (4z; 129.3 ± 0.4 Ma) that was given a less extreme chemical abrasion treatment (Figure 7).

Due to the smaller grain size of baddeleyite and zircon, a single mineral fraction was analysed from each of the three other samples from the José Fernandes Gabbro (VA81, VA44, VA43). These three fractions (two zircon and one baddeleyite) have $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates between 131.0 and 121.5 Ma (Table 2), slightly to moderately younger than most of the analyses from VA41 (Figure 7). They do not help to constrain the emplacement age of the gabbro intrusion or duration of magmatism. The range in $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates observed and the slight difference between zircon and baddeleyite dates will be evaluated in the discussion.

Table 2. U-Th-Pb isotopic data for diabase/gabbro samples from the PGA, Brazil.

Sample	Compositional Parameters							Radiogenic Isotope Ratios							Isotopic Ages					
	Wt. mg	U ppm	Th U	Pb ppm	mol % ²⁰⁶ Pb*	Pb* Pb _c	Pb _c (pg)	²⁰⁶ Pb / ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb / ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb / ²⁰⁶ Pb	% err	²⁰⁷ Pb / ²³⁵ U	% err	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	% err	corr. coef.	²⁰⁷ Pb / ²³⁵ U	±	²⁰⁶ Pb / ²³⁸ U	±
(a,c)	(b)	(d)	(e)	(e)	(e)	(f)	(g)	(g)	(h)	(g)	(h)	(g)	(h)	(g)	(h)	(i)	(h)	(i)	(h)	
José Fernandes Gabbro																				
VA41-2b (6)	0.0015	330	0.05	14.4	74.13%	0.8	12.3	71	0.001	0.047950	3.696	0.137475	3.882	0.020794	0.589	0.384	130.79	4.76	132.67	0.77
VA41-3b (27)	0.0050	195	0.02	4.2	96.98%	8.5	2.2	607	0.008	0.049447	1.538	0.142879	1.649	0.020957	0.238	0.522	135.60	2.09	133.70	0.32
VA41-4z (4)	0.0040	325	0.80	7.8	98.32%	19.2	1.5	1084	0.261	0.048655	1.209	0.135914	1.319	0.020260	0.327	0.446	129.40	1.60	129.30	0.42
VA41-5z* (6)	0.0124	92	0.82	2.4	96.93%	10.4	2.6	598	0.268	0.048805	1.301	0.141959	1.396	0.021096	0.195	0.544	134.79	1.76	134.58	0.26
VA41-6z* (7)	0.0115	876	0.86	21.5	99.59%	81.4	3.0	4503	0.280	0.048776	0.174	0.142504	0.261	0.021189	0.158	0.758	135.27	0.33	135.17	0.21
VA81-1z (3)	0.0030	748	0.85	18.2	98.64%	24.1	2.2	1344	0.278	0.048486	0.710	0.136588	0.870	0.020431	0.453	0.581	130.00	1.06	130.38	0.58
VA44-2b (14)	0.0035	281	0.24	16.6	64.06%	0.5	38.8	51	0.074	0.045703	4.189	0.129379	4.292	0.020531	0.963	0.218	123.54	4.99	131.01	1.25
VA43-3z (4)	0.0040	678	1.67	18.2	99.06%	42.5	1.7	1952	0.547	0.048594	0.608	0.127515	0.670	0.019032	0.155	0.496	121.86	0.77	121.53	0.19
Ponta Grossa Dykes																				
VA2-2b (9)	0.0023	376	0.01	13.1	80.76%	1.1	14.1	96	0.001	0.043223	5.044	0.121180	5.311	0.020334	0.609	0.484	116.14	5.83	129.76	0.78
VA2-3b (33)	0.0050	386	0.05	8.3	96.30%	6.9	5.2	497	0.015	0.048223	1.259	0.136950	1.423	0.020597	0.511	0.482	130.32	1.74	131.43	0.66
VA2-4z (3)	0.0030	4047	1.23	60.0	98.82%	30.5	5.7	1565	0.402	0.048677	0.614	0.077065	0.741	0.011482	0.344	0.570	75.38	0.54	73.60	0.25
VA2-5z (5)	0.0022	1521	1.24	40.8	99.25%	48.1	1.8	2428	0.405	0.049061	0.451	0.142007	0.508	0.020993	0.138	0.524	134.83	0.64	133.93	0.18
VA2-6z (7)	0.0041	1915	2.02	74.7	89.99%	3.9	63.0	185	0.662	0.049005	0.733	0.141968	0.791	0.021011	0.265	0.379	134.80	1.00	134.04	0.35
CFM131-1b (1)	0.0020	138	0.16	5.9	75.03%	0.8	6.5	74	0.053	0.050080	5.640	0.142357	5.984	0.020617	0.683	0.547	135.14	7.57	131.55	0.89
CFM131-2b (12)	0.0030	393	0.06	12.3	84.22%	1.4	15.3	117	0.020	0.046608	4.986	0.129228	5.282	0.020109	0.550	0.575	123.40	6.14	128.34	0.70
CFM131-3z (5)	0.0030	1463	2.02	43.0	99.64%	119.5	1.1	5087	0.661	0.048527	0.305	0.132268	0.437	0.019769	0.281	0.720	126.13	0.52	126.19	0.35
CFM131-4z (3)	0.0050	1415	1.51	41.9	96.68%	11.3	17.1	557	0.493	0.048428	0.378	0.136817	0.459	0.020490	0.195	0.590	130.20	0.56	130.75	0.25
CFM131-6z* (4)	0.0052	1694	1.68	48.5	99.58%	95.8	2.6	4395	0.550	0.049291	0.189	0.139846	0.245	0.020577	0.104	0.693	132.91	0.31	131.30	0.14
CFM131-9z* (6)	0.0035	1040	1.55	30.3	98.56%	26.8	3.8	1280	0.507	0.048786	0.425	0.140652	0.485	0.020910	0.144	0.538	133.62	0.61	133.40	0.19

(a) 1b, 4z etc. are labels for single grain or small multi-grain fractions composed of baddeleyite and zircon, respectively. Number in parentheses indicates number of crystals

(b) Fraction weights determined with a UTM-2 ultramicrobalance; weight uncertainties are generally less than ±1 microgram.

(c) All zircon fractions annealed and chemically abraded after Mattinson (2005), those given extreme CA denoted with *.

(d) Model Th/U ratio calculated from radiogenic ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb ratio and ²⁰⁶Pb/²³⁸U age.

(e) Pb* and Pbc represent radiogenic and common Pb, respectively; mol % ²⁰⁶Pb* with respect to radiogenic, blank and initial common Pb.

(f) Measured ratio corrected for spike and fractionation only.

(g) Corrected for fractionation, spike, and common Pb; up to 1.5 pg of common Pb was assumed to be procedural blank: ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb = 18.24 ± 0.80%; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb = 15.64 ± 0.32%;

²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb = 37.50 ± 0.74% (all uncertainties 1-sigma). Excess over blank was assigned to initial common Pb.

(h) Errors are 2-sigma, propagated using the algorithms of Schmitz and Schoene (2007) and Crowley et al. (2007).

(i) Calculations are based on the decay constants of Jaffey et al. (1971). ²⁰⁶Pb/²³⁸U and ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb ages corrected for initial disequilibrium in ²³⁰Th/²³⁸U using Th/U [magma] = 3.

(j) Corrected for fractionation, spike, and blank Pb only.

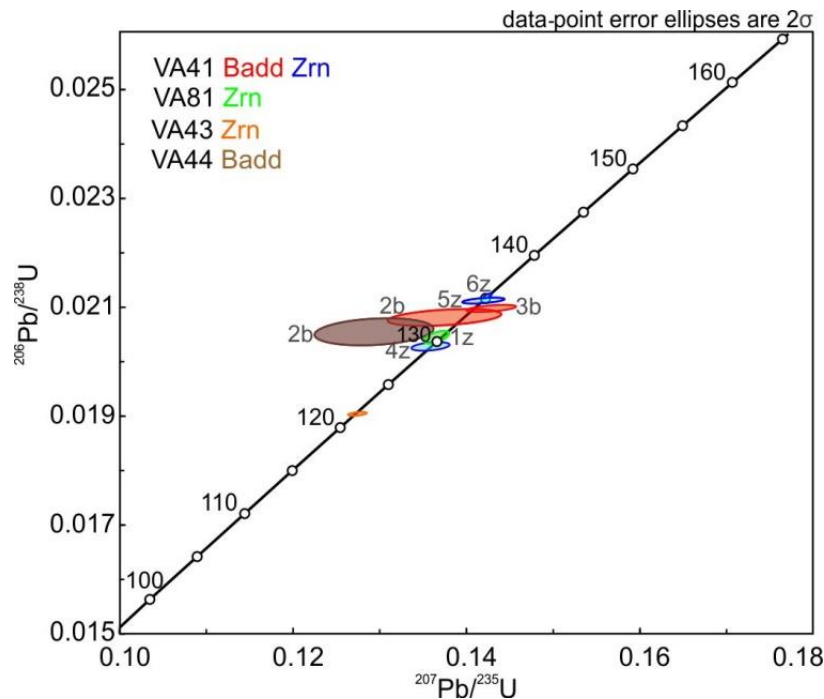


Figure 7. Concordia diagram of José Fernandes Gabbro samples.

6.1.3. PGDS

6.1.3.1. High Ti-P-Sr basalt dyke VA2

The total of five mineral fractions were analysed from this basaltic dyke (Table 2); two multi-grain baddeleyite fractions (2b and 3b; 9 and 33 grains, respectively) and three chemically abraded zircon fractions (4z-6z; consisting of between 3 and 7 grains). The geochemistry of these fractions is consistent with crystallization directly from a basaltic magma, the baddeleyites have low Th/U (0.01-0.05) and moderate uranium contents (376-386 ppm) and the zircons have high Th/U (1.23-2.02) and quite high uranium contents (1521-4047 ppm). Four of the fractions have $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates between 129.8 and 134.0 Ma; fraction 4z is highly discordant (45%) with a much younger $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ date of 73.6 Ma (Figure 8a). The high U (4047 ppm) and Th (4960 ppm) contents in zircon fraction 4z are sufficient that these grains are likely completely metamict and even after chemical abrasion still retain regions that have experienced Pb-loss. Small multi-grain zircon fractions 5z and 6z were subjected to a stronger CA pre-treatment, have lower U and Th contents, and yielded $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages that are identical within analytical uncertainty (Figure 8b). A weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ date of 133.95 ± 0.16 Ma (MSWD=0.33) calculated for these two zircon fractions is interpreted to be

the best estimate for the timing of dyke emplacement (Figure 8b). Similar to the José Fernandes Gabbro sample VA41 above, the baddeleyite analyses are slightly younger than these strongly chemically abraded zircon fractions.

6.1.3.2. *Intermediate Ti-P basaltic andesite dyke CFM131*

A total of six mineral fractions were analysed from this basaltic andesite dyke. Consistent with the other samples in this study, the baddeleyite fractions (1b and 2b) have lower uranium contents (138-393 ppm) and Th/U (0.06-0.16) compared to coexisting zircon (1040-1694 ppm and 1.51-2.02, respectively). The $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates for all six fractions vary by 7 m.y. between 126.2 and 133.4 Ma, with some overlap between the baddeleyite and zircon dates (Figure 8c). Three fractions, including both zircon and baddeleyite (1b, 4z and 6z), have similar $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates between 130.8 and 131.6 Ma and the weighted mean date of 131.18 ± 0.70 Ma (MSWD=7.7) is considered a good estimate for the emplacement age of this dyke. Two of these fractions (1b and 6z) have identical $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ dates and yield a similar but even more precise date of 131.31 ± 0.13 Ma and a much lower MSWD of 0.31. The two younger analyses (2b and 3z) are attributed to Pb-loss. The slightly older analysis (9z), with a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ date of 133.40 ± 0.19 Ma, could reflect a zircon fraction with the least amount of Pb-loss, and hence a more accurate estimate of dyke emplacement, or the presence of one or more zircon antecrysts/xenocrysts. We consider the age agreement between three fractions that include both zircon and baddeleyite to be a more persuasive argument for its emplacement age.

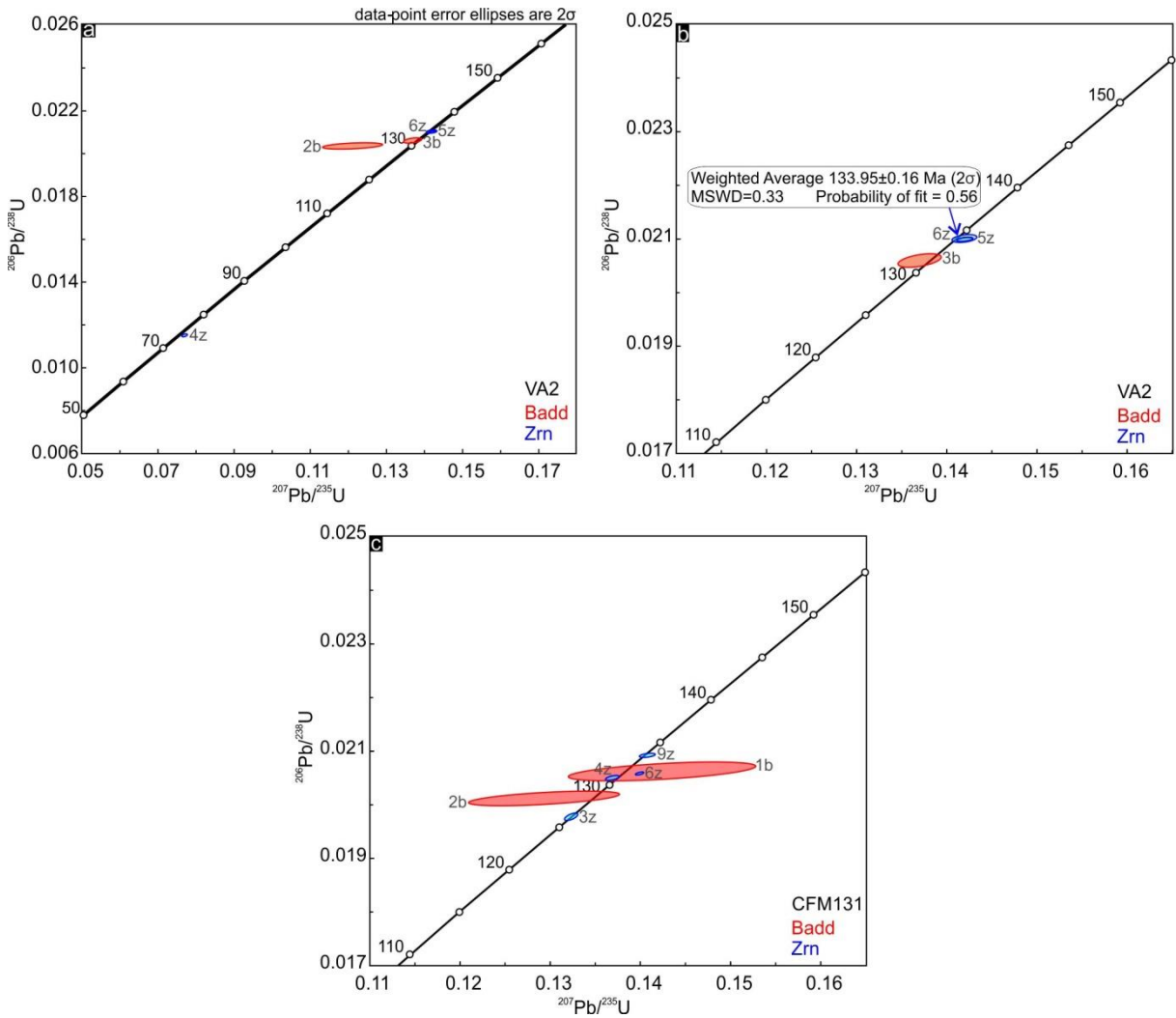


Figure 8. Concordia diagrams of PGDS samples.

6.2. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating ages

6.2.1. Phlogopite lamprophyre (FM38b)

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite step-heating data from sample FM38b are shown in Table 3 and Figure 9. Three aliquots composed of 2-3 phlogopite grains were analysed. Plateau ages of 133.28 ± 0.20 Ma, 133.81 ± 0.20 Ma and 134.01 ± 0.24 Ma were obtained in the three runs. Some steps were excluded due to low ^{40}Ar signal and larger errors. An integrated age of 133.7 ± 0.1 Ma (2σ) is the best estimate for the lamprophyre dyke, considering 26 steps of the three aliquots.

Table 3. Step heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data of phlogopite from sample FM38b.

Run	^{40}Ar (Mol)	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	Ca/K	$^{*40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	% $^{*40}\text{Ar}$	Age (Ma)	±
01A	1.93E-18	0.0680	-0.4161	0.0084	7.3140	-0.8158	-13.0320	-178.2	-45.0	311.0
01B	3.25E-14	0.0280	0.0020	0.0176	48.9612	0.0035	40.5887	82.9	133.4	0.5
01C	4.78E-18	-1.5960	5.4242	-0.2576	-23.6480	10.6716	455.0376	-1916.8	1119.9	2063.2
01D	2.17E-14	0.0190	0.0004	0.0160	46.2289	0.0004	40.5673	87.8	133.3	0.5
01E	5.24E-15	0.0043	-0.0090	0.0121	42.8761	-0.0182	41.5759	97.0	136.5	1.3
01F	1.57E-14	0.0107	-0.0012	0.0147	43.6381	-0.0029	40.4571	92.7	133.0	0.5
01G	2.29E-14	0.0101	0.0009	0.0144	43.5942	0.0014	40.5903	93.1	133.4	0.4
01H	2.77E-14	0.0075	-0.0006	0.0136	42.6895	-0.0016	40.4458	94.7	132.9	0.4
01I	6.13E-14	0.0089	-0.0002	0.0139	42.8003	-0.0009	40.1377	93.8	132.0	0.3
01J	7.84E-16	0.0046	-0.0309	0.0083	39.4546	-0.0610	38.0770	96.5	125.4	7.4
01K	2.59E-16	-0.0091	0.0831	0.0003	40.2434	0.1625	42.9795	106.8	141.0	22.2
01L	5.11E-17	-0.0463	-0.1934	-0.1000	61.6743	-0.3795	75.4678	122.4	240.6	205.6
02A	1.10E-14	0.0040	0.0272	0.0133	42.1168	0.0529	40.9393	97.2	134.5	0.7
02B	3.56E-15	0.0017	0.0157	0.0125	40.7412	0.0303	40.2462	98.8	132.3	1.7
02C	1.63E-14	0.0010	0.0196	0.0124	40.8597	0.0380	40.5585	99.3	133.3	0.5
02D	2.00E-15	-0.0014	-0.0116	0.0137	40.9546	-0.0231	41.3661	101.0	135.9	2.9
02E	4.97E-15	-0.0009	0.0002	0.0116	40.4185	0.0000	40.6980	100.7	133.7	1.2
02F	1.44E-14	0.0003	0.0025	0.0121	40.7464	0.0045	40.6539	99.8	133.6	0.6
02G	1.69E-15	-0.0018	0.0109	0.0107	41.8049	0.0210	42.3300	101.3	138.9	3.6
02H	1.49E-15	-0.0033	-0.0363	0.0086	41.2592	-0.0715	42.2292	102.4	138.6	4.0
02I	7.43E-15	0.0002	0.0210	0.0116	41.0489	0.0408	40.9985	99.9	134.7	0.9
02J	2.48E-14	0.0002	-0.0009	0.0125	40.7361	-0.0023	40.6698	99.8	133.7	0.4
02K	3.49E-16	-0.0129	-0.0157	0.0096	40.7042	-0.0312	44.5504	109.5	145.9	16.8
02L	1.68E-14	0.0011	-0.0013	0.0127	41.1200	-0.0030	40.7985	99.2	134.1	0.5
03A	8.37E-15	0.0152	0.0067	0.0151	45.9278	0.0127	41.3975	90.1	136.0	0.9
03B	3.94E-15	0.0024	-0.0134	0.0122	41.5496	-0.0268	40.8268	98.3	134.2	1.6
03C	5.21E-15	0.0004	-0.0117	0.0117	40.9806	-0.0233	40.8574	99.7	134.2	1.2
03D	5.65E-15	0.0003	0.0003	0.0114	40.6202	0.0001	40.5262	99.8	133.2	1.1
03E	7.35E-15	-0.0010	-0.0051	0.0117	40.6583	-0.0104	40.9566	100.7	134.6	0.9
03F	1.34E-14	-0.0001	-0.0029	0.0114	40.9288	-0.0062	40.9429	100.0	134.5	0.5
03G	1.11E-14	0.0017	0.0110	0.0122	41.2200	0.0211	40.7252	98.8	133.8	0.6
03H	4.96E-15	0.0018	-0.0054	0.0124	41.0759	-0.0110	40.5472	98.7	133.3	1.3
03I	2.25E-14	0.0008	-0.0002	0.0128	40.8691	-0.0009	40.6278	99.4	133.5	0.4
03J	2.59E-16	0.0128	-0.1205	0.0025	41.1484	-0.2366	37.3135	90.7	123.0	22.0
03K	1.12E-18	-0.1406	-0.4891	0.2181	7.8704	-0.9588	49.7881	632.9	162.3	287.5

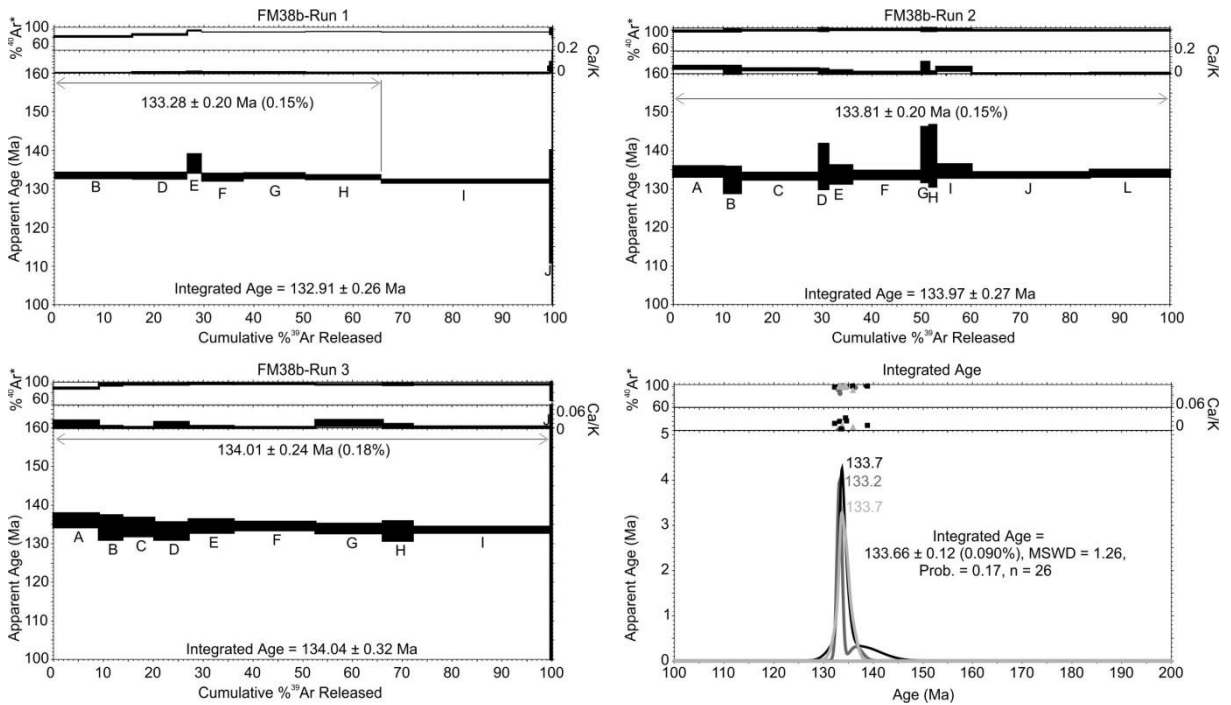


Figure 9. Step heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data of phlogopite from phlogopite lamprophyre dyke FM38b.

7. Discussion

7.1. Possible causes for contrasting ages of coexisting baddeleyite and zircon

Coexisting magmatic zircon and baddeleyite has been reported from a number of rock types, including diabase/gabbro (e.g., Heaman et al., 1992; Scoates and Chamberlain, 1995; Amelin et al., 1999; Allibon et al., 2011), ultramafic rocks (e.g., LeCheminant and Heaman, 1989), and syenite (e.g., Heaman and Machado, 1992). The stability of Zr-bearing minerals in these magmas is mostly related to the silica activity of the magma, baddeleyite typically crystallizing earlier than zircon at lower silica activities (e.g., Scoates and Chamberlain, 1995), however their U-Pb ages are often similar within analytical uncertainties (e.g., Heaman and Machado, 1992; Teixeira et al., 1997; Janasi et al., 2011; Allibon et al., 2011) reflecting relatively short (<1 m.y.) magma solidification times.

In our samples from both the José Fernandes Gabbro and the PGDS samples there are some discrepancies between coexisting baddeleyite and zircon ages. Similar situations have been identified in other magmatic rocks and interpreted as being related to: (a) xenocrystic origin of baddeleyite (Amelin et al., 1997); (b) contact or regional metamorphism (Davidson and van Breemen, 1988; Amelin et al., 1999); (c) element mobility such as Pb-loss in zircon (Heaman et al., 1992; Heaman and LeCheminant, 1993); (d) low total Pb of baddeleyite (Heaman et al., 1992); (e) ^{207}Pb excess (Amelin and Zaitsev, 2002) and (f) preferential Radon loss (e.g., Jenner et al., 1991), related to the disequilibrium partitioning and mobility of intermediate daughter elements in U-Pb decay chains (e.g., Crowley and Schmitz, 2009). Although baddeleyite is typically considered to be less susceptible to Pb-loss than zircon (Heaman and LeCheminant, 1993, 2000), discordant baddeleyite analyses have been reported and, unlike zircon, chemical abrasion pre-treatment seems to have no effect at reducing discordance (Rioux et al., 2010; Wu et al., 2015).

Scatter $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of baddeleyite and zircon of José Fernandes Gabbro and PGDS samples cannot be attributed to a metamorphic event, since no metamorphism affected the area after the much older Neoproterozoic thermal events. Xenocrystic baddeleyite (Amelin et al., 1997; Heaman and LeCheminant, 2000) would show older ages relative to zircon, which is opposite to what is observed, baddeleyite ages are characteristically younger than stronger CA zircon fractions. Our baddeleyite data also do not show evidence of ^{207}Pb excess or Radon loss, as in both cases the ages are discordant (e.g., Heaman and Le Cheminant, 2000). In the José Fernandes Gabbro samples the two minerals display different textures/parageneses, as

baddeleyite is included in clinopyroxene or associated with ilmenite, while zircon is included in quartz and K-feldspar. It could be speculated that older (134-135 Ma) stronger CA zircon ages represent antecrysts or zircon grains with inherited cores (e.g., Miller et al., 2007). However, younger baddeleyite ages (~131 Ma) are related to low Pb*/Pbc and these fractions could be sensitive to common Pb correction. Unusual Pb fractionation and minor interferences in the Pb spectrum of low Pb*/Pbc fractions are also pointed out by Heaman et al. (1992) to explain anomalous young baddeleyite ages of sills from Canada. Baddeleyite fractions from sample VA41 with higher Pb*/Pbc (e.g., VA41-3b, Table 2) are older and show lower errors.

Zircon fractions from José Fernandes Gabbro samples submitted to regular chemical abrasion pre-treatment are ~5-13 m.y. younger (e.g., VA43-3z) than the oldest zircon age (135 Ma) and it is improbable that these age differences represent a protracted zircon crystallization due to different pulses of magma. The scatter of the zircon ages can, instead, indicate that not all Pb-loss areas were effectively removed from zircon grains after chemical abrasion. The stronger CA zircon ages are considered, therefore, a more reliable estimate for the emplacement age of the José Fernandes Gabbro.

Scatter U-Pb ages of coexisting baddeleyite and zircon are observed in the two PGDS samples. In this case, even the baddeleyite fractions with higher Pb*/Pbc (VA2-3b) are younger (~131 Ma). The two minerals are found included in late-stage micrographic intergrowths and there is no textural explanation for the age scatter. Zircon analyses are more precise due to their higher Pb*/Pbc and U content. However, zircon fractions from PGDS samples submitted to regular chemical abrasion pre-treatment also show younger ages (e.g., fraction VA2-4z) relative to stronger CA zircon. In the basaltic andesite CFM131, 131-130 Ma ages seem more consistent and were obtained even in stronger CA zircon (CFM131-6z). However, fraction 4z for basalt dyke VA2 show stronger suggestions for the presence of Pb loss areas in potentially metamict grains, due to high U and Th concentrations (4047 ppm and 4960 ppm, respectively) and the youngest Late Cretaceous age of 74 Ma. Anomalous younger ages (123-116 Ma), interpreted as a result of Pb loss in zircon from PEMP, were also identified by in situ SHRIMP and SIMS U-Pb data by Pinto et al. (2011) and Wigand et al. (2004), from Paraná lavas and Etendeka intrusive rocks, related to the presence of microfractures in zircon. We consider, therefore, that stronger CA zircon ages are the best estimate for the emplacement age of the basalt VA2.

7.2. Age of the José Fernandes Gabbro

The ages of Early Cretaceous alkaline suites/complexes located at the PGA were mainly obtained by the K-Ar technique that show a wide range of results that varies from ~200 to 105 Ma (e.g., Teixeira, 1982; Ruberti, 1984; Sonoki and Garda, 1988; Gomes et al., 1990; Machado Jr., 2000) with only a few reported $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages (e.g., Basu et al., 1993) (Table 4). The only geochronological data available until now for the José Fernandes Gabbro was a K-Ar age of 190 Ma referred in Teixeira (1982). We interpret that the precise age of 134.93 ± 0.16 Ma is the best estimate for the emplacement of the José Fernandes Gabbro. The preferred emplacement age, is ~1 m.y. older than the best estimates for the emplacement of the high Ti-P-Sr basalt dyke (133.95 ± 0.16 Ma) and phlogopite lamprophyre (133.7 ± 0.1 Ma), suggesting that the emplacement of Early Cretaceous alkaline intrusions in the PGA could have started before dyke emplacement.

Table 4. Synthesis of ages obtained in this work in comparison with Early Cretaceous alkaline intrusions and tholeiitic dykes from the PGA.

Unit	Age (Ma)	Reference
José Fernandes- Si oversaturated	Zrn U-Pb 134.93 (0.16)	this work
High Ti-P-Sr basalt dyke	Zrn U-Pb 133.95 (0.16)	this work
Phlogopite lamprophyre	Phl Ar/Ar 133.7 (0.1)	this work
Basaltic andesite dyke	Zrn U-Pb 131.31 (0.13)	this work
	Ar/Ar average: 132.7 range: 131.2 (0.4)	
PGDS (14 samples, recalculated)	to 133.4 (0.5)	Renne et al.1996
Jacupiranga	Bt Ar/Ar 132.8	Basu et al. (1993)
Juquiá	Bt K-Ar 132.6 (4.2)	Sonoki and Garda (1988)
Pariquera-Açu	Rb/Sr 142.1 (7.3)	Machado Jr. (2000)
Banhadão	K-Ar range 127-106	Ruberti (1984)
	K-Ar 114.7 (9.7)	Gomes et al. (1990)
Barra do Itapirapuã	Rb/Sr 128 (19)	Ruberti et al. (1997)
Itapirapuã	K-Ar range 115-97	Sonoki and Garda (1988)

7.3. Age of dykes

The PGDS is a prominent dyke swarm in the PEMP and is considered to be one of the main feeder zones to the northern Paraná lavas (e.g., Piccirillo et al., 1990). In this study we report three new dyke dates from the PGA that include a variety of magma compositions from basalt to lamprophyre. The new U-Pb zircon age of 133.95 ± 0.16 Ma obtained for the high Ti-P-Sr basalt dyke (VA2) is coherent with other ID-TIMS and SHRIMP U-Pb dates obtained from Paraná lavas; 134.3 ± 0.8 Ma (Janasi et al., 2011) and 134.4 ± 1.1 Ma (Pinto et al.,

2011). The basaltic andesite dyke investigated in this study (CFM131), yields a slightly younger emplacement age of 131.31 ± 0.13 Ma and is within the range of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating dates (133.5 ± 0.5 Ma to 131.2 ± 0.4 Ma) reported by Renne et al. (1996a) for the PGDS (Table 4). The duration of PGDS dyke emplacement is tightly constrained to 3 m.y., between 134-131 Ma; this range is confirmed by both the U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating methods. The only exception is some younger (i.e., 127 Ma) $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dyke dates (Renne et al., 1996a), however so far these younger dykes have not been corroborated using the U-Pb method.

The new U-Pb zircon age obtained in this study for basalt dyke VA2 of 133.95 ± 0.16 Ma is identical within error to the range of U-Pb dyke emplacement dates recently reported from the Florianópolis Dyke Swarm (134.7 ± 0.3 Ma to 133.9 ± 0.7 Ma; Florisbal et al., 2014), which indicates that the two dyke swarms were active during the same period. The U-Pb zircon date obtained for basalt dyke VA2 is also identical within error to the precise $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phlogopite age obtained in this study for lamprophyre dyke FM38b (133.7 ± 0.1 Ma), spatially related to Bairro da Cruz Alkaline Intrusion. These results indicate coeval Early Cretaceous tholeiitic and alkaline magmatism within the PGA with good agreement between the two dating methods.

The PGDS samples show distinct geochemical signatures, as basaltic andesite CFM131 is similar to Pitanga and Paranapanema lava types from northern Paraná Basin (Peate et al., 1992). High Ti-P-Sr basalt VA2, however, is similar to Urubici lava type that shows geochemical and isotopic signatures that can be interpreted to have formed by contribution of lithospheric melts that represent the source of the alkaline magmatism (Peate et al., 1999). The close spatial relationship of the Urubici-like basalt VA2 to Jacupiranga Alkaline Complex and the coherent age between Early Cretaceous tholeiitic and alkaline magmatism of the PGA, suggests that lithospheric contribution in the generation of tholeiitic magma could have locally occurred in the PGA. However, the consistent 131-130 Ma age obtained for the basaltic andesite CFM131 is coherent with previous step-heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and give more indications that the magmatism of the PGDS could have persisted for at least ~3 m.y..

8. Conclusions

The new ID-TIMS U-Pb data of coexisting baddeleyite and zircon from PGDS and a transitional to alkaline-related intrusion (José Fernandes Gabbro) show contrasting results in which stronger CA zircon ages yielded the best estimate age of 133.95 ± 0.16 Ma for a high Ti-P-Sr basalt dyke from the PGDS and of 134.93 ± 0.16 Ma for José Fernandes Gabbro. The ages can represent the best estimate for their emplacement. However, the most consistent age for a basaltic andesite dyke from the PGDS is younger (131.31 ± 0.13 Ma), which is in agreement with previous $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating ages and give more indications that the magmatism of the PGDS persisted for at least 3 m.y.. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating age of 133.7 ± 0.1 Ma from a phlogopite lamprophyre, located close to the Bairro da Cruz Alkaline Intrusion, is identical within errors to high Ti-P-Sr basalt dyke suggesting, with robust data, a coeval tholeiitic and alkaline magmatism in the PGA. The best estimate age of José Fernandes Gabbro is, however, ~ 1 m.y. older than PGDS and phlogopite lamprophyre and can indicate that the emplacement of alkaline intrusions could have occurred before dyke emplacement.

Acknowledgements

The authors are thanked to FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) (proc. 2012/06082-6), Science Without Borders scholarship, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) (proc. CNPq 202043/2014-2) and Prof. Frederico Meira Faleiros. The U-Pb dating portion of this study was partially funded with an NSERC Discovery Grant to LMH. We appreciate the expert assistance of James LeBlanc and Chiranjeeb Sarkar in the TIMS analyses.

References

Allibon, J., Ovtcharova, M., Bussy, F., Cosca, M., Schaltegger, U., Bussien, D., Lewin, E., 2011. Lifetime of an ocean island volcano feeder zone: constraints from U-Pb dating on coexisting zircon and baddeleyite, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age determinations, Fuerteventura, Canary Islands. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48: 567-592.

Almeida, V.V., Janasi, V.A., (in preparation). Crustal contamination and its role in the petrogenesis of the José Fernandes Gabbro, Paraná Magmatic Province, Brazil: evidence from whole-rock elemental and Sr-Nd-Pb isotope geochemistry

Amelin, Y.V., Larin, A.M., Tucker, R.D., 1997. Chronology of multiphase emplacement of the Salmi rapakivi granite-anorthosite complex, Baltic Shield: implications for magmatic evolution. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127: 353-368.

Amelin, Y., Li, C., Naldrett, A.J., 1999. Geochronology of the Voisey's Bay intrusion, Labrador, Canada, by precise U-Pb dating of coexisting baddeleyite, zircon and apatite. *Lithos*, 47: 33-51.

Amelin, Y., Zaitsev, A.N., 2002. Precise geochronology of phoscorites and carbonatites: The critical role of U-series disequilibrium in age interpretations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(13): 2399-2419.

Basu, A.R., Renne, P.R., Mertz, D., Poreda, R.J., 1993. Alkaline igneous rocks of the Deccan and Paraná: implications for the origin of continental flood basalts (CFB) (abstract). *Eos, Transactions American Geophysical Union*, p. 552.

Beccaluva, L., Barbieri, M., Born, H., Brotzu, P., Coltorti, M., Conte, A., Garbarino, C., Gomes, C.B., Macciota, G., Morbidelli, L., Ruberti, E., Siena, F., Traversa, G., 1992. Fractional crystallization and liquid immiscibility processes in the alkaline-carbonatite complex of Juquiá, São Paulo, Brazil. *Journal of Petrology*, 33: 1371-1404.

Bowring, J.F., McLean, N.M., Bowring, S.A., 2011. Engineering cyber infrastructure for U-Pb geochronology: Tripoli and U-Pb_Redux. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12 (6), Q0AA19

Bryan, S.E., Ernst, R.E., 2008. Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs). *Earth Science Reviews*, 86: 175-202.

Burke K., Dewey, J.F., 1973. Plume-Generated Triple Junctions: Key Indicators in Applying Plate Tectonics to Old Rocks. *The Journal of Geology*, 81(4): 406-433.

Comin-Chiaramonti, P., Marzoli, A., Gomes, C.B., Milan, A., Riccomini, C., Velásquez, V.F., Mantovani, M. M.S., Renne, P., Tassinari, C.C.G., Vasconcelos, P.M., 2007. Origin of Post-Paleozoic Magmatism in Eastern Paraguay. In: Foulger R.G., Jurdy D.M.

(eds.) Plates, plumes and planetary processes. Geological Society of America, 43: 603-633.

Coutinho, J.M.V., 2008. Dyke swarms of the Paraná Triple Junction, southern Brazil. *Geologia USP, Série Científica*, 8(2): 29-52.

Crowley, J.L., Schoene, B., Bowring, S.A., 2007. U-Pb dating of zircon in the Bishop Tuff at the millennial scale. *Geology*, 35(12): 1123-1126.

Crowley, J.L., Schmitz, M.D., 2009. A precise comparison of U-Pb dates from baddeleyite and zircon: evidence for excess ^{207}Pb in baddeleyite. American Geophysical Union, Fall Meeting, Abstract V53B-06

Davidson, A., Breemen, O. V., 1988. Baddeleyite-zircon relationships in coronitic metagabbro, Grenville Province, Ontario: implications for geochronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 100: 291-299.

Deino, A.L., 2001. Mass Spec v. 5.02, Berkeley Geochronology Center, Special Publications.

Ernesto, M., Raposo, M.I.B., Marques, L.S., Renne, P.R., Diogo, L.A., De Min, A., 1999. Paleomagnetism, geochemistry and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of north-eastern Paraná magmatic province: tectonic implications. *Journal of Geodynamics*, 28: 321-340.

Faleiros, F.M., Campanha, G.A.C., Martins, L., Valch, S.R.F., 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.

Florisbal, L.M., Heaman, L.M., Janasi, V.A., Bitencourt, M.F., 2014. Tectonic significance of the Florianópolis Dyke Swarm, Paraná-Etendeka Magmatic Province: A reappraisal based on U-Pb dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289: 140-150.

Gaspar, J.C., 1989., *Geologie et mineralogie du complexe carbonatique du Jacupiranga, Brésil*. Ph.D. thesis, University of Orleans, 377p.

Gibson, S.A., Thompson, R.N., Day, J.A., 2006. Timescales and mechanisms of plume-lithosphere interactions: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and geochemistry of alkaline

igneous rocks from the Paraná-Etendeka large igneous province. *Earth and Planetary Science Letters*, 251: 1-17.

Gomes, C.B., Ruberti, E., Morbidelli, L., 1990. Carbonatite complexes from Brazil: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, 3: 51-63.

Gomes, C.B., Ruberti, E., Comin-Chiaramonti, P., Azzone, R.G., 2011. Alkaline magmatism in the Ponta Grossa Arch, SE Brazil: A review. *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 152-168.

Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., Velázquez, V.F., 2013. A synthesis on the alkaline magmatism of Eastern Paraguay. *Brazilian Journal of Geology*, 43(4): 745-761.

Harris, C., Marsh, J.S., Milner, S.C., 1999. Petrology of the alkaline core of the Messum Igneous Complex, Namibia: Evidence for the progressively decreasing effect of crustal contamination. *Journal of Petrology*, 40: 1377-1397.

Heaman, L.M., LeCheminant, A.N., Rainbird, R.H., 1992. Nature and timing of Franklin igneous events, Canada: Implications for a Late Proterozoic mantle plume and the break-up of Laurentia. *Earth and Planetary Science Letters*, 109:117-131.

Heaman, L.M., Machado, N., 1992. Timing and origin of midcontinent rift alkaline magmatism, North America: evidence from the Coldwell Complex. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 289–303.

Heaman, L.M., LeCheminant, A.N., 1993. Paragenesis and U–Pb systematics of baddeleyite (ZrO₂). *Chemical Geology*, 110: 95–126.

Heaman, L.M., LeCheminant, A.N., 2000. Anomalous U-Pb systematics in mantle-derived baddeleyite xenocrysts from Île Bizard: evidence for high temperature radon diffusion. *Chemical Geology*, 172: 77-93.

Herz, N., 1977. Timing of spreading in South Atlantic: information from Brazilian alkalic rocks. *Geological Society American Bulletin*, 88: 101-112.

Janasi, V.A., de Freitas, V.A., Heaman, L.M., 2011. The onset of flood basalt volcanism, Northern Paraná Basin, Brazil: A precise U-Pb baddeleyite/zircon age for a Chapecó-type dacite. *Earth and Planetary Science Letters*, 302(1-2): 147-153.

Jenner, G.A., Dunning, G.R., Malpas, J., Brown, M., Brace, T., 1991. Bay of Islands and Little Port complexes, revisited: age, geochemical and isotopic evidence confirm suprasubduction-zone origin. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 28:1635-1652.

Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on total alkali silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745-750.

LeCheminant, A.N. and Heaman, L.M., 1989. Mackenzie igneous events, Canada: Middle Proterozoic hotspot magmatism associated with ocean opening. *Earth and Planetary Science Letters*, 96: 38-48.

Ludwig, K.R., 1991. A plotting and regression program for radiogenic-isotope data, version 2.56. U.S. Geological Survey Open-File Report, 91 (445 pp.).

Machado Jr., D.L., 2000. Idade do magmatismo alcalino de Pariqueira-Açú (SP). *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4): 593-596.

Marques, L.S., 2001. Geoquímica dos diques toleíticos da costa sul-sudeste do Brasil: Contribuição ao conhecimento da Província Magmática Paraná. Tese de Livre Docência. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. 85 p.

Marques, L.S., Ernesto, M., 2004. O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. In: Mantesso Neto, V. et al. (Org.) *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo, Beca Produções Culturais, p. 245-263.

Mattinson, J.M., 2005. Zircon U–Pb chemical abrasion (“CA-TIMS”) method: combined annealing and multi-step partial dissolution analysis for improved precision and accuracy of zircon ages. *Chemical Geology*, 220 (1–2): 47–66.

Miller, J.S., Matzel, J.E.P., Miller, C.F., Burgess, S.D., Miller, R.B., 2007. Zircon growth and recycling during the assembly in large composite arc plutons. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167: 282-299.

Morgan, L.E., Mark, D.F., Imlach, J., Barfod, D., Dymock, R., 2013. Advances in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating: from Archaeology to Planetary Sciences, FCs-EK: a new sampling of the Fish Canyon Tuff $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ neutron flux monitor, Geological Society, London, Special Publications, eds. Jourdan F., Mark D.F., Verati, C.

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

Muzio, R., Peel E., Artur C., 1999. New geochronological data of the Valle Chico alkaline massif (Uruguay), using U-Pb and Sm-Nd systematics. In: AGA/Córdoba-Argentina, II Simposio Sudamericano de Geología Isotópica, Extended abstracte.

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 efficiency of microwave oven sample decomposition procedures. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(2): 167-180.

Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., 1992. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas, South America: classification of magma types and their spatial distribution. *Bulletin of Volcanology*, 55: 119-139.

Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., 1996. Lithospheric to astenospheric transition in Low-Ti flood basalts from southern Paraná, Brazil. *Chemical Geology*, 127: 1-24.

Peate, D.W., Hawkesworth, C.J., Mantovani, M.S.M., Rogers, N.W., Turner, S.P., 1999. Petrogenesis and Stratigraphy of the High-Ti/Y Urubici Magma Type in the Paraná Flood Basalt Province and Implications for the Nature of 'Dupal'-Type Mantle in the South Atlantic Region. *Journal of Petrology*, 40(3): 451-473.

Piccirillo, E.M., Comin-Chiaramonti, P., Melfi, A.J., Stolfa, D., Bellieni, G., Marques, L.S., Giaretta, A., Nardy, A.J.R., Pinese, J.P.P., Raposo, M.I.B., Roisenberg, A., 1988. Petrochemistry of continental flood basalt-ryolite suites and intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: Piccirillo, E.M., Melfi, A.J. (eds.), *The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and Geophysical aspects*. Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, pp. 107-156.

Piccirillo, E.M., Bellieni, G., Cavazzini, G., Comin-Chiaramonti, P., Petrini, R., Melfi, A.J., Pinese, J.P.P., Zantadeschi, P., De Min, A., 1990. Lower Cretaceous tholeiitic dyke swarms from the Ponta Grossa Arch (southeast Brazil): Petrology, Sr-Nd isotopes and genetic relationships with the Paraná flood volcanics. *Chemical Geology*, 89(1-2): 19-48.

Pinese, J.P.P., 1989. Caracterização petrológica e geoquímica dos diques do Arco de Ponta Grossa. Dissertação de mestrado. Instituto Astronômico e Geofísico. Universidade de São Paulo. 196p.

Pinto, V.M., Hartmann, L.A., Santos, J.O.S., McNaughton, N.J., Wildner, W., 2011. Zircon U-Pb geochronology from the Paraná bimodal volcanic province support a brief eruptive cycle at ~135 Ma. *Chemical Geology*, 281(1-2): 93-102.

Raposo, M.I.B., Ernesto, M., 1995a. Anisotropy of magnetic susceptibility in the Ponta Grossa dyke swarm (Brazil) and its relationship with magma flow direction. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 87(3-4): 183-196.

Raposo, M.I.B., Ernesto, M., 1995b. An Early Cretaceous paleomagnetic pole from Ponta Grossa dikes (Brazil): Implications for the South American Mesozoic apparent polar wander path. *Journal of Geophysical Research*, 100(B10): 20095-20109.

Renne, P.R., Ernesto, M., Pacca, I.G., Coe, R.S., Glen, J.M., Prévot, M., Perrin, M., 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic–Cretaceous boundary. *Science*, 258 (5084), 975–979.

Renne, P.R., Deckart, K., Ernesto, M., Féraud, G., Piccirillo, E.M., 1996a. Age of the Ponta Grossa dike swarm (Brazil), and implications to Paraná flood volcanism. *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1-2): 199-211.

Renne, P.R., Glen, J.M., Milner, S.C., Duncan, A.R., 1996b. Age of Etendeka flood volcanism and associated intrusions in southwestern Africa. *Geology*, 24: 659-662.

Renne, P.R., Swisher, C.C., Deino, A.L., Karner, D.B., Owens, T.L., De Paolo, D., 1998. Intercalibration of standards, absolute ages and uncertainties in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating. *Chemical Geology*, 145: 117-152.

Rioux, M., Bowring, S., Dudás, F., Hanson, R., 2010. Characterizing the U–Pb systematics of baddeleyite through chemical abrasion: application of multi-step digestion methods to baddeleyite geochronology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160: 777–801.

Ruberti, E., 1984. Petrologia do maciço alcalino do Banhadão, PR. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo.

Ruberti, E., Gomes, C.B., Comin-Chiaramonti, P., 2005. The alkaline magmatism from the Ponta Grossa Arch. *In: Comin-Chiaramonti, P., Gomes, C.B. eds. Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazillian Platform. Edusp/Fapesp, São Paulo, pp.473-521.*

Ruberti, E., Enrich, G.E.R., Azzone, R.G., Comin-Chiaramonti, P., De Min, A., Gomes, C.B., 2012. The Banhadão Alkaline Complex, southeastern Brazil: source and evolution of potassic SiO₂-undersaturated high-Ca magmatic series. *Mineralogy and Petrology*, 104: 63-80.

Sarkar, C., Pearson, D.G., Heaman, L.M., and Woodland, S.J., 2015. Precise Pb isotope ratio determination of picogram-size samples: A comparison between multiple Faraday collectors equipped with 10¹² Ω amplifiers and multiple ion counters. *Chemical Geology*, 395: 27-40.

Schmitz, M.D., Schoene, B., 2007. Derivation of isotope ratios, errors, and error correlations for U–Pb geochronology using Pb-205–U-235–(U-233)-spiked isotope dilution thermal ionization mass spectrometric data. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(8).

Scoates, J.S., Chamberlain, K.R., 1995. Baddeleyite (ZrO₂) and zircon (ZrSiO₄) from anorthositic rocks of the Laramie anorthosite complex, Wyoming: Petrologic consequences and U-Pb ages. *American Mineralogist*, 80: 1317-1327.

Sonoki, I.K., Garda, G.M., 1988. Idades K/Ar de rochas alcalinas do Brasil meridional e Paraguai oriental: compilação e adaptação às novas constantes de decaimento. *Boletim do Instituto de Geociências da USP, Série Científica*, 19: 63-85.

Stacey, J.S., Kramers, J.D., 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26 (2), 207–221.

Steiger, R.H., Jäger, E., 1977. Subcommittee on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters* 36 (3), 359–362.

Stewart, K, Turner, S., Kelley, S., Hawkesworth, C., Kirstein, L., Mantovani, M., 1996. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. *Earth and Planetary Science Letters*, 143: 95-109.

Teixeira, W., 1982. Folhas SG.21 – Asunción, SG. 22 – Curitiba e SG.23 – Iguape. Considerações sobre os dados radiométricos: interpretações e evolução geocronológica. Projeto Radam Brasil. São Paulo/Florianópolis.

Teixeira, W., Kamo, S.L., Arcanjo, J.B.A., 1997. U-Pb zircon and baddeleyite age and tectonic interpretation of the Itabuna Alkaline Suite, São Francisco Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 10(1): 91-98.

Thiede, D.S., Vasconcelos, P.M., 2010. Paraná flood basalts: Rapid extrusion hypothesis confirmed by new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ results. *Geology*, 38(8): 747-750.

Ussami, N., Kolisnyk, A., Raposo, M.I.B., Ferreira, F.J.F., Molina, E.C., Ernesto, M., 1991. Detectabilidade magnética de diques do Arco de Ponta Grossa: Um estudo integrado de magnetometria terrestre aérea e magnetismo de rocha. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(4): 317-327.

Vasconcelos, E.M.G., Gomes, C.B., 1998. Diques e plugs alcalinos da região do Vale do Ribeira, divisa dos estados do Paraná e São Paulo: características petrográficas e geoquímicas. *Geochimica Brasiliensis*, 12: 123-143.

Wigand, M., Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., Villa, I.M., Emmermann, R., 2004. Short-lived magmatism activity in an orogenic subvolcanic complex: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and ion microprobe U-Pb zircon dating of the Erongo, Damaraland, Namibia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130: 285-305.

Wu, W.N., Schmitt, A.K., Pappalardo, L., 2015. U-Th baddeleyite geochronology and its significance to date the emplacement of silica undersaturated magmas. *American Mineralogist*, 100: 2082-2090.

ANEXO D

TABELAS DE ANÁLISES EM MINERAIS POR MICROSSONDA ELETRÔNICA

Tabela 1 Composições de cristais de feldspato com fórmulas estruturais calculadas na base de 32 oxigênios.

Amostra	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RA	VA43RA	VA43RA
Litotipo	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG
Localização	centro	borda	borda	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	borda	borda	centro	borda	centro	centro
SiO ₂	63,60	64,11	63,64	63,98	63,87	64,38	57,06	64,11	53,81	64,29	54,21	63,96	63,64	64,09	57,06	
TiO ₂										0,08	0,09	0,06				
Al ₂ O ₃	19,89	19,88	20,45	20,22	20,44	19,77	26,76	20,60	28,91	19,35	28,47	19,09	20,45	20,28	26,76	
FeO	0,56	0,70	0,57	0,49	0,52	0,41	0,57	0,28	0,57	0,15	0,26	0,09	0,57	0,51	0,57	
Cr ₂ O ₃										0,00	0,00	0,01				
MnO	0,00	0,05	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,07	0,00	
NiO										0,01	0,00	0,00				
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	
CaO	1,32	1,46	1,90	1,51	1,55	1,09	8,81	1,74	12,12	0,67	11,07	0,50	1,90	1,69	8,81	
Na ₂ O	4,13	4,10	4,17	4,20	4,35	3,38	6,47	5,59	4,81	2,61	5,04	2,41	4,17	4,65	6,47	
K ₂ O	9,40	9,60	9,15	9,11	8,89	10,88	0,38	7,67	0,30	11,76	0,39	12,31	9,15	8,74	0,38	
SrO	0,09	0,00	0,23	0,28	0,17	0,22	0,25	0,18	0,05	0,26	0,23	0,25	0,23	0,14	0,25	
BaO	0,93	0,45	0,81	0,63	0,79	0,66	0,03	0,29	0,13	0,49	0,04	0,56	0,81	0,44	0,03	
Total	99,91	100,34	100,93	100,45	100,57	100,81	100,34	100,46	100,74	99,68	99,81	99,25	100,93	100,61	100,34	
Si	11,652	11,668	11,552	11,629	11,595	11,716	10,255	11,573	9,718	11,813	9,841	11,834	11,552	11,608	10,255	
Al	4,291	4,261	4,372	4,328	4,370	4,237	5,665	4,378	6,150	4,187	6,087	4,159	4,372	4,325	5,665	
Fe ³																
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,012	0,008	0,000	0,000	0,000	
Fe ²	0,086	0,107	0,086	0,074	0,079	0,063	0,086	0,042	0,086	0,023	0,039	0,014	0,086	0,077	0,086	
Mn	0,000	0,007	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,002	0,002	0,000	0,000	0,010	0,000	
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,005	0,003	
Ba	0,067	0,032	0,057	0,045	0,056	0,047	0,002	0,021	0,009	0,035	0,003	0,041	0,057	0,031	0,002	
Ca	0,258	0,284	0,369	0,294	0,301	0,213	1,696	0,337	2,346	0,132	2,153	0,099	0,369	0,328	1,696	
Na	1,468	1,447	1,469	1,479	1,532	1,194	2,254	1,955	1,684	0,930	1,774	0,865	1,469	1,631	2,254	
K	2,196	2,228	2,120	2,113	2,058	2,527	0,086	1,766	0,068	2,757	0,090	2,906	2,120	2,018	0,086	
Total	20,018	20,034	20,025	19,968	19,991	19,997	20,047	20,072	20,068	19,890	20,001	19,929	20,025	20,033	20,047	
Ab	37,4	36,5	37,1	38,1	39,4	30,4	55,8	48,2	41,1	24,4	44,2	22,4	37,1	41	55,8	
An	6,6	7,2	9,3	7,6	7,7	5,4	42	8,3	57,2	3,5	53,6	2,6	9,3	8,2	42	
Or	56	56,3	53,6	54,4	52,9	64,2	2,1	43,5	1,7	72,2	2,2	75,1	53,6	50,7	2,1	

M-MG – melamonzogabro.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD
Litotipo	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG
Localização	centro	centro	centro	centro	centro	centro	borda	int	int	int	centro	borda	int	int	borda
SiO ₂	52,10	54,30	63,41	64,09	64,60	63,30	52,87	52,14	52,51	52,32	62,94	63,35	64,01	52,09	53,73
TiO ₂							0,11	0,10	0,12	0,08	0,09	0,08	0,09	0,10	0,10
Al ₂ O ₃	29,85	28,65	20,93	20,28	20,36	20,50	29,47	29,69	29,39	29,64	19,82	19,54	19,26	29,79	28,73
FeO	0,68	0,61	0,52	0,51	0,57	0,59	0,37	0,34	0,34	0,31	0,13	0,16	0,16	0,35	0,29
Cr ₂ O ₃							0,03	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
MnO	0,01	0,00	0,00	0,07	0,04	0,03	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,02	0,03	0,01	0,00
NiO							0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
MgO	0,04	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
CaO	12,85	11,54	1,98	1,69	1,47	1,95	12,20	12,77	12,40	12,54	0,77	0,65	0,59	12,54	11,24
Na ₂ O	4,26	5,07	4,63	4,65	4,32	4,55	4,46	4,12	4,42	4,23	2,97	2,93	2,91	4,16	5,03
K ₂ O	0,27	0,35	8,14	8,74	9,52	8,39	0,32	0,33	0,33	0,32	10,56	11,09	11,45	0,25	0,24
SrO	0,19	0,31	0,40	0,14	0,15	0,19	0,25	0,28	0,26	0,28	0,27	0,26	0,27	0,25	0,18
BaO	0,00	0,08	0,77	0,44	0,40	0,41	0,12	0,05	0,02	0,03	2,29	1,21	0,68	0,05	0,06
Total	100,24	100,92	100,78	100,61	101,43	99,91	100,20	99,85	99,81	99,77	99,84	99,31	99,45	99,59	99,62
Si	9,484	9,789	11,490	11,608	11,627	11,543	9,604	9,517	9,579	9,547	11,665	11,733	11,802	9,520	9,776
Al	6,398	6,083	4,466	4,325	4,316	4,402	6,305	6,382	6,314	6,369	4,326	4,262	4,182	6,411	6,156
Fe ³															
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,014	0,016	0,011	0,013	0,011	0,012	0,014	0,014
Fe ²	0,104	0,092	0,079	0,077	0,085	0,090	0,056	0,052	0,052	0,047	0,020	0,025	0,025	0,053	0,044
Mn	0,002	0,000	0,000	0,010	0,006	0,004	0,000	0,005	0,002	0,000	0,000	0,003	0,005	0,002	0,000
Mg	0,010	0,004	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
Ba	0,000	0,006	0,055	0,031	0,028	0,029	0,009	0,004	0,001	0,002	0,166	0,088	0,049	0,004	0,004
Ca	2,507	2,228	0,383	0,328	0,284	0,381	2,375	2,497	2,424	2,452	0,153	0,129	0,117	2,455	2,191
Na	1,502	1,772	1,627	1,631	1,508	1,609	1,571	1,458	1,563	1,497	1,067	1,052	1,040	1,474	1,775
K	0,062	0,080	1,882	2,018	2,186	1,952	0,074	0,077	0,077	0,074	2,497	2,620	2,693	0,058	0,056
Total	20,069	20,054	19,982	20,033	20,040	20,010	20,009	20,006	20,028	19,999	19,907	19,926	19,925	19,991	20,016
Ab	36,9	43,4	41,8	41	37,9	40,8	39,1	36,2	38,5	37,2	28,7	27,7	27	37	44,1
An	61,6	54,6	9,8	8,2	7,1	9,7	59,1	61,9	59,6	60,9	4,1	3,4	3	61,6	54,5
Or	1,5	2	48,4	50,7	55	49,5	1,8	1,9	1,9	1,8	67,2	68,9	69,9	1,5	1,4

M-MG – melamonzogabro.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA43RD	VA43RD	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA
Litotipo	M-MG	M-MG	M-G	M-G	M-G	M-G	M-G	M-G	M-G	M-G	M-G	LG	LG	LG	LG	LG
Localização	int	borda	borda	centro	borda	borda	borda	centro	int	borda	borda	int	borda	centro	centro	centro
SiO ₂	52,14	53,77	53,25	53,38	52,78	58,55	54,98	53,18	52,90	57,58	51,67	64,63	64,18	62,42	61,84	
TiO ₂	0,09	0,09	0,10	0,10	0,08	0,05	0,04	0,07	0,08	0,06						
Al ₂ O ₃	29,46	28,62	29,40	29,32	29,45	25,69	27,65	29,23	29,21	26,53	29,37	19,67	19,80	20,02	20,23	
FeO	0,51	0,31	0,19	0,20	0,26	0,41	0,61	0,23	0,23	0,22	0,34	0,26	0,20	0,14	0,22	
Cr ₂ O ₃	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01						
MnO	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,03	0,03	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,06	0,00	0,04	
NiO	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00						
MgO	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	
CaO	12,37	11,17	12,45	12,23	12,55	7,91	10,30	11,96	12,24	8,63	12,83	0,71	1,11	1,06	1,27	
Na ₂ O	4,31	5,12	4,35	4,48	4,31	6,57	5,23	4,59	4,41	6,20	4,07	2,69	2,72	2,97	2,83	
K ₂ O	0,26	0,23	0,36	0,35	0,33	0,75	0,44	0,37	0,33	0,73	0,44	11,95	11,37	10,67	10,96	
SrO	0,26	0,17	0,38	0,30	0,36	0,35	0,37	0,36	0,31	0,34	0,37	0,58	0,23	0,51	0,35	
BaO	0,07	0,02	0,05	0,05	0,09	0,02	0,04	0,05	0,05	0,05	0,07	0,55	0,19	2,15	2,19	
Total	99,55	99,52	100,53	100,43	100,23	100,33	99,87	100,04	99,78	100,36	99,15	101,03	99,85	99,96	99,92	
Si	9,545	9,790	9,637	9,661	9,592	10,496	9,978	9,666	9,641	10,334	9,515	11,764	11,745	11,589	11,518	
Al	6,351	6,137	6,266	6,249	6,303	5,424	5,910	6,256	6,270	5,607	6,370	4,216	4,267	4,378	4,436	
Fe ³																
Ti	0,012	0,012	0,013	0,014	0,011	0,006	0,005	0,009	0,011	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Fe ²	0,078	0,047	0,029	0,030	0,039	0,061	0,093	0,035	0,035	0,032	0,052	0,040	0,030	0,021	0,034	
Mn	0,003	0,002	0,002	0,001	0,000	0,005	0,004	0,000	0,003	0,001	0,001	0,000	0,009	0,000	0,006	
Mg	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,000	
Ba	0,005	0,001	0,003	0,003	0,006	0,001	0,003	0,004	0,003	0,004	0,005	0,039	0,014	0,156	0,160	
Ca	2,426	2,179	2,414	2,372	2,444	1,519	2,003	2,329	2,390	1,659	2,531	0,138	0,218	0,211	0,253	
Na	1,530	1,808	1,526	1,572	1,519	2,284	1,840	1,618	1,558	2,158	1,452	0,949	0,964	1,068	1,021	
K	0,061	0,053	0,082	0,082	0,076	0,172	0,102	0,086	0,076	0,167	0,104	2,775	2,655	2,527	2,603	
Total	20,025	20,029	19,972	19,984	19,990	19,968	19,983	20,003	19,987	19,970	20,030	19,921	19,902	19,958	20,031	
Ab	38,1	44,8	37,9	39	37,6	57,5	46,6	40,1	38,7	54,2	35,5	24,6	25,1	28,1	26,3	
An	60,4	53,9	60	58,9	60,5	38,2	50,8	57,7	59,4	41,6	61,9	3,6	5,7	5,5	6,5	
Or	1,5	1,3	2	2	1,9	4,3	2,6	2,1	1,9	4,2	2,5	71,9	69,2	66,4	67,1	

M-MG – melamonzogabro, M-G – melagabro, LG – gabro bandado.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA
Litotipo	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG
Localização	centro	centro	centro	borda	centro	centro	centro	borda	borda	borda	int	int	centro	borda	borda
SiO ₂	55,83	54,96	62,18	61,47	61,53	62,00	62,07	52,13	52,71	51,54	51,41	52,59	50,03	49,92	50,66
TiO ₂															
Al ₂ O ₃	27,44	27,93	20,36	19,95	19,73	20,19	19,87	29,36	28,48	29,19	29,78	28,68	30,39	30,57	29,92
FeO	0,51	0,24	0,12	0,20	0,10	0,20	0,19	0,29	0,34	0,38	0,29	0,39	0,43	0,36	0,31
Cr ₂ O ₃															
MnO	0,09	0,04	0,01	0,00	0,11	0,00	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,01	0,07
NiO															
MgO	0,05	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02
CaO	10,02	10,49	1,22	0,66	0,92	1,18	1,00	12,20	11,72	12,36	13,31	11,93	13,67	13,99	12,95
Na ₂ O	5,61	5,18	2,69	2,34	2,47	2,99	2,83	4,31	4,74	4,37	3,79	4,51	3,54	3,30	3,64
K ₂ O	0,43	0,46	10,85	11,53	11,22	10,41	10,65	0,39	0,53	0,36	0,38	0,45	0,29	0,28	0,40
SrO	0,20	0,22	0,23	0,64	0,14	0,47	0,35	0,30	0,06	0,34	0,19	0,06	0,34	0,33	0,42
BaO	0,18	0,03	2,49	1,93	2,13	2,23	1,71	0,15	0,00	0,05	0,15	0,02	0,00	0,13	0,00
Total	100,36	99,56	100,14	98,72	98,38	99,66	98,69	99,15	98,61	98,63	99,36	98,69	98,73	98,90	98,38
Si	10,071	9,978	11,540	11,581	11,608	11,547	11,620	9,578	9,714	9,534	9,448	9,685	9,271	9,242	9,400
Al	5,830	5,972	4,450	4,426	4,383	4,429	4,381	6,352	6,182	6,358	6,445	6,220	6,633	6,666	6,537
Fe ³															
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²	0,078	0,037	0,018	0,032	0,016	0,031	0,029	0,045	0,052	0,058	0,045	0,059	0,066	0,055	0,048
Mn	0,014	0,006	0,001	0,000	0,018	0,000	0,004	0,004	0,003	0,005	0,005	0,005	0,002	0,002	0,011
Mg	0,012	0,002	0,003	0,003	0,008	0,000	0,000	0,000	0,005	0,007	0,007	0,005	0,009	0,006	0,006
Ba	0,013	0,002	0,181	0,142	0,157	0,163	0,126	0,011	0,000	0,003	0,011	0,002	0,000	0,009	0,000
Ca	1,936	2,040	0,242	0,132	0,186	0,234	0,201	2,402	2,314	2,450	2,621	2,354	2,715	2,774	2,574
Na	1,961	1,824	0,970	0,854	0,904	1,079	1,025	1,537	1,694	1,568	1,349	1,610	1,270	1,184	1,308
K	0,099	0,105	2,569	2,772	2,701	2,473	2,544	0,090	0,124	0,084	0,089	0,106	0,069	0,066	0,094
Total	20,014	19,966	19,974	19,942	19,981	19,956	19,930	20,019	20,088	20,067	20,020	20,046	20,035	20,004	19,978
Ab	49,1	46	25,7	22,7	23,8	28,5	27,2	38,1	41	38,2	33,2	39,6	31,3	29,4	32,9
An	48,4	51,4	6,4	3,5	4,9	6,2	5,3	59,6	56	59,7	64,6	57,8	67	68,9	64,7
Or	2,5	2,6	67,9	73,8	71,2	65,3	67,5	2,2	3	2	2,2	2,6	1,7	1,6	2,4

LG – gabro bandado.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA
Litotipo	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG
Localização	centro	borda	borda	borda	int	borda	int	centro	centro	centro	centro	borda	int	centro	borda
SiO ₂	51,02	52,76	49,85	53,40	52,45	55,23	51,22	64,30	62,33	64,02	51,21	50,71	51,28	51,38	54,48
TiO ₂															
Al ₂ O ₃	29,45	28,61	31,08	27,92	28,72	28,28	30,88	19,34	19,82	19,30	30,99	30,88	30,15	30,51	26,42
FeO	0,33	0,28	0,42	0,56	0,33	0,45	0,43	0,11	0,14	0,13	0,38	0,36	0,35	0,39	1,04
Cr ₂ O ₃															
MnO	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00	0,04	0,00
NiO															
MgO	0,01	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03
CaO	12,73	11,64	14,20	11,14	11,94	10,60	13,53	0,71	0,72	0,68	13,59	14,08	13,50	13,50	10,28
Na ₂ O	3,90	4,49	3,39	4,81	4,26	5,34	3,84	2,67	2,73	2,22	3,62	3,66	3,82	3,76	5,68
K ₂ O	0,44	0,44	0,22	0,48	0,47	0,50	0,24	11,95	11,12	12,96	0,25	0,25	0,31	0,27	0,36
SrO	0,46	0,37	0,15	0,28	0,33	0,30	0,40	0,40	0,46	0,25	0,32	0,29	0,43	0,17	0,30
BaO	0,03	0,18	0,00	0,00	0,25	0,21	0,15	0,26	2,51	0,24	0,03	0,11	0,09	0,16	0,08
Total	98,41	98,83	99,35	98,63	98,77	100,94	100,72	99,76	99,84	99,84	100,40	100,34	99,92	100,17	98,67
Si	9,470	9,714	9,179	9,834	9,674	9,930	9,308	11,812	11,624	11,795	9,312	9,256	9,387	9,368	10,045
Al	6,436	6,202	6,740	6,055	6,238	5,988	6,607	4,183	4,352	4,187	6,637	6,637	6,499	6,551	5,737
Fe ³															
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²	0,051	0,043	0,065	0,086	0,050	0,068	0,065	0,017	0,021	0,020	0,058	0,055	0,054	0,059	0,160
Mn	0,007	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004	0,002	0,002	0,005	0,004	0,000	0,000	0,000	0,005	0,000
Mg	0,003	0,013	0,009	0,009	0,003	0,003	0,005	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,002	0,009
Ba	0,002	0,013	0,000	0,000	0,018	0,015	0,010	0,019	0,183	0,017	0,002	0,008	0,006	0,011	0,006
Ca	2,531	2,297	2,802	2,198	2,360	2,041	2,634	0,139	0,144	0,134	2,647	2,752	2,647	2,636	2,031
Na	1,404	1,602	1,211	1,717	1,524	1,861	1,352	0,952	0,985	0,794	1,276	1,295	1,356	1,329	2,032
K	0,104	0,104	0,052	0,114	0,110	0,114	0,056	2,800	2,644	3,047	0,058	0,059	0,073	0,063	0,084
Total	20,008	19,989	20,059	20,014	19,979	20,024	20,039	19,924	19,958	19,998	19,994	20,062	20,022	20,024	20,104
Ab	34,8	40,0	29,8	42,6	38,2	46,3	33,4	24,5	26,1	20,0	32,1	31,5	33,3	33,0	49,0
An	62,7	57,4	68,9	54,6	59,1	50,8	65,2	3,6	3,8	3,4	66,5	67,0	64,9	65,4	49,0
Or	2,6	2,6	1,3	2,8	2,8	2,8	1,4	72,0	70,1	76,7	1,5	1,4	1,8	1,6	2,0

LG – gabro bandado.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA44RA	VA44RA	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA41A	VA41A	VA41A
Litotipo	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	CQMG	CQMG	CQMG
Localização	int	centro	borda	centro	borda	borda	borda	centro	centro	borda	centro	centro	centro	centro	centro
SiO ₂	51,04	51,46	63,04	62,01	53,09	54,86	55,15	50,53	51,59	51,63	52,18	50,78	54,41	63,11	63,89
TiO ₂			0,12	0,14	0,05	0,01	0,07	0,10	0,09	0,08	0,11	0,06			
Al ₂ O ₃	30,28	29,81	19,76	19,55	29,12	28,12	27,06	29,99	30,32	30,54	29,78	30,90	27,65	20,16	20,18
FeO	0,36	0,32	0,34	0,70	0,46	0,63	0,31	0,41	0,46	0,39	0,40	0,45	0,32	0,31	0,19
Cr ₂ O ₃															
MnO	0,03	0,04	0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
NiO															
MgO	0,00	0,01	0,08	0,30	0,03	0,08	0,04	0,04	0,02	0,01	0,03	0,04	0,01	0,00	0,00
CaO	13,57	12,07	0,87	0,85	11,28	9,99	8,26	13,36	12,59	12,48	11,75	13,31	10,61	1,42	1,44
Na ₂ O	3,48	4,29	2,67	2,26	4,42	5,31	3,76	3,56	3,66	3,86	4,14	3,48	5,47	4,19	4,05
K ₂ O	0,31	0,30	12,32	12,42	0,44	0,22	3,76	0,38	0,43	0,27	0,48	0,33	0,42	9,17	9,38
SrO	0,10	0,54	0,32	0,33	0,31	0,20	0,28	0,37	0,33	0,31	0,34	0,32	0,23	0,12	0,15
BaO	0,06	0,07	0,68	0,91	0,13	0,04	0,41	0,05	0,04	0,06	0,12	0,14	0,16	1,47	0,97
Total	99,22	98,90	100,22	99,49	99,33	99,46	99,10	98,80	99,54	99,65	99,34	99,80	99,29	99,94	100,25
Si	9,379	9,488	11,630	11,575	9,705	9,961	10,155	9,352	9,440	9,428	9,557	9,296	9,942	11,593	11,646
Al	6,553	6,473	4,293	4,298	6,269	6,013	5,868	6,537	6,534	6,568	6,423	6,662	5,950	4,361	4,332
Fe ³															
Ti	0,000	0,000	0,017	0,020	0,007	0,001	0,009	0,015	0,012	0,011	0,015	0,009	0,000	0,000	0,000
Fe ²	0,056	0,049	0,053	0,109	0,070	0,095	0,048	0,064	0,071	0,060	0,061	0,068	0,049	0,048	0,029
Mn	0,005	0,006	0,001	0,004	0,000	0,001	0,001	0,000	0,002	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
Mg	0,000	0,001	0,022	0,083	0,009	0,022	0,011	0,011	0,006	0,003	0,008	0,010	0,002	0,000	0,000
Ba	0,004	0,005	0,049	0,066	0,009	0,003	0,030	0,004	0,003	0,004	0,009	0,010	0,011	0,106	0,069
Ca	2,672	2,384	0,172	0,169	2,209	1,944	1,630	2,649	2,468	2,442	2,306	2,611	2,077	0,279	0,282
Na	1,239	1,534	0,955	0,818	1,567	1,870	1,342	1,278	1,299	1,367	1,470	1,235	1,938	1,493	1,432
K	0,072	0,069	2,900	2,958	0,102	0,051	0,883	0,090	0,101	0,063	0,113	0,077	0,099	2,148	2,180
Total	19,980	20,009	20,092	20,100	19,947	19,961	19,977	20,000	19,936	19,949	19,962	19,978	20,069	20,028	19,971
Ab	31,1	38,5	23,7	20,7	40,4	48,4	34,8	31,8	33,6	35,3	37,8	31,5	47,1	38,1	36,8
An	67,1	59,8	4,3	4,3	57	50,3	42,3	65,9	63,8	63,1	59,3	66,6	50,5	7,1	7,2
Or	1,8	1,7	72	75	2,6	1,3	22,9	2,2	2,6	1,6	2,9	2	2,4	54,8	56

CQMG – quartzo monzogabro médio a grosso, LG – gabro bandado.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A
Litotipo	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG
Localização	int	centro	borda	centro	centro	borda	borda	int	centro	centro	borda	borda	int	centro	centro
SiO ₂	54,55	62,83	64,16	64,30	63,95	53,79	59,52	53,22	52,99	53,74	57,72	57,13	53,20	52,10	53,54
TiO ₂															
Al ₂ O ₃	28,64	20,17	19,86	19,62	19,58	28,27	24,53	29,05	29,01	28,97	26,04	26,35	28,80	27,08	28,35
FeO	0,29	0,31	0,41	0,24	0,32	0,29	0,19	0,27	0,35	0,74	0,36	0,20	0,41	2,68	0,28
Cr ₂ O ₃															
MnO	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00
NiO															
MgO	0,02	0,01	0,00	0,02	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	1,12	0,01
CaO	11,45	1,28	1,54	1,32	1,25	11,02	6,65	11,98	11,86	11,53	8,45	8,67	11,62	10,03	11,38
Na ₂ O	4,97	3,69	4,37	3,96	4,04	5,03	7,76	4,66	4,77	4,91	6,90	6,50	4,95	4,69	4,99
K ₂ O	0,35	9,55	9,19	9,76	9,97	0,30	0,37	0,29	0,27	0,31	0,30	0,26	0,33	1,46	0,32
SrO	0,31	0,23	0,04	0,03	0,17	0,24	0,14	0,35	0,24	0,09	0,04	0,14	0,32	0,38	0,37
BaO	0,05	2,31	0,08	0,35	0,33	0,10	0,00	0,13	0,02	0,26	0,18	0,00	0,00	0,33	0,15
Total	100,66	100,37	99,65	99,60	99,59	99,09	99,21	99,97	99,53	100,55	100,01	99,25	99,66	99,88	99,38
Si	9,832	11,576	11,693	11,748	11,719	9,840	10,726	9,685	9,677	9,727	10,386	10,336	9,708	9,660	9,792
Al	6,079	4,377	4,263	4,221	4,225	6,090	5,205	6,225	6,239	6,175	5,518	5,614	6,190	5,914	6,106
Fe ³															
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²	0,043	0,048	0,063	0,037	0,048	0,045	0,028	0,041	0,053	0,112	0,055	0,030	0,063	0,416	0,043
Mn	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,006	0,000	0,001	0,000	0,000	0,004	0,002	0,000
Mg	0,004	0,003	0,000	0,005	0,000	0,011	0,000	0,000	0,001	0,000	0,005	0,003	0,004	0,310	0,004
Ba	0,003	0,166	0,006	0,025	0,023	0,007	0,000	0,009	0,002	0,018	0,013	0,000	0,000	0,024	0,010
Ca	2,211	0,253	0,300	0,258	0,246	2,159	1,284	2,335	2,320	2,236	1,629	1,681	2,271	1,992	2,229
Na	1,736	1,318	1,545	1,404	1,435	1,785	2,712	1,643	1,690	1,722	2,407	2,280	1,750	1,685	1,768
K	0,080	2,245	2,136	2,275	2,330	0,071	0,085	0,067	0,064	0,072	0,068	0,060	0,077	0,346	0,076
Total	19,993	19,986	20,006	19,973	20,026	20,008	20,047	20,011	20,046	20,063	20,081	20,004	20,067	20,349	20,028
Ab	43,1	34,5	38,8	35,7	35,8	44,5	66,5	40,6	41,5	42,7	58,7	56,7	42,7	41,9	43,4
An	54,9	6,6	7,5	6,6	6,1	53,8	31,5	57,7	56,9	55,5	39,7	41,8	55,4	49,5	54,7
Or	2	58,8	53,7	57,8	58,1	1,8	2,1	1,7	1,6	1,8	1,7	1,5	1,9	8,6	1,9

CQMG – quartzo monzogabro médio a grosso.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA81	VA81	VA81	VA81	VA81	VA81	VA81	VA81	VA81	VA81	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A
Litotipo	FQMG	FQMG	FQMG	FQMG	FQMG	FQMG	FQMG	FQMG	FQMG	FQMG	MON	MON	MON	MON	MON
Localização	int	int	int	int	int	int	int	int	int	int	borda	int	centro	int	centro
SiO ₂	53,91	55,56	54,93	53,08	54,83	53,17	53,44	65,55	65,58	65,75	63,21	63,32	63,09	63,79	54,41
TiO ₂	0,09	0,11	0,07	0,08	0,09	0,06	0,07	0,00	0,00	0,02	0,13	0,14	0,13	0,15	0,07
Al ₂ O ₃	28,12	27,59	28,00	28,98	27,16	29,36	29,24	18,64	18,50	18,83	19,57	19,40	19,86	19,88	26,84
FeO	0,40	0,53	0,32	0,26	0,41	0,26	0,25	0,13	0,14	0,10	0,18	0,09	0,17	0,21	1,22
Cr ₂ O ₃	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
MnO	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
NiO	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
MgO	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	0,77
CaO	11,00	10,12	10,69	11,95	10,14	12,18	12,15	0,12	0,17	0,24	1,16	0,73	1,20	1,28	10,10
Na ₂ O	5,10	5,57	5,42	4,89	5,36	4,61	4,68	2,60	2,73	3,36	3,52	3,09	3,75	3,73	5,18
K ₂ O	0,28	0,32	0,29	0,34	0,40	0,23	0,18	12,24	11,87	11,00	9,98	10,69	9,51	9,94	0,25
SrO	0,24	0,19	0,22	0,11	0,25	0,25	0,09	0,12	0,10	0,14	0,21	0,24	0,21	0,20	0,12
BaO	0,08	0,08	0,05	0,01	0,11	0,06	0,00	0,32	0,34	0,42	0,98	1,67	1,64	0,70	0,02
Total	99,22	100,09	100,00	99,72	98,75	100,21	100,12	99,73	99,44	99,87	98,95	99,37	99,56	99,88	99,01
Si	9,852	10,037	9,943	9,673	10,045	9,644	9,681	11,998	12,020	11,975	11,698	11,738	11,644	11,674	9,968
Al	6,052	5,870	5,969	6,220	5,860	6,271	6,238	4,018	3,993	4,039	4,265	4,235	4,317	4,285	5,791
Fe ³															
Ti	0,012	0,015	0,010	0,011	0,013	0,008	0,010	0,000	0,000	0,003	0,018	0,020	0,018	0,021	0,010
Fe ²	0,060	0,080	0,048	0,040	0,062	0,039	0,038	0,020	0,022	0,015	0,028	0,014	0,026	0,032	0,187
Mn	0,000	0,000	0,001	0,002	0,000	0,002	0,003	0,001	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,002
Mg	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,210
Ba	0,005	0,006	0,003	0,001	0,008	0,005	0,000	0,023	0,024	0,030	0,071	0,121	0,119	0,050	0,001
Ca	2,154	1,959	2,073	2,333	1,990	2,367	2,358	0,024	0,034	0,047	0,230	0,145	0,237	0,251	1,983
Na	1,807	1,951	1,902	1,728	1,904	1,621	1,644	0,923	0,970	1,187	1,263	1,111	1,342	1,324	1,840
K	0,064	0,075	0,067	0,079	0,093	0,053	0,041	2,858	2,776	2,556	2,356	2,528	2,239	2,321	0,058
Total	20,006	19,996	20,016	20,087	19,975	20,010	20,013	19,865	19,840	19,855	19,931	19,912	19,942	19,958	20,050
Ab	44,9	49	47,1	41,7	47,8	40,1	40,7	24,3	25,7	31,3	32,8	29,4	35,1	34	47,4
An	53,5	49,2	51,3	56,4	49,9	58,6	58,3	0,6	0,9	1,2	6	3,8	6,2	6,4	51,1
Or	1,6	1,9	1,7	1,9	2,3	1,3	1	75,1	73,4	67,4	61,2	66,8	58,6	59,6	1,5

FQMG – quartzo monzogabro fino a médio, MON – monzonito.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A
Litotipo	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON
Localização	centro	borda	int	borda	centro	borda	centro	int	borda	centro	int	int	centro	borda	int
SiO ₂	63,64	63,27	64,02	64,19	58,00	54,54	63,50	63,14	63,73	54,86	54,71	67,99	54,10	54,04	54,26
TiO ₂	0,10	0,16	0,11	0,10	0,08	0,09	0,14	0,15	0,12	0,09	0,10	0,00	0,09	0,10	0,09
Al ₂ O ₃	19,15	19,65	19,49	19,50	25,60	27,90	19,37	19,65	19,64	27,57	27,52	19,53	27,69	27,95	27,60
FeO	0,21	0,20	0,15	0,17	0,20	0,26	0,19	0,21	0,20	0,29	0,27	0,19	0,54	0,33	0,61
Cr ₂ O ₃	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01
MnO	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00	0,02	0,03	0,00	0,02
NiO	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
MgO	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01	0,00	0,12
CaO	1,10	1,20	1,09	0,90	7,88	10,80	1,24	1,18	1,22	10,24	10,36	0,04	10,88	10,86	10,48
Na ₂ O	3,17	3,27	3,32	3,09	7,02	5,35	3,72	3,67	3,67	5,42	5,39	11,40	5,00	5,14	5,25
K ₂ O	10,75	10,44	10,59	11,15	0,27	0,26	9,89	9,88	9,88	0,51	0,45	0,03	0,47	0,35	0,30
SrO	0,19	0,22	0,18	0,16	0,14	0,15	0,20	0,19	0,21	0,27	0,26	0,00	0,24	0,21	0,13
BaO	0,32	1,00	0,22	0,20	0,00	0,00	0,72	0,92	0,64	0,11	0,09	0,00	0,08	0,09	0,05
Total	98,69	99,45	99,20	99,49	99,21	99,37	98,97	99,00	99,33	99,42	99,15	99,33	99,15	99,07	98,92
Si	11,779	11,679	11,763	11,776	10,481	9,928	11,728	11,677	11,714	9,994	9,989	11,955	9,905	9,886	9,934
Al	4,174	4,271	4,217	4,213	5,448	5,981	4,213	4,280	4,251	5,915	5,918	4,044	5,970	6,021	5,951
Fe ³															
Ti	0,014	0,022	0,015	0,014	0,011	0,012	0,019	0,021	0,017	0,012	0,014	0,000	0,012	0,014	0,012
Fe ²	0,033	0,031	0,023	0,026	0,030	0,040	0,029	0,032	0,031	0,044	0,041	0,028	0,083	0,050	0,093
Mn	0,002	0,003	0,002	0,005	0,003	0,000	0,000	0,002	0,000	0,005	0,000	0,003	0,005	0,000	0,003
Mg	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,029	0,003	0,000	0,033
Ba	0,023	0,072	0,016	0,014	0,000	0,000	0,052	0,067	0,046	0,008	0,006	0,000	0,006	0,006	0,004
Ca	0,218	0,237	0,215	0,177	1,526	2,106	0,245	0,234	0,240	1,999	2,027	0,008	2,134	2,129	2,056
Na	1,138	1,170	1,183	1,099	2,460	1,888	1,332	1,316	1,308	1,914	1,908	3,887	1,775	1,823	1,864
K	2,538	2,458	2,482	2,610	0,062	0,060	2,330	2,331	2,317	0,119	0,105	0,007	0,110	0,082	0,070
Total	19,930	19,943	19,916	19,934	20,021	20,015	19,948	19,960	19,924	20,010	20,008	19,961	20,003	20,011	20,020
Ab	29,2	30,3	30,5	28,3	60,8	46,6	34,1	33,9	33,8	47,5	47,2	99,6	44,2	45,2	46,7
An	5,6	6,1	5,5	4,6	37,7	51,9	6,3	6	6,2	49,6	50,2	0,2	53,1	52,8	51,5
Or	65,2	63,6	64	67,2	1,5	1,5	59,6	60,1	59,9	3	2,6	0,2	2,7	2	1,8

MON – monzonito.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74
Litotipo	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	borda	centro	borda	centro	borda	int	centro	borda	borda	int	centro	borda	borda	int	int
SiO ₂	63,91	63,27	62,04	61,76	54,96	50,08	51,21	51,80	55,69	50,92	52,77	55,05	53,47	56,71	55,61
TiO ₂	0,14	0,06	0,18	0,18	0,13	0,12	0,13	0,13	0,07	0,09	0,05	0,04	0,11	0,06	0,07
Al ₂ O ₃	20,05	20,05	20,33	20,44	28,15	31,69	30,65	30,19	28,09	30,83	29,57	27,87	28,95	27,18	27,35
FeO	0,21	0,16	0,12	0,23	0,25	0,26	0,27	0,25	0,23	0,32	0,30	0,17	0,22	0,22	0,27
Cr ₂ O ₃															
MnO	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,13	0,01	0,01
NiO															
MgO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,00
CaO	1,14	1,08	0,91	1,18	9,81	13,72	12,79	12,45	9,26	12,91	11,63	9,00	11,01	8,74	9,50
Na ₂ O	3,76	3,58	3,21	3,27	5,30	3,19	3,68	4,08	5,41	3,65	4,39	5,61	4,63	5,72	5,52
K ₂ O	10,60	10,68	11,04	10,47	0,50	0,25	0,29	0,27	0,73	0,34	0,45	0,87	0,46	1,02	0,79
SrO	0,30	0,31	0,45	0,41	0,27	0,28	0,32	0,34	0,40	0,39	0,37	0,31	0,27	0,33	0,34
BaO	0,29	0,59	2,02	2,35	0,19	0,01	0,09	0,07	0,05	0,03	0,12	0,15	0,01	0,03	0,06
Total	100,40	99,80	100,31	100,30	99,58	99,61	99,44	99,58	99,96	99,48	99,67	99,08	99,29	100,01	99,51
Si	11,649	11,630	11,503	11,463	9,974	9,172	9,379	9,467	10,053	9,333	9,625	10,040	9,757	10,223	10,101
Al	4,304	4,340	4,439	4,468	6,016	6,835	6,611	6,498	5,972	6,655	6,351	5,986	6,221	5,770	5,850
Fe ³															
Ti	0,019	0,008	0,025	0,025	0,018	0,017	0,018	0,017	0,010	0,013	0,007	0,005	0,015	0,008	0,010
Fe ²	0,032	0,025	0,019	0,036	0,038	0,040	0,041	0,039	0,035	0,050	0,046	0,027	0,033	0,033	0,041
Mn	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,020	0,001	0,002
Mg	0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,000	0,002	0,002	0,005	0,000	0,005	0,000	0,008	0,000	0,000
Ba	0,021	0,043	0,147	0,171	0,014	0,000	0,007	0,005	0,004	0,002	0,009	0,011	0,001	0,002	0,004
Ca	0,222	0,212	0,181	0,235	1,908	2,692	2,510	2,438	1,791	2,535	2,273	1,759	2,152	1,688	1,849
Na	1,329	1,276	1,154	1,177	1,865	1,133	1,307	1,446	1,894	1,297	1,553	1,984	1,638	1,999	1,944
K	2,465	2,505	2,611	2,479	0,117	0,059	0,068	0,063	0,168	0,078	0,104	0,201	0,108	0,235	0,182
Total	20,041	20,042	20,080	20,057	19,953	19,949	19,943	19,975	19,932	19,964	19,973	20,014	19,953	19,959	19,983
Ab	33,1	32	29,2	30,2	47,9	29,2	33,6	36,6	49,2	33,2	39,5	50,3	42	51	48,9
An	5,5	5,3	4,6	6	49	69,3	64,6	61,8	46,5	64,8	57,8	44,6	55,2	43	46,5
Or	61,4	62,7	66,2	63,7	3	1,5	1,8	1,6	4,4	2	2,6	5,1	2,8	6	4,6

MG – monzogabro.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA74	VA74	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60
Litotipo	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	centro	centro	centro	borda	int	borda	int	int	centro	int	borda	centro	borda	centro	borda
SiO ₂	56,98	54,18	51,46	52,38	51,03	54,59	52,48	51,20	51,79	51,61	51,97	52,59	55,76	63,31	63,22
TiO ₂	0,02	0,10	0,06	0,11	0,19	0,04	0,09	0,10	0,06	0,08	0,08	0,08	0,02	0,08	0,05
Al ₂ O ₃	26,50	28,70	29,84	29,17	29,37	27,78	29,25	29,73	29,51	29,62	29,43	28,84	26,84	19,22	18,94
FeO	0,23	0,25	0,34	0,44	0,87	0,32	0,35	0,30	0,35	0,35	0,35	0,31	0,25	0,13	0,10
Cr ₂ O ₃			0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
MnO	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,00	0,02	0,02
NiO			0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
MgO	0,02	0,01	0,00	0,00	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	8,13	10,69	12,91	12,15	12,47	10,49	12,15	12,88	12,56	12,81	12,71	11,97	9,51	0,81	0,42
Na ₂ O	6,27	4,91	4,06	4,36	3,95	5,35	4,52	4,08	4,18	4,02	4,28	4,51	5,95	2,39	1,97
K ₂ O	0,72	0,50	0,40	0,46	0,59	0,53	0,41	0,38	0,36	0,40	0,33	0,47	0,42	12,23	13,13
SrO	0,29	0,28	0,31	0,29	0,30	0,23	0,23	0,31	0,29	0,29	0,22	0,35	0,15	0,25	0,24
BaO	0,02	0,12	0,03	0,08	0,17	0,03	0,09	0,12	0,05	0,08	0,03	0,06	0,00	0,39	0,39
Total	99,19	99,74	99,42	99,45	99,36	99,37	99,60	99,12	99,16	99,28	99,42	99,20	98,90	98,84	98,50
Si	10,331	9,838	9,449	9,599	9,415	9,951	9,598	9,437	9,520	9,486	9,529	9,655	10,165	11,768	11,820
Al	5,658	6,137	6,452	6,295	6,382	5,964	6,300	6,453	6,388	6,411	6,355	6,236	5,762	4,207	4,170
Fe ³															
Ti	0,003	0,014	0,008	0,015	0,026	0,005	0,012	0,014	0,008	0,011	0,011	0,011	0,003	0,011	0,007
Fe ²	0,035	0,037	0,052	0,067	0,134	0,049	0,054	0,046	0,054	0,054	0,054	0,048	0,038	0,020	0,016
Mn	0,001	0,000	0,002	0,000	0,002	0,002	0,003	0,002	0,000	0,002	0,003	0,003	0,000	0,003	0,003
Mg	0,006	0,004	0,000	0,000	0,113	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,002	0,008	0,002	0,006	0,012	0,002	0,006	0,009	0,004	0,006	0,002	0,004	0,000	0,028	0,029
Ca	1,579	2,080	2,540	2,386	2,465	2,049	2,381	2,544	2,474	2,523	2,497	2,355	1,858	0,161	0,084
Na	2,204	1,729	1,445	1,549	1,413	1,891	1,603	1,458	1,490	1,433	1,522	1,606	2,103	0,861	0,714
K	0,165	0,115	0,094	0,108	0,139	0,123	0,096	0,089	0,084	0,094	0,077	0,110	0,098	2,900	3,132
Total	19,984	19,962	20,044	20,025	20,101	20,036	20,053	20,052	20,022	20,020	20,050	20,028	20,027	19,959	19,975
Ab	55,8	44,1	35,4	38,3	35,2	46,5	39,3	35,6	36,8	35,4	37,2	39,4	51,8	22	18,2
An	40	53	62,3	59	61,4	50,4	58,4	62,2	61,1	62,3	61	57,8	45,8	4,1	2,1
Or	4,2	2,9	2,3	2,7	3,5	3	2,4	2,2	2,1	2,3	1,9	2,7	2,4	73,9	79,7

MG – monzogabro.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA60	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A
Litotipo	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	int	int	int	int	borda	int	int	centro	borda	centro	borda	int	int	centro	borda
SiO ₂	63,64	63,17	63,60	63,69	63,71	62,28	62,23	63,23	63,86	52,24	59,16	62,59	63,18	53,19	58,07
TiO ₂	0,08	0,08	0,08	0,06	0,08	0,08	0,11	0,09	0,08	0,11	0,03	0,11	0,09	0,06	0,02
Al ₂ O ₃	19,04	19,01	19,11	19,15	19,00	19,89	19,72	19,61	19,31	29,14	24,94	19,87	19,62	28,78	25,71
FeO	0,15	0,13	0,14	0,13	0,12	0,09	0,21	0,15	0,14	0,27	0,27	0,13	0,12	0,24	0,19
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00	0,01
NiO	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	0,64	0,68	0,79	0,80	0,55	1,24	1,17	0,85	0,77	12,12	6,84	0,98	0,83	11,28	7,56
Na ₂ O	2,07	2,40	2,43	2,44	2,18	2,50	2,50	3,71	3,38	4,36	7,04	3,52	3,40	4,63	6,87
K ₂ O	12,78	12,47	12,14	12,20	12,79	11,29	11,45	9,94	10,72	0,36	0,75	9,96	10,28	0,36	0,40
SrO	0,22	0,22	0,20	0,24	0,27	0,22	0,25	0,22	0,20	0,27	0,18	0,20	0,20	0,27	0,16
BaO	0,33	0,32	0,31	0,28	0,31	1,45	1,10	1,37	0,49	0,04	0,04	1,96	1,53	0,05	0,00
Total	98,98	98,48	98,82	99,01	99,02	99,05	98,77	99,17	98,96	98,94	99,30	99,32	99,28	98,86	98,99
Si	11,817	11,791	11,803	11,800	11,826	11,615	11,628	11,702	11,788	9,605	10,666	11,625	11,702	9,752	10,504
Al	4,164	4,179	4,177	4,178	4,153	4,368	4,339	4,274	4,198	6,310	5,295	4,346	4,280	6,214	5,477
Fe ³															
Ti	0,011	0,011	0,011	0,008	0,011	0,011	0,015	0,013	0,011	0,015	0,004	0,015	0,013	0,008	0,003
Fe ²	0,023	0,020	0,022	0,020	0,019	0,014	0,033	0,023	0,022	0,042	0,041	0,020	0,019	0,037	0,029
Mn	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002	0,000	0,003	0,000	0,005	0,000	0,002
Mg	0,006	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,024	0,023	0,023	0,020	0,023	0,106	0,081	0,099	0,035	0,003	0,003	0,143	0,111	0,004	0,000
Ca	0,127	0,136	0,157	0,159	0,109	0,248	0,234	0,169	0,152	2,388	1,321	0,195	0,165	2,216	1,465
Na	0,745	0,869	0,874	0,877	0,785	0,904	0,906	1,331	1,210	1,554	2,461	1,268	1,221	1,646	2,410
K	3,027	2,969	2,874	2,884	3,029	2,686	2,729	2,347	2,524	0,084	0,173	2,360	2,429	0,084	0,092
Total	19,946	19,998	19,943	19,948	19,958	19,954	19,970	19,958	19,942	20,001	19,967	19,972	19,945	19,961	19,982
Ab	19,1	21,9	22,4	22,4	20	23,6	23,4	34,6	31,1	38,6	62,2	33,2	32	41,7	60,8
An	3,3	3,4	4	4,1	2,8	6,5	6	4,4	3,9	59,3	33,4	5,1	4,3	56,2	36,9
Or	77,6	74,7	73,6	73,6	77,2	70	70,5	61	65	2,1	4,4	61,7	63,7	2,1	2,3

MG – monzogabro.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73
Litotipo	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	centro	borda	centro	borda	centro	centro	borda	centro	borda	centro	borda	int	centro	borda	centro
SiO ₂	52,13	56,01	51,59	56,37	62,40	58,44	63,14	63,34	52,77	55,36	62,70	62,92	63,85	51,89	55,85
TiO ₂	0,09	0,06	0,09	0,07	0,11	0,05	0,10	0,08	0,09	0,08	0,16	0,15	0,13	0,10	0,09
Al ₂ O ₃	29,58	26,96	29,79	26,63	20,26	25,52	19,88	19,62	28,72	27,72	20,15	20,03	19,96	29,90	27,40
FeO	0,27	0,21	0,28	0,22	0,16	0,52	0,15	0,18	0,24	0,28	0,15	0,14	0,18	0,26	0,29
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
NiO	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	0,02	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	12,15	8,89	12,46	8,78	1,16	7,23	0,83	0,82	11,16	9,60	1,23	1,05	1,27	12,94	9,70
Na ₂ O	4,32	6,09	4,16	6,14	4,06	6,81	3,75	3,66	4,72	5,69	3,59	3,89	4,18	4,09	5,90
K ₂ O	0,26	0,39	0,27	0,42	8,86	0,41	9,69	10,15	0,27	0,23	9,58	9,23	9,17	0,32	0,45
SrO	0,24	0,22	0,27	0,26	0,25	0,19	0,22	0,17	0,24	0,15	0,23	0,21	0,21	0,23	0,22
BaO	0,08	0,20	0,07	0,16	2,07	0,08	1,66	1,10	0,06	0,04	1,99	2,02	0,51	0,05	0,08
Total	99,12	99,04	98,99	99,07	99,35	99,27	99,45	99,15	98,29	99,18	99,79	99,64	99,47	99,80	99,99
Si	9,561	10,192	9,489	10,250	11,560	10,548	11,663	11,708	9,730	10,055	11,582	11,618	11,680	9,476	10,092
Al	6,389	5,778	6,453	5,703	4,420	5,425	4,325	4,271	6,236	5,930	4,384	4,356	4,300	6,431	5,831
Fe ³															
Ti	0,012	0,008	0,012	0,010	0,015	0,007	0,014	0,011	0,012	0,011	0,022	0,021	0,018	0,014	0,012
Fe ²	0,041	0,032	0,043	0,033	0,025	0,078	0,023	0,028	0,037	0,043	0,023	0,022	0,028	0,040	0,044
Mn	0,000	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002	0,000	0,002
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,006	0,014	0,005	0,011	0,150	0,006	0,120	0,080	0,004	0,003	0,144	0,146	0,037	0,004	0,006
Ca	2,388	1,733	2,456	1,711	0,230	1,398	0,164	0,162	2,205	1,868	0,243	0,208	0,249	2,532	1,878
Na	1,536	2,149	1,484	2,165	1,458	2,383	1,343	1,312	1,687	2,004	1,286	1,393	1,483	1,448	2,067
K	0,061	0,091	0,063	0,097	2,094	0,094	2,284	2,394	0,064	0,053	2,258	2,174	2,140	0,075	0,104
Total	19,994	19,999	20,007	19,982	19,955	19,941	19,944	19,974	19,975	19,969	19,944	19,938	19,937	20,020	20,036
Ab	38,5	54,1	37,1	54,5	38,6	61,5	35,4	33,9	42,6	51,1	34	36,9	38,3	35,7	51
An	59,9	43,6	61,4	43,1	6,1	36,1	4,3	4,2	55,7	47,6	6,4	5,5	6,4	62,4	46,4
Or	1,5	2,3	1,6	2,4	55,4	2,4	60,2	61,9	1,6	1,4	59,6	57,6	55,3	1,8	2,6

MG – monzogabro.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA73	VA73	VA73	VA73	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	Xen2
Litotipo	MG	MG	MG	MG	SY	SY	SY	SY	SY	SY	SY	SY	SY	SY	EC
Localização	int	int	centro	borda	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	int	centro	centro	centro
SiO ₂	63,58	62,90	52,49	54,45	64,53	63,72	63,72	63,62	63,05	63,84	62,77	53,88	51,50	53,04	54,32
TiO ₂	0,12	0,15	0,11	0,09	0,13	0,16	0,17	0,14	0,17	0,16	0,18	0,09	0,09	0,11	0,05
Al ₂ O ₃	19,86	20,12	29,64	28,27	18,86	19,88	19,41	18,34	20,05	19,68	19,75	28,33	29,72	28,85	28,35
FeO	0,13	0,20	0,24	0,28	0,54	0,55	0,38	0,76	0,64	0,48	0,54	0,54	0,68	0,60	0,45
Cr ₂ O ₃	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,04	0,01	0,02	0,00	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01
NiO	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	1,13	0,06	0,15	0,32	0,00	0,00	0,00	0,03
CaO	1,22	1,21	12,36	10,79	0,57	1,54	1,20	0,59	1,86	1,31	1,55	11,15	13,07	11,81	10,44
Na ₂ O	3,87	3,95	4,41	5,23	3,96	4,69	4,60	3,11	4,86	3,63	4,14	5,09	4,09	4,74	5,10
K ₂ O	9,82	8,98	0,28	0,31	10,02	8,52	8,93	10,77	7,71	9,90	8,79	0,44	0,27	0,22	0,38
SrO	0,23	0,24	0,26	0,24	0,12	0,11	0,10	0,09	0,13	0,15	0,16	0,23	0,21	0,16	0,32
BaO	0,48	1,95	0,04	0,10	0,34	0,33	0,26	0,34	0,48	0,38	0,54	0,06	0,05	0,00	0,09
Total	99,32	99,71	99,85	99,77	99,23	99,55	98,82	98,91	99,02	99,73	98,76	99,83	99,71	99,56	99,52
Si	11,678	11,599	9,563	9,885	11,846	11,641	11,720	11,773	11,574	11,683	11,593	9,809	9,441	9,684	9,885
Al	4,296	4,369	6,360	6,044	4,077	4,277	4,204	3,997	4,334	4,241	4,296	6,074	6,416	6,203	6,075
Fe ³															
Ti	0,017	0,021	0,015	0,012	0,018	0,022	0,024	0,019	0,023	0,022	0,025	0,012	0,012	0,015	0,007
Fe ²	0,020	0,031	0,037	0,043	0,083	0,084	0,058	0,118	0,098	0,073	0,083	0,082	0,104	0,092	0,068
Mn	0,000	0,002	0,000	0,002	0,002	0,006	0,002	0,003	0,000	0,005	0,003	0,003	0,005	0,002	0,000
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,033	0,000	0,000	0,312	0,016	0,041	0,088	0,000	0,000	0,000	0,008
Ba	0,035	0,141	0,003	0,007	0,024	0,024	0,019	0,025	0,035	0,027	0,039	0,004	0,004	0,000	0,006
Ca	0,240	0,239	2,413	2,099	0,112	0,301	0,236	0,117	0,366	0,257	0,307	2,175	2,567	2,310	2,035
Na	1,378	1,412	1,558	1,841	1,410	1,661	1,640	1,116	1,730	1,288	1,483	1,797	1,454	1,678	1,800
K	2,301	2,113	0,065	0,072	2,347	1,986	2,095	2,543	1,806	2,311	2,071	0,102	0,063	0,051	0,088
Total	19,965	19,927	20,014	20,005	19,952	20,002	19,998	20,023	19,982	19,948	19,988	20,058	20,066	20,035	19,972
Ab	35,2	37,5	38,6	45,9	36,4	42,1	41,3	29,6	44,3	33,4	38,4	44,1	35,6	41,5	45,9
An	6,1	6,3	59,8	52,3	2,9	7,6	5,9	3,1	9,4	6,7	8	53,4	62,9	57,2	51,9
Or	58,7	56,1	1,6	1,8	60,7	50,3	52,8	67,3	46,3	59,9	53,6	2,5	1,5	1,3	2,2

MG – monzogabro, SY – bolsão sienítico, EC – enclave.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen4	Xen4
Litotipo	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC
Localização	borda	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro
SiO ₂	63,76	64,21	62,98	54,22	54,23	55,27	52,68	52,94	55,83	54,01	53,05	62,98	55,83	54,15	54,39
TiO ₂	0,10	0,07	0,12	0,08	0,10	0,10	0,03	0,08	0,08	0,05	0,08	0,12	0,08	0,08	0,07
Al ₂ O ₃	19,77	19,79	20,29	28,46	28,43	28,28	29,70	29,21	27,28	28,35	29,53	20,29	27,28	29,21	28,93
FeO	0,21	0,15	0,09	0,39	0,65	0,46	0,26	0,35	0,29	0,38	0,28	0,09	0,29	0,37	0,30
Cr ₂ O ₃															
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
NiO															
MgO	0,00	0,00	0,00	0,04	0,20	0,08	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,00	0,03	0,03	0,14
CaO	0,98	1,00	1,09	10,43	10,43	10,06	11,93	11,11	9,32	10,56	11,63	1,09	9,32	11,02	10,68
Na ₂ O	3,36	3,49	3,40	5,05	4,92	5,23	4,34	4,49	5,54	4,90	4,32	3,40	5,54	4,87	5,06
K ₂ O	11,40	11,05	10,65	0,41	0,37	0,46	0,36	0,43	0,55	0,46	0,33	10,65	0,55	0,22	0,21
SrO	0,25	0,28	0,28	0,31	0,36	0,32	0,22	0,26	0,20	0,21	0,21	0,28	0,20	0,21	0,22
BaO	0,56	0,41	1,72	0,11	0,12	0,14	0,09	0,10	0,06	0,13	0,01	1,72	0,06	0,03	0,06
Total	100,39	100,45	100,60	99,49	99,82	100,41	99,63	98,98	99,18	99,08	99,49	100,60	99,18	100,18	100,06
Si	11,676	11,709	11,571	9,868	9,851	9,959	9,602	9,698	10,142	9,869	9,660	11,571	10,142	9,778	9,826
Al	4,264	4,250	4,390	6,100	6,082	6,001	6,375	6,301	5,836	6,101	6,333	4,390	5,836	6,211	6,155
Fe ³															
Ti	0,014	0,010	0,016	0,011	0,013	0,014	0,004	0,010	0,011	0,007	0,011	0,016	0,011	0,010	0,010
Fe ²	0,032	0,023	0,013	0,059	0,099	0,069	0,039	0,053	0,043	0,059	0,042	0,013	0,043	0,056	0,045
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg	0,000	0,000	0,000	0,011	0,054	0,023	0,006	0,007	0,008	0,008	0,012	0,000	0,008	0,008	0,037
Ba	0,040	0,029	0,124	0,008	0,008	0,010	0,006	0,007	0,004	0,009	0,001	0,124	0,004	0,002	0,004
Ca	0,191	0,195	0,214	2,034	2,030	1,942	2,330	2,181	1,814	2,067	2,269	0,214	1,814	2,132	2,067
Na	1,193	1,234	1,211	1,782	1,733	1,827	1,534	1,595	1,951	1,736	1,525	1,211	1,951	1,705	1,772
K	2,663	2,571	2,496	0,094	0,086	0,106	0,084	0,101	0,128	0,108	0,076	2,496	0,128	0,050	0,049
Total	20,073	20,021	20,035	19,967	19,958	19,951	19,980	19,953	19,937	19,964	19,930	20,035	19,937	19,952	19,965
Ab	29,5	30,9	30,9	45,6	45	47,1	38,9	41,1	50,1	44,4	39,4	30,9	50,1	43,9	45,6
An	4,7	4,9	5,5	52	52,7	50,1	59	56,3	46,6	52,9	58,6	5,5	46,6	54,8	53,2
Or	65,8	64,3	63,7	2,4	2,2	2,7	2,1	2,6	3,3	2,8	2	63,7	3,3	1,3	1,3

EC – enclave.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	VA41D2	VA41D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D5	VA67D1	VA67D1	VA67D1
Litotipo	EC	EC	EC	EC	EC	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
Localização	centro	centro	centro	centro	int	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro
SiO ₂	55,06	55,20	67,87	68,02	68,02	66,96	67,72	64,84	65,94	65,95	65,58	62,39	63,68	63,19	63,18
TiO ₂	0,18	0,10	0,01	0,00	0,00	0,05	0,03	0,01	0,02	0,01	0,05	0,04	0,01	0,00	0,00
Al ₂ O ₃	21,88	28,61	19,86	20,10	20,10	19,79	19,94	20,65	20,35	20,56	19,97	22,05	19,12	19,74	19,81
FeO	2,44	0,34	0,07	0,01	0,01	0,46	0,36	0,93	0,56	0,29	0,56	1,25	0,04	0,10	0,05
Cr ₂ O ₃						0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01
NiO						0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MgO	3,15	0,08	0,00	0,00	0,00	0,42	0,08	0,09	0,02	0,02	0,01	0,27	0,00	0,00	0,00
CaO	12,73	10,36	0,13	0,16	0,16	1,00	0,80	1,44	1,21	1,15	2,54	1,57	0,00	0,00	0,01
Na ₂ O	4,78	5,34	11,43	11,36	11,36	10,74	11,01	10,25	10,61	10,82	10,68	9,26	0,58	0,88	1,05
K ₂ O	0,17	0,27	0,03	0,02	0,02	0,21	0,14	0,25	0,14	0,10	0,43	0,95	15,71	15,03	15,08
SrO	0,18	0,20	0,02	0,08	0,08	0,33	0,20	0,40	0,31	0,25	0,26	0,65	0,10	0,64	0,31
BaO	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,08	0,02	0,00	0,05	0,00	0,05	0,11	0,11	0,02	0,00
Total	100,70	100,53	99,42	99,76	99,76	100,05	100,30	98,89	99,22	99,15	100,13	98,54	99,35	99,62	99,50
Si	10,103	9,917	11,922	11,904	11,904	11,783	11,848	11,590	11,705	11,694	11,623	11,282	11,854	11,742	11,736
Al	4,728	6,053	4,108	4,143	4,143	4,101	4,108	4,347	4,254	4,293	4,168	4,696	4,192	4,320	4,334
Fe ³															
Ti	0,025	0,013	0,001	0,000	0,000	0,006	0,004	0,001	0,003	0,001	0,007	0,005	0,001	0,000	0,000
Fe ²	0,374	0,052	0,011	0,001	0,001	0,068	0,052	0,139	0,083	0,043	0,083	0,189	0,006	0,016	0,008
Mn	0,016	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,002
Mg	0,862	0,021	0,000	0,001	0,001	0,111	0,022	0,024	0,005	0,005	0,003	0,073	0,000	0,000	0,000
Ba	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,005	0,002	0,000	0,003	0,000	0,003	0,008	0,008	0,001	0,000
Ca	2,503	1,994	0,024	0,031	0,031	0,188	0,149	0,276	0,230	0,218	0,482	0,304	0,000	0,000	0,002
Na	1,701	1,860	3,893	3,855	3,855	3,665	3,735	3,552	3,652	3,720	3,670	3,247	0,209	0,317	0,378
K	0,039	0,062	0,006	0,005	0,005	0,046	0,031	0,057	0,032	0,023	0,097	0,219	3,731	3,563	3,574
Total	20,353	19,974	19,965	19,941	19,941	19,975	19,953	19,986	19,967	19,997	20,136	20,023	20,001	19,962	20,034
Ab	40,1	47,5	99,2	99,1	99,1	94,0	95,4	91,4	93,3	93,9	86,4	86,1	5,3	8,2	9,6
An	59	50,9	0,6	0,8	0,8	4,8	3,8	7,1	5,9	5,5	11,3	8,1	0,0	0,0	0,1
Or	0,9	1,6	0,2	0,1	0,1	1,2	0,8	1,5	0,8	0,6	2,3	5,8	94,7	91,8	90,4

EC – enclave, BT – basanita.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D5	VA43D5
Litotipo	PT	PT	PT	PT	PT	PT	PT	PT	PT	PT	PT	PT	PT	TB	TB
Localização	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	TB	TB
SiO ₂	57,94	64,61	65,81	51,52	67,52	63,12	49,40	47,00	51,57	48,16	47,85	49,37	48,31	53,11	51,96
TiO ₂	0,06	0,00	0,82	0,12	0,01	0,00	0,08	0,05	0,10	0,07	0,08	0,06	0,06	0,10	0,08
Al ₂ O ₃	25,54	21,38	19,33	28,73	19,69	18,42	33,45	32,41	29,58	31,74	31,77	30,90	32,39	29,36	30,06
FeO	0,47	0,40	0,37	0,52	0,20	0,11	0,54	0,55	0,52	0,67	0,56	0,54	0,52	0,55	0,57
Cr ₂ O ₃	0,02	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00
MnO	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,00	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
NiO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
MgO	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,14	0,01	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CaO	6,88	1,60	1,15	11,07	0,27	0,35	0,66	15,82	12,16	14,77	15,23	13,91	15,16	12,51	13,34
Na ₂ O	7,13	10,00	10,26	4,67	11,14	0,94	2,67	2,10	3,83	2,63	2,38	3,00	2,37	4,33	4,01
K ₂ O	0,17	0,43	1,43	0,61	0,17	14,90	8,23	0,25	0,60	0,38	0,28	0,40	0,28	0,26	0,24
SrO	0,48	0,22	0,11	0,47	0,16	0,05	0,21	0,38	0,48	0,37	0,39	0,39	0,39	0,22	0,25
BaO	0,32	0,05	0,10	0,15	0,12	0,69	0,46	0,02	0,12	0,00	0,00	0,03	0,06	0,06	0,02
Total	99,02	98,73	99,39	97,89	99,33	98,59	95,87	98,59	98,98	98,92	98,56	98,62	99,57	100,52	100,55
Si	10,513	11,535	11,729	9,608	11,909	11,881	9,432	8,783	9,512	8,953	8,928	9,172	8,914	9,619	9,438
Al	5,458	4,495	4,057	6,310	4,090	4,083	7,521	7,133	6,425	6,949	6,981	6,761	7,039	6,262	6,430
Fe ³															
Ti	0,008	0,000	0,110	0,017	0,001	0,000	0,011	0,007	0,014	0,010	0,011	0,008	0,008	0,014	0,011
Fe ²	0,071	0,060	0,055	0,081	0,029	0,017	0,086	0,086	0,080	0,104	0,087	0,084	0,080	0,083	0,087
Mn	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001	0,002	0,005	0,000	0,003	0,002	0,002	0,000	0,002	0,000	0,002
Mg	0,000	0,005	0,000	0,000	0,003	0,000	0,040	0,003	0,000	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,023	0,003	0,007	0,011	0,008	0,051	0,034	0,001	0,009	0,000	0,000	0,002	0,004	0,004	0,001
Ca	1,338	0,306	0,220	2,212	0,051	0,071	0,135	3,168	2,403	2,942	3,044	2,769	2,997	2,428	2,596
Na	2,509	3,462	3,546	1,689	3,810	0,343	0,988	0,761	1,370	0,948	0,861	1,081	0,848	1,521	1,412
K	0,039	0,098	0,325	0,145	0,038	3,578	2,005	0,060	0,141	0,090	0,067	0,095	0,066	0,061	0,055
Total	19,961	19,967	20,051	20,075	19,940	20,026	20,257	20,002	19,957	20,031	19,981	19,972	19,958	19,992	20,032
Ab	64,6	89,5	86,7	41,7	97,7	8,6	31,6	19,1	35,0	23,8	21,7	27,4	21,7	37,9	34,8
An	34,4	7,9	5,4	54,7	1,3	1,8	4,3	79,4	61,4	73,9	76,6	70,2	76,6	60,5	63,9
Or	1,0	2,5	7,9	3,6	1,0	89,6	64,1	1,5	3,6	2,3	1,7	2,4	1,7	1,5	1,4

PT – phonotephrite, TB – traquibasalto.

Tabela 1. (continuação).

Amostra	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5
Litotipo	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB
Localização						int	centro	centro	centro	centro	centro
SiO ₂	51,96	54,67	53,85	53,43	62,48	52,07	54,76	53,32	64,81	64,71	63,59
TiO ₂	0,10	0,11	0,13	0,12	0,07	0,06	0,13	0,14	0,11	0,15	0,10
Al ₂ O ₃	30,22	28,65	28,68	28,72	23,20	30,10	27,94	29,10	19,64	19,80	21,08
FeO	0,59	0,42	0,49	0,57	0,42	0,51	0,47	0,44	0,34	0,41	0,68
Cr ₂ O ₃	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
MnO	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
MgO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02
CaO	12,35	11,41	11,77	11,82	5,03	13,34	10,93	12,42	1,32	1,33	2,81
Na ₂ O	3,84	5,16	4,97	4,64	8,40	4,04	5,14	4,54	4,33	4,17	5,34
K ₂ O	0,69	0,21	0,20	0,29	0,46	0,23	0,42	0,17	8,83	9,00	6,14
SrO	0,20	0,14	0,13	0,25	0,09	0,22	0,26	0,11	0,14	0,16	0,13
BaO	0,02	0,00	0,00	0,03	0,03	0,06	0,07	0,03	0,36	0,38	0,22
Total	99,99	100,82	100,24	99,89	100,18	100,66	100,13	100,28	99,94	100,13	100,12
Si	9,472	9,828	9,754	9,724	11,088	9,445	9,919	9,663	11,761	11,734	11,466
Al	6,488	6,065	6,118	6,156	4,848	6,430	5,960	6,210	4,197	4,228	4,476
Fe ³											
Ti	0,014	0,014	0,018	0,016	0,009	0,009	0,018	0,020	0,015	0,021	0,013
Fe ²	0,090	0,063	0,075	0,086	0,063	0,077	0,071	0,066	0,051	0,063	0,103
Mn	0,002	0,004	0,003	0,002	0,000	0,002	0,002	0,002	0,005	0,002	0,002
Mg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,006
Ba	0,001	0,000	0,000	0,002	0,002	0,004	0,005	0,002	0,025	0,027	0,016
Ca	2,412	2,198	2,284	2,305	0,956	2,593	2,121	2,411	0,256	0,259	0,543
Na	1,357	1,799	1,746	1,637	2,890	1,421	1,805	1,595	1,524	1,466	1,867
K	0,161	0,049	0,047	0,068	0,104	0,054	0,096	0,040	2,044	2,082	1,412
Total	19,997	20,020	20,045	19,996	19,960	20,035	19,997	20,009	19,882	19,882	19,904
Ab	34,5	44,5	42,8	40,8	73,2	34,9	44,9	39,4	39,9	38,5	48,8
An	61,4	54,3	56,0	57,5	24,2	63,7	52,7	59,6	6,7	6,8	14,2
Or	4,1	1,2	1,2	1,7	2,6	1,3	2,4	1,0	53,5	54,7	36,9

TB – traquibasalto.

Tabela 2. Composições de cristais de olivina com fórmulas estruturais calculadas na base de 4 oxigênios e 3 cátions.

Amostra Litotipo	VA46A M-G	VA46A M-G	VA46A M-G	VA46A M-G	VA46A M-G	VA46A M-G	VA43RA M-MG	VA43RA M-MG	VA43RA M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG
SiO ₂	36,65	36,48	36,26	36,33	36,15	36,22	39,61	39,15	39,68	35,99	35,95	35,98	36,16	36,26	36,19	36,29	36,04
TiO ₂	0,03	0,05	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03	0,03	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02
Al ₂ O ₃	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
FeO	33,79	34,02	35,11	35,14	34,55	34,80	16,96	17,96	16,91	36,87	36,81	36,66	35,44	35,80	36,58	35,91	37,06
Cr ₂ O ₃	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
MnO	0,81	0,80	0,82	0,89	0,84	0,86	0,57	0,60	0,60	0,67	0,66	0,66	0,65	0,66	0,67	0,63	0,71
NiO	0,04	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,14	0,13	0,04	0,07	0,05	0,05	0,06	0,04	0,06	0,07	0,04
MgO	29,47	29,53	28,69	28,45	28,41	28,13	43,78	42,50	43,38	27,54	27,47	27,41	28,52	28,27	27,78	28,09	27,15
CaO	0,11	0,13	0,05	0,10	0,15	0,11	0,07	0,01	0,10	0,08	0,09	0,06	0,07	0,06	0,12	0,09	0,05
Na ₂ O	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,04	0,04	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02	0,04
K ₂ O	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
SrO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
BaO	0,00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,01				0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00
Total	100,96	101,10	101,10	100,99	100,21	100,22	101,20	100,38	100,73	101,29	101,14	100,92	100,92	101,15	101,49	101,14	101,13
Si	1,001	0,997	0,996	0,999	1,000	1,003	0,994	0,995	0,999	0,995	0,995	0,998	0,996	0,998	0,997	0,999	0,999
Al	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
Ti	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Fe ²	0,772	0,777	0,807	0,808	0,800	0,806	0,356	0,382	0,356	0,853	0,852	0,850	0,817	0,824	0,843	0,827	0,859
Mn	0,019	0,019	0,019	0,021	0,020	0,020	0,012	0,013	0,013	0,016	0,015	0,015	0,015	0,015	0,016	0,015	0,017
Mg	1,200	1,203	1,175	1,167	1,172	1,161	1,638	1,611	1,628	1,135	1,134	1,133	1,171	1,160	1,141	1,153	1,122
Ca	0,003	0,004	0,001	0,003	0,004	0,003	0,002	0,000	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,004	0,003	0,001
Na	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002
K	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,003	0,003	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
Total	2,999	3,003	3,003	3,001	3,000	2,996	3,007	3,005	3,000	3,005	3,002	3,002	3,002	3,002	3,001	3,004	3,001
Fe#	0,39	0,39	0,41	0,41	0,41	0,41	0,18	0,19	0,18	0,43	0,43	0,43	0,41	0,42	0,42	0,42	0,43
Mg#	0,61	0,61	0,59	0,59	0,59	0,59	0,82	0,81	0,82	0,57	0,57	0,57	0,59	0,58	0,58	0,58	0,57

M-G – melagabro, M-MG – melamonzogabro.

Tabela 2. (continuação).

Amostra Litotipo	VA43RD M-MG	VA60 MG	VA60 MG	VA60 MG	VA60 MG	VA60 MG	VA60 MG	VA60 MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA73 MG	VA73 MG	VA73 MG	VA73 MG
SiO ₂	36,40	34,88	34,85	34,73	34,73	34,74	34,74	34,13	34,54	34,73	34,54	34,91	34,51	34,30	36,25	36,35	36,23	
TiO ₂	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,03	0,08	0,03	0,03	0,04	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01	
Al ₂ O ₃	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	
FeO	36,53	41,40	41,53	42,18	42,74	42,26	42,80	43,68	41,32	42,09	42,74	42,14	42,93	44,07	35,23	35,01	35,19	
Cr ₂ O ₃	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	
MnO	0,66	0,80	0,75	0,76	0,77	0,76	0,75	0,99	1,00	0,94	0,94	0,91	0,92	0,94	0,74	0,70	0,76	
NiO	0,07	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,02	0,03	0,04	0,03	0,06	0,07	0,04	
MgO	27,83	23,70	23,65	22,98	22,71	23,00	22,50	21,05	22,80	22,27	21,88	22,17	21,53	20,82	28,69	28,76	28,54	
CaO	0,11	0,06	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08	0,09	0,06	0,10	0,03	0,12	0,06	0,06	0,11	0,10	0,11	
Na ₂ O	0,01	0,04	0,02	0,02	0,02	0,06	0,00	0,02	0,07	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	
K ₂ O	0,01	0,01	0,00	0,01	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	
SrO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	
BaO	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	
Total	101,68	100,96	100,98	100,88	101,15	100,99	101,03	100,10	99,93	100,27	100,18	100,37	100,05	100,34	101,16	101,03	100,92	
Si	0,999	0,992	0,992	0,993	0,993	0,992	0,995	0,995	0,996	1,000	0,999	1,004	1,000	0,998	0,996	0,998	0,997	
Al	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	
Ti	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	
Fe ²	0,839	0,985	0,989	1,009	1,022	1,010	1,025	1,064	0,996	1,014	1,034	1,013	1,041	1,072	0,809	0,804	0,810	
Mn	0,015	0,019	0,018	0,018	0,019	0,018	0,018	0,024	0,024	0,023	0,023	0,022	0,023	0,023	0,017	0,016	0,018	
Mg	1,139	1,005	1,004	0,980	0,968	0,980	0,960	0,914	0,980	0,956	0,943	0,950	0,930	0,903	1,175	1,177	1,171	
Ca	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,001	0,004	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	
Na	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,003	0,000	0,001	0,004	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Ni	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	
Total	2,999	3,007	3,008	3,006	3,007	3,008	3,003	3,004	3,005	3,000	3,001	2,997	3,000	3,002	3,004	3,001	3,002	
Fe#	0,42	0,49	0,50	0,51	0,51	0,51	0,52	0,54	0,50	0,51	0,52	0,52	0,53	0,54	0,41	0,41	0,41	
Mg#	0,58	0,51	0,50	0,49	0,49	0,49	0,48	0,46	0,50	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,59	0,59	0,59	

M-MG – melamonzogabro, MG – monzogabro.

Table 2. (continuação).

Amostra Litotipo	VA73 MG	VA73 MG	VA73 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA41D2 MG	VA41D2 BT	VA41D2 BT	VA41D2 BT	VA41D2 BT	Xen2 EC	Xen2 EC
SiO ₂	36,31	36,16	35,71	35,85	34,54	35,03	35,20	35,06	35,20	34,50	34,81	39,74	40,43	40,38	39,20	35,34	35,20	
TiO ₂	0,00	0,00	0,05	0,04	0,03	0,06	0,19	0,00	0,02	0,00	0,04	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,02	
Al ₂ O ₃	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,06	0,05	0,05	0,03	0,01	
FeO	34,73	35,21	37,28	37,00	38,24	36,17	36,81	35,72	35,79	40,33	39,51	15,90	12,91	12,87	18,43	36,37	37,02	
Cr ₂ O ₃	0,00	0,03	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04	0,05	0,05	0,03	0,00	0,01	
MnO	0,71	0,70	0,72	0,69	0,87	0,86	0,86	0,79	0,84	0,91	0,89	0,27	0,23	0,21	0,31	0,73	0,78	
NiO	0,06	0,04	0,05	0,06	0,06	0,08	0,04	0,06	0,06	0,05	0,04	0,24	0,27	0,25	0,22	0,03	0,04	
MgO	29,14	28,82	26,86	27,13	25,64	26,68	26,68	27,74	27,85	24,45	25,02	43,47	45,94	45,88	41,67	27,62	26,64	
CaO	0,06	0,09	0,09	0,10	0,07	0,12	0,06	0,09	0,07	0,08	0,15	0,44	0,45	0,44	0,44	0,06	0,05	
Na ₂ O	0,01	0,02	0,07	0,02	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,05	0,00	0,00	
K ₂ O	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01	
SrO	0,00	0,02	0,00	0,00								0,00	0,00	0,00	0,00			
BaO	0,02	0,01	0,00	0,00								0,01	0,00	0,00	0,01			
Total	101,06	101,11	100,86	100,93	99,46	99,06	99,87	99,48	99,86	100,35	100,48	100,19	100,40	100,18	100,42	100,20	99,78	
Si	0,996	0,994	0,995	0,996	0,985	0,992	0,991	0,986	0,986	0,985	0,987	1,002	1,003	1,003	0,998	0,988	0,992	
Al	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	
Ti	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,004	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Fe ²	0,796	0,809	0,869	0,860	0,912	0,857	0,866	0,840	0,839	0,963	0,937	0,335	0,268	0,267	0,393	0,851	0,873	
Mn	0,016	0,016	0,017	0,016	0,021	0,021	0,021	0,019	0,020	0,022	0,021	0,006	0,005	0,004	0,007	0,017	0,019	
Mg	1,191	1,181	1,116	1,124	1,090	1,127	1,119	1,163	1,163	1,041	1,058	1,634	1,699	1,700	1,582	1,151	1,120	
Ca	0,002	0,003	0,003	0,003	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002	0,002	0,005	0,012	0,012	0,012	0,012	0,002	0,002	
Na	0,001	0,001	0,004	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000	
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	
Ni	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005	0,005	0,005	0,005	0,001	0,001	
Total	3,004	3,005	3,007	3,003	3,012	3,005	3,006	3,013	3,011	3,015	3,011	2,996	2,995	2,993	3,000	3,012	3,007	
Fe#	0,40	0,41	0,44	0,43	0,46	0,43	0,44	0,42	0,42	0,48	0,47	0,17	0,14	0,14	0,20	0,43	0,44	
Mg#	0,60	0,59	0,56	0,57	0,54	0,57	0,56	0,58	0,58	0,52	0,53	0,83	0,86	0,86	0,80	0,57	0,56	

MG – monzogabro, BT – basanita, EC – enclave.

Tabela 2. (continuação).

Amostra Litotipo	Xen2 EC	Xen2 EC	Xen2 EC	Xen2 EC
SiO ₂	34,81	35,34	35,20	34,81
TiO ₂	0,04	0,00	0,02	0,04
Al ₂ O ₃	0,02	0,03	0,01	0,02
FeO	37,31	36,37	37,02	37,31
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,01	0,00
MnO	0,72	0,73	0,78	0,72
NiO	0,05	0,03	0,04	0,05
MgO	27,24	27,62	26,64	27,24
CaO	0,05	0,06	0,05	0,05
Na ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,02	0,01	0,00
SrO				
BaO				
Total	100,24	100,20	99,78	100,24
Si	0,979	0,988	0,992	0,979
Al	0,001	0,001	0,000	0,001
Ti	0,001	0,000	0,000	0,001
Fe ²	0,878	0,851	0,873	0,878
Mn	0,017	0,017	0,019	0,017
Mg	1,142	1,151	1,120	1,142
Ca	0,002	0,002	0,002	0,002
Na	0,000	0,000	0,000	0,000
K	0,000	0,001	0,000	0,000
Ni	0,001	0,001	0,001	0,001
Total	3,021	3,012	3,007	3,021
Fe#	0,43	0,43	0,44	0,43
Mg#	0,57	0,57	0,56	0,57

EC – enclave.

Tabela 3. Composições de cristais de clinopiroxênio com fórmulas estruturais calculadas na base de 6 oxigênios e 4 cátions.

Amostra	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	
Litotipo	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	int	int	int	borda	int	centro	borda	borda	int	centro	centro	centro	int	int	int	int	int	borda	borda	
SiO ₂	50,45	49,79	52,35	51,00	50,49	51,56	49,73	50,79	50,29	51,93	50,90	50,97	49,73	48,97	49,73	51,12	48,69	49,77	50,07	
TiO ₂	1,37	1,63	0,66	1,11	1,34	0,77	1,44	1,07	1,41	0,51	1,04	0,86	1,67	1,53	1,46	0,94	1,92	1,68	1,43	
Al ₂ O ₃	3,42	3,64	2,53	2,81	3,47	2,68	4,10	3,64	3,58	2,88	3,95	3,46	3,80	4,23	3,24	3,68	4,83	3,77	3,56	
Cr ₂ O ₃	0,14	0,01	0,28	0,00	0,45	0,26	0,04	0,33	0,02	1,19	0,57	0,63	0,01	0,04	0,02	0,34	0,01	0,06	0,02	
FeO	7,91	8,62	5,19	8,35	6,83	6,56	8,34	7,24	8,32	4,45	6,13	5,60	8,98	8,02	8,28	5,55	9,00	9,09	8,94	
MnO	0,22	0,26	0,12	0,28	0,20	0,19	0,23	0,19	0,23	0,12	0,17	0,12	0,23	0,23	0,23	0,15	0,23	0,26	0,23	
NiO	0,01	0,00	0,04	0,00	0,03	0,03	0,00	0,03	0,02	0,05	0,03	0,03	0,01	0,05	0,02	0,03	0,02	0,00	0,03	
MgO	13,92	13,57	16,36	13,96	14,64	15,02	13,87	14,90	14,07	16,82	15,13	15,52	13,25	13,74	14,13	15,84	13,22	13,23	13,96	
CaO	21,93	21,71	22,19	21,88	22,02	22,35	21,61	21,62	21,59	21,63	21,53	21,90	21,70	21,41	21,46	22,04	21,31	21,71	21,17	
Na ₂ O	0,53	0,49	0,30	0,49	0,48	0,42	0,48	0,40	0,45	0,45	0,54	0,47	0,51	0,47	0,41	0,38	0,45	0,52	0,46	
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	
Total	99,91	99,73	100,01	99,89	99,94	99,85	99,84	100,20	99,99	100,04	100,00	99,56	99,90	98,71	99,00	100,07	99,69	100,09	99,86	
Si (T)	1,874	1,858	1,917	1,896	1,867	1,904	1,849	1,872	1,867	1,895	1,872	1,879	1,856	1,840	1,865	1,873	1,820	1,855	1,864	
Al (T)	0,127	0,142	0,084	0,104	0,133	0,096	0,152	0,128	0,133	0,105	0,128	0,121	0,144	0,160	0,135	0,127	0,180	0,145	0,136	
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	
Al (M1)	0,023	0,018	0,026	0,019	0,018	0,020	0,028	0,030	0,024	0,018	0,043	0,029	0,023	0,028	0,008	0,032	0,033	0,020	0,021	
Fe ³⁺ (M1)	0,060	0,069	0,035	0,058	0,061	0,056	0,076	0,057	0,061	0,056	0,050	0,060	0,064	0,079	0,075	0,061	0,071	0,066	0,067	
Ti (M1)	0,038	0,046	0,018	0,031	0,037	0,022	0,040	0,030	0,040	0,014	0,029	0,024	0,047	0,043	0,041	0,026	0,054	0,047	0,040	
Cr (M1)	0,004	0,000	0,008	0,000	0,013	0,007	0,001	0,010	0,001	0,034	0,017	0,018	0,000	0,001	0,001	0,010	0,000	0,002	0,001	
Ni (M1)	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	
Mg (M1)	0,771	0,755	0,893	0,774	0,807	0,827	0,769	0,819	0,779	0,875	0,830	0,853	0,737	0,770	0,790	0,865	0,737	0,735	0,775	
Fe ²⁺ (M1)	0,103	0,113	0,020	0,118	0,063	0,067	0,086	0,054	0,095	0,000	0,031	0,015	0,129	0,078	0,085	0,006	0,104	0,130	0,096	
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,039	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Fe ²⁺ (M2)	0,082	0,088	0,105	0,084	0,087	0,079	0,098	0,112	0,102	0,080	0,107	0,098	0,088	0,095	0,100	0,103	0,106	0,087	0,115	
Mn (M2)	0,007	0,008	0,004	0,009	0,006	0,006	0,007	0,006	0,007	0,004	0,005	0,004	0,007	0,007	0,007	0,005	0,007	0,008	0,007	
Ca (M2)	0,873	0,868	0,870	0,872	0,872	0,884	0,861	0,854	0,859	0,846	0,848	0,865	0,868	0,862	0,862	0,865	0,854	0,867	0,845	
Na (M2)	0,038	0,036	0,021	0,035	0,034	0,030	0,035	0,028	0,032	0,032	0,039	0,033	0,037	0,034	0,030	0,027	0,033	0,038	0,033	
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	
Wo	47,7	47,6	46,1	47,2	47,7	47,6	47,5	46,4	46,8	46,0	46,7	47,2	47,6	47,8	46,9	47,0	47,4	47,7	46,1	
Em	42,2	41,4	47,3	41,9	44,1	44,5	42,4	44,5	42,5	49,7	45,7	46,6	40,5	42,6	43,0	47,0	40,9	40,4	42,3	
Fs	10,1	11,0	6,6	10,9	8,2	7,9	10,1	9,0	10,7	4,3	7,6	6,2	11,9	9,6	10,1	5,9	11,7	11,9	11,5	
Q	96,0	96,2	97,8	96,3	96,4	96,9	96,3	97,0	96,6	96,7	95,9	96,5	96,1	96,3	96,8	97,1	96,5	96,0	96,5	
Jd	1,1	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8	1,9	1,2	1,0	1,0	0,3	1,0	1,1	0,9	0,8	
Aeg	2,9	3,0	1,3	2,8	2,8	2,3	2,7	2,0	2,4	2,5	2,2	2,4	2,9	2,7	2,9	1,9	2,4	3,1	2,7	
#Mg	80,6	79,0	87,8	79,3	84,3	84,9	80,7	83,1	79,8	92,0	85,7	88,3	77,3	81,6	81,0	88,8	77,8	77,2	78,6	

MG – melagabro.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA46A	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD
Litotipo	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG
Localização	borda	borda	centro	borda	int	centro	int	borda	int	int	centro	int	borda	int	centro	centro	int
SiO ₂	51,34	50,80	48,59	49,07	50,26	48,54	48,73	51,81	50,67	49,70	50,40	52,16	52,28	51,02	52,25	53,07	50,34
TiO ₂	0,93	1,19	1,90	1,53	1,49	1,85	1,74	0,57	1,39	1,71	1,33	0,70	0,25	0,62	0,65	0,34	1,46
Al ₂ O ₃	2,62	3,17	5,13	4,53	3,20	5,06	4,63	2,01	2,73	3,52	3,04	2,43	1,03	2,61	2,20	1,09	2,92
Cr ₂ O ₃	0,03	0,05	0,03	0,04	0,04	0,05	0,01	0,08	0,05	0,06	0,05	0,23	0,05	0,09	0,27	0,22	0,02
FeO	8,00	8,26	8,77	8,83	8,71	8,76	8,43	9,97	9,17	9,06	8,80	5,64	11,68	9,78	5,44	7,13	8,98
MnO	0,29	0,24	0,23	0,25	0,24	0,24	0,21	0,34	0,28	0,24	0,27	0,14	0,37	0,35	0,15	0,20	0,26
NiO	0,02	0,00	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01
MgO	14,04	13,89	13,43	13,87	14,09	13,30	12,96	13,63	14,70	13,90	14,40	16,16	13,26	13,74	16,55	15,34	14,28
CaO	22,10	21,98	21,41	20,80	21,53	21,33	22,09	21,17	20,48	21,07	21,03	22,07	20,59	21,11	22,00	22,31	20,87
Na ₂ O	0,56	0,53	0,48	0,49	0,41	0,47	0,50	0,33	0,32	0,37	0,35	0,30	0,32	0,36	0,27	0,26	0,35
K ₂ O	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00
Total	99,93	100,11	100,00	99,42	100,01	99,62	99,32	99,91	99,80	99,65	99,71	99,85	99,86	99,67	99,82	99,98	99,48
Si (T)	1,905	1,884	1,807	1,833	1,869	1,813	1,827	1,938	1,888	1,858	1,879	1,916	1,967	1,909	1,917	1,962	1,883
Al (T)	0,095	0,116	0,193	0,167	0,131	0,187	0,173	0,062	0,112	0,142	0,122	0,084	0,033	0,091	0,083	0,038	0,117
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,020	0,022	0,032	0,032	0,009	0,036	0,031	0,027	0,008	0,013	0,012	0,021	0,013	0,024	0,012	0,009	0,012
Fe ³⁺ (M1)	0,062	0,064	0,087	0,083	0,067	0,079	0,080	0,024	0,049	0,058	0,058	0,040	0,029	0,055	0,047	0,023	0,048
Ti (M1)	0,026	0,033	0,053	0,043	0,042	0,052	0,049	0,016	0,039	0,048	0,037	0,019	0,007	0,017	0,018	0,009	0,041
Cr (M1)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	0,002	0,001	0,002	0,001	0,007	0,001	0,003	0,008	0,006	0,001
Ni (M1)	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000
Mg (M1)	0,777	0,768	0,745	0,772	0,781	0,741	0,724	0,760	0,816	0,775	0,800	0,885	0,744	0,767	0,905	0,845	0,796
Fe ²⁺ (M1)	0,114	0,111	0,081	0,068	0,099	0,091	0,115	0,170	0,087	0,104	0,090	0,028	0,206	0,134	0,010	0,106	0,103
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,072	0,081	0,104	0,125	0,105	0,105	0,069	0,117	0,150	0,121	0,126	0,105	0,133	0,117	0,111	0,091	0,131
Mn (M2)	0,009	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008	0,007	0,011	0,009	0,008	0,009	0,004	0,012	0,011	0,005	0,006	0,008
Ca (M2)	0,879	0,873	0,853	0,832	0,858	0,854	0,887	0,849	0,818	0,844	0,840	0,869	0,830	0,846	0,865	0,884	0,836
Na (M2)	0,040	0,038	0,035	0,035	0,029	0,034	0,037	0,024	0,023	0,027	0,025	0,022	0,023	0,026	0,019	0,019	0,025
K (M2)	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	47,7	47,6	47,8	46,3	46,6	47,7	49,4	44,8	43,7	45,8	45,3	46,0	43,4	45,4	45,8	45,9	44,8
Em	42,2	41,9	41,8	43,0	42,4	41,4	40,3	40,1	43,6	42,0	43,1	46,9	38,9	41,1	47,9	43,9	42,7
Fs	10,1	10,5	10,4	10,7	11,1	10,9	10,2	15,2	12,7	12,2	11,6	7,1	17,7	13,5	6,4	10,3	12,5
Q	95,8	96,0	96,3	96,2	96,9	96,4	96,1	97,6	97,6	97,2	97,4	97,8	97,6	97,3	98,0	98,1	97,4
Jd	1,0	1,0	1,0	1,1	0,4	1,1	1,1	1,3	0,3	0,5	0,5	0,8	0,7	0,8	0,4	0,6	0,5
Aeg	3,2	3,0	2,7	2,7	2,7	2,5	2,8	1,2	2,1	2,3	2,2	1,5	1,6	1,9	1,6	1,4	2,1
#Mg	80,7	80,0	80,1	80,0	79,3	79,2	79,7	72,6	77,5	77,5	78,7	86,9	68,7	75,3	88,3	81,0	77,4

MG – melagabro, M-MG – melamonzogabro.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA
Litotipo	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG
Localização	borda	int	int	int	int	centro	int	borda	centro	int	borda	int	int	borda	centro	int	centro
SiO ₂	50,16	50,04	50,68	51,04	50,05	49,82	48,98	49,83	52,90	48,41	49,45	50,89	49,20	50,94	51,49	48,03	49,58
TiO ₂	1,53	1,48	0,99	1,11	1,44	1,47	1,67	1,60	0,43	1,89	1,51	0,95	1,44	1,20	0,68	1,71	1,40
Al ₂ O ₃	3,42	4,04	3,58	2,75	3,23	3,58	4,40	3,72	2,06	4,99	3,53	3,41	4,03	3,35	2,78	4,92	3,74
Cr ₂ O ₃	0,06	0,00	0,52	0,22	0,11	0,09	0,00	0,11	1,23	0,05	0,01	0,22	0,04	0,00	0,39	0,13	0,03
FeO	7,11	8,04	6,90	7,31	7,49	7,13	8,14	8,17	4,04	8,42	7,18	6,78	8,27	7,19	5,89	8,15	7,86
MnO	0,27	0,25	0,17	0,16	0,20	0,15	0,12	0,26	0,10	0,23	0,28	0,04	0,15	0,27	0,11	0,24	0,19
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,08	0,00	0,10	0,04	0,00	0,03	0,02	0,07	0,06	0,02	0,12
MgO	14,97	14,20	14,77	15,29	14,58	14,58	14,04	13,86	17,33	13,56	14,07	15,49	13,89	15,39	16,00	13,79	14,21
CaO	22,22	21,97	22,43	22,34	22,32	22,27	22,47	22,53	21,87	22,61	22,38	22,38	22,07	20,67	22,77	22,54	22,08
Na ₂ O	0,61	0,44	0,40	0,39	0,66	0,74	0,43	0,45	0,45	0,47	0,63	0,32	0,41	0,73	0,35	0,44	0,39
K ₂ O	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
Total	100,34	100,45	100,43	100,60	100,09	99,92	100,32	100,53	100,50	100,67	99,04	100,51	99,51	99,82	100,51	99,96	99,59
Si (T)	1,843	1,846	1,863	1,873	1,847	1,838	1,810	1,842	1,919	1,787	1,846	1,864	1,835	1,876	1,880	1,782	1,845
Al (T)	0,148	0,154	0,137	0,119	0,140	0,156	0,190	0,158	0,082	0,213	0,154	0,136	0,165	0,124	0,120	0,215	0,155
Fe ³⁺ (T)	0,009	0,000	0,000	0,008	0,013	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,000	0,022	0,019	0,000	0,000	0,000	0,002	0,004	0,007	0,004	0,001	0,011	0,012	0,022	0,000	0,000	0,009
Fe ³⁺ (M1)	0,113	0,081	0,076	0,087	0,116	0,129	0,124	0,094	0,048	0,135	0,113	0,088	0,100	0,087	0,096	0,149	0,094
Ti (M1)	0,042	0,041	0,028	0,031	0,040	0,041	0,046	0,045	0,012	0,052	0,042	0,026	0,041	0,033	0,019	0,048	0,039
Cr (M1)	0,002	0,000	0,015	0,006	0,003	0,003	0,000	0,003	0,035	0,002	0,000	0,006	0,001	0,000	0,011	0,004	0,001
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,002	0,000	0,003	0,001	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,004
Mg (M1)	0,820	0,781	0,810	0,836	0,802	0,802	0,774	0,764	0,896	0,746	0,783	0,846	0,772	0,845	0,871	0,763	0,788
Fe ²⁺ (M1)	0,023	0,075	0,054	0,040	0,038	0,023	0,051	0,091	0,000	0,060	0,061	0,022	0,074	0,011	0,002	0,036	0,065
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,041	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,074	0,092	0,083	0,089	0,064	0,062	0,076	0,068	0,075	0,065	0,051	0,098	0,084	0,124	0,081	0,065	0,086
Mn (M2)	0,009	0,008	0,005	0,005	0,006	0,005	0,004	0,008	0,003	0,007	0,009	0,001	0,005	0,009	0,003	0,008	0,006
Ca (M2)	0,875	0,868	0,884	0,878	0,882	0,881	0,890	0,892	0,850	0,894	0,895	0,878	0,882	0,816	0,891	0,896	0,880
Na (M2)	0,043	0,032	0,028	0,028	0,047	0,053	0,031	0,032	0,032	0,034	0,046	0,022	0,029	0,052	0,025	0,032	0,028
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	48,8	47,8	48,3	47,6	49,4	49,8	49,7	49,2	45,7	50,7	50,0	47,6	48,7	45,4	48,3	50,9	48,4
Em	45,8	43,0	44,3	45,3	44,9	45,4	43,2	42,1	50,3	42,3	43,7	45,9	42,6	47,1	47,2	43,3	43,3
Fs	5,4	9,2	7,5	7,0	5,7	4,8	7,1	8,7	4,0	7,1	6,2	6,5	8,8	7,5	4,5	5,7	8,3
Q	95,4	96,6	97,0	97,1	95,0	94,4	96,7	96,6	96,7	96,3	95,1	97,6	96,9	94,5	97,4	96,5	97,0
Jd	0,0	0,7	0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	0,3	0,3	1,1	0,0	0,0	0,3
Aeg	4,6	2,7	2,4	2,9	5,0	5,6	3,3	3,3	2,9	3,6	4,8	2,1	2,8	4,4	2,6	3,5	2,7
#Mg	89,5	82,4	85,6	86,6	88,7	90,4	85,9	82,8	92,6	85,7	87,5	87,6	83,0	86,3	91,3	88,3	83,9

M-MG – melamonzogabro.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA
Litotipo	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG
Localização	centro	int	centro	borda	centro	borda	centro	int	borda	borda	int	int	int	int	int	int	int
SiO ₂	51,09	49,49	49,64	48,99	48,88	49,17	49,15	49,69	49,76	51,01	48,99	49,26	47,45	48,55	48,60	49,47	48,57
TiO ₂	0,86	1,43	1,25	1,36	1,56	1,30	1,32	1,05	1,41	0,97	1,47	1,53	1,94	1,61	1,64	1,03	1,51
Al ₂ O ₃	2,80	4,04	3,43	4,25	4,03	3,77	4,31	3,60	3,62	2,48	4,28	4,32	4,98	4,29	4,37	3,47	3,53
Cr ₂ O ₃	0,26	0,14	0,14	0,11	0,01	0,26	0,34	0,27	0,11	0,00	0,15	0,06	0,07	0,11	0,03	0,17	0,16
FeO	5,51	7,76	7,32	7,62	7,51	7,08	7,31	6,92	7,42	6,99	7,83	7,68	8,30	7,98	7,86	6,81	7,62
MnO	0,19	0,22	0,16	0,22	0,17	0,18	0,14	0,12	0,26	0,36	0,15	0,09	0,14	0,19	0,15	0,22	0,18
NiO	0,06	0,14	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,06	0,05	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00
MgO	15,46	14,22	14,76	14,17	14,18	14,35	14,38	14,87	14,45	16,23	13,79	13,98	13,50	13,72	13,59	14,87	13,79
CaO	22,39	21,99	22,00	21,77	21,97	22,10	22,96	22,39	22,28	20,51	22,06	22,38	22,27	21,80	22,14	22,24	22,54
Na ₂ O	0,31	0,45	0,34	0,64	0,48	0,55	0,39	0,33	0,63	0,61	0,38	0,42	0,42	0,39	0,47	0,49	0,61
K ₂ O	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
Total	98,93	99,88	99,04	99,15	98,78	98,74	100,30	99,23	99,99	99,25	99,14	99,76	99,06	98,65	98,89	98,77	98,52
Si (T)	1,898	1,835	1,852	1,825	1,830	1,838	1,812	1,847	1,838	1,885	1,833	1,830	1,779	1,827	1,823	1,844	1,826
Al (T)	0,102	0,165	0,148	0,175	0,170	0,162	0,187	0,153	0,158	0,108	0,167	0,171	0,220	0,174	0,177	0,153	0,156
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,004	0,007	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,003	0,018
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,020	0,012	0,002	0,012	0,008	0,004	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,022	0,018	0,000	0,017	0,016	0,000
Fe ³⁺ (M1)	0,049	0,100	0,095	0,129	0,108	0,116	0,131	0,104	0,124	0,103	0,084	0,094	0,138	0,090	0,101	0,128	0,127
Ti (M1)	0,024	0,040	0,035	0,038	0,044	0,036	0,037	0,029	0,039	0,027	0,041	0,043	0,055	0,046	0,046	0,029	0,043
Cr (M1)	0,008	0,004	0,004	0,003	0,000	0,008	0,010	0,008	0,003	0,000	0,005	0,002	0,002	0,003	0,001	0,005	0,005
Ni (M1)	0,002	0,004	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,002	0,001	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000
Mg (M1)	0,856	0,786	0,821	0,787	0,791	0,800	0,790	0,824	0,796	0,867	0,769	0,774	0,755	0,770	0,760	0,827	0,773
Fe ²⁺ (M1)	0,042	0,053	0,042	0,031	0,049	0,036	0,032	0,030	0,036	0,000	0,077	0,068	0,051	0,074	0,074	0,012	0,053
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,081	0,087	0,091	0,078	0,079	0,069	0,061	0,081	0,065	0,106	0,084	0,077	0,071	0,087	0,071	0,069	0,042
Mn (M2)	0,006	0,007	0,005	0,007	0,005	0,006	0,004	0,004	0,008	0,011	0,005	0,003	0,005	0,006	0,005	0,007	0,006
Ca (M2)	0,891	0,874	0,879	0,869	0,881	0,885	0,907	0,892	0,882	0,812	0,885	0,890	0,895	0,879	0,890	0,888	0,908
Na (M2)	0,023	0,033	0,025	0,046	0,035	0,040	0,028	0,024	0,045	0,044	0,027	0,030	0,030	0,029	0,035	0,036	0,045
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	47,7	48,5	48,0	49,2	49,0	49,5	50,7	48,8	49,6	44,8	48,8	49,2	50,5	48,6	49,6	49,5	51,1
Em	45,8	43,7	44,8	44,6	44,0	44,7	44,1	45,1	44,8	49,3	42,4	42,8	42,6	42,5	42,3	46,0	43,5
Fs	6,5	7,8	7,3	6,2	7,1	5,9	5,2	6,1	5,7	5,8	8,9	8,0	6,9	8,9	8,1	4,5	5,3
Q	97,6	96,5	97,4	95,0	96,3	95,7	97,0	97,5	95,2	95,4	97,1	96,8	96,7	96,9	96,3	96,2	95,2
Jd	0,7	0,4	0,1	0,4	0,3	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0	0,6	0,5	0,0	0,5	0,0	0,0	
Aeg	1,7	3,1	2,6	4,6	3,5	4,1	3,0	2,4	4,8	4,6	2,3	2,7	3,3	2,6	3,2	3,8	4,8
#Mg	87,5	84,9	86,0	87,9	86,2	88,4	89,5	88,1	88,8	89,4	82,7	84,3	86,1	82,7	83,9	91,0	89,1

M-MG – melamonzogabro.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RA	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD
Litotipo	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG
Localização	borda	int	int	int	int	int	borda	borda	int	centro	centro	centro	borda	int	int	int	borda
SiO ₂	49,46	47,42	47,89	47,79	49,68	50,77	51,97	52,27	50,38	50,04	52,38	50,33	49,63	50,28	50,20	49,83	52,01
TiO ₂	1,37	1,92	1,84	1,78	1,49	1,22	0,52	0,25	1,31	1,53	0,63	1,33	1,66	1,39	1,37	1,41	0,44
Al ₂ O ₃	3,56	5,68	5,26	5,63	3,65	3,31	1,50	0,84	3,17	3,50	2,14	3,47	3,40	3,39	3,44	3,98	1,39
Cr ₂ O ₃	0,03	0,16	0,17	0,08	0,11	0,17	0,03	0,00	0,13	0,10	0,22	0,24	0,06	0,15	0,14	0,44	0,03
FeO	7,54	8,29	8,27	8,33	7,48	8,61	11,39	11,74	9,14	8,58	5,18	8,34	10,07	8,55	8,82	8,05	11,66
MnO	0,25	0,16	0,23	0,23	0,15	0,23	0,37	0,35	0,24	0,25	0,15	0,24	0,28	0,24	0,24	0,20	0,38
NiO	0,00	0,03	0,03	0,02	0,10	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00
MgO	14,44	13,09	13,18	12,93	14,19	14,67	14,28	13,16	14,59	14,16	16,55	14,30	13,54	14,47	14,22	14,39	13,72
CaO	22,19	22,01	21,87	22,34	22,05	20,58	19,63	20,87	20,29	21,04	22,26	21,24	20,31	20,92	20,87	21,13	19,90
Na ₂ O	0,62	0,50	0,43	0,39	0,67	0,35	0,32	0,26	0,34	0,33	0,31	0,35	0,38	0,34	0,36	0,38	0,34
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00
Total	99,45	99,25	99,16	99,50	99,58	99,94	100,03	99,75	99,60	99,54	99,83	99,85	99,38	99,77	99,67	99,81	99,86
Si (T)	1,837	1,776	1,796	1,787	1,845	1,885	1,944	1,971	1,880	1,869	1,920	1,872	1,867	1,871	1,873	1,851	1,953
Al (T)	0,156	0,224	0,204	0,213	0,156	0,115	0,056	0,029	0,120	0,131	0,080	0,128	0,133	0,129	0,128	0,149	0,047
Fe ³⁺ (T)	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,000	0,026	0,029	0,035	0,004	0,030	0,010	0,009	0,019	0,023	0,012	0,024	0,018	0,020	0,024	0,026	0,015
Fe ³⁺ (M1)	0,129	0,120	0,097	0,102	0,112	0,038	0,040	0,026	0,048	0,043	0,049	0,047	0,048	0,052	0,049	0,059	0,031
Ti (M1)	0,038	0,054	0,052	0,050	0,042	0,034	0,015	0,007	0,037	0,043	0,017	0,037	0,047	0,039	0,038	0,040	0,012
Cr (M1)	0,001	0,005	0,005	0,002	0,003	0,005	0,001	0,000	0,004	0,003	0,006	0,007	0,002	0,005	0,004	0,013	0,001
Ni (M1)	0,000	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
Mg (M1)	0,799	0,731	0,737	0,721	0,786	0,812	0,796	0,740	0,812	0,789	0,904	0,793	0,759	0,803	0,791	0,797	0,768
Fe ²⁺ (M1)	0,033	0,063	0,080	0,089	0,051	0,081	0,138	0,218	0,080	0,100	0,011	0,091	0,126	0,081	0,094	0,067	0,173
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,065	0,076	0,083	0,070	0,070	0,149	0,178	0,126	0,157	0,126	0,099	0,121	0,144	0,133	0,132	0,125	0,163
Mn (M2)	0,008	0,005	0,007	0,007	0,005	0,007	0,012	0,011	0,008	0,008	0,005	0,008	0,009	0,008	0,008	0,006	0,012
Ca (M2)	0,883	0,883	0,879	0,895	0,877	0,819	0,787	0,843	0,811	0,842	0,874	0,846	0,819	0,834	0,834	0,841	0,801
Na (M2)	0,044	0,036	0,031	0,028	0,048	0,025	0,024	0,019	0,025	0,024	0,022	0,025	0,028	0,025	0,026	0,027	0,025
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	49,6	50,4	49,4	50,5	49,2	44,0	41,4	43,8	43,6	45,4	46,3	45,7	44,3	45,1	45,1	46,0	42,1
Em	44,9	41,7	41,5	40,6	44,1	43,7	41,9	38,4	43,6	42,5	47,9	42,8	41,1	43,4	42,7	43,6	40,3
Fs	5,5	8,0	9,1	8,9	6,8	12,4	16,6	17,9	12,7	12,2	5,8	11,5	14,6	11,6	12,2	10,5	17,6
Q	95,3	96,1	96,6	97,0	94,9	97,4	97,6	98,1	97,4	97,5	97,7	97,4	97,1	97,4	97,3	97,1	97,5
Jd	0,0	0,7	0,8	0,8	0,2	1,2	0,5	0,5	0,7	0,9	0,5	0,9	0,8	0,7	0,9	0,9	0,8
Aeg	4,8	3,2	2,6	2,3	5,0	1,5	1,9	1,5	1,8	1,6	1,8	1,7	2,1	1,9	1,8	2,0	1,7
#Mg	89,1	84,0	82,0	82,0	86,7	77,9	71,6	68,2	77,4	77,8	89,1	78,9	73,8	78,9	77,8	80,6	69,6

M-MG – melamonzogabro.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA43RD	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A	VA60A
Litotipo	M-MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	borda	int	centro	borda	centro	borda	borda	borda	centro	borda	borda	int	centro	centro	centro	centro	borda
SiO ₂	55,80	50,34	51,32	49,30	52,58	51,41	50,85	50,46	49,11	50,26	51,42	51,95	50,34	49,80	49,85	50,96	50,74
TiO ₂	0,34	0,67	0,81	1,93	0,44	0,71	0,79	0,71	1,95	0,70	0,58	0,60	1,37	1,43	0,77	0,60	0,39
Al ₂ O ₃	1,96	2,42	2,55	2,31	1,68	2,31	2,24	2,34	3,99	2,28	1,96	2,02	3,40	3,64	2,72	1,88	1,67
Cr ₂ O ₃	0,03	0,03	0,27	0,03	0,18	0,08	0,04	0,06	0,02	0,05	0,03	0,59	0,22	0,08	0,10	0,03	0,00
FeO	10,44	11,72	8,83	13,55	6,50	8,33	11,65	11,88	8,84	14,14	11,92	6,84	7,15	9,35	13,38	14,01	14,57
MnO	0,32	0,37	0,26	0,38	0,20	0,26	0,35	0,38	0,25	0,39	0,37	0,20	0,20	0,24	0,39	0,43	0,38
NiO	0,00	0,00	0,02	0,02	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01	0,01
MgO	12,06	13,44	15,66	13,37	17,18	15,70	14,18	13,17	13,99	13,25	13,74	15,35	14,74	14,05	12,84	13,67	12,46
CaO	17,69	19,89	19,76	18,20	20,60	20,30	19,25	20,06	21,06	18,25	19,36	21,82	21,85	20,83	19,05	18,26	18,82
Na ₂ O	0,51	0,33	0,30	0,28	0,26	0,24	0,31	0,30	0,38	0,27	0,27	0,38	0,33	0,30	0,30	0,28	0,28
K ₂ O	0,10	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Total	99,26	99,22	99,77	99,39	99,67	99,35	99,67	99,36	99,59	99,61	99,68	99,79	99,62	99,71	99,41	100,13	99,33
Si (T)	1,966	1,903	1,903	1,875	1,932	1,912	1,909	1,908	1,835	1,905	1,936	1,921	1,869	1,860	1,892	1,919	1,937
Al (T)	0,034	0,097	0,097	0,104	0,068	0,088	0,091	0,092	0,165	0,095	0,064	0,079	0,131	0,140	0,108	0,081	0,063
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,048	0,011	0,015	0,000	0,005	0,013	0,009	0,013	0,011	0,007	0,023	0,009	0,018	0,020	0,014	0,002	0,012
Fe ³⁺ (M1)	0,000	0,072	0,050	0,034	0,052	0,050	0,058	0,059	0,071	0,066	0,028	0,046	0,054	0,059	0,068	0,064	0,050
Ti (M1)	0,009	0,019	0,023	0,055	0,012	0,020	0,022	0,020	0,055	0,020	0,016	0,017	0,038	0,040	0,022	0,017	0,011
Cr (M1)	0,001	0,001	0,008	0,001	0,005	0,002	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,017	0,006	0,002	0,003	0,001	0,000
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
Mg (M1)	0,634	0,757	0,866	0,758	0,924	0,871	0,794	0,743	0,779	0,749	0,771	0,846	0,816	0,782	0,727	0,767	0,709
Fe ²⁺ (M1)	0,309	0,141	0,038	0,151	0,000	0,044	0,115	0,164	0,083	0,156	0,161	0,063	0,067	0,096	0,166	0,148	0,218
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,283	0,158	0,185	0,225	0,148	0,166	0,192	0,153	0,122	0,226	0,187	0,102	0,101	0,137	0,191	0,229	0,197
Mn (M2)	0,010	0,012	0,008	0,012	0,006	0,008	0,011	0,012	0,008	0,013	0,012	0,006	0,006	0,008	0,013	0,014	0,012
Ca (M2)	0,668	0,806	0,785	0,742	0,811	0,809	0,774	0,813	0,843	0,741	0,781	0,865	0,869	0,834	0,775	0,737	0,770
Na (M2)	0,035	0,024	0,021	0,021	0,019	0,017	0,022	0,022	0,027	0,020	0,020	0,027	0,024	0,022	0,022	0,021	0,020
K (M2)	0,005	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	35,3	43,3	41,9	39,6	42,7	42,8	41,3	43,4	46,1	39,6	41,1	46,1	46,9	45,1	41,7	39,2	40,6
Em	33,5	40,7	46,2	40,4	49,5	46,1	42,3	39,7	42,7	40,0	40,6	45,1	44,0	42,3	39,1	40,8	37,4
Fs	31,3	16,1	11,9	20,0	7,8	11,1	16,4	16,9	11,2	20,4	18,3	8,8	9,1	12,6	19,2	20,1	21,9
Q	96,4	97,5	97,8	97,8	98,1	98,2	97,7	97,7	97,1	98,0	98,0	97,2	97,5	97,7	97,7	97,9	97,9
Jd	3,6	0,3	0,5	0,0	0,2	0,4	0,3	0,4	0,4	0,2	0,9	0,5	0,6	0,6	0,4	0,1	0,4
Aeg	0,0	2,2	1,7	2,2	1,8	1,4	2,0	1,9	2,5	1,8	1,1	2,3	1,9	1,7	1,9	2,1	1,7
#Mg	51,7	71,7	79,5	66,9	86,4	80,6	72,1	70,1	79,2	66,2	68,9	83,7	82,9	77,0	67,1	67,0	63,1

M-MG – melamonzogabro, MG – monzogabro.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73	VA73	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A
Litotipo	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	int	borda	int	centro	borda	int	int	centro	borda	int	borda	borda	centro	centro	centro	int	borda
SiO ₂	50,07	50,43	49,95	53,30	51,00	52,04	51,71	51,09	49,71	51,85	52,65	52,41	50,94	51,93	51,83	49,24	50,19
TiO ₂	1,35	1,11	1,56	0,39	0,99	0,61	0,83	0,92	1,64	0,44	0,17	0,30	0,63	0,59	0,60	1,38	1,21
Al ₂ O ₃	3,45	2,96	3,58	1,31	2,42	1,64	2,57	3,11	3,77	1,64	0,70	1,04	1,76	2,02	2,49	3,81	2,60
Cr ₂ O ₃	0,18	0,08	0,25	1,09	0,06	0,15	0,46	0,13	0,11	0,24	0,10	0,07	0,01	0,24	0,26	0,06	0,14
FeO	9,11	9,71	8,59	3,29	9,34	8,82	6,06	6,43	8,90	9,43	10,78	11,20	11,38	6,56	5,39	8,74	8,87
MnO	0,26	0,37	0,24	0,07	0,29	0,25	0,18	0,17	0,25	0,29	0,34	0,34	0,41	0,16	0,16	0,26	0,26
NiO	0,02	0,00	0,01	0,03	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	0,00	0,01	0,02	0,01
MgO	14,40	13,80	14,28	17,69	14,63	14,51	16,26	15,74	14,11	14,24	13,72	13,99	13,21	15,20	15,87	13,85	14,34
CaO	20,55	20,74	21,03	22,65	20,53	21,49	21,55	21,80	20,96	21,19	21,36	19,92	19,63	21,13	21,36	20,30	20,12
Na ₂ O	0,39	0,44	0,35	0,27	0,41	0,37	0,31	0,39	0,37	0,34	0,32	0,38	0,42	0,31	0,38	0,34	0,34
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Total	99,78	99,64	99,85	100,11	99,69	99,87	99,95	99,79	99,85	99,68	100,14	99,67	98,42	98,25	98,28	98,04	98,08
Si (T)	1,865	1,887	1,860	1,938	1,901	1,936	1,900	1,881	1,852	1,937	1,969	1,968	1,942	1,947	1,934	1,867	1,903
Al (T)	0,135	0,113	0,140	0,056	0,099	0,064	0,101	0,119	0,148	0,063	0,031	0,032	0,058	0,053	0,067	0,133	0,097
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,017	0,018	0,017	0,000	0,007	0,008	0,011	0,016	0,018	0,010	0,000	0,014	0,021	0,037	0,043	0,037	0,019
Fe ³⁺ (M1)	0,065	0,062	0,054	0,029	0,065	0,044	0,052	0,077	0,062	0,046	0,042	0,027	0,031	0,006	0,005	0,043	0,030
Ti (M1)	0,038	0,031	0,044	0,011	0,028	0,017	0,023	0,025	0,046	0,012	0,005	0,008	0,018	0,017	0,017	0,039	0,035
Cr (M1)	0,005	0,002	0,007	0,031	0,002	0,004	0,013	0,004	0,003	0,007	0,003	0,002	0,000	0,007	0,008	0,002	0,004
Ni (M1)	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000
Mg (M1)	0,800	0,770	0,793	0,928	0,813	0,805	0,890	0,864	0,784	0,793	0,765	0,783	0,751	0,850	0,883	0,783	0,811
Fe ²⁺ (M1)	0,075	0,117	0,085	0,000	0,086	0,122	0,010	0,014	0,087	0,131	0,185	0,165	0,178	0,084	0,045	0,095	0,102
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,031	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,144	0,125	0,128	0,065	0,141	0,109	0,124	0,107	0,128	0,117	0,110	0,160	0,154	0,116	0,118	0,139	0,150
Mn (M2)	0,008	0,012	0,008	0,002	0,009	0,008	0,005	0,005	0,008	0,009	0,011	0,011	0,013	0,005	0,005	0,008	0,008
Ca (M2)	0,820	0,832	0,839	0,882	0,820	0,857	0,848	0,860	0,837	0,848	0,856	0,801	0,802	0,849	0,854	0,825	0,817
Na (M2)	0,028	0,032	0,026	0,019	0,030	0,027	0,022	0,028	0,027	0,025	0,023	0,027	0,031	0,030	0,023	0,028	0,025
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	44,6	45,1	45,5	46,3	44,1	45,3	45,3	46,6	45,6	44,9	44,7	42,0	42,6	44,7	45,0	44,8	43,5
Em	43,5	41,8	43,0	50,3	43,7	42,5	47,6	46,8	42,7	42,0	39,9	41,0	39,8	44,8	46,5	42,5	43,1
Fs	11,9	13,1	11,6	3,4	12,2	12,2	7,2	6,6	11,7	13,2	15,4	17,0	17,6	10,5	8,6	12,7	13,4
Q	97,1	96,7	97,3	98,0	96,9	97,3	97,7	97,1	97,2	97,4	97,6	97,2	96,8	96,9	97,7	97,1	97,4
Jd	0,6	0,7	0,6	0,0	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,0	1,0	1,3	2,6	2,1	1,4	1,0
Aeg	2,3	2,6	2,1	2,0	2,8	2,3	1,9	2,4	2,2	2,1	2,4	1,8	1,9	0,4	0,3	1,6	1,6
#Mg	78,5	76,1	78,8	93,7	78,2	77,7	86,9	87,7	78,4	76,1	72,2	70,7	69,4	81,0	84,4	77,0	76,3

MG – monzogabro.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74	VA74
Litotipo	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	borda	centro	int	borda	int	centro	int	borda	int	borda	centro	int	borda	int	borda	centro	int
SiO ₂	51,24	51,47	50,24	51,54	51,28	51,81	50,68	50,38	50,46	49,14	52,15	49,95	49,36	49,68	50,00	50,70	50,14
TiO ₂	0,48	0,74	1,32	0,33	0,38	0,75	1,36	1,30	1,23	1,77	0,56	1,72	1,72	1,44	1,61	1,15	1,57
Al ₂ O ₃	1,44	2,46	2,83	1,26	1,39	2,55	3,33	3,38	3,50	4,65	3,14	4,21	4,58	4,62	4,07	3,04	3,89
Cr ₂ O ₃	0,02	0,15	0,13	0,02	0,00	0,39	0,06	0,01	0,09	0,05	1,05	0,04	0,08	0,05	0,06	0,03	0,01
FeO	11,49	6,78	8,74	12,76	12,50	5,62	8,59	8,66	8,79	8,87	5,48	8,57	8,49	8,85	8,75	8,54	8,45
MnO	0,41	0,18	0,26	0,50	0,47	0,13	0,22	0,27	0,24	0,20	0,12	0,21	0,21	0,23	0,23	0,23	0,21
NiO	0,03	0,02	0,02	0,01	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	12,93	16,09	14,30	12,89	13,16	16,55	14,64	13,88	14,05	13,66	17,21	13,81	13,76	13,78	13,68	13,93	14,31
CaO	19,93	20,27	20,48	19,19	19,33	21,34	20,44	21,24	20,61	21,05	20,17	21,26	21,22	20,91	21,35	21,07	21,12
Na ₂ O	0,37	0,34	0,35	0,36	0,38	0,29	0,39	0,50	0,46	0,42	0,41	0,42	0,44	0,39	0,44	0,48	0,40
K ₂ O	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
Total	98,34	98,52	98,68	98,87	98,89	99,43	99,73	99,63	99,44	99,81	100,31	100,19	99,86	99,95	100,21	99,18	100,11
Si (T)	1,959	1,919	1,893	1,966	1,951	1,908	1,885	1,879	1,885	1,832	1,899	1,854	1,837	1,848	1,857	1,899	1,859
Al (T)	0,041	0,081	0,107	0,034	0,049	0,092	0,115	0,121	0,115	0,168	0,101	0,146	0,163	0,152	0,143	0,101	0,141
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,024	0,027	0,019	0,022	0,013	0,019	0,031	0,028	0,039	0,036	0,033	0,038	0,038	0,050	0,035	0,033	0,029
Fe ³⁺ (M1)	0,017	0,033	0,036	0,020	0,042	0,042	0,035	0,056	0,037	0,062	0,037	0,040	0,058	0,048	0,048	0,037	0,053
Ti (M1)	0,014	0,021	0,038	0,010	0,011	0,021	0,038	0,036	0,035	0,050	0,015	0,048	0,048	0,040	0,045	0,032	0,044
Cr (M1)	0,001	0,004	0,004	0,001	0,000	0,011	0,002	0,000	0,003	0,001	0,030	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000
Ni (M1)	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg (M1)	0,737	0,894	0,803	0,733	0,747	0,908	0,812	0,772	0,783	0,759	0,884	0,764	0,763	0,764	0,757	0,778	0,791
Fe ²⁺ (M1)	0,208	0,020	0,101	0,215	0,187	0,000	0,083	0,108	0,104	0,092	0,000	0,108	0,090	0,096	0,113	0,118	0,083
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,143	0,159	0,139	0,172	0,168	0,131	0,150	0,106	0,134	0,123	0,130	0,118	0,116	0,131	0,111	0,112	0,126
Mn (M2)	0,013	0,006	0,008	0,016	0,015	0,004	0,007	0,008	0,008	0,007	0,004	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Ca (M2)	0,816	0,810	0,827	0,784	0,788	0,842	0,815	0,849	0,825	0,841	0,787	0,846	0,846	0,833	0,850	0,846	0,839
Na (M2)	0,027	0,025	0,026	0,027	0,028	0,021	0,028	0,036	0,033	0,030	0,029	0,030	0,032	0,028	0,032	0,035	0,029
K (M2)	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	42,9	43,0	44,2	41,2	41,7	44,7	43,8	46,3	44,7	46,3	42,5	46,1	46,6	45,7	46,4	45,6	45,6
En	38,7	47,5	43,0	38,5	39,5	48,3	43,7	42,1	42,4	41,8	50,5	41,6	42,0	41,9	41,4	42,0	43,0
Fs	18,4	9,5	12,8	20,3	18,8	7,0	12,5	11,7	12,9	11,8	7,0	12,3	11,4	12,4	12,2	12,4	11,4
Q	97,2	97,5	97,3	97,3	97,1	97,8	97,0	96,2	96,6	96,8	96,9	96,8	96,7	97,0	96,6	96,3	97,0
Jd	1,6	1,2	0,9	1,5	0,7	0,7	1,4	1,2	1,8	1,2	1,5	1,6	1,3	1,5	1,4	1,7	1,1
Aeg	1,2	1,4	1,8	1,3	2,2	1,5	1,6	2,5	1,7	2,0	1,6	1,6	2,0	1,5	2,0	1,9	2,0
#Mg	67,8	83,4	77,0	65,4	67,7	87,4	77,8	78,3	76,7	77,9	87,8	77,2	78,7	77,1	77,2	77,2	79,1

MG – monzogabro.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA74	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA48A	VA41A	VA41A	VA41A
Litotipo	MG	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	MON	CQMG	CQMG	CQMG
Localização	borda	int	int	int	borda	borda	centro	int	borda	int	borda	borda	centro	centro	borda	borda
SiO ₂	49,04	50,08	50,11	49,27	50,56	50,73	50,40	50,09	50,07	51,53	51,82	50,52	51,88	49,88	50,42	50,87
TiO ₂	1,86	1,25	1,36	1,68	1,08	0,85	1,28	1,33	0,76	0,23	0,23	1,17	0,27	1,49	0,80	0,20
Al ₂ O ₃	4,55	3,14	2,97	3,63	2,61	1,93	2,67	2,73	2,11	0,91	0,92	2,69	1,01	2,82	1,73	0,85
Cr ₂ O ₃	0,01	0,00	0,09	0,02	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,05	0,00	0,02
FeO	8,60	10,32	8,80	9,61	10,59	12,28	10,03	10,13	13,25	14,33	14,60	10,79	12,77	10,30	14,96	15,98
MnO	0,18	0,31	0,25	0,30	0,38	0,50	0,30	0,31	0,52	0,51	0,54	0,36	0,51	0,26	0,49	0,44
NiO	0,00	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
MgO	13,88	13,90	14,58	13,88	14,22	13,71	14,51	14,07	13,12	11,80	12,00	13,93	12,32	14,04	13,98	10,59
CaO	21,29	20,04	20,59	20,35	19,52	18,83	19,82	20,05	18,27	19,99	19,75	19,84	20,72	20,66	16,93	20,16
Na ₂ O	0,40	0,36	0,32	0,34	0,30	0,36	0,35	0,34	0,30	0,29	0,27	0,33	0,32	0,31	0,27	0,27
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Total	99,81	99,41	99,09	99,09	99,26	99,19	99,43	99,05	98,42	99,61	100,14	99,63	99,82	99,80	99,58	99,50
Si (T)	1,826	1,881	1,879	1,855	1,902	1,921	1,889	1,887	1,919	1,967	1,968	1,896	1,965	1,867	1,912	1,961
Al (T)	0,174	0,119	0,121	0,146	0,098	0,079	0,112	0,113	0,081	0,033	0,032	0,104	0,035	0,124	0,078	0,039
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,011	0,001
Total (T)]	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,026	0,020	0,010	0,016	0,018	0,007	0,006	0,009	0,014	0,008	0,009	0,015	0,010	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺ (M1)	0,073	0,056	0,055	0,059	0,040	0,051	0,057	0,054	0,047	0,033	0,029	0,046	0,032	0,070	0,063	0,047
Ti (M1)	0,052	0,035	0,038	0,048	0,031	0,024	0,036	0,038	0,022	0,007	0,007	0,033	0,008	0,042	0,023	0,006
Cr (M1)	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001
Ni (M1)	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004
Mg (M1)	0,770	0,778	0,815	0,779	0,798	0,774	0,811	0,790	0,750	0,672	0,679	0,780	0,696	0,783	0,790	0,609
Fe ²⁺ (M1)	0,079	0,111	0,079	0,098	0,114	0,144	0,088	0,110	0,168	0,280	0,276	0,126	0,254	0,103	0,125	0,335
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,116	0,157	0,142	0,145	0,180	0,194	0,169	0,156	0,210	0,144	0,159	0,167	0,119	0,141	0,276	0,133
Mn (M2)	0,006	0,010	0,008	0,009	0,012	0,016	0,010	0,010	0,017	0,017	0,018	0,011	0,016	0,008	0,016	0,014
Ca (M2)	0,849	0,806	0,827	0,821	0,787	0,764	0,796	0,809	0,750	0,818	0,804	0,798	0,841	0,829	0,688	0,833
Na (M2)	0,029	0,026	0,023	0,025	0,022	0,027	0,026	0,025	0,022	0,022	0,020	0,024	0,023	0,023	0,020	0,020
K (M2)	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	46,8	43,5	44,4	44,5	41,9	40,7	42,7	43,4	40,0	42,7	41,9	42,7	44,1	44,7	36,6	43,6
En	42,5	42,0	43,7	42,3	42,5	41,3	43,5	42,4	39,9	35,1	35,4	41,7	36,5	42,2	42,1	31,9
Fs	10,8	14,5	11,9	13,2	15,6	18,0	13,8	14,2	20,1	22,2	22,7	15,6	19,5	13,1	21,4	24,5
Q	96,9	97,2	97,6	97,4	97,8	97,2	97,3	97,4	97,7	97,8	98,0	97,5	97,6	97,6	97,9	98,0
Jd	0,8	0,7	0,4	0,5	0,7	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,0	0,0	0,0
Aeg	2,3	2,0	2,0	2,1	1,5	2,5	2,4	2,2	1,8	1,8	1,5	1,9	1,8	2,4	2,1	2,1
#Mg	79,8	74,4	78,7	76,2	73,1	69,6	75,9	74,8	66,5	61,3	61,0	72,7	65,1	76,3	66,3	56,5

MG – monzogabro, MON – monzonito, CQMG – quartzo monzogabro médio a grosso.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA41A	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA44RA
Litotipo	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	CQMG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG
Localização	centro	centro	borda	centro	centro	borda	centro	centro	int	borda	centro	int	centro	borda	centro	int	centro
SiO ₂	51,24	50,24	50,59	50,40	51,04	49,99	49,91	52,47	51,19	51,28	52,82	50,30	50,94	50,19	50,80	50,30	52,63
TiO ₂	0,80	1,37	1,00	1,30	1,32	0,92	1,31	0,52	1,14	1,05	0,44	1,52	1,34	1,61	1,36	1,63	0,63
Al ₂ O ₃	1,70	2,79	2,43	2,58	2,77	1,97	2,59	2,30	3,16	2,75	2,24	3,92	3,08	3,93	3,43	4,14	2,67
Cr ₂ O ₃	0,00	0,02	0,00	0,03	0,01	0,00	0,01	0,96	0,06	0,00	0,54	0,03	0,06	0,03	0,06	0,04	0,31
FeO	14,77	9,89	11,21	9,36	10,04	15,14	9,87	6,17	9,29	9,83	5,00	9,21	9,34	9,08	9,17	8,76	5,70
MnO	0,51	0,21	0,39	0,33	0,26	0,45	0,31	0,17	0,27	0,34	0,08	0,22	0,28	0,20	0,28	0,31	0,10
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,12	0,00	0,00	0,03	0,00	0,06	0,04	0,00	0,10	0,05
MgO	13,43	14,43	13,42	14,21	14,69	11,95	14,01	15,78	14,09	12,98	16,62	13,75	13,67	13,60	13,67	13,80	16,36
CaO	17,49	20,36	20,14	20,85	20,34	18,30	20,95	22,05	21,39	21,71	22,62	21,49	21,54	21,37	21,75	21,92	22,14
Na ₂ O	0,23	0,35	0,26	0,32	0,35	0,27	0,33	0,33	0,40	0,38	0,27	0,38	0,40	0,38	0,43	0,45	0,37
K ₂ O	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
Total	100,16	99,65	99,44	99,36	100,91	98,99	99,29	100,86	100,99	100,33	100,65	100,81	100,69	100,43	100,95	101,45	100,96
Si (T)	1,937	1,878	1,909	1,890	1,884	1,923	1,876	1,917	1,887	1,914	1,921	1,859	1,888	1,863	1,876	1,845	1,910
Al (T)	0,064	0,122	0,091	0,110	0,116	0,077	0,115	0,084	0,113	0,086	0,079	0,141	0,112	0,137	0,125	0,155	0,090
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,012	0,001	0,017	0,004	0,005	0,012	0,000	0,016	0,025	0,035	0,017	0,030	0,022	0,035	0,025	0,024	0,024
Fe ³⁺ (M1)	0,023	0,069	0,036	0,055	0,062	0,032	0,073	0,035	0,052	0,020	0,042	0,053	0,043	0,038	0,054	0,071	0,049
Ti (M1)	0,023	0,038	0,029	0,037	0,037	0,027	0,037	0,014	0,032	0,030	0,012	0,042	0,037	0,045	0,038	0,045	0,017
Cr (M1)	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,028	0,002	0,000	0,015	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,009
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000	0,003	0,002
Mg (M1)	0,757	0,804	0,755	0,794	0,808	0,685	0,785	0,859	0,774	0,722	0,901	0,757	0,755	0,753	0,753	0,755	0,885
Fe ²⁺ (M1)	0,186	0,087	0,164	0,109	0,086	0,244	0,104	0,045	0,116	0,194	0,012	0,117	0,139	0,127	0,130	0,101	0,014
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,258	0,153	0,154	0,129	0,162	0,211	0,123	0,109	0,118	0,094	0,098	0,115	0,108	0,117	0,100	0,097	0,110
Mn (M2)	0,016	0,007	0,013	0,010	0,008	0,015	0,010	0,005	0,008	0,011	0,003	0,007	0,009	0,006	0,009	0,010	0,003
Ca (M2)	0,708	0,816	0,814	0,838	0,805	0,754	0,844	0,863	0,845	0,868	0,881	0,851	0,855	0,850	0,861	0,862	0,861
Na (M2)	0,017	0,025	0,019	0,023	0,025	0,020	0,024	0,023	0,029	0,027	0,019	0,027	0,029	0,027	0,031	0,032	0,026
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	37,1	43,9	43,2	44,8	43,2	39,8	45,5	46,0	45,6	46,2	46,6	46,3	46,0	46,0	46,7	47,5	46,0
En	39,6	43,2	40,0	42,5	43,5	36,2	42,3	45,8	41,8	38,5	47,6	41,2	40,7	40,8	40,8	41,6	47,3
Fs	23,3	12,9	16,9	12,8	13,3	24,0	12,3	8,2	12,6	15,3	5,8	12,6	13,3	13,2	12,5	10,9	6,6
Q	98,2	97,4	98,0	97,6	97,4	97,9	97,5	97,6	97,0	97,2	98,1	97,1	97,0	97,1	96,8	96,6	97,3
Jd	0,6	0,0	0,6	0,2	0,2	0,6	0,0	0,7	1,0	1,8	0,6	1,0	1,0	1,4	1,0	0,9	0,9
Aeg	1,2	2,6	1,3	2,3	2,5	1,5	2,5	1,7	2,0	1,0	1,4	1,9	2,0	1,5	2,2	2,5	1,8
#Mg	63,0	77,0	70,4	76,9	76,5	60,1	77,5	84,8	76,8	71,5	89,1	76,6	75,4	75,5	76,6	79,2	87,7

CQMG – quartzo monzogabro médio a grosso, LG – gabro bandado.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA44RA	VA44RA	VA44RA	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	VA71	Xen2	Xen2	Xen2	VA81
Litotipo	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	LG	EC	EC	EC	FQMG
Localização	borda	centro	centro	int	borda	centro	centro	int	borda	int	borda	centro	int	borda	int	borda	centro	centro
SiO ₂	50,15	50,51	50,39	50,46	49,17	51,59	49,64	50,35	50,07	48,75	51,22	50,47	48,17	48,61	48,31	51,97	52,78	51,17
TiO ₂	1,60	1,32	1,53	1,29	1,61	0,69	1,41	1,51	1,40	1,62	0,93	1,15	1,86	1,71	1,86	0,60	0,37	0,62
Al ₂ O ₃	3,99	3,49	3,68	3,08	4,00	3,07	4,14	3,26	3,46	4,37	2,23	3,98	5,12	4,55	4,68	1,75	1,36	1,53
Cr ₂ O ₃	0,07	0,03	0,00	0,02	0,03	0,19	0,25	0,07	0,03	0,04	0,01	0,28	0,06	0,02	0,04	0,05	0,01	0,00
FeO	8,22	9,26	9,75	8,23	9,09	6,41	7,92	8,06	8,55	8,55	9,39	7,40	8,67	9,08	9,02	10,98	7,39	13,93
MnO	0,21	0,18	0,19	0,21	0,25	0,16	0,18	0,19	0,22	0,21	0,30	0,15	0,21	0,23	0,22	0,32	0,27	0,53
NiO	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	14,05	13,99	13,66	14,70	13,71	15,92	14,43	14,78	14,37	13,87	14,69	14,84	13,42	13,34	13,83	13,80	14,53	13,02
CaO	21,34	21,30	21,15	21,06	20,67	21,22	21,45	21,03	20,61	20,49	20,24	21,13	21,01	20,58	20,56	19,71	22,81	18,97
Na ₂ O	0,35	0,40	0,43	0,34	0,43	0,34	0,36	0,31	0,36	0,39	0,33	0,32	0,40	0,37	0,32	0,37	0,27	0,30
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01
Total	99,97	100,48	100,78	99,39	98,98	99,61	99,80	99,56	99,07	98,28	99,35	99,73	98,92	98,51	98,86	99,56	99,79	100,08
Si (T)	1,864	1,871	1,865	1,882	1,849	1,902	1,843	1,874	1,876	1,842	1,917	1,870	1,811	1,839	1,818	1,954	1,960	1,933
Al (T)	0,136	0,129	0,135	0,119	0,151	0,099	0,158	0,126	0,124	0,158	0,083	0,130	0,189	0,161	0,182	0,046	0,040	0,067
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,039	0,023	0,026	0,017	0,026	0,035	0,024	0,017	0,029	0,037	0,015	0,044	0,038	0,042	0,026	0,031	0,020	0,002
Fe ³⁺ (M1)	0,031	0,060	0,054	0,053	0,065	0,045	0,074	0,045	0,042	0,056	0,039	0,037	0,073	0,049	0,073	0,008	0,019	0,052
Ti (M1)	0,045	0,037	0,043	0,036	0,046	0,019	0,039	0,042	0,040	0,046	0,026	0,032	0,053	0,049	0,053	0,017	0,010	0,018
Cr (M1)	0,002	0,001	0,000	0,001	0,001	0,006	0,007	0,002	0,001	0,001	0,000	0,008	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg (M1)	0,778	0,772	0,754	0,817	0,769	0,875	0,799	0,820	0,803	0,781	0,820	0,820	0,752	0,752	0,776	0,773	0,805	0,733
Fe ²⁺ (M1)	0,105	0,107	0,123	0,076	0,094	0,021	0,057	0,074	0,086	0,079	0,100	0,059	0,083	0,108	0,071	0,169	0,147	0,195
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,119	0,120	0,124	0,127	0,127	0,132	0,115	0,132	0,139	0,135	0,155	0,133	0,118	0,131	0,140	0,168	0,064	0,193
Mn (M2)	0,007	0,006	0,006	0,007	0,008	0,005	0,006	0,006	0,007	0,007	0,010	0,005	0,007	0,007	0,007	0,010	0,009	0,017
Ca (M2)	0,850	0,845	0,839	0,841	0,833	0,838	0,853	0,839	0,827	0,830	0,812	0,839	0,847	0,834	0,829	0,794	0,908	0,768
Na (M2)	0,025	0,029	0,031	0,025	0,031	0,025	0,026	0,023	0,026	0,028	0,024	0,023	0,029	0,028	0,024	0,027	0,020	0,022
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	45,9	45,8	45,6	45,2	45,7	44,9	46,8	45,0	44,6	45,5	43,0	45,3	47,1	45,7	45,7	41,7	47,2	40,7
En	42,0	41,9	41,0	43,9	42,2	46,9	43,8	44,0	43,3	42,8	43,5	44,3	41,8	41,2	42,7	40,6	41,8	38,8
Fs	12,1	12,3	13,5	10,9	12,1	8,2	9,4	11,1	12,2	11,7	13,5	10,4	11,1	13,1	11,6	17,7	11,0	20,5
Q	97,4	97,0	96,8	97,4	96,7	97,4	97,2	97,6	97,2	97,0	97,5	97,6	96,8	97,1	97,5	97,2	98,0	97,8
Jd	1,5	0,9	1,1	0,6	1,0	1,1	0,7	0,7	1,1	1,2	0,7	1,3	1,1	1,3	0,7	2,2	1,0	0,1
Aeg	1,2	2,2	2,2	2,0	2,4	1,5	2,1	1,7	1,7	1,8	1,8	1,1	2,1	1,6	1,9	0,6	1,0	2,2
#Mg	77,6	77,3	75,3	80,1	77,7	85,1	82,3	79,9	78,1	78,5	76,3	81,0	79,0	76,0	78,6	69,6	79,2	65,4

LG – gabro bandado, EC – enclave, FQMG – quartzo monzogabro fino a médio.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen2	Xen4	Xen4	Xen4
Litotipo	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC
Localização	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	centro	borda	centro	centro	centro	centro	centro	borda	int
SiO ₂	51,73	52,86	52,01	52,23	52,76	53,26	53,05	52,51	52,20	50,97	48,53	49,20	52,19	51,79	54,45	54,61	55,03
TiO ₂	0,81	0,43	0,73	0,58	0,47	0,20	0,75	0,56	0,18	0,81	1,59	1,18	0,32	0,41	0,00	0,29	0,03
Al ₂ O ₃	1,98	1,49	2,01	1,73	1,62	0,66	1,49	2,82	3,16	3,96	5,66	5,38	1,60	2,78	0,12	0,76	0,41
Cr ₂ O ₃	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,00	0,03	0,03	0,03	0,00
FeO	7,34	7,19	7,08	7,14	7,65	7,31	7,25	5,34	4,20	5,59	6,71	6,77	8,82	6,92	5,45	5,17	2,77
MnO	0,27	0,26	0,29	0,28	0,25	0,25	0,27	0,19	0,16	0,21	0,20	0,21	0,25	0,22	0,32	0,21	0,12
NiO	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	14,21	14,54	14,12	14,62	14,63	15,18	14,73	15,26	15,73	14,67	13,68	13,86	14,41	14,35	15,25	14,86	16,96
CaO	22,92	22,62	23,20	23,05	22,27	23,45	22,58	23,54	24,75	23,63	22,36	22,27	21,46	22,92	24,36	24,45	24,94
Na ₂ O	0,28	0,29	0,24	0,23	0,27	0,21	0,28	0,22	0,03	0,23	0,20	0,22	0,27	0,26	0,08	0,17	0,10
K ₂ O	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
Total	99,55	99,70	99,69	99,87	99,92	100,54	100,40	100,45	100,40	100,10	98,93	99,11	99,33	99,70	100,06	100,55	100,36
Si (T)	1,928	1,964	1,936	1,937	1,957	1,960	1,957	1,922	1,903	1,875	1,816	1,835	1,953	1,921	2,000	1,982	1,994
Al (T)	0,072	0,036	0,064	0,063	0,043	0,029	0,043	0,078	0,097	0,125	0,184	0,165	0,048	0,079	0,001	0,018	0,006
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,011	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,015	0,029	0,024	0,013	0,028	0,000	0,021	0,044	0,039	0,046	0,065	0,072	0,023	0,043	0,005	0,014	0,012
Fe ³⁺ (M1)	0,033	0,003	0,017	0,034	0,008	0,043	0,000	0,020	0,050	0,050	0,043	0,042	0,026	0,032	0,000	0,000	0,000
Ti (M1)	0,023	0,012	0,020	0,016	0,013	0,005	0,021	0,015	0,005	0,023	0,045	0,033	0,009	0,012	0,000	0,008	0,001
Cr (M1)	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg (M1)	0,789	0,805	0,783	0,808	0,809	0,833	0,810	0,833	0,855	0,804	0,763	0,771	0,804	0,794	0,835	0,804	0,916
Fe ²⁺ (M1)	0,140	0,150	0,155	0,129	0,142	0,118	0,148	0,089	0,052	0,076	0,084	0,082	0,138	0,120	0,159	0,174	0,072
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,056	0,070	0,048	0,059	0,088	0,053	0,079	0,055	0,027	0,046	0,083	0,087	0,112	0,063	0,026	0,031	0,021
Mn (M2)	0,009	0,008	0,009	0,009	0,008	0,008	0,009	0,006	0,005	0,007	0,006	0,007	0,008	0,007	0,010	0,007	0,004
Ca (M2)	0,915	0,900	0,925	0,916	0,885	0,925	0,892	0,923	0,967	0,931	0,896	0,890	0,860	0,911	0,958	0,951	0,968
Na (M2)	0,021	0,021	0,018	0,017	0,019	0,015	0,020	0,016	0,002	0,016	0,014	0,016	0,020	0,019	0,005	0,012	0,007
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	48,2	46,8	48,4	47,9	46,0	48,0	46,3	48,6	50,9	50,1	49,1	48,6	45,0	48,3	48,4	48,5	49,0
En	41,5	41,8	41,0	42,3	42,1	43,2	42,0	43,8	45,0	43,3	41,8	42,1	42,0	42,0	42,2	41,0	46,3
Fs	10,3	11,4	10,6	9,8	11,9	8,8	11,8	7,6	4,1	6,6	9,1	9,2	13,1	9,7	9,4	10,4	4,7
Q	97,9	97,9	98,2	98,3	98,0	98,5	98,0	98,4	99,8	98,3	98,5	98,3	98,0	98,1	99,5	98,8	99,3
Jd	0,7	1,9	1,1	0,5	1,5	0,0	2,0	1,1	0,1	0,8	0,9	1,1	0,9	1,1	0,5	1,2	0,7
Aeg	1,5	0,2	0,8	1,2	0,4	1,5	0,0	0,5	0,1	0,9	0,6	0,6	1,1	0,8	0,0	0,0	0,0
#Mg	80,1	78,5	79,4	81,2	77,9	83,0	78,1	85,3	91,6	86,8	82,1	82,0	76,3	81,2	81,8	79,7	90,8

EC – enclave.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4
Litotipo	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC	EC
Localização	int	borda	centro	borda	centro	borda	centro	centro	borda	centro	centro	centro	borda	centro	centro	centro	
SiO ₂	55,08	54,16	54,93	55,22	54,91	54,68	54,71	53,84	54,70	54,66	54,28	52,77	52,29	53,40	53,12	53,64	54,56
TiO ₂	0,01	0,19	0,00	0,07	0,03	0,00	0,13	0,30	0,04	0,10	0,05	0,15	0,16	0,19	0,18	0,15	0,00
Al ₂ O ₃	0,32	0,72	0,24	0,44	0,38	0,07	0,38	1,22	1,95	0,50	0,39	1,89	1,81	1,49	1,56	1,21	0,45
Cr ₂ O ₃	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00
FeO	2,87	6,24	3,00	3,48	2,76	5,38	4,61	4,99	4,65	3,01	6,23	5,35	4,92	3,69	4,83	4,69	2,60
MnO	0,11	0,22	0,12	0,16	0,13	0,34	0,18	0,21	0,26	0,12	0,23	0,22	0,21	0,15	0,18	0,22	0,12
NiO	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	17,15	13,24	17,05	16,34	16,96	15,38	15,91	15,18	16,80	16,91	14,64	15,40	15,74	16,57	15,54	15,86	17,08
CaO	25,11	24,35	24,80	24,91	25,09	24,69	24,69	23,63	21,74	24,19	24,64	24,93	24,51	25,34	24,85	25,07	25,07
Na ₂ O	0,03	0,16	0,10	0,15	0,06	0,05	0,17	0,19	0,06	0,17	0,12	0,04	0,05	0,02	0,03	0,03	0,12
K ₂ O	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	100,71	99,28	100,26	100,77	100,34	100,59	100,82	99,59	100,21	99,66	100,59	100,76	99,68	100,86	100,29	100,90	100,01
Si (T)	1,994	1,985	1,997	1,994	1,993	2,001	1,993	1,971	1,960	1,992	1,994	1,927	1,925	1,935	1,947	1,953	1,985
Al (T)	0,006	0,015	0,003	0,006	0,007	0,000	0,007	0,029	0,040	0,008	0,006	0,073	0,075	0,064	0,053	0,047	0,015
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,001	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,007	0,016	0,008	0,013	0,010	0,003	0,010	0,024	0,042	0,014	0,011	0,009	0,004	0,000	0,014	0,005	0,005
Fe ³⁺ (M1)	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,059	0,066	0,056	0,031	0,035	0,019
Ti (M1)	0,000	0,005	0,000	0,002	0,001	0,000	0,004	0,008	0,001	0,003	0,002	0,004	0,004	0,005	0,005	0,004	0,000
Cr (M1)	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mg (M1)	0,925	0,723	0,924	0,880	0,918	0,839	0,864	0,829	0,897	0,919	0,802	0,838	0,864	0,895	0,849	0,861	0,927
Fe ²⁺ (M1)	0,066	0,256	0,066	0,106	0,072	0,158	0,121	0,138	0,059	0,065	0,186	0,090	0,063	0,044	0,101	0,094	0,050
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,021	0,025	0,024	0,021	0,016	0,017	0,019	0,053	0,153	0,040	0,014	0,015	0,023	0,011	0,016	0,013	0,010
Mn (M2)	0,003	0,007	0,004	0,005	0,004	0,010	0,006	0,007	0,008	0,004	0,007	0,007	0,007	0,005	0,006	0,007	0,004
Ca (M2)	0,974	0,956	0,966	0,964	0,976	0,968	0,964	0,927	0,835	0,945	0,970	0,976	0,967	0,984	0,976	0,978	0,977
Na (M2)	0,002	0,012	0,007	0,010	0,005	0,004	0,012	0,013	0,004	0,012	0,008	0,003	0,004	0,001	0,002	0,002	0,009
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	49,0	48,8	48,8	48,9	49,3	48,8	49,0	47,6	42,9	48,0	49,2	50,9	50,5	50,9	50,3	50,2	49,8
En	46,6	36,9	46,7	44,6	46,3	42,3	43,9	42,6	46,2	46,7	40,7	43,7	45,1	46,3	43,7	44,2	47,2
Fs	4,4	14,3	4,5	6,4	4,4	8,8	7,1	9,8	10,9	5,3	10,1	5,5	4,5	2,8	6,0	5,5	3,1
Q	99,8	98,8	99,3	99,0	99,6	99,6	98,8	98,7	99,6	98,8	99,2	99,7	99,6	99,9	99,8	99,8	99,1
Jd	0,2	1,2	0,6	1,1	0,5	0,4	1,1	1,3	0,4	1,2	0,8	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2
Aeg	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,1	0,2	0,2	0,7
#Mg	91,4	72,0	91,2	87,4	91,3	82,7	86,1	81,2	80,9	89,8	80,0	88,9	91,0	94,3	87,9	88,9	93,9

EC – enclave.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	Xen4	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	VA43RC	Xen2	Xen2
Litotipo	EC	EC	EC	EC	EC	SY	SY	SY	SY	SY	SY	SY	SY	SY	EC	EC
Localização	borda	centro	centro	centro	centro	borda	int	int	borda	borda	int	centro	borda	centro	centro	borda
SiO ₂	54,43	52,66	52,16	52,89	52,93	50,94	48,86	57,03	50,87	50,30	49,60	48,64	48,07	49,07	51,82	50,32
TiO ₂	0,25	0,47	0,73	0,37	0,58	1,06	1,42	0,69	1,00	1,37	1,32	1,63	1,71	1,58	0,74	1,28
Al ₂ O ₃	0,47	1,40	1,90	1,43	1,65	2,87	4,67	11,05	3,17	2,74	4,08	4,63	5,05	4,25	2,45	2,78
Cr ₂ O ₃	0,00	0,07	0,00	0,01	0,01	0,03	0,17	0,07	0,02	0,01	0,08	0,23	0,20	0,17	0,47	0,04
FeO	5,40	8,44	8,85	8,56	8,63	6,54	7,54	3,71	6,38	7,43	7,99	7,05	7,81	6,81	5,33	10,29
MnO	0,18	0,34	0,34	0,34	0,33	0,42	0,19	0,14	0,42	0,40	0,21	0,27	0,22	0,26	0,11	0,29
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,00	0,04	0,02	0,03	0,01		
MgO	15,19	13,05	12,86	13,10	12,91	16,04	14,15	7,87	16,46	16,20	14,20	14,53	13,63	14,67	16,52	13,69
CaO	24,33	23,70	23,55	23,66	23,70	20,75	21,23	11,45	19,92	20,24	21,40	21,65	21,88	21,68	21,71	20,14
Na ₂ O	0,17	0,23	0,33	0,28	0,27	0,63	0,50	2,15	0,67	0,67	0,53	0,70	0,63	0,69	0,27	0,38
K ₂ O	0,01	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,09	5,37	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Total	100,42	100,37	100,74	100,66	101,02	99,28	98,82	99,53	98,98	99,36	99,44	99,34	99,23	99,19	99,44	99,21
Si (T)	1,989	1,962	1,937	1,963	1,957	1,881	1,827	1,944	1,879	1,859	1,846	1,804	1,794	1,822	1,908	1,896
Al (T)	0,011	0,038	0,063	0,037	0,043	0,119	0,173	0,056	0,121	0,119	0,154	0,196	0,206	0,179	0,092	0,104
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,010	0,023	0,020	0,026	0,030	0,006	0,033	0,387	0,017	0,000	0,025	0,007	0,016	0,007	0,015	0,019
Fe ³⁺ (M1)	0,000	0,003	0,026	0,010	0,000	0,097	0,095	0,000	0,097	0,112	0,090	0,140	0,133	0,127	0,042	0,039
Ti (M1)	0,007	0,013	0,021	0,011	0,016	0,030	0,040	0,018	0,028	0,038	0,037	0,045	0,048	0,044	0,021	0,036
Cr (M1)	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,001	0,005	0,002	0,001	0,000	0,002	0,007	0,006	0,005	0,014	0,001
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Mg (M1)	0,828	0,725	0,712	0,725	0,712	0,866	0,789	0,400	0,857	0,850	0,788	0,801	0,758	0,812	0,907	0,769
Fe ²⁺ (M1)	0,156	0,233	0,221	0,228	0,242	0,000	0,038	0,193	0,000	0,000	0,057	0,000	0,038	0,005	0,002	0,136
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,000	0,000	0,050	0,042	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,029	0,026	0,028	0,027	0,031	0,105	0,103	0,202	0,100	0,096	0,102	0,078	0,072	0,080	0,120	0,150
Mn (M2)	0,006	0,011	0,011	0,011	0,010	0,013	0,006	0,004	0,013	0,013	0,007	0,009	0,007	0,008	0,004	0,009
Ca (M2)	0,953	0,946	0,937	0,941	0,939	0,821	0,851	0,418	0,788	0,801	0,853	0,860	0,875	0,862	0,857	0,813
Na (M2)	0,012	0,017	0,023	0,020	0,019	0,045	0,036	0,142	0,048	0,048	0,038	0,050	0,046	0,050	0,020	0,028
K (M2)	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,004	0,234	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	48,5	49,0	49,4	49,0	48,8	45,4	47,8	34,5	43,9	44,8	47,4	49,4	50,2	49,0	45,4	43,5
En	42,1	37,6	37,5	37,7	37,0	48,8	44,3	33,0	50,5	49,9	43,8	46,1	43,5	46,2	48,1	41,2
Fs	9,4	13,5	13,1	13,3	14,2	5,8	7,9	32,6	5,6	5,3	8,8	4,5	6,3	4,8	6,5	15,3
Q	98,8	98,3	97,6	97,9	98,1	95,3	96,1	81,0	94,9	94,9	95,9	94,6	95,0	94,7	98,0	97,1
Jd	1,2	1,5	1,1	1,5	2,0	0,3	1,0	19,0	0,7	0,0	0,9	0,2	0,5	0,3	0,5	1,0
Aeg	0,0	0,2	1,3	0,6	0,0	4,5	2,9	0,0	4,3	5,1	3,2	5,2	4,4	5,1	1,5	1,9
#Mg	81,7	73,6	74,1	74,0	72,3	89,4	84,9	50,3	90,1	90,3	83,3	91,1	87,3	90,5	88,1	72,9

EC – enclave, SY – bolsão sienítico.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA43D5	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2
Litotipo	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	TB	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
Localização									int	int	borda	int	int	borda	borda	centro	centro
SiO ₂	51,91	51,48	50,43	50,15	49,92	49,94	50,55	49,66	48,15	49,24	48,05	49,02	50,88	48,93	50,54	51,54	51,48
TiO ₂	0,67	0,80	1,04	1,39	1,10	1,37	0,93	1,28	2,13	1,61	2,02	1,62	1,15	1,88	1,33	1,13	1,10
Al ₂ O ₃	2,45	2,46	3,32	2,89	4,04	3,46	3,34	3,74	5,34	4,66	5,33	4,56	3,38	4,60	3,09	2,35	2,40
Cr ₂ O ₃	0,02	0,36	0,07	0,14	0,09	0,08	0,03	0,04	0,31	0,49	0,08	0,45	0,55	0,07	0,02	0,37	0,42
FeO	6,32	5,78	6,85	8,41	7,39	8,17	7,54	8,57	7,15	6,57	7,31	6,81	5,74	7,42	6,36	5,78	5,69
MnO	0,60	0,24	0,48	0,54	0,30	0,26	0,32	0,28	0,13	0,13	0,14	0,14	0,11	0,17	0,10	0,13	0,14
NiO	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,00	0,02	0,02	0,04
MgO	16,15	16,39	15,59	15,33	15,05	14,60	14,71	14,43	13,34	14,17	13,56	14,02	15,18	13,80	15,00	16,03	16,13
CaO	20,95	21,93	21,26	20,61	21,42	21,67	21,72	21,45	22,76	22,75	22,97	22,63	22,90	22,69	23,01	22,44	22,38
Na ₂ O	0,72	0,38	0,72	0,73	0,57	0,36	0,71	0,40	0,41	0,39	0,37	0,38	0,35	0,41	0,26	0,20	0,25
K ₂ O	0,05	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Total	99,84	99,81	99,78	100,21	99,89	99,93	99,86	99,86	99,76	100,06	99,85	99,66	100,29	99,96	99,73	100,00	100,04
Si (T)	1,904	1,890	1,855	1,848	1,840	1,852	1,866	1,844	1,792	1,820	1,785	1,821	1,868	1,815	1,869	1,896	1,891
Al (T)	0,097	0,106	0,144	0,126	0,160	0,148	0,134	0,156	0,208	0,180	0,215	0,179	0,132	0,185	0,131	0,102	0,104
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,004	0,001	0,027	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,005
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,009	0,000	0,000	0,000	0,016	0,003	0,011	0,007	0,026	0,023	0,018	0,021	0,014	0,016	0,004	0,000	0,000
Fe ³⁺ (M1)	0,102	0,082	0,136	0,122	0,120	0,092	0,121	0,104	0,082	0,081	0,108	0,081	0,063	0,091	0,070	0,045	0,054
Ti (M1)	0,018	0,022	0,029	0,039	0,031	0,038	0,026	0,036	0,060	0,045	0,056	0,045	0,032	0,052	0,037	0,031	0,030
Cr (M1)	0,001	0,010	0,002	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,009	0,014	0,002	0,013	0,016	0,002	0,001	0,011	0,012
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,001
Mg (M1)	0,870	0,886	0,833	0,835	0,827	0,807	0,809	0,799	0,740	0,781	0,751	0,776	0,831	0,763	0,827	0,879	0,883
Fe ²⁺ (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,057	0,032	0,053	0,081	0,055	0,064	0,063	0,043	0,076	0,060	0,033	0,019
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,013	0,011	0,022	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,092	0,092	0,074	0,111	0,104	0,105	0,080	0,110	0,059	0,067	0,055	0,068	0,071	0,064	0,066	0,097	0,097
Mn (M2)	0,019	0,007	0,015	0,017	0,009	0,008	0,010	0,009	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,003	0,004	0,004
Ca (M2)	0,823	0,863	0,838	0,814	0,846	0,861	0,859	0,853	0,908	0,901	0,914	0,901	0,901	0,902	0,912	0,884	0,881
Na (M2)	0,051	0,027	0,052	0,052	0,041	0,026	0,051	0,028	0,029	0,028	0,026	0,027	0,025	0,029	0,019	0,015	0,018
K (M2)	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	45,8	46,6	47,4	46,1	47,5	47,1	48,3	47,0	50,8	50,0	51,2	49,8	48,8	50,0	48,9	46,7	46,9
En	49,1	48,4	48,4	47,7	46,4	44,1	45,5	44,0	41,4	43,3	42,1	43,0	45,0	42,3	44,3	46,4	47,0
Fs	5,1	5,0	4,2	6,3	6,1	8,8	6,3	9,0	7,9	6,8	6,7	7,2	6,2	7,7	6,8	6,9	6,1
Q	94,7	97,2	94,5	94,5	95,6	97,2	94,6	97,0	96,8	97,0	97,1	97,1	97,4	96,9	98,0	98,5	98,1
Jd	0,5	0,0	0,0	0,0	0,5	0,1	0,5	0,2	0,8	0,7	0,4	0,6	0,5	0,5	0,1	0,0	0,0
Aeg	4,9	2,8	5,5	5,6	3,9	2,7	5,0	2,8	2,4	2,3	2,5	2,3	2,2	2,7	1,9	1,5	1,9
#Mg	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9

TB – trachybasalt, BT – basanite.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA41D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2
Litotipo	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
Localização	centro	centro	borda	borda								borda		borda		borda	
SiO ₂	48,36	50,37	47,95	52,48	47,99	46,85	47,53	49,75	47,86	47,13	49,29	42,49	47,89	42,75	46,60	44,62	46,13
TiO ₂	2,16	1,27	2,02	0,67	2,05	2,61	2,29	1,43	2,06	2,40	1,83	4,14	2,20	3,96	2,52	3,22	2,77
Al ₂ O ₃	5,03	3,25	5,29	1,84	5,33	6,26	5,52	3,65	5,24	5,82	3,82	8,72	5,46	8,86	6,21	7,66	6,53
Cr ₂ O ₃	0,13	0,51	0,23	0,96	0,09	0,09	0,11	0,27	0,16	0,16	0,14	0,00	0,32	0,02	0,08	0,11	0,02
FeO	6,90	5,80	7,10	3,68	7,38	7,68	6,94	6,71	7,34	7,25	7,35	9,64	6,94	9,55	8,14	8,47	8,14
MnO	0,11	0,12	0,12	0,09	0,12	0,15	0,11	0,13	0,11	0,11	0,16	0,14	0,14	0,13	0,13	0,11	0,18
NiO	0,03	0,03	0,04	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,03	0,05	0,02
MgO	14,00	15,14	13,78	16,67	13,51	12,85	13,74	14,37	13,55	13,51	14,43	10,72	13,50	10,80	12,54	11,94	12,17
CaO	23,01	23,19	22,89	23,41	22,79	22,73	22,88	22,87	22,98	22,85	22,01	22,47	22,60	22,37	22,75	22,34	22,82
Na ₂ O	0,34	0,30	0,33	0,29	0,35	0,42	0,34	0,35	0,38	0,35	0,29	0,51	0,39	0,50	0,46	0,48	0,46
K ₂ O	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,04	0,01
Total	100,09	99,97	99,75	100,10	99,65	99,67	99,49	99,56	99,72	99,61	99,36	98,83	99,44	98,94	99,46	99,05	99,25
Si (T)	1,789	1,857	1,782	1,916	1,787	1,749	1,770	1,848	1,780	1,755	1,838	1,617	1,786	1,624	1,746	1,682	1,734
Al (T)	0,211	0,141	0,219	0,079	0,213	0,251	0,230	0,152	0,220	0,245	0,162	0,383	0,214	0,376	0,254	0,318	0,266
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,002	0,000	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,009	0,000	0,013	0,000	0,021	0,024	0,012	0,008	0,010	0,011	0,006	0,008	0,026	0,020	0,020	0,023	0,024
Fe ³⁺ (M1)	0,102	0,079	0,108	0,039	0,099	0,107	0,110	0,082	0,116	0,119	0,069	0,173	0,083	0,164	0,122	0,145	0,118
Ti (M1)	0,060	0,035	0,056	0,018	0,057	0,073	0,064	0,040	0,058	0,067	0,051	0,119	0,062	0,113	0,071	0,091	0,078
Cr (M1)	0,004	0,015	0,007	0,028	0,003	0,003	0,003	0,008	0,005	0,005	0,004	0,000	0,009	0,001	0,002	0,003	0,001
Ni (M1)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,001
Mg (M1)	0,772	0,832	0,763	0,907	0,750	0,715	0,763	0,796	0,751	0,750	0,802	0,608	0,751	0,612	0,700	0,671	0,682
Fe ²⁺ (M1)	0,053	0,038	0,051	0,007	0,069	0,077	0,047	0,067	0,059	0,048	0,066	0,092	0,070	0,091	0,083	0,065	0,097
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,060	0,059	0,061	0,061	0,062	0,056	0,059	0,060	0,053	0,060	0,095	0,042	0,064	0,049	0,050	0,057	0,041
Mn (M2)	0,004	0,004	0,004	0,003	0,004	0,005	0,004	0,004	0,003	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,006
Ca (M2)	0,912	0,916	0,911	0,916	0,909	0,909	0,913	0,910	0,916	0,912	0,880	0,916	0,903	0,910	0,913	0,902	0,919
Na (M2)	0,024	0,021	0,024	0,020	0,025	0,030	0,024	0,025	0,027	0,025	0,021	0,038	0,028	0,037	0,033	0,035	0,034
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	50,8	49,6	51,0	48,4	50,8	51,8	51,2	49,7	51,5	51,6	47,8	55,2	50,5	54,8	52,3	53,2	52,9
En	43,0	45,1	42,7	48,0	41,9	40,7	42,8	43,4	42,2	42,4	43,6	36,7	42,0	36,8	40,1	39,6	39,2
Fs	6,2	5,3	6,3	3,6	7,3	7,6	6,0	6,9	6,3	6,1	8,7	8,1	7,5	8,4	7,6	7,2	7,9
Q	97,4	97,7	97,4	97,9	97,3	96,7	97,3	97,3	97,1	97,2	97,8	95,7	97,0	95,7	96,3	96,0	96,3
Jd	0,2	0,0	0,3	0,0	0,5	0,6	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6
Aeg	2,4	2,3	2,3	2,1	2,2	2,7	2,4	2,4	2,7	2,5	2,1	4,1	2,3	3,8	3,2	3,5	3,1
#Mg	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

BT – basanite.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA43D2	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1	VA43D1
Litotipo	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	PT	PT	PT	PT	PT
Localização	borda			borda			borda			borda							
SiO ₂	46,10	45,14	50,56	43,90	47,74	46,91	44,51	46,74	47,56	45,63	49,13	43,84	49,24	46,97	49,25	48,41	48,42
TiO ₂	2,43	3,52	1,43	3,67	2,32	2,50	3,29	2,11	1,76	2,68	1,60	3,28	1,60	2,41	1,62	2,04	1,85
Al ₂ O ₃	6,44	6,95	3,10	7,96	5,54	5,94	7,69	6,02	5,47	6,89	3,92	8,12	4,37	6,26	4,48	5,04	5,11
Cr ₂ O ₃	0,02	0,24	0,11	0,00	0,38	0,22	0,02	0,00	0,44	0,06	0,02	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
FeO	8,88	8,22	6,86	9,71	7,00	7,50	9,32	8,55	6,54	7,48	6,72	8,30	7,60	8,07	7,63	8,67	7,77
MnO	0,14	0,14	0,13	0,16	0,12	0,15	0,14	0,17	0,13	0,10	0,14	0,13	0,22	0,21	0,26	0,26	0,22
NiO	0,00	0,01	0,00	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00
MgO	12,01	12,28	14,79	11,00	13,45	12,98	11,36	12,62	13,57	12,38	14,17	11,82	13,42	12,37	13,63	12,98	13,31
CaO	22,60	22,33	22,64	22,21	22,81	22,86	22,60	21,97	22,71	23,02	22,97	22,56	22,00	22,06	21,94	21,39	22,11
Na ₂ O	0,46	0,45	0,31	0,53	0,38	0,40	0,50	0,44	0,41	0,37	0,32	0,41	0,38	0,46	0,43	0,44	0,47
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
Total	99,08	99,28	99,92	99,19	99,75	99,48	99,44	98,62	98,59	98,63	99,01	98,48	98,86	98,82	99,23	99,26	99,26
Si (T)	1,738	1,699	1,871	1,663	1,776	1,754	1,678	1,765	1,784	1,722	1,835	1,662	1,850	1,772	1,841	1,818	1,811
Al (T)	0,262	0,301	0,129	0,337	0,224	0,246	0,322	0,235	0,216	0,278	0,165	0,338	0,150	0,229	0,159	0,182	0,189
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,025	0,007	0,006	0,019	0,019	0,015	0,020	0,033	0,026	0,028	0,008	0,025	0,043	0,050	0,039	0,041	0,036
Fe ³⁺ (M1)	0,131	0,120	0,063	0,146	0,091	0,112	0,150	0,113	0,106	0,122	0,089	0,154	0,044	0,075	0,060	0,059	0,082
Ti (M1)	0,069	0,100	0,040	0,105	0,065	0,070	0,093	0,060	0,050	0,076	0,045	0,094	0,045	0,068	0,046	0,058	0,052
Cr (M1)	0,001	0,007	0,003	0,000	0,011	0,007	0,001	0,000	0,013	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
Mg (M1)	0,675	0,689	0,816	0,621	0,746	0,723	0,638	0,711	0,759	0,696	0,789	0,668	0,752	0,696	0,760	0,727	0,742
Fe ²⁺ (M1)	0,100	0,077	0,073	0,108	0,068	0,072	0,098	0,083	0,046	0,075	0,068	0,059	0,115	0,111	0,097	0,116	0,088
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,049	0,062	0,077	0,054	0,059	0,051	0,046	0,074	0,053	0,039	0,053	0,050	0,080	0,069	0,082	0,098	0,073
Mn (M2)	0,005	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,004	0,003	0,004	0,004	0,007	0,007	0,008	0,008	0,007
Ca (M2)	0,913	0,901	0,897	0,902	0,909	0,916	0,913	0,889	0,913	0,931	0,919	0,916	0,886	0,891	0,879	0,861	0,886
Na (M2)	0,033	0,033	0,022	0,039	0,028	0,029	0,037	0,032	0,030	0,027	0,023	0,030	0,028	0,033	0,031	0,032	0,034
K (M2)	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	52,5	52,1	48,2	53,5	51,0	52,0	53,9	50,6	51,6	53,5	50,3	54,1	48,3	50,5	48,4	47,8	49,5
En	38,9	39,9	43,8	36,9	41,9	41,1	37,7	40,5	42,9	40,0	43,1	39,5	41,0	39,4	41,8	40,4	41,5
Fs]	8,6	8,0	8,0	9,6	7,1	7,0	8,5	8,9	5,6	6,6	6,6	6,4	10,6	10,2	9,9	11,9	9,0
Q	96,3	96,3	97,7	95,6	97,0	96,8	95,9	96,5	96,8	97,0	97,5	96,6	97,0	96,4	96,7	96,5	96,4
Jd	0,6	0,2	0,2	0,5	0,5	0,4	0,5	0,8	0,6	0,6	0,2	0,5	1,5	1,5	1,3	1,4	1,1
Aeg	3,1	3,5	2,1	3,9	2,5	2,8	3,7	2,7	2,6	2,4	2,3	3,0	1,5	2,2	2,0	2,0	2,5
#Mg	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

BT – basanite, PT – phonotephrite.

Tabela 3. (continuação).

Amostra	VA43D1	VA43D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1	VA67D1
Litotipo	PT	PT	BT	BT	BT	BT	BT	BT	BT
Localização			int	borda	centro	borda	centro	borda	centro
SiO ₂	45,57	44,49	49,53	46,41	47,54	45,29	50,66	45,16	48,55
TiO ₂	2,94	3,42	1,62	2,59	1,87	3,06	1,05	3,09	1,60
Al ₂ O ₃	7,39	8,28	5,47	6,89	7,07	7,61	4,66	7,97	6,22
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,42	0,06	0,09	0,03	0,63	0,06	0,21
FeO	8,37	9,00	6,40	7,61	7,05	8,20	5,56	8,04	6,22
MnO	0,19	0,23	0,19	0,13	0,14	0,10	0,08	0,15	0,07
NiO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,08	0,00	0,03
MgO	11,82	11,10	14,23	12,71	13,38	12,18	15,26	12,19	14,10
CaO	22,22	21,80	22,67	23,95	22,45	23,13	22,72	23,52	22,91
Na ₂ O	0,47	0,51	0,53	0,41	0,55	0,40	0,52	0,31	0,41
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	98,98	98,85	101,05	100,77	100,14	99,99	101,20	100,49	100,31
Si (T)	1,720	1,688	1,809	1,713	1,754	1,690	1,837	1,677	1,784
Al (T)	0,280	0,313	0,192	0,288	0,246	0,311	0,163	0,324	0,217
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (T)]	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,048	0,058	0,044	0,012	0,061	0,024	0,036	0,025	0,053
Fe ³⁺ (M1)	0,098	0,097	0,084	0,157	0,117	0,141	0,087	0,145	0,097
Ti (M1)	0,083	0,098	0,045	0,072	0,052	0,086	0,029	0,086	0,044
Cr (M1)	0,000	0,000	0,012	0,002	0,003	0,001	0,018	0,002	0,006
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001
Mg (M1)	0,665	0,628	0,774	0,699	0,736	0,677	0,825	0,675	0,772
Fe ²⁺ (M1)	0,105	0,120	0,042	0,058	0,032	0,071	0,003	0,067	0,027
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,061	0,069	0,070	0,020	0,069	0,044	0,079	0,038	0,067
Mn (M2)	0,006	0,007	0,006	0,004	0,004	0,003	0,002	0,005	0,002
Ca (M2)	0,898	0,886	0,887	0,947	0,888	0,925	0,883	0,935	0,902
Na (M2)	0,034	0,037	0,037	0,030	0,039	0,029	0,036	0,023	0,029
K (M2)	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	52,0	52,0	50,0	54,9	51,5	53,9	49,3	54,5	51,0
En	38,5	36,9	43,7	40,6	42,7	39,5	46,1	39,3	43,7
Fs	9,6	11,1	6,3	4,5	5,9	6,7	4,6	6,1	5,3
Q	96,2	95,8	96,0	96,7	95,7	96,8	96,1	97,5	96,8
Jd	1,3	1,6	1,4	0,2	1,5	0,5	1,1	0,4	1,1
Aeg	2,6	2,6	2,7	3,1	2,9	2,8	2,8	2,2	2,1
#Mg	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

BT – basanite, PT – phonotephrite.

Tabela 4. Composições de cristais de ortopiroxênio e pigeonita com fórmulas estruturais calculadas na base de 6 oxigênios e 4 cátions.

Amostra	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA43RD	VA60	VA60	VA60	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA66A	VA73
Litotipo	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	M-MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG	MG
Localização	centro	centro	borda	int	int	int	int	int	int	borda	borda	borda	borda	int	int	int	borda
SiO ₂	52,78	52,52	52,69	52,96	52,68	53,38	52,79	52,65	51,75	51,24	50,96	52,82	51,79	51,42	52,07	52,59	52,58
TiO ₂	0,20	0,36	0,34	0,35	0,34	0,21	0,36	0,37	0,23	0,31	0,29	0,28	0,19	0,25	0,01	0,00	0,28
Al ₂ O ₃	0,82	0,96	0,90	0,98	0,96	0,83	1,12	0,93	0,75	0,80	0,76	0,84	0,60	0,84	0,72	0,48	0,83
Cr ₂ O ₃	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,02	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
FeO	22,63	23,21	22,89	21,87	22,68	20,42	21,97	22,63	26,20	26,22	27,47	22,35	25,26	25,12	25,28	24,58	22,98
MnO	0,64	0,61	0,61	0,58	0,59	0,58	0,58	0,65	0,67	0,63	0,66	0,64	0,83	0,80	0,82	0,78	0,67
NiO	0,03	0,02	0,03	0,00	0,02	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,03
MgO	22,39	21,51	21,62	22,63	22,16	24,10	22,59	22,41	19,47	19,16	18,57	22,74	20,18	19,52	19,85	21,20	22,19
CaO	1,26	1,68	1,69	1,62	1,57	0,90	1,61	1,58	1,53	1,80	1,47	1,36	0,83	1,40	0,59	0,57	1,43
Na ₂ O	0,02	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06	0,01	0,02	0,04	0,03	0,04	0,02	0,06	0,03	0,01	0,08
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
Total	100,77	100,93	100,84	101,03	101,05	100,52	101,11	101,27	100,64	100,25	100,21	101,07	99,70	99,43	99,39	100,23	101,09
Si (T)	1,952	1,949	1,955	1,949	1,945	1,957	1,941	1,938	1,953	1,943	1,943	1,944	1,964	1,959	1,982	1,973	1,941
Al (T)	0,036	0,042	0,039	0,042	0,042	0,036	0,049	0,040	0,034	0,036	0,034	0,036	0,027	0,038	0,018	0,021	0,036
Fe ³⁺ (T)	0,012	0,010	0,006	0,009	0,014	0,008	0,010	0,021	0,014	0,021	0,023	0,020	0,009	0,004	0,000	0,006	0,023
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Al (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,000	0,000
Fe ³⁺ (M1)	0,038	0,033	0,029	0,035	0,040	0,035	0,043	0,041	0,035	0,042	0,042	0,044	0,027	0,031	0,005	0,028	0,049
Ti (M1)	0,006	0,010	0,009	0,010	0,009	0,006	0,010	0,010	0,006	0,009	0,008	0,008	0,006	0,007	0,000	0,000	0,008
Cr (M1)	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni (M1)	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001
Mg (M1)	0,956	0,956	0,960	0,956	0,950	0,958	0,947	0,948	0,958	0,949	0,949	0,948	0,968	0,961	0,980	0,972	0,942
Fe ²⁺ (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,279	0,234	0,235	0,286	0,270	0,359	0,292	0,282	0,138	0,135	0,106	0,299	0,173	0,148	0,147	0,214	0,279
Fe ²⁺ (M2)	0,650	0,678	0,675	0,629	0,646	0,583	0,622	0,635	0,778	0,769	0,810	0,624	0,765	0,765	0,800	0,737	0,637
Mn (M2)	0,020	0,019	0,019	0,018	0,018	0,018	0,018	0,020	0,021	0,020	0,021	0,020	0,027	0,026	0,026	0,025	0,021
Ca (M2)	0,050	0,067	0,067	0,064	0,062	0,035	0,063	0,062	0,062	0,073	0,060	0,054	0,034	0,057	0,024	0,023	0,057
Na (M2)	0,001	0,002	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,001	0,001	0,003	0,002	0,003	0,002	0,004	0,002	0,001	0,005
K (M2)	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Wo	2,6	3,5	3,5	3,3	3,2	1,8	3,3	3,2	3,2	3,8	3,1	2,8	1,7	3,0	1,2	1,2	3,0
En	63,8	61,5	61,7	64,2	63,3	68,0	64,4	63,8	56,6	56,3	54,8	64,8	58,8	57,4	57,8	60,9	63,8
Fs	33,6	35,0	34,8	32,5	33,5	30,1	32,3	32,9	40,2	39,9	42,1	32,4	39,4	39,6	41,0	37,9	33,3
Q	99,9	99,8	99,7	99,7	99,7	99,6	99,6	99,9	99,9	99,7	99,8	99,7	99,8	99,6	99,8	99,9	99,4
Jd	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aeg	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,1	0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,4	0,1	0,1	0,6
Mg#	65,5	63,7	63,9	66,4	65,4	69,3	66,6	66,0	58,5	58,5	56,6	66,7	59,9	59,2	58,5	61,7	65,7

M-MG – melamonzogabro, MG – monzogabro, FQMG – quartzo monzogabro fino a médio, MON – monzonito.

Tabela 4. (continuação).

Amostra	VA66A	VA66A	VA66A	VA48A	VA48A	VA81	VA81	VA41A	VA41A	VA41A
Litotipo	MG	MG	MG	MON	MON	FQMG	FQMG	CQMG	CQMG	CQMG
Localização	borda	borda	int	int	centro	centro	borda	borda	borda	centro
SiO ₂	51,90	49,99	52,30	51,81	51,18	51,02	50,61	51,00	50,63	50,30
TiO ₂	0,09	0,30	0,18	0,27	0,37	0,50	0,48	0,32	0,28	1,90
Al ₂ O ₃	0,70	0,35	0,33	0,65	0,76	1,05	0,95	0,67	0,60	0,77
Cr ₂ O ₃	0,00	0,00	0,01	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
FeO	26,26	27,16	25,40	26,75	28,32	27,72	29,83	27,47	28,89	25,30
MnO	0,84	0,84	0,86	0,91	0,94	0,88	1,08	0,77	0,71	0,75
NiO	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,14
MgO	18,88	21,30	20,44	19,10	17,69	17,95	15,93	16,33	16,03	16,42
CaO	0,85	0,53	0,88	1,68	1,69	1,90	1,83	4,03	2,57	5,89
Na ₂ O	0,03	0,03	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,14
K ₂ O	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
Total	99,58	100,49	100,45	101,22	101,02	101,06	100,77	100,63	99,78	101,62
Si (T)	1,983	1,879	1,968	1,950	1,947	1,935	1,951	1,954	1,965	1,905
Al (T)	0,017	0,016	0,015	0,029	0,034	0,047	0,043	0,030	0,027	0,034
Fe ³⁺ (T)	0,000	0,105	0,017	0,021	0,018	0,018	0,006	0,016	0,008	0,056
Total (T)	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,996
Al (M1)	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ³⁺ (M1)	0,000	0,102	0,024	0,036	0,034	0,040	0,026	0,030	0,022	0,000
Ti (M1)	0,003	0,008	0,005	0,008	0,011	0,014	0,014	0,009	0,008	0,054
Cr (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004
Mg (M1)	0,983	0,889	0,971	0,956	0,955	0,946	0,915	0,933	0,928	0,927
Fe ²⁺ (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,045	0,028	0,041	0,014
Mn (M1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M1)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Mg (M2)	0,093	0,304	0,176	0,116	0,049	0,069	0,000	0,000	0,000	0,000
Fe ²⁺ (M2)	0,842	0,646	0,758	0,785	0,849	0,822	0,885	0,807	0,866	0,731
Mn (M2)	0,027	0,027	0,028	0,029	0,030	0,028	0,035	0,025	0,023	0,024
Ca (M2)	0,035	0,021	0,036	0,068	0,069	0,077	0,076	0,165	0,107	0,239
Na (M2)	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,004	0,004	0,003	0,004	0,010
K (M2)	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total (M2)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,004
Wo	1,8	1,1	1,8	3,5	3,6	4,0	3,9	8,6	5,5	12,5
Em	55,1	64,1	59,1	55,7	52,2	53,0	47,7	48,3	47,8	48,5
Fs	43,1	34,7	39,1	40,8	44,2	43,0	48,4	43,2	46,7	39,0
Q	99,8	99,8	99,7	99,9	99,7	99,6	99,6	99,7	99,6	99,0
Jd	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Aeg	0,0	0,2	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	1,0
Mg#	56,1	64,9	60,2	57,7	54,2	55,2	49,6	52,8	50,6	55,4

MG – monzogabro, MON – monzonito, CQMG – quartzo monzogabro médio a grosso, FQMG – quartzo monzogabro fino a médio.

Tabela 5. Composições de cristais de anfibólio com fórmulas estruturais calculadas na base de 23 oxigênios e 13 cátions (13 e CNK).

Amostra Litotipo	VA43D1 PT	VA43D1 PT	VA43D1 PT	VA43D1 PT	VA43D1 PT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT
SiO ₂	37,94	37,90	38,01	37,43	37,86	37,56	36,37	36,73	36,40	35,11	36,32	36,30	36,55	36,71	36,26
TiO ₂	6,58	6,78	6,71	6,87	6,76	5,16	3,95	5,40	5,16	3,56	4,70	5,15	4,73	4,32	3,97
Al ₂ O ₃	12,61	12,60	12,64	12,64	12,89	13,76	13,67	13,51	13,84	14,58	14,57	13,79	13,82	14,71	15,03
FeO	12,38	12,36	11,79	12,83	11,86	11,31	21,76	14,86	16,96	23,20	17,08	16,10	17,29	16,29	18,11
Cr ₂ O ₃	0,00	0,02	0,00	0,04	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
MnO	0,20	0,21	0,22	0,20	0,20	0,23	0,50	0,28	0,38	0,57	0,34	0,38	0,36	0,35	0,39
NiO	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
MgO	10,82	10,56	10,92	10,19	11,12	11,80	4,69	9,45	7,75	3,71	7,79	8,21	8,24	8,12	6,90
CaO	12,16	12,15	12,26	12,14	12,12	12,05	11,75	12,14	12,05	11,72	12,00	11,91	11,53	12,06	12,03
Na ₂ O	2,09	2,02	2,12	2,11	2,03	1,87	2,04	1,99	1,91	1,88	1,95	1,96	1,84	1,97	1,94
K ₂ O	1,53	1,64	1,53	1,65	1,51	2,17	1,93	2,01	1,99	2,13	2,08	2,04	2,01	2,02	2,03
SrO	0,16	0,19	0,18	0,18	0,18	0,20	0,30	0,25	0,26	0,30	0,26	0,24	0,21	0,25	0,25
BaO	0,17	0,14	0,16	0,19	0,14	0,44	0,18	0,26	0,26	0,18	0,28	0,29	0,28	0,29	0,26
Total	96,64	96,57	96,55	96,48	96,69	96,56	97,15	96,89	96,98	96,96	97,38	96,38	96,87	97,09	97,17
TSi	5,844	5,858	5,864	5,820	5,804	5,752	5,833	5,721	5,726	5,679	5,675	5,724	5,695	5,729	5,699
TAl	2,156	2,142	2,136	2,180	2,196	2,248	2,167	2,279	2,274	2,321	2,325	2,276	2,305	2,271	2,301
TFe ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
TTi	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total T	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
CAI	0,132	0,151	0,160	0,135	0,131	0,233	0,415	0,199	0,290	0,456	0,356	0,284	0,231	0,432	0,481
CCr	0,000	0,002	0,000	0,005	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
CFe ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160	0,000	0,000
CTi	0,762	0,788	0,779	0,804	0,780	0,594	0,477	0,633	0,611	0,433	0,552	0,611	0,554	0,507	0,469
CMg	2,485	2,433	2,511	2,362	2,541	2,694	1,121	2,194	1,817	0,895	1,815	1,930	1,914	1,889	1,617
CFe ₂	1,595	1,598	1,521	1,668	1,521	1,448	2,919	1,936	2,231	3,138	2,232	2,123	2,093	2,126	2,381
CMn	0,026	0,027	0,029	0,026	0,026	0,030	0,068	0,037	0,051	0,078	0,045	0,051	0,048	0,046	0,052
CCa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total C	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
BMg	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BFe ₂	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BMn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
BCa	2,000	2,000	2,000	2,000	1,991	1,977	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,925	2,000	2,000
BNa	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,023	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,075	0,000	0,000
Total B	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
ACa	0,007	0,012	0,026	0,023	0,000	0,000	0,019	0,026	0,031	0,031	0,009	0,012	0,000	0,016	0,026
ANa	0,624	0,605	0,634	0,636	0,594	0,532	0,634	0,601	0,583	0,590	0,591	0,599	0,481	0,596	0,591
AK	0,301	0,323	0,301	0,327	0,295	0,424	0,395	0,399	0,399	0,440	0,415	0,410	0,400	0,402	0,407
Total A	0,932	0,941	0,962	0,986	0,890	0,956	1,049	1,026	1,013	1,060	1,014	1,022	0,880	1,015	1,024
Total	15,932	15,941	15,962	15,986	15,890	15,956	16,049	16,026	16,013	16,060	16,014	16,022	15,880	16,015	16,024
Mg#	0,61	0,60	0,62	0,59	0,63	0,65	0,28	0,53	0,45	0,22	0,45	0,48	0,48	0,47	0,40

PT – phonotephrite, BT – basanite.

Tabela 6. Composições de cristais de biotita com fórmulas estruturais calculadas na base de 22 oxigênios.

Amostra Litotipo	VA46A M-G	VA46A M-G	VA46A M-G	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA44RA LG	VA44RA LG	VA44RA LG	VA44RA LG	VA44RA LG	VA44RA LG	VA44RA LG	VA71 LG	VA71 LG	VA71 LG	VA71 LG
SiO ₂	35,53	36,52	36,30	36,72	37,13	36,82	36,58	38,17	37,32	37,48	37,18	36,96	37,16	36,17	36,89	36,88	37,46	
TiO ₂	8,28	6,90	8,06	5,99	4,84	5,84	5,26	5,84	8,67	8,57	8,35	7,19	7,07	5,41	7,43	5,00	6,51	
Al ₂ O ₃	13,94	13,68	13,54	12,60	12,51	12,89	12,72	14,94	13,96	13,82	13,77	14,00	13,98	14,08	13,96	13,95	13,93	
FeO	14,00	13,58	13,66	19,02	18,88	18,68	18,70	13,66	16,22	16,93	16,89	17,46	15,24	14,78	12,93	13,51	12,97	
Cr ₂ O ₃	0,02	0,02	0,01	0,03	0,06	0,02	0,03	0,01	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00					
MnO	0,06	0,09	0,11	0,11	0,08	0,09	0,11	0,13	0,18	0,16	0,10	0,11	0,09	0,07	0,07	0,08	0,08	
NiO	0,01	0,00	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05											
MgO	13,26	14,36	13,72	11,44	12,12	11,45	11,71	15,23	11,94	11,71	11,81	11,92	13,12	13,97	14,87	15,37	15,84	
CaO	0,00	0,02	0,13	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,03	0,05	0,01	0,01	0,01	0,18	0,02	0,05	0,00	
Na ₂ O	0,57	0,45	0,44	0,35	0,17	0,24	0,21	0,24	0,32	0,32	0,21	0,24	0,36	0,12	0,29	0,23	0,29	
K ₂ O	8,40	9,01	9,01	9,04	9,23	9,05	9,06	9,62	9,22	9,23	9,61	9,39	9,27	9,62	10,06	9,69	9,69	
SrO	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00											
BaO	1,07	0,13	0,12	0,09	0,04	0,33	0,26							0,23	0,37	0,08	0,31	
Total	95,15	94,75	95,15	95,44	95,10	95,45	94,69	97,84	97,88	98,27	97,93	97,31	96,30	94,62	96,89	94,85	97,09	
Si	5,352	5,476	5,431	5,610	5,682	5,618	5,631	5,519	5,469	5,487	5,474	5,486	5,511	5,482	5,427	5,530	5,477	
Al ^{IV}	2,473	2,416	2,386	2,267	2,255	2,316	2,306	2,481	2,409	2,382	2,387	2,447	2,443	2,513	2,418	2,463	2,399	
Al ^{VI}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,063	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Ti	0,938	0,778	0,907	0,688	0,557	0,670	0,609	0,635	0,955	0,944	0,924	0,803	0,788	0,617	0,822	0,564	0,716	
Fe ²	1,763	1,703	1,709	2,430	2,416	2,384	2,407	1,652	1,987	2,073	2,080	2,167	1,891	1,873	1,591	1,694	1,586	
Cr	0,002	0,002	0,001	0,004	0,007	0,002	0,004	0,001	0,004	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
Mn	0,008	0,011	0,014	0,014	0,010	0,012	0,014	0,016	0,023	0,020	0,012	0,014	0,011	0,009	0,009	0,010	0,010	
Mg	2,977	3,210	3,060	2,606	2,765	2,605	2,687	3,282	2,607	2,556	2,593	2,637	2,902	3,156	3,261	3,436	3,453	
Ba	0,063	0,007	0,007	0,005	0,002	0,020	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,021	0,005	0,018	
Ca	0,000	0,003	0,021	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,004	0,008	0,002	0,002	0,002	0,029	0,003	0,008	0,001	
Na	0,166	0,131	0,128	0,104	0,050	0,071	0,063	0,068	0,091	0,090	0,060	0,070	0,103	0,035	0,084	0,068	0,083	
K	1,614	1,723	1,720	1,762	1,802	1,762	1,779	1,774	1,723	1,724	1,806	1,778	1,754	1,860	1,888	1,854	1,807	
Total	15,356	15,460	15,384	15,490	15,546	15,462	15,516	15,491	15,272	15,284	15,338	15,408	15,405	15,588	15,524	15,632	15,550	
Fe#	0,37	0,35	0,36	0,48	0,47	0,48	0,47	0,33	0,43	0,45	0,45	0,45	0,39	0,37	0,33	0,33	0,31	
Mg#	0,63	0,65	0,64	0,52	0,53	0,52	0,53	0,67	0,57	0,55	0,55	0,55	0,61	0,63	0,67	0,67	0,69	

M-G – melagabro, M-MG – melamonzogabro, LG – gabro bandado.

Tabela 6. (continuação).

Amostra Litotipo	VA71 LG	VA60 MG	VA60 MG	VA60 MG	VA60 MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA73 MG	VA73 MG	VA73 MG	VA73 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG
SiO ₂	36,86	37,14	37,89	37,09	37,35	36,18	36,19	40,40	37,67	36,97	36,60	36,76	36,74	36,41	35,79	36,09	36,03
TiO ₂	6,80	5,73	4,89	5,33	5,40	5,92	5,64	0,25	2,94	7,55	7,48	6,83	7,21	5,42	7,55	5,53	7,98
Al ₂ O ₃	14,08	12,19	11,67	12,35	12,38	12,54	12,85	15,96	12,91	12,36	13,07	13,10	13,10	14,04	13,84	13,82	13,71
FeO	13,09	17,08	17,40	17,22	17,33	20,55	20,24	12,50	14,87	16,69	16,75	16,15	16,25	16,90	16,86	17,38	17,87
Cr ₂ O ₃		0,02	0,04	0,04	0,02	0,03	0,05	0,00	0,00	0,10	0,08	0,04	0,06				
MnO	0,07	0,06	0,05	0,07	0,05	0,10	0,09	0,10	0,05	0,09	0,08	0,07	0,07	0,08	0,06	0,09	0,08
NiO		0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,07	0,03	0,04	0,06				
MgO	14,88	12,99	13,56	12,99	12,94	10,56	10,57	14,86	15,85	12,36	12,25	13,02	12,62	12,77	11,92	12,82	11,30
CaO	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	1,13	0,00	0,01	0,00	0,00	0,07	0,03	0,03	0,01	0,00
Na ₂ O	0,28	0,26	0,21	0,21	0,17	0,29	0,25	1,01	0,19	0,48	0,45	0,48	0,45	0,17	0,19	0,10	0,29
K ₂ O	10,06	9,17	8,47	9,34	9,23	8,92	9,19	8,28	9,25	8,52	8,85	8,93	8,98	9,92	9,94	10,37	9,69
SrO		0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,01	0,05	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01				
BaO	0,40	0,30	0,13	0,21	0,19	0,13	0,17	0,15	0,13	0,37	0,65	0,30	0,40	0,26	0,25	0,13	0,11
Total	96,53	94,97	94,38	94,88	95,11	95,25	95,28	94,70	93,89	95,58	96,29	95,72	96,02	95,99	96,44	96,34	97,06
Si	5,446	5,658	5,775	5,660	5,678	5,584	5,583	5,939	5,721	5,577	5,502	5,528	5,518	5,499	5,393	5,459	5,404
Al ^{IV}	2,450	2,187	2,095	2,219	2,216	2,279	2,335	2,061	2,279	2,196	2,314	2,320	2,317	2,497	2,456	2,462	2,422
Al ^{VI}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,702	0,030	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ti	0,756	0,657	0,561	0,612	0,617	0,687	0,654	0,028	0,336	0,857	0,846	0,773	0,815	0,616	0,856	0,629	0,900
Fe ²	1,618	2,176	2,218	2,197	2,203	2,653	2,611	1,537	1,889	2,105	2,106	2,031	2,041	2,135	2,125	2,199	2,242
Cr	0,000	0,002	0,005	0,005	0,002	0,004	0,006	0,000	0,000	0,012	0,009	0,005	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,009	0,008	0,006	0,009	0,006	0,013	0,012	0,012	0,006	0,011	0,010	0,009	0,009	0,010	0,008	0,011	0,011
Mg	3,278	2,950	3,081	2,955	2,932	2,430	2,431	3,257	3,589	2,779	2,745	2,919	2,826	2,875	2,678	2,891	2,527
Ba	0,023	0,018	0,008	0,013	0,011	0,008	0,010	0,009	0,008	0,022	0,038	0,018	0,024	0,015	0,015	0,008	0,006
Ca	0,000	0,000	0,007	0,000	0,002	0,000	0,000	0,178	0,000	0,002	0,000	0,000	0,011	0,005	0,004	0,001	0,000
Na	0,080	0,077	0,062	0,062	0,050	0,087	0,075	0,288	0,056	0,140	0,131	0,140	0,131	0,049	0,056	0,030	0,085
K	1,896	1,782	1,647	1,818	1,790	1,756	1,809	1,553	1,792	1,640	1,697	1,713	1,721	1,911	1,911	2,001	1,854
Total	15,556	15,515	15,465	15,550	15,507	15,501	15,526	15,564	15,706	15,341	15,398	15,456	15,420	15,612	15,502	15,691	15,451
Fe#	0,33	0,42	0,42	0,43	0,43	0,52	0,52	0,32	0,34	0,43	0,43	0,41	0,42	0,43	0,44	0,43	0,47
Mg#	0,67	0,58	0,58	0,57	0,57	0,48	0,48	0,68	0,66	0,57	0,57	0,59	0,58	0,57	0,56	0,57	0,53

LG – gabro bandado, MG – monzogabro.

Tabela 6. (continuação).

Amostra Litotipo	VA48A MON	VA48A MON	VA48A MON	VA48A MON	Xen2 EC	Xen2 EC	Xen2 EC	VA41D2 BT	VA41D2 BT	VA41D2 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	VA67D1 BT	
SiO ₂	37,25	37,05	37,35	37,33	37,25	36,83	36,85	36,43	34,12	34,45	34,96	34,94	34,75	34,31
TiO ₂	5,11	5,53	5,40	4,73	5,09	7,00	6,75	6,87	5,48	5,89	6,51	6,17	5,22	5,54
Al ₂ O ₃	12,35	12,19	12,17	12,44	12,30	13,30	13,40	13,46	14,86	15,22	14,84	15,23	15,29	15,66
FeO	19,92	19,99	19,93	19,62	19,70	16,07	16,64	16,96	17,29	17,32	16,40	14,65	16,62	12,90
Cr ₂ O ₃	0,00	0,01	0,02	0,00	0,03				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MnO	0,15	0,17	0,13	0,14	0,11	0,09	0,07	0,09	0,51	0,49	0,41	0,19	0,23	0,16
NiO	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01				0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
MgO	11,55	11,32	11,56	11,79	11,65	12,92	12,83	12,80	11,78	11,71	12,23	13,38	12,51	14,31
CaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,08	0,08	0,06	0,17	0,11	0,21	0,03	0,03	0,03
Na ₂ O	0,17	0,21	0,18	0,17	0,19	0,37	0,32	0,31	0,50	0,41	0,46	0,61	0,61	0,66
K ₂ O	9,23	9,20	9,20	9,23	8,99	9,65	9,90	9,92	8,40	8,57	8,42	8,31	8,34	8,11
SrO	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00				0,07	0,07	0,10	0,04	0,08	0,08
BaO	0,11	0,07	0,06	0,11	0,10	0,05	0,07	0,06	1,36	1,31	1,47	2,20	1,85	2,81
Total	95,84	95,75	96,03	95,58	95,43	96,36	96,92	96,96	94,55	95,55	96,01	95,75	95,53	94,58
Si	5,686	5,667	5,688	5,704	5,697	5,508	5,500	5,450	5,293	5,279	5,307	5,292	5,315	5,245
Al ^{IV}	2,220	2,196	2,183	2,238	2,215	2,342	2,355	2,371	2,707	2,721	2,653	2,708	2,685	2,755
Al ^{VI}	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,008	0,026	0,000	0,008	0,069	0,064
Ti	0,587	0,636	0,619	0,544	0,586	0,787	0,758	0,773	0,639	0,679	0,743	0,703	0,601	0,637
Fe ²	2,543	2,557	2,538	2,507	2,520	2,010	2,077	2,122	2,243	2,220	2,082	1,856	2,126	1,649
Cr	0,000	0,001	0,002	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	0,019	0,022	0,017	0,018	0,014	0,012	0,009	0,011	0,067	0,063	0,053	0,024	0,030	0,021
Mg	2,628	2,581	2,624	2,685	2,656	2,880	2,855	2,855	2,724	2,675	2,768	3,021	2,852	3,261
Ba	0,007	0,004	0,004	0,007	0,006	0,003	0,004	0,003	0,083	0,079	0,087	0,131	0,111	0,168
Ca	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,012	0,013	0,010	0,028	0,019	0,034	0,005	0,005	0,005
Na	0,050	0,062	0,053	0,050	0,056	0,109	0,093	0,090	0,149	0,121	0,135	0,179	0,181	0,196
K	1,797	1,795	1,787	1,799	1,754	1,841	1,885	1,893	1,662	1,675	1,631	1,606	1,627	1,582
Total	15,537	15,521	15,515	15,552	15,510	15,504	15,549	15,578	15,603	15,557	15,493	15,533	15,602	15,583
Fe#	0,49	0,50	0,49	0,48	0,49	0,41	0,42	0,43	0,45	0,45	0,43	0,38	0,43	0,34
Mg#	0,51	0,50	0,51	0,52	0,51	0,59	0,58	0,57	0,55	0,55	0,57	0,62	0,57	0,66

MON – monzonito, EC – enclave, BT – basanito.

Tabela 7. Composições de cristais de magnetita com fórmulas estruturais calculadas na base de 4 oxigênios e 3 cátions.

Amostra Litotipo	VA46A M-G	VA46A M-G	VA46A M-G	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA43RD M-MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA60A MG	VA60A MG	VA71 LG	VA71 LG	VA71 LG	VA71 LG
SiO ₂	0,06	0,08	0,08	0,20	0,22	0,07	0,06	0,08	0,13	0,05	0,08	0,08	0,07	0,07	0,08	0,07	0,06
TiO ₂	10,96	10,84	11,30	0,34	3,65	9,06	10,77	20,30	10,32	8,91	9,62	8,07	7,21	11,48	9,29	10,00	9,86
Al ₂ O ₃	3,09	3,66	3,70	0,69	1,26	2,21	3,85	6,07	2,77	3,50	3,30	2,45	1,01	3,37	3,72	3,73	3,56
Fe ₂ O ₃ (T)							85,67	73,24	85,79	88,45	88,44			85,25	86,81	86,31	87,39
Cr ₂ O ₃	0,27	1,71	0,39	0,06	0,15	0,75	0,59	0,62	0,57	0,77	0,71	0,48	0,52	0,48	0,76	0,64	0,71
FeO(T)	77,90	75,79	76,91	90,54	86,79	79,91						81,36	82,81				
MnO	0,56	0,70	0,57	0,07	0,19	0,30	0,52	0,57	0,42	0,41	0,46	0,33	0,39	0,41	0,38	0,38	0,40
MgO	1,12	1,03	1,19	0,36	0,45	0,89	1,14	2,26	0,23	0,48	0,47	0,61	0,06	1,07	0,96	0,80	0,88
CaO	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,02	0,00	0,00	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O	0,04	0,01	0,06	0,01	0,02	0,01	0,03	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,05	0,01	0,00	0,01	0,00
K ₂ O	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BaO	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00						0,00	0,00				
ZnO							0,09	0,13	0,09	0,11	0,05			0,11	0,10	0,06	0,13
NiO	0,05	0,04	0,03	0,03	0,04	0,04						0,05	0,04				
Nb ₂ O ₃							0,00	0,00	0,03	0,00	0,09			0,00	0,00	0,01	0,00
Total	94,06	93,89	94,25	92,34	92,78	93,27	102,74	103,31	100,39	102,75	103,22	93,45	92,24	102,27	102,11	102,02	103,01
Fe ₂ O ₃ wt, %	43,20	40,94	41,72	66,43	59,08	47,01	42,42	21,78	42,28	45,93	45,03	48,99	51,36	41,30	44,76	43,30	44,45
FeO wt, %	39,03	38,95	39,37	30,76	33,63	37,61	38,92	46,30	39,15	38,26	39,06	37,28	36,60	39,55	37,84	38,70	38,64
Total	98,12	96,28	98,04	98,94	98,55	97,23	97,82	97,54	95,46	97,71	98,16	97,87	96,86	97,39	97,13	97,07	97,99
Si	0,002	0,003	0,003	0,008	0,009	0,003	0,002	0,003	0,005	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002
Ti	0,311	0,308	0,319	0,010	0,106	0,260	0,304	0,558	0,303	0,254	0,273	0,231	0,212	0,327	0,265	0,286	0,279
Al	0,137	0,163	0,164	0,031	0,057	0,099	0,170	0,261	0,127	0,156	0,147	0,110	0,046	0,150	0,166	0,167	0,158
Fe ⁺³	1,226	1,163	1,179	1,930	1,709	1,351	1,199	0,599	1,240	1,309	1,279	1,405	1,507	1,176	1,276	1,237	1,258
Cr	0,008	0,051	0,012	0,002	0,004	0,023	0,018	0,018	0,018	0,023	0,021	0,015	0,016	0,014	0,023	0,019	0,021
Fe ⁺²	1,231	1,230	1,236	0,994	1,081	1,201	1,222	1,415	1,276	1,211	1,233	1,189	1,194	1,252	1,198	1,229	1,215
Mn	0,018	0,022	0,018	0,002	0,006	0,010	0,017	0,018	0,014	0,013	0,015	0,011	0,013	0,013	0,012	0,012	0,013
Mg	0,063	0,058	0,066	0,020	0,026	0,051	0,064	0,123	0,013	0,027	0,027	0,035	0,003	0,060	0,054	0,045	0,050
Ca	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000
Na	0,003	0,001	0,005	0,001	0,001	0,001	0,002	0,000	0,000	0,002	0,000	0,001	0,004	0,001	0,000	0,001	0,000
K	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,004	0,003	0,003	0,001	0,000	0,000	0,003	0,003	0,002	0,004
Ni	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	3,002	3,001	3,004	3,001	3,001	3,001	3,001	3,000	3,000	3,002	3,000	3,001	3,003	3,000	3,000	3,001	3,000
Usp	0,313	0,311	0,322	0,018	0,114	0,263	0,306	0,561	0,307	0,256	0,276	0,234	0,214	0,329	0,268	0,288	0,281

M-G – melagabro, M-MG – melamonzogabro, MG – monzogabro, LG – gabro bandado.

Tabela 7. (continuação).

Amostra Litotipo	VA48A MON	VA48A MON	VA48A MON	VA66A MG	VA81 FQMG	VA43RC SY	VA43RC SY	VA43RC SY	VA43D2 BT	VA43D2 BT	VA43D5 TB	VA43D5 TB	VA43D1 PT	VA43D1 PT	VA43D1 PT	VA43D1 PT	VA43D1 PT
SiO ₂	0,06	0,07	0,09	0,14	0,12	0,03	0,04	0,06	0,97	0,15	1,06	0,09	0,11	0,10	0,14	0,07	0,14
TiO ₂	5,87	2,97	4,39	3,71	4,27	23,47	2,11	20,17	4,01	0,67	2,03	21,44	18,19	13,38	26,34	14,40	19,39
Al ₂ O ₃	3,86	1,26	1,43	1,37	1,16	0,37	10,47	0,43	0,69	0,95	1,35	0,23	5,54	4,25	6,32	3,54	0,11
Fe ₂ O ₃ (T)																	
Cr ₂ O ₃	0,56	0,11	0,10	0,08	0,13	0,29	0,87	0,52	0,03	0,05	0,02	0,08	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
FeO(T)	81,57	87,89	85,97	86,47	85,90	64,40	74,73	68,80	86,28	89,58	85,18	69,58	65,73	72,52	56,88	72,84	68,12
MnO	0,39	0,17	0,24	0,28	0,19	0,84	0,48	0,38	0,36	0,07	0,34	0,29	1,38	1,22	1,27	0,62	4,21
MgO	0,91	0,14	0,17	0,38	0,10	4,24	6,21	2,46	0,06	0,09	0,77	0,69	2,89	1,11	4,88	2,80	0,04
CaO	0,00	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,58	0,14	0,14	0,12	0,03	0,03	0,02	0,03	0,13
Na ₂ O	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05	0,01	0,05	0,04	0,07	0,02	0,05
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,03	0,01	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,00	0,00
ZnO																	
NiO	0,01	0,02	0,01	0,04	0,03	0,00	0,09	0,00	0,02	0,02	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00
Nb ₂ O ₃																	
Total	93,24	92,65	92,44	92,49	91,94	93,67	95,06	92,84	93,08	91,76	91,02	92,55	93,98	92,71	95,99	94,37	92,22
Fe ₂ O ₃ wt, %	51,78	60,66	57,34	58,86	57,38	22,33	55,28	27,10	57,39	65,01	59,23	23,91	26,23	35,90	10,89	36,96	27,64
FeO wt, %	34,98	33,30	34,37	33,51	34,27	44,31	24,98	44,42	34,64	31,09	31,89	48,06	42,13	40,22	47,08	39,58	43,25
Total	97,87	98,62	98,09	98,31	97,56	95,62	99,72	95,03	98,80	98,23	96,93	94,86	96,55	96,27	97,05	98,03	94,95
Si	0,002	0,003	0,003	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,037	0,006	0,041	0,003	0,004	0,004	0,005	0,003	0,005
Ti	0,167	0,086	0,128	0,108	0,125	0,668	0,055	0,586	0,116	0,020	0,059	0,635	0,508	0,384	0,712	0,402	0,579
Al	0,172	0,057	0,065	0,062	0,053	0,016	0,426	0,020	0,031	0,043	0,062	0,011	0,242	0,191	0,268	0,155	0,005
Fe ⁺³	1,472	1,761	1,669	1,709	1,682	0,636	1,436	0,787	1,660	1,903	1,734	0,709	0,732	1,031	0,295	1,033	0,825
Cr	0,017	0,003	0,003	0,002	0,004	0,009	0,024	0,016	0,001	0,001	0,001	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001
Fe ⁺²	1,106	1,075	1,112	1,081	1,117	1,402	0,721	1,434	1,114	1,011	1,038	1,583	1,307	1,284	1,416	1,229	1,434
Mn	0,012	0,006	0,008	0,009	0,006	0,027	0,014	0,012	0,012	0,002	0,011	0,010	0,043	0,039	0,039	0,019	0,141
Mg	0,051	0,008	0,010	0,022	0,006	0,239	0,320	0,142	0,004	0,005	0,045	0,040	0,160	0,063	0,262	0,155	0,002
Ca	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,024	0,006	0,006	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,005
Na	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,002	0,004	0,004	0,001	0,003	0,003	0,005	0,002	0,003
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
Zn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Ni	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,000	0,003	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	3,001	3,001	3,001	3,001	3,001	3,001	3,002	3,001	3,003	3,003	3,004	3,001	3,002	3,002	3,003	3,001	3,002
Usp	0,169	0,089	0,131	0,113	0,130	0,669	0,056	0,588	0,153	0,025	0,101	0,639	0,512	0,388	0,717	0,405	0,584

MON – monzonito, FQMG – quartzo monzogabro fino a médio, MG – monzogabro, SY – bolsão sienítico, BT – basanita, TB – traquibasalto, PT – fonotefrito.

Tabela 8. Composições de cristais de ilmenita com fórmulas estruturais calculadas na base de 3 oxigênios e 2 cátions.

Amostra Litotipo	VA43RD M-MG	VA60A MG	VA60A MG	VA60A MG	VA60A MG	VA73 MG	VA73 MG	VA73 MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA66A MG	VA74 MG	VA74 MG	VA74 MG	VA71 LG
SiO ₂	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,06	0,03	0,04	0,01	0,05	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07
TiO ₂	49,25	48,54	49,39	49,68	48,78	49,22	49,27	49,57	49,76	49,23	48,64	48,83	48,39	49,14	50,55	52,43	49,32
Al ₂ O ₃	0,04	0,09	0,06	0,08	0,12	0,05	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,06	0,05	0,08	0,04
Cr ₂ O ₃	0,04	0,12	0,08	0,07	0,06	0,15	0,11	0,10	0,03	0,03	0,05	0,01	0,02	0,05	0,02	0,01	0,06
FeO(T)	46,64	47,41	46,23	45,79	47,00	46,99	46,78	46,62	46,60	46,25	47,26	46,76	47,72	48,28	46,97	44,61	45,64
MnO	0,93	0,68	0,74	0,55	0,55	0,64	0,63	0,59	0,79	0,75	0,73	0,77	1,11	0,88	0,92	1,02	0,83
MgO	1,78	1,52	1,57	1,70	1,76	1,70	1,63	1,84	1,35	1,27	0,72	0,76	0,38	1,37	1,38	3,00	2,57
CaO	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,28
Na ₂ O	0,03	0,01	0,05	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00
BaO	0,03	0,03	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00				
ZnO														0,00	0,01	0,00	0,00
NiO	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00				
Nb ₂ O ₃														0,25	0,01	0,06	0,04
Total	98,80	98,47	98,15	97,93	98,36	98,83	98,60	98,86	98,61	97,66	97,52	97,21	97,73	100,04	99,95	101,25	98,86
Fe ₂ O ₃ wt, %	7,13	7,91	5,90	5,14	7,52	7,02	6,64	6,52	5,59	5,50	6,10	5,48	6,64	8,20	5,42	4,24	7,74
FeO wt, %	40,23	40,29	40,92	41,16	40,23	40,67	40,81	40,75	41,57	41,30	41,77	41,83	41,75	40,90	42,10	40,80	38,68
Total	99,48	99,15	98,67	98,37	99,05	99,38	99,16	99,41	99,14	98,18	98,08	97,75	98,37	100,82	100,48	101,66	99,57
Si	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,002
Ti	0,930	0,921	0,941	0,948	0,925	0,930	0,934	0,935	0,945	0,945	0,939	0,946	0,934	0,920	0,948	0,959	0,924
Al	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,001
Fe ⁺³	0,135	0,150	0,112	0,098	0,143	0,133	0,126	0,123	0,106	0,106	0,118	0,106	0,128	0,154	0,102	0,078	0,145
Cr	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001
Fe ⁺²	0,845	0,850	0,866	0,873	0,848	0,854	0,860	0,855	0,878	0,881	0,896	0,900	0,896	0,851	0,877	0,830	0,806
Mn	0,020	0,014	0,016	0,012	0,012	0,014	0,013	0,013	0,017	0,016	0,016	0,017	0,024	0,018	0,019	0,021	0,018
Mg	0,067	0,057	0,059	0,064	0,066	0,064	0,061	0,069	0,051	0,048	0,028	0,029	0,015	0,051	0,051	0,109	0,095
Ca	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007
Na	0,002	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000
Ba	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn														0,000	0,000	0,000	0,000
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb														0,003	0,000	0,001	0,001
Total	2,001	2,001	2,002	2,000	2,001	2,000	2,002	2,001	2,001	2,001	2,001	2,001	2,001	2,000	2,000	2,001	2,000

M-MG – melamonzogabro, MG – monzogabro.

Tabela 8. (continuação).

Amostra Litotipo	VA81 MON	VA48A MON	VA71 LG	VA71 LG	VA71 LG	Xen2 EC	Xen2 EC	Xen2 EC	Xen2 EC	VA43RC SY	VA43RC SY
SiO ₂	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,80	0,07	0,06	0,03	0,44
TiO ₂	49,75	50,20	49,90	50,74	50,01	49,21	49,42	51,06	49,79	49,39	50,24
Al ₂ O ₃	0,07	0,09	0,07	0,08	0,03	0,05	0,15	0,05	0,03	0,04	0,31
Cr ₂ O ₃	0,03	0,05	0,04	0,04	0,06	0,05	0,06	0,03	0,06	0,11	0,19
FeO(T)	47,36	45,29	46,58	46,73	47,30	45,51	44,31	43,35	45,31	34,28	33,26
MnO	0,86	0,93	0,76	0,79	0,76	0,63	0,79	0,94	0,72	3,47	3,56
MgO	0,83	2,34	2,60	2,44	2,26	1,83	1,76	1,69	1,99	11,67	10,36
CaO	0,01	0,01	0,02	0,00	0,02	0,11	0,22	0,09	0,24	0,01	0,03
Na ₂ O	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00
BaO	0,01	0,11								0,00	0,00
ZnO			0,00	0,02	0,01	0,04	0,01	0,05	0,02		
NiO	0,00	0,01								0,01	0,01
Nb ₂ O ₃			0,09	0,14	0,08	0,34	0,35	0,41	0,35		
Total	98,99	99,08	100,10	101,02	100,58	97,82	97,90	97,74	98,59	99,02	98,42
Fe ₂ O ₃ wt, %	5,46	5,78	7,86	6,88	7,88	5,87	3,46	1,62	5,61	15,72	10,72
FeO wt, %	42,45	40,09	39,50	40,54	40,21	40,23	41,20	41,89	40,26	20,13	23,61
Total	99,51	99,62	100,85	101,67	101,32	98,36	98,19	97,87	99,09	100,49	99,30
Si	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,020	0,002	0,002	0,001	0,010
Ti	0,945	0,942	0,924	0,933	0,924	0,940	0,941	0,979	0,942	0,861	0,888
Al	0,002	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,005	0,001	0,001	0,001	0,009
Fe ⁺³	0,104	0,109	0,146	0,127	0,146	0,112	0,066	0,031	0,106	0,274	0,190
Cr	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,004
Fe ⁺²	0,897	0,837	0,813	0,829	0,826	0,854	0,872	0,893	0,847	0,390	0,464
Mn	0,018	0,020	0,016	0,016	0,016	0,014	0,017	0,020	0,015	0,068	0,071
Mg	0,031	0,087	0,095	0,089	0,083	0,069	0,066	0,064	0,075	0,403	0,363
Ca	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,003	0,006	0,002	0,006	0,000	0,001
Na	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
Ba	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Zn			0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,000		
Ni	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Nb			0,001	0,002	0,001	0,004	0,005	0,005	0,005		
Total	2,001	2,001	2,000	2,000	2,000	2,000	2,001	2,000	2,000	2,001	2,001

MON – monzonito, LG – gabro bandado, EC – enclave, SY – bolsão sienítico.