



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Vitalino Elizeu Ferreira do Carmo

**Evolução magmática e tectônica dos corpos metabásicos no limite entre os complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, sudeste de Minas Gerais**

Rio de Janeiro

2018

Vitalino Elizeu Ferreira do Carmo

**Evolução magmática e tectônica dos corpos metabásicos no limite entre os complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, sudeste de Minas Gerais**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias e Faixas Móveis. .

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mônica da Costa Pereira Lavalle Heilbron

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Almeida do Eirado Silva

Rio de Janeiro

2018





CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

C287 Carmo, Vitalino Elizeu Ferreira do.  
Evolução magmática e tectônica dos corpos metabásicos no limite entre os complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, sudeste de Minas Gerais / Vitalino Elizeu Ferreira do Carmo. – 2018.  
238 f. : il.

Orientadora: Mônica da Costa Pereira Lavalle Heilbron.  
Coorientador: Luiz Guilherme Almeida do Eirado Silva.  
Tese (Doutorado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geoquímica – Minas Gerais, Sudeste – Teses. 2. Geologia isotópica – Juiz de Fora (MG) – Teses. 3. Datação radioativa – Mantiqueira, Serra da – Teses. 4. Tempo geológico – Magmatismo – Minas Gerais, Sudeste. 5. Tectônica de placas – Juiz de Fora (MG) – Teses. I. Heilbron, Mônica da Costa Pereira Lavalle. II. Silva, Luiz Guilherme Almeida do Eirado. IV. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. V. Título.

CDU 550.93(815.1)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo/ CRB-7: 5285

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

Vitalino Elizeu Ferreira do Carmo

**Evolução magmática e tectônica dos corpos metabásicos no limite entre os complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, sudeste de Minas Gerais**

Tese apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias e Faixas Móveis.

Aprovada em 23de fevereiro de 2018.

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Guilherme Almeida do Eirado Silva

Faculdade de Geologia - UERJ

Banca Examinadora:

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Mônica da Costa P. Lavalle Heilbron (Orientadora)  
Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Silva  
Serviço Geológico do Brasil – Companhia de Pesquisa de Recursos  
Minerais

---

Prof. Dr. Ciro Alexandre Ávila.  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

---

Prof. Dr. Ivo Antônio Dussin  
Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof. Dr. Miguel A. Tupinambá A. S.  
Faculdade de Geologia – UERJ

Rio de Janeiro  
2018

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, a Prof<sup>a</sup>. Mônica Heilbron, ao Prof. Luiz Guilherme, dentre os quais incluo o Prof Miguel Tupinambá, e através destes agradeço à UERJ, para onde voltei para me formar geólogo, mais uma vez.

Aos professores que tive oportunidade de cursar disciplinas que também me orientaram, de forma específica ao Prof. Ivo Dussin, que na oportunidade peço para agradecer por mim ao ilustre Prof. Koji.

À Faculdade de Geologia (FGEL), seus serviços de Secretaria, representado pela Juçara e pela Marianni, aos companheiros do Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR), Gilberto, Carla e João, Laboratório Geológico de Preparação de Amostras (LGPA), representado pela Gabriela e Núbia, onde gostei muito de trabalhar, e ao Laboratório de Estudos Tectônicos (LET).

Também agradeço ao Prof. Dr. Reiner Neumann, do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), onde terminei de preparar algumas amostras, ao Prof. Dr. Cristiano Lana e à geóloga Ana Alkmin, do Laboratório de Geocronologia do Departamento de Geologia da Escola de Minas (UFOP), onde foram feitas as datações, me dando oportunidade de voltar a Ouro Preto, e é claro à minha República Covil, sempre com as portas, os braços e sorrisos abertos para todos nós.

Agradeço aos colegas de curso, Mariana e Marcela, que muito ajudaram a completar o meu trabalho, aos amigos Eduardo Socolov e Caroline Oliveira, o Leandro Duque, e o Henrique Bruno à Cida, ao Lucas e seus companheiros, alunos do curso de Estágio de Campo II, e uma boa lembrança do motorista Valdecir, que nos levou algumas vezes para o campo e hoje o levamos de forma confortável em nossas melhores lembranças. Os colegas Bruno Gomes, Daniel e (Mike) McMaster, em nome de toda esta turma que vai passando, chegando e continuando, sempre no estudo da nossa geologia ...

E à Laura (minha irmã), que me ajudou neste trabalho descomunal de edição, além de guarita e marmita, ao Mauro (seu Companheiro), que traduziu o Resumo apresentado na forma de *Abstract*.

Também agradecer: aos meus demais irmãos, César (e Graça), Tatiana, Arturene, Claudiane (e Claudinho), Scarlet (e Luiz César), Gorete (e Nelson), que também me deram guarita e marmita; aos meus sobrinhos Carol e Henrique; aos meus parentes e amigos que, neste tempo todo, seguraram as pontas para mim lá roça, à Rejane, que reza por mim, e aos meus saudosos pais, Artur e Élide, meu irmão Ronaldo e à Nossa Senhora Aparecida.

## RESUMO

CARMO, Vitalino Elizeu Ferreira do. *Evolução magmática e tectônica dos corpos metabásicos no limite entre os complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, sudeste de Minas Gerais*. 2018. 244f. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

Esta tese é sobre os litotipos metabásicos nos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, unidades litoestratigráficas, compostas por associações de rochas ortoderivadas atribuídas a arcos magmáticos, continental e oceânico, do Riacciano-Orosiriano, desenvolvidos em torno de núcleo Arqueano, e que serviram de embasamento para sequências de cobertura, de ambiente margem passiva, do Neoproterozoico, reunidas no Grupo Andrelândia. Estas unidades compõem o Terreno Ocidental da Faixa Ribeira, que por sua vez representa porção retrabalhada, no Evento Brasileiro, do Paleocontinente do São Francisco. O objetivo foi estudar ocorrências desses litotipos em meio ao embasamento, do qual podem, tanto tomarem parte, serem mais antigos (englobados), quanto serem mais novos. Foram realizadas, análises de geoquímica, elementar e isotópica (Sr-Nd), de 34 e 21 amostras, respectivamente, e datação geocronológica U-Pb em zircão (LA-ICP-MS) de sete amostras. Foram classificados com relação às grandes séries de cristalização, separados em de baixo-Ti e alto-Ti e por assinaturas geoquímicas, discriminados em termos de ambientes tectônicos. No Complexo Mantiqueira predominam metabasitos toleíticos de alto-Ti, de ambientes distensivos intraplaca continental, e no Complexo Juiz de Fora metabasitos toleíticos, maior parte, “basalto alcalinos” e calcioalcalinos, de baixo-Ti, de ambientação tectônica de margem convergente e divergente e intraplaca (divergentes). Das datações U-Pb foram obtidas cinco diferentes concentrações de idades, interpretadas de cristalização, metamorfismo e de herança, e das análises isotópicas foram obtidas diferentes concentrações de idades modelo  $T_{DM}Nd$ , indicadoras de diferentes eventos de extração mantélica. Do Arqueano, tem-se idades modelo  $T_{DM}Nd$  em ambas as unidades e idades U-Pb restritas a duas amostras, do Complexo Mantiqueira, do Mesoarqueano (2,8-3,2 Ga), interpretadas de herança, do Neoarqueano (ca 2,7 e 2,6 Ga), interpretadas de cristalização e herança, que indicam existência de crosta arqueana e magmatismo máfico intracontinental. Do Paleoproterozoico tem-se duas concentrações de idades U-Pb, uma entre o Riacciano-Orosiriano (de ca 2,05 Ga), em ambas as unidades, e outra do Orosiriano (ca 1,97 Ga), no Complexo Mantiqueira. Do Complexo Juiz de Fora, com assinaturas do tipo IAT e CAB, são relacionáveis às suas associações de rochas de arco oceânico, e do Complexo Mantiqueira, com assinaturas de ambientes distensivos e intraplaca (pós-arco e pós-orogênico), que apontam para uma contemporaneidade de ambientes tectônicos distintos, convergente e divergente. Contudo, a maioria das análises são associadas a idades modelo  $T_{DM}Nd$  mais novas, do Esteniano-Toniano e, em menor quantidade, do Calaminiano e Ectasiano, com assinaturas geoquímicas distintas para cada uma das unidades, todos relacionados a ambientes tectônicos distensivos. Estas idades modelo  $T_{DM}Nd$  são atribuídas a eventos de extração mantélica, relacionáveis à eventos de tentativas de fragmentação e da fragmentação do Paleocontinente e da deposição das sequências do Grupo Andrelândia.

Palavras-chave: Complexo Mantiqueira. Complexo Juiz de Fora. Paleocontinente do São Francisco. Terreno Ocidental. Magmatismo máfico na Faixa Ribeira. Geoquímica elementar de metabasitos. Geoquímica isotópica de metabasitos. Datação U-Pb (LA-ICP-MS) em zircão.

## ABSTRACT

CARMO, Vitalino Elizeu Ferreira do. *Magmatic and tectonic evolution of the metabasic bodies at the boundary between the Mantiqueira and Juiz de Fora Complexes, southeast of Minas Gerais*. 2018. 244f. Thesis (Doctorate in Science) – Faculty of Geology, Rio de Janeiro State University, Rio de Janeiro, 2018.

This thesis deals with metabasic rocks in Mantiqueira and Juiz de Fora complexes, lithostratigraphic units composed by associations of continental and oceanic magmatic arcs of the Riacian-Orosirian developed around Archaean nucleus, which served as basement for sequences of the Neoproterozoic passive margin environment coverage of Andrelândia Group. Components of Occidental Terrain of Ribeira Belt, Brasiliano Event's reworked portion of the southern portion of São Francisco's Palecontinent, are units related to its development and fragmentation. The purpose of this thesis was to study occurrences of metabasites in the basement, from which they can either take part, be older or be more recent. Elemental and isotopic geochemical analyzes (Sr-Nd) of 34 and 21 samples, respectively, were performed. Seven samples were geochronological dated by means of U-Pb zircon (LA-ICP-MS). These were classified in relation to the large series of crystallization, separated as low Ti and high Ti, by geochemical signatures and also discriminated in terms of tectonic environments. From seven samples dated to U-Pb were obtained five different concentrations of ages, from crystallization, metamorphism and inheritance. From isotopic geochemistry were obtained seven different concentrations of model ages  $T_{DMNd}$ , probably indicating distinct events of mantle extraction. In Mantiqueira Complex predominate high-Ti tholeiites coming from continental intraplate distensive environments. In Juiz de Fora Complex predominate low-Ti, mostly tholeiites, as well as "alkaline basalt" and calcium-alkaline of more diverse type, associated to convergent and divergent margin and intraplate. As for the Archaean, there are model ages  $T_{DMNd}$  in both units and U-Pb age restricted to Mantiqueira Complex, with ages of Neoproterozoic (ca 2,7 and 2,6 Ga), from crystallization and inheritance, and Mesoarchean (between 2.8 and 3.2 Ga), from inheritance, which indicate the existence of Archaean crust and intracontinental mafic magmatism. Two concentrations of Paleoproterozoic U-Pb ages were recorded, one at the boundary between Rhyacian-Orosirian period (from ca 2.05 Ga) in both units, and another from Orosirian period (ca 1.97 Ga), represented by two samples in Mantiqueira Complex. From Rhyacian-Orosirian, at the Juiz de Fora Complex, there are two samples with IAT and CAB signatures, possibly related to their associations of oceanic arc rocks. From Mantiqueira Complex there are samples with signatures of intraplate environments (post-arc and post-orogenic), which point to a contemporaneity of distinct tectonic environments, convergent and divergent. However, most of these analyzes are associated with younger model ages  $T_{DMNd}$  (Stenian-Tonian, and, to a lesser extent, Calymmian and Ectasian) and very rare U-Pb ages. As for the Mantiqueira Complex they are continental intraplate and as for the Juiz de Fora Complex they are of tholeiitic nature (type MORB) and "alkaline basalt". They are related to events of mantle extraction and distensive magmatism, associated with the attempts and the fragmentation of the Palecontinent and to the deposition of the Andrelândia Group sequences.

Key-words: Mantiqueira Complex. Juiz de Fora Complex. São Francisco's Palecontinent. Occidental Terrain. Mafic magmatism in Ribeira Belt. Elemental geochemistry of metabasites. Isotopic geochemistry of metabasites. U-Pb (LA-ICP-MS) dating with zircon.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Recorte do Mapa Rodoviário do estado de Minas Gerais.....	28
Figura 2 -	Recorte de imagem de satélite Landsat .....	28
Figura 3 -	Equações utilizadas Tratamento dos dados das análises isotópicas Sm-Nd e Rb-Sr. ....	41
Figura 4 -	Contextualização geológica utilizada para a Área de Estudo, dentro da Plataforma Sul-americana, compartimentada em províncias estruturais, e dentro da Faixa Ribeira, compartimentada em terrenos tectônicos-estratigráficos e destes terrenos em domínios estruturais.....	51
Figura 5 -	Esboço tectônico da região Sudeste do Brasil, que descreve os limites propostos para a porção do Sul do Cráton do São Francisco e mapa tectônico da região Sudeste do Brasil .....	52
Figura – 6	Mapa Geológico simplificado do segmento norte da Faixa Ribeira, no limite dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro .....	56
Figura – 7	Perfis geológicos nos limites entre os domínios Andrelândia e Juiz de Fora. ....	57
Figura – 8	Mapa geológico simplificado do domínio Cratônico .....	72
Figura – 9	Idades dos principais eventos distensivos registrados no Cráton São Francisco e nas faixas Ribeira, Araçuaí e Brasília e Oeste do Congo, entre 1130 (Esteniano) e 750 Ma (Crogeniano). Complexos Copiado de Tupinambá <i>et al</i> (2007). ....	80
Figura 10 -	Afloramentos de hornblenda gnaiss do Complexo Mantiqueira. ....	89
Figura 11 -	Fotomicrografia, com nicóis descruzados e cruzados, do biotita-hornblenda, metabasito (anfíbolito), no Complexo Mantiqueira. ....	90
Figura 12 -	Detalhe de afloramentos de hornblenda gnaiss migmatítico, do Complexo Mantiqueira, na Faixa Guiricema-Abre Campo. ....	92
Figura 13 -	Fotomicrografia com nicóis descruzados e cruzados de hornblenda gnaiss, do Complexo Mantiqueira, na Faixa Guiricema-Abre Campo. ....	92
Figura 14 -	Detalhe de afloramentos de (hornblenda)-biotita gnaiss (milonítico), do Complexo Mantiqueira, na porção mais oeste-noroeste da área. ....	94

Figura 15 -	Afloramentos e exposições e fotomicrografia com nicóis descruzados e cruzados de metabasitos e doletritos como litotipo principal no Complexo Mantiqueira. ....	97
Figura 16 -	Granitóide granulítico no Domínio Andrelândia, na Pedreira Gori (UB-VC-163), próximo à cidade de Tocantins, diferente dos litotipos típicos, que caracterizam o Complexo Mantiqueira. ....	99
Figura 17 -	Ortogramulitos félsicos do Complexo Juiz de Fora. ....	104
Figura 18 -	Fotomicrografia com nicóis descruzados e cruzados de ortogramulitos félsicos e máficos do Complexo Juiz de Fora. ....	105
Figura 19 -	Ortognaisses migmatíticos e granulíticos miloníticos, do Complexo Juiz de Fora, ao longo da Faixa Guiricema-Abre Campo. ....	107
Figura 20 -	Fotomicrografia com nicóis descruzados e cruzados de ortognaisses migmatíticos e granulíticos miloníticos, do Complexo Juiz de Fora, ao longo da Faixa Guiricema-Abre Campo. ....	107
Figura 21 -	Ocorrências de granulitos máficos, como litotipo principal, em meio ao Complexo Juiz de Fora, na região de Descoberto e Astolfo Dutra. .	110
Figura 22 -	Fotomicrografia de granulitos máficos como litotipo principal, do Complexo Juiz de Fora, com nicóis descruzados e cruzados. ....	111
Figura 23 -	Diagrama binário, Nb <i>versus</i> TiO <sub>2</sub> , utilizado para classificação das 16 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (anfíbolitos e metadoleritos), do Complexo Mantiqueira. ....	117
Figura 24 -	Diagramas de classificação de 16 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (anfíbolitos e metadoleritos), do Complexo Mantiqueira. ....	118
Figura 25 -	Diagramas de discriminação de ambiente tectônico de 16 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (anfíbolitos e metadoleritos), do Complexo Mantiqueira. ....	119
Figura 26 -	Diagramas de discriminação de ambiente tectônico de 16 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (anfíbolitos e metadoleritos), do Complexo Mantiqueira. ....	119
Figura 27 -	Diagramas de distribuição de Elementos Terras Raras (ETR), normalizados pelo condrito, de 16 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (anfíbolitos e metadoleritos), do Complexo	

	Mantiqueira. ....	122
Figura 28 -	Diagramas de variação multielementar normalizados pelo MORB (Pearce 1983), de 16 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (anfíbolitos e metadoleritos), do Complexo Mantiqueira. ....	123
Figura 29 -	Diagramas de variação multielementar (de elementos mais e menos incompatíveis), normalizados pelo Manto Primitivo, de 16 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (anfíbolitos e metadoleritos), do Complexo Mantiqueira. ....	124
Figura 30 -	Diagramas binários, do tipo Harker, de MgO <i>versus</i> elementos maiores e traços selecionados, de 16 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (anfíbolitos e metadoleritos), do Complexo Mantiqueira. ....	125
Figura 31 -	Diagrama binário, Nb <i>versus</i> TiO <sub>2</sub> , utilizado para representar separação entre de baixo-Ti e alto-Ti, das 20 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora .....	136
Figura 32 -	Diagramas de classificação das 20 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora .....	136
Figura 33 -	Diagrama de classificação, com base no diagrama ternário Al-Fe(T)+Ti-Mg, das 20 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora. ....	137
Figura 34 -	Diagramas de discriminação de ambiente tectônico de 20 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora. ....	138
Figura 35 -	Diagramas de discriminação de ambiente tectônico de 20 amostras de de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora. ....	138
Figura 36 -	Diagramas de distribuição de Elementos Terras Raras (ETR), normalizados pelo condrito de 20 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora. ....	141

Figura 37 -	Diagramas de variação multielementar, de elementos mais e menos incompatíveis, normalizados pelo MORB (Pearce 1983), de 20 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora. ....	142
Figura 38 -	Diagramas de variação multielementar, de elementos mais e menos incompatíveis, normalizados pelo Manto Primintivo de 20 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora. ....	143
Figura 39 -	Diagramas binários do tipo Harker de MgO <i>versus</i> elementos maiores e traços selecionados, de 20 amostras de rochas metabásicas, de composição basáltica (granulitos máficos e miloníticos), do Complexo Juiz de Fora. ....	144
Figura 40 -	Diagramas de evolução de Nd de metabasitos dos complexo e Mantiqueira e Juiz de Fora. ....	155
Figura 41 -	Diagrama $\epsilon_{Nd(t)}$ <i>versus</i> $[\frac{87}{86}Sr]_t$ de metabasitos dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora.. ....	156
Figura 42 -	Mosaico com fotomicrografias, em lupa binocular, dos grãos de zircão datados, de metabasitos dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, onde observa morfologia, dimensões ( $\mu m$ ), coloração, dentre outras feições dos grãos.....	160
Figura 43 -	Imagens por catodoluminescência (CL) de grãos de zircão datados, dentro dos limites analíticos, de anfibolito, com restos de textura ígnea preservada, da amostra VC-VC-19b, do Complexo Mantiqueira, no contorno rodoviário da cidade de Coimbra. ....	162
Figura 44 -	Diagramas concórdia, idades U-Pb em zircão (LA-ICP-MS), de anfibolito, com restos de textura ígnea preservada, da amostra VC-VC-19b, do Complexo Mantiqueira, no contorno rodoviário da cidade de Coimbra. ....	165
Figura 45 -	Imagens por catodoluminescência (CL) de grãos de zircão datados, dentro dos limites analíticos, de anfibolito, com restos de textura ígnea preservada, da amostra VC-VC-21a, do Complexo Mantiqueira, com idades interpretadas de cristalização. ....	172
Figura 46 -	Diagramas de concórdia, idades U-Pb em zircão (LA-ICP-MS), de	

	anfíbólito, com restos de textura ígnea preservada, da amostra VC-VC-21a, do Complexo Mantiqueira. ....	173
Figura 47 -	Imagens por catoluminescência (CL) de grãos de zircão de anfíbólito, da amostra,UB-VC-70d, do Complexo Mantiqueira, na Faixa Guiricema-Abre Campo. ....	177
Figura 48 -	Diagramas de concórdia, idades U-Pb em zircão (LA-ICP-MS), de anfíbólito, da amostra UB-VC-70d, do Complexo Mantiqueira, na Faixa Guiricema-Abre Campo. ....	178
Figura 49 -	Imagens por catoluminescência (CL) de grãos de zircão, dentro dos limites analíticos, de anfíbólito, da amostra RP-VC-103c. ....	182
Figura 50 -	Diagramas de concórdia, idades U-Pb em zircão (LA-ICP-MS), de anfíbólito, da amostra RP-VC-103c, no Complexo Mantiqueira, dentro da Faixa Guiricema-Abre Campo. ....	189
Figura 51 -	Imagens por catoluminescência (CL) de grãos de zircão, dentro dos limites analíticos, de granulito máfico, da amostra SJ-VC-72a, do Complexo Juiz de Fora. ....	190
Figura 52 -	Diagramas de concórdia, idades U-Pb em zircão (LA-ICP-MS), de granulito máfico, da amostra SJ-VC-72a, do Complexo Juiz de Fora. .	192
Figura 53 -	Imagens por catoluminescência (CL) de grãos de zircão, dentro dos limites analíticos, de granulito máfico, da amostra CT-VC-08d, do Complexo Juiz de Fora. ....	198
Figura 54 -	Diagramas de concórdia, idades U-Pb em zircão (LA-ICP-MS), de intercepto superior, de granulito máfico, da amostra CT-VC-08d, do Complexo Juiz de Fora. ....	199
Figura 55 -	Imagens por catodoluminescência (CL) de grãos de zircão datados, dentro dos limites analíticos, com idades de ca 660 Ma, interpretadas de cristalização, de ca 605 Ma, interpretadas de herança e de em torno 2,0 Ga, interpretadas de herança, de granulito máfico milonítico, da amostra RP-VC-351b, do Complexo Juiz de Fora, na Faixa Guiricema Abre Campo. ....	202
Figura 56 -	Diagramas de concórdia, idades U-Pb em zircão, de granulito máfico milonítico, da amostra RP-VC-351b, do Complexo Juiz de Fora, na Faixa Guiricema-Abre Campo. ....	203

Figura 57 -	Resumo dos valores de idade modelo $T_{DMNd}$ , idade U-Pb em zircão e ambientação tectônica, de metabasitos nos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora do Arqueano e Paleoproterozoico. ....	210
Figura 58 -	Resumo dos valores de idade modelo $T_{DMNd}$ , idade U-Pb em zircão e ambientação tectônica, de metabasitos nos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora do Mesoproterozoico e Neoproterozoico. ....	211
Figura 59 -	Modelo evolutivo simplificado, onde são separados quatro estágios de desenvolvimento de magmatismos para os metabasitos estudados em meio às rochas dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora. ....	214

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Resumo principais valores de idades U-Pb em zircão, dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora e de unidades correlatas. ....	63
Tabela 2 -	Dados de Sm-Nd de rochas dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora. ....	68
Tabela 3 -	Resumo das descrições de lâminas delgadas de rochas de composição básica do Complexo Mantiqueira. ....	100
Tabela 4 -	Resumo das descrições de lâminas delgadas de rochas de composição básica do Complexo Juiz de Fora. ....	114
Tabela 5 -	Valores analíticos, de elementos maiores e menores, das 16 amostras de metabasitos no Complexo Mantiqueira. ....	128
Tabela 6 -	Valores analíticos, de elementos traços, das 16 amostras de metabasitos no Complexo Mantiqueira. ....	129
Tabela 7 -	Valores analíticos, de Elementos Terras Raras (ETR), inclusive Sc e Y, das 16 amostras de metabasitos do Complexo Mantiqueira ....	130
Tabela 8 -	Valores composição mineral normativa, conforme norma CIPW, calculada para livre de voláteis, para 16 amostras de metabasitos do Complexo Mantiqueira. ....	131
Tabela 9 -	Valores de razões diversas, entre elementos traços incompatíveis de diferentes coeficientes de partição, de 16 amostras de metabasitos do Complexo Mantiqueira. ....	132
Tabela 10 -	Resumo da classificação litogeoquímica e de discriminação tectônica de 16 amostras de metabasitos do Complexo Mantiqueira. ....	133
Tabela 11 -	Valores analíticos, elementares e isotópicos, medidos e calculados de 8 amostras de metabasitos do Complexo Mantiqueira. ....	134
Tabela 12 -	Valores analíticos, de elementos maiores e menores, das 20 amostras de metabasitos do Complexo Juiz de Fora. ....	147
Tabela 13 -	Valores analíticos, de elementos traços, das 20 amostras de metabasitos no Complexo Juiz de Fora. ....	148
Tabela 14 -	Valores analíticos, de Elementos Terras Raras (ETR), inclusive Sc e Y, das 20 amostras de metabasitos do Complexo Juiz de Fora. ....	149

Tabela 15 -	Valores composição mineral normativa, conforme norma CIPW, calculada para livre de voláteis, para 16 amostras de metabasitos do Complexo Juiz de Fora. ....	150
Tabela 16 -	Valores de razões diversas, entre elementos traços incompatíveis de diferentes coeficientes de partição, de 20 amostras de metabasitos do Complexo Juiz de Fora. ....	151
Tabela 17 -	- Resumo da classificação litogeoquímica e de discriminação tectônica de 20 amostras de metabasitos do Complexo Juiz de Fora. ....	152
Tabela 18 -	Valores analíticos, elementares e isotópicos, medidos e calculados de 14 amostras de metabasitos do Complexo Juiz de Fora. ....	153
Tabela 19 -	Resumo das amostras de metabasitos datadas U-Pb em zircão (LA-ICP-MS), quatro do Complexo Mantiqueira e três do Complexo Juiz de Fora. ....	159
Tabela 20 -	Medidas U-Pb (LA-ICP-MS), em grãos de zircão, dentro dos limites analíticos admitidos, de anfíbolito, com restos de textura ígnea preservada, da amostra VC-VC-19b, do Complexo Mantiqueira, no contorno rodoviário da cidade de Coimbra. ....	166
Tabela 21 -	Medidas U-Pb (LA-ICP-MS), em grãos de zircão, dentro dos limites analíticos admitidos, de anfíbolito com restos de textura ígnea preservada, da amostra VC-VC-21a, do Complexo Mantiqueira, no Mirante da Serra de São Geraldo (rodovia Ubá-Viçosa) ....	174
Tabela 22 -	Medidas U-Pb (LA-ICP-MS), em grãos de zircão, dentro dos limites analíticos admitidos, de anfíbolito, da amostra UB-VC-70d, do Complexo Mantiqueira, na Faixa Guiricema-Abre Campo, junto ao Ribeirão dos Bagres, próximo a Guiricema. ....	179
Tabela 23 -	Medidas U-Pb (LA-ICP-MS) em grãos de zircão, dentro dos limites analíticos admitidos, de anfíbolito, da amostra RP-VC-103c, do Complexo Mantiqueira, na Faixa Guiricema-Abre Campo, no perímetro urbano de Guarani, saída para Descoberto. ....	185
Tabela 24 -	Medidas U-Pb (LA-ICP-MS) em grãos de zircão, dentro dos limites analíticos admitidos, de granulito máfico, da amostra SJ-VC-72a, do Complexo Juiz de Fora, na rodovia São João Nepomuceno-Rio Novo. ..	193

Tabela 25 -	Medidas U-Pb (LA-ICP-MS) em grãos de zircão, dentro dos limites analíticos admitidos, de granulito márfico, da amostra CT-VC-08d, do Complexo Juiz de Fora, próximo à cidade de Cataguases. ....	200
Tabela 26 -	Medidas U-Pb (LA-ICP-MS) em grãos de zircão, dentro dos limites analíticos admitidos, de granulito máfico milonítico, da amostra RP-VC-351b, do Complexo Juiz de Fora, na Faixa Guiricema-Abre Campo, às margens do Rio Pomba, no início do barramento da PCH Triunfo. ....	204
Tabela 27 -	– Resumo dos resultados de idades obtidos pelas datações U-Pb em zircão (LA-ICP-MS), obtidas das amostras de metabasitos, quatro amostras do Complexo Mantiqueira e três amostras do Complexo Juiz de Fora. ....	208

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	23
1	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	29
1.1	<b>Levantamento bibliográfico</b> .....	29
1.2	<b>Trabalhos de campo – mapeamento e coleta de amostras</b> .....	30
1.3	<b>Processamento dos dados geológicos e estruturais (compilação de dados elaboração de mapas e perfis geológicos)</b> .....	31
1.4	<b>Petrografia (descrição de lâminas delgadas)</b> .....	32
1.5	<b>Litogeoquímica e geoquímica isotópica</b> .....	32
1.5.1	<u>Preparação de amostras de litogeoquímica e geoquímica isotópica</u> .....	34
1.5.2	<u>Procedimentos analíticos</u> .....	34
1.5.2.1	Análises (laboratoriais) de litogeoquímica (geoquímica elementar) .....	34
1.5.2.2	Análises (laboratoriais) de geoquímica isotópica .....	36
1.5.3	<u>Tratamento e análise dos dados litogeoquímicos</u> .....	37
1.5.4	<u>Tratamento dos dados das análises isotópicas Sm/Nd e Sr/Sr</u> .....	40
1.6	<b>Geocronologia U-Pb em zircão (LA-ICP-MS)</b> .....	43
1.6.1	<u>Preparação de amostras para datação U-Pb</u> .....	43
1.6.1.1	<u>Concentração mineral e separação de grãos de zircão</u> .....	43
1.6.1.2	<u>Catação dos grãos de zircão e montagem de seção em resina</u> .....	45
1.6.2	<u>Procedimentos analíticos e de tratamento dos dados de geocronologia U-Pb em zircão (LA-ICP-MS)</u> .....	46
1.6.3	<u>Interpretação dos dados U-Pb</u> .....	47
2	<b>GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	49
2.1	<b>Introdução</b> .....	49
2.2	<b>Terreno Ocidental – domínios estruturais Andrelândia e Juiz de Fora</b> .....	51
2.2.1	<u>Unidades de embasamento e de cobertura do Terreno Ocidental</u> .....	54
2.2.1.1	Complexo Mantiqueira .....	57
2.2.1.2	Complexo Juiz de Fora .....	58
2.2.1.3	Grupo Andrelândia .....	59
2.2.3	<u>Datações geocronológicas e origens tectônicas do Terreno Ocidental</u> ...	60

2.2.3.1	Dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora .....	60
2.2.3.2	Do Grupo Andrelândia .....	62
2.3	<b>Domínios cratônicos – Núcleo Arqueano, Cinturão Mineiro, região do Quadrilátero Ferrífero</b> .....	69
2.3.1	<u>Núcleo Arqueano</u> .....	69
2.3.2	<u>Unidades de coberturas precursoras e orogenéticas paleoproterozoicas da região do Quadrilátero Ferrífero</u> .....	71
2.3.3	<u>Arcos magmáticos paleoproterozoicos do Cinturão Mineiro</u> .....	71
2.4	<b>Tentativas de fragmentação do Paleocontinente do São Francisco</b> ..	72
2.4.1	<u>Eventos tectônicos - rifiteamento, magmatismo e sedimentação</u> .....	72
2.4.2	<u>Magmatismos félsicos e máficos (básicos)</u> .....	74
2.4.2.1	Magmatismos intracontinental básico e félsico do Estateriano .....	74
2.4.2.2	Magmatismo básico intracontinental do Calaminiano .....	75
2.4.2.3	Magmatismo básico intracontinental do Esteniano – 1,2-1,0 Ga .....	76
2.4.2.4	Magmatismo básico intracontinental do Toniano – 1,0-0,85 Ga .....	77
2.4.2.5	Magmatismo máfico e máfico-ultramáfico relacionado a ambiente de margem passiva do Criogeniano .....	78
3	<b>GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	81
3.1	<b>Introdução</b> .....	81
3.2	<b>Arranjo estrutural e forma de mapeamento</b> .....	82
3.3	<b>Unidades litológicas do Domínio Andrelândia</b> .....	86
3.3.1	<u>Complexo Mantiqueira</u> .....	87
3.3.1.1	Hornblenda gnaissé .....	87
3.3.1.2	Bitotia-hornblenda gnaissé bandado migmatítico, rico em metabasitos de natureza ortoderivada .....	91
3.3.1.3	(Hornblenda)-biotita gnaissé (milonítico) .....	93
3.3.1.4	Rochas básicas (metabasitos, metadoleridos e doleritos) .....	95
3.3.1.4.1	Rochas básicas como litotipos subordinado – anfíbolitos, metadoleritos e doleritos .....	95
3.3.1.4.2	Rochas básicas como litotipo principal .....	97
3.3.2	<u>Granitoide granulítico do Domínio Andrelândia</u> .....	98
3.3.3	<u>Rochas metassedimentares</u> .....	101
3.3.3.1	Silimanita-granada gnaissé migmatítico, granada-hornblenda-biotita	

	gnaisses, biotita gnaisses e quartzitos .....	101
3.4	<b>Unidades litológicas do Domínio Juiz de Fora</b> .....	102
3.4.1	<u>Complexo Juiz de Fora</u> .....	102
3.4.1.1	Ortogramulitos félsicos .....	102
3.4.1.2	Ortognaisses migmatíticos e granulíticos .....	106
3.4.1.3	Granulitos máficos .....	108
3.4.1.3.1	Litotipo subordinado .....	108
3.4.1.3.2	Litotipo principal .....	109
3.4.2	<u>Grupo Andrelândia – (silimanita)-granada-biotita gnaisses</u> .....	112
3.4.3	<u>Rochas ou granitoides intrusivas brasileiras</u> .....	112
4	<b>LITOGEOQUÍMICA E GEOQUÍMICA ISOTÓPICA DOS METABASITOS DOS COMPLEXOS MANTIQUEIRA E JUIZ DE FORA</b> .....	115
4.1	<b>Introdução</b> .....	115
4.2	<b>Litogeoquímica e geoquímica isotópica dos metabasitos</b> .....	116
4.2.1	<u>Complexo Mantiqueira</u> .....	116
4.2.1.1	Litogeoquímica .....	116
4.2.1.1.1	Classificação em séries e afinidades magmáticas .....	116
4.2.1.1.2	Discriminação de ambiente tectônico .....	118
4.2.1.1.3	Assinatura geoquímica, com base nos padrões de distribuição de ETR e outros elementos incompatíveis .....	120
4.2.1.2	Geoquímica isotópica .....	127
4.2.2	<u>Complexo Juiz de Fora</u> .....	135
4.2.2.1	Litogeoquímica .....	135
4.2.2.1.1	Classificação em séries e afinidades magmáticas .....	135
4.2.2.1.2	Discriminação de ambiente tectônico .....	137
4.2.2.1.3	Assinatura geoquímica, com base nos padrões de distribuição de ETR e outros elementos incompatíveis .....	139
4.2.2.2	Geoquímica isotópica .....	146
5	<b>GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÃO (LA-ICP-MS) DE METABASITOS DOS COMPLEXOS MANTIQUEIRA E JUIZ DE FORA</b> .....	157
5.1	<b>Introdução</b> .....	157

5.2	<b>Datação das amostras do Complexo Mantiqueira</b> .....	161
5.2.1	<u>Amostra VC-VC-19b</u> .....	161
5.2.2	<u>Amostra VC-VC-21a</u> .....	171
5.2.3	<u>Amostra UB-VC-70d</u> .....	176
5.2.4	<u>Amostra RP-VC-103c</u> .....	181
<b>5.3</b>	<b>Complexo Juiz de Fora</b> .....	189
5.3.1	<u>Amostra SJ-VC-72a</u> .....	189
5.3.2	<u>Amostra CT-VC-08d</u> .....	197
5.3.3	<u>Amostra RP-VC-351b</u> .....	201
5.4	<b>Considerações sobre resultados das datações U-Pb em zircão (LA-ICP-MS)</b> .....	206
5.4.1	<u>Valores de idade maiores – Neoarqueno - VC-VC-19b e VC-VC-21a ...</u>	206
5.4.2	<u>Valores de idades do limite Riachiano-Orosiriano e Orosiriano.....</u>	206
5.4.3	<u>Valores de idades do Criogeniano</u> .....	207
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	209
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	215
	<b>APÊNDICE A</b> – Mapa Geológico-Estrutural da Área de Estudo.....	232
	<b>APÊNDICE B</b> – Mapa Geológico-Geoquímico, com listagem de pontos de análise de geoquímica elementar e isotópica e de geocronologia u-Pb. ....	233
	<b>APÊNDICE C</b> – Tabelas de Pontos Geológicos. ....	234

## INTRODUÇÃO

Esta tese é sobre os litotipos máficos (metabasitos) que ocorrem em meio às associações de rochas predominantes félsicas dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora. A mesma é defendida com base em trabalhos de campo, petrográficos e estudos analíticos, de geoquímica elementar e isotópica, dos sistemas rubídio-estrôncio (Rb-Sr) e samário-neodímio (Sm-Nd), e de datação geocronológica urânio-chumbo (U-Pb) em zircão.

Os metabasitos ocorrem difundidos, de maneiras semelhantes, em meio às rochas predominantes dessas duas unidades, originalmente descritos como parte das mesmas. As formas de ocorrência variam de subordinadas inseridas na estruturação geral, como bandas tabulares, lentes, boudins, enclaves, e localmente como litotipo principal.

Os complexos Mantiqueira e Juiz de Fora são unidade

es litoestratigráficas do Terreno Ocidental da Faixa Ribeira, que representa porção retrabalhada do Paleocontinente do São Francisco, no Evento Brasileiro. As rochas dessas unidades foram desenvolvidas no Riáciano-Orosiriano e juntamente com demais terrenos compuseram esse Paleocontinente. Posterior à sua consolidação, ocorreram diversos eventos tectônicos, referidos como de tentativas malogradas de fragmentação, e compuseram o embasamento para deposição das sequências de cobertura, reunidas no Grupo Andrelândia, relacionadas à sua fragmentação e precursoras do Evento Brasileiro.

Para proposição do presente estudo sobre os metabasitos foi considerado os múltiplos contextos tectônicos que essas unidades foram envolvidas, com possibilidades de magmatismo de composição básica associados. São contextos relacionadas, desde o desenvolvimento das mesmas no Paleoproterozoico em torno de núcleo Arqueano, às suas existências como parte de domínio continental estável ou íntegro, ao longo de todo o Mesoproterozoico, até a sua fragmentação no Neoproterozoico.

As associações de rochas félsicas dessas duas unidades, com maior número de dados analíticos, são de afinidades calcioalcalinas, relacionadas a ambientes tectônicos convergentes. Estes são relativamente bem caracterizados, de arcos magmáticos continental do Complexo Mantiqueira e oceânico do Complexo Juiz de Fora, em menor quantidade atribuídas a ambientes colisionais, de idades do Riáciano-Orosiriano, e de resquícios de Núcleo Continental Arqueano, bem caracterizado no Domínio Cratônico.

Já os metabasitos, inseridos em meio à essas associações de rochas félsicas, com menor número de dados analíticos, são de afinidades geoquímicas distintas diversas, com

predomínio de toleíticas, ao mesmo tempo heterogêneas, e em menor quantidade de afinidades alcalinas e calcioalcalinas-toleíticas. São discriminados de ambientes tectônicos os mais diversos, convergentes e divergentes, continentais e oceânicos, relacionáveis a eventos tectônicos diversos, partes da história do Paleocontinente, maior parte mais jovens, atribuídas a tentativas e à fragmentação do mesmo.

Os metabasitos mais antigos, relacionáveis ao desenvolvimento e à consolidação do Paleocontinente, do Complexo Mantiqueira parecem dissociadas do ambiente de arco continental, enquanto que, do Complexo Juiz de Fora são associados ao ambiente de arco oceânico (membros menos evoluídos da séries calcioalcalinas). Do Complexo Mantiqueira, discriminados de ambiente divergente intracontinental do Orosiriano, são interpretados como pós-orogênicos (relacionáveis a uma tectônica para formação da bacia do Grupo Itacolomi). Também são registrados metabasitos mais antigos que os arcos, no Complexo Mantiqueira interpretados como resquícios de crosta continental arqueana preservada, no Complexo Juiz de Fora relacionados a eventual crosta oceânica do Sideriano (tipo MORB, contemporâneo ao desenvolvimento da bacia do de margem passiva, representada pelo Supergrupo Minas, e de primeiro estágio de arco no Cinturão Mineiro).

A apresentação dessa tese é subdividida em seis capítulos: 1 – Materiais e Métodos; 2 - Geologia Regional; 3 - Geologia Local; 4 - Geoquímica Elementar e Isotópica; 5- Geocronologia U-Pb em Zircão. À estes capítulos, são somados itens Introdução, Considerações Finais, Referências e Anexos.

Em Materiais e Métodos, de forma sintética são descritos os recursos, as etapas e as metodologias utilizados ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Na Geologia Regional, são apresentadas compartimentação e eventos tectônicos, unidades litoestratigráficas e magmatismos, reconhecidos na Faixa Ribeira e Domínio Cratônico, relacionáveis a formação de rochas básicas, que poderiam contextualizar estes litotipos no Terreno Ocidental.

Na Geologia Local, separado por domínios estruturais Andrelândia e Juiz de Fora, são feitas rápida descrição dos litotipos separados na área de estudo, com ênfase para rochas do embasamento, dos complexos Juiz de Fora e Mantiqueira, e para as rochas básicas em meio a estas, em detrimento das unidades de cobertura, representada pelo Grupo Andrelândia, e das intrusivas brasileiras. Destaque para a separação de faixa ambígua, entre os domínios estruturais reconhecidos, referida como referida como Faixa Guiricema-Abre Campo.

Na Geoquímica Elementar e Isotópica dos metabasitos, separadamente para cada uma das unidades ou domínios, são apresentados resultados, tratamento analítico e propostas

tentativas de integração desses. Inicialmente, é feita classificação com base nas grandes séries de cristalização, separação destes em de baixo-Ti e de alto-Ti, de diferentes tipos de assinaturas geoquímica elementar, a partir de elementos menores e traços diversos, com destaque para ETR normalizados pelo condrito. Esta é seguida de análise isotópica de Nd e Sr, de parâmetros petrogenéticos e de idades modelo  $T_{DM}Nd$  (atribuídas a idade máxima de extração mantélica), que em grande parte consolidam grupos litogeoquímicos separados. Por fim é feita discriminação de ambiente tectônicos (de rochas de composição básica) e feitas tentativas de discriminação quanto aos seus possíveis ambientes tectônicos, se de margem ou intraplaca, distensivos ou compressivos.

Na Geocronologia U-Pb em zircão, são apresentados resultados de datação de metabasitos, de três amostras do Complexo Juiz de Fora e quatro do Complexo Mantiqueira. São calculadas idades do Arqueano ao Neoproterozoico, que são interpretadas, de cristalização, de herança e de metamorfismo.

A análise e integração dos dados analíticos, de geoquímica elementar e isotópica e de geocronologia U-Pb, são bastante reveladores, não obstante inexistência de mais dados e alguns conflitos entre estes. Estes permitem caracterização e correlação de grupos geoquímicos, idades de extração e de cristalização.

Do Complexo Mantiqueira, predomínio de metabasitos toleíticos de alto-Ti. Os valores de idades de extração (idades modelo  $T_{DM}Nd$ ) variam do Mesoarqueano, isoladas do Calaminiano e Ectasiano e do Esteniano, com predomínio de parâmetros petrogenéticos  $ENd(t)$  positivos, indicando contaminação crustal.

São obtidas idades U-Pb do Neoarqueano de duas amostras da parte norte da área, entendidas como representantes de resquício de crosta continental arqueana. Outras duas idades U-Pb são do Orosiriano, uma discriminada e outra interpretada intraplaca continental e outra do tipo MORB (de grupo geoquímico de baixo-Ti e  $ENd(t)$  negativo).

Do Complexo Juiz de Fora, predomínio de metabasitos toleíticos de baixo-Ti. Os valores de idades de extração (idades modelo  $T_{DM}Nd$ ) são do Mesoarqueano, uma do Ectasiano e uma importante concentração do limite Esteniano-Toniano. Os parâmetros petrogenéticos  $ENd(t)$  são todos negativos a levemente positivos, indicando fonte essencialmente juvenil.

São obtidas idades U-Pb do limite Riáciano-Orosiriano de três amostras, que incluem básicas-intermediárias, de afinidades toleíticas e calcioalcalians (basalto-andesíticas), relacionadas a arcos magmático oceânico representado pelo Complexo Juiz de Fora.

Para a concentração de idades modelo ( $T_{DMNd}$ ) do limite Esteniano-Toniano não foi obtida idade U-Pb. As mesmas são separadas em toleíticas do tipo MORB e basalto-alcálinas, porém com mesmas assinaturas isotópicas e ocorrem ao longo de mesmo trend, que indicam representarem variações de mesmo evento e fonte magmática.

Dentre série de interpretações possíveis, envolvendo resultados analíticos de metabasitos nas duas unidades (nos dois domínios estruturais), ressaltamos três:

- a) os resultados de idades U-Pb e modelos ( $T_{DMNd}$ ) indicam existência, para ambos, de eventos de extração mantélica, e para o Complexo Mantiqueira, de resquílios de crosta continental e arqueana, que precedeu ao desenvolvimento do Paleocontinente;
- b) os metabasitos com idades U-Pb do Riachão-Orosiriano, do Complexo Juiz de Fora, são parte do arco magmático oceânico, enquanto que contemporâneas a estas, do Orosiriano, no Complexo Mantiqueira, são atribuídos a fase pós-orogênica dessa unidade, isto é pós arco, relacionados ao desenvolvimento e consolidação do Paleocontinente;
- c) os metabasitos toleíticos de alto-Ti,  $eNd(t)$  positivos, intraplaca continental do Complexo Mantiqueira, e de baixo-Ti do tipo MORB e basalto alcalino e  $eNd(t)$  negativos, do Complexo Juiz de Fora, com idades modelo ( $T_{DMNd}$ ) do Esteniano e limite Esteniano-Toniano, tomariam parte de mesmo evento tectônico, relacionável à fragmentação do Paleocontinente, que esperam por datação geocronológica.

O objetivo central desta tese, sobre metabasitos, dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, é contextualizar os mesmos em termos tectônicos, com relação às unidades do qual tomam parte, componentes Terreno Ocidental, que é considerado porção retrabalhada do Paleocontinente do São Francisco.

Os metabasitos, originalmente descritos como parte dessas, constituem litotipos difundidos nas duas unidades, em meio às suas rochas ortoderivadas félsicas, intermediárias e félsicas, com idades do Riachão-Orosiriano, representantes de terrenos acrescionários, de arcos e colisionais, na composição do Paleocontinente. De afinidades geoquímicas diferentes e heterogêneas, condicionados à estruturação geral, gnáissica e milonítica, estabelecida no Evento Brasileiro, é possível que estes representem eventos tectônicos e magmatismos básicos diversos aos dos desenvolvimentos desses dois terrenos.

Através de estudo de geoquímica elementar e isotópica e geocronológico, espera-se caracterizar estas eventuais diversidades tectônicas, comparar os metabasitos das duas

unidades e contextualiza-los na história do Paleocóntinente. Desenvolvido no Paleoproterozoico, em torno de núcleo Arqueano, foi palco de diversas tentativas de fragmentação, desde o Estareriiano, até o Toniano-Criogeniano, quando esta vem a ocorrer, com uma variedade de possibilidades ambientes tectônicos e de magmatismo de composição básica.

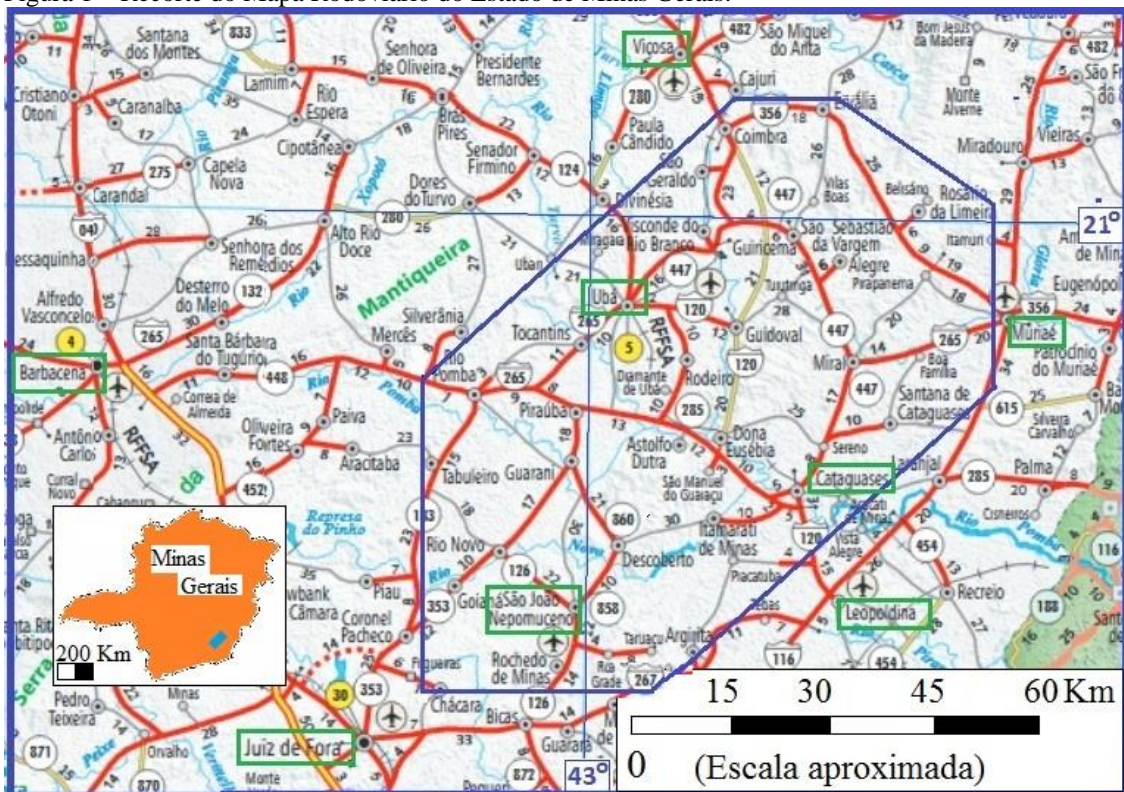
A área de estudo fica situada no sudeste do estado de Minas Gerais, na região da Zona da Mata, entre Juiz de Fora, a sul, e Viçosa, a norte. Esta é representada por polígono irregular, limitado pelos meridianos  $43^{\circ}10'$ , a oeste, e  $42^{\circ}30'$  a leste, e pelos paralelos  $21^{\circ}35'$ , a sul, e  $20^{\circ}50'$ , a Norte, com cerca de 100 km de extensão e 50 km de largura, perfazendo uma área em torno de  $5.000 \text{ km}^2$ . A orientação NE-SW do polígono acompanha a estruturação geral das unidades geológicas que compõem o Terreno Ocidental.

Dentro do limite da área de estudo ficam as cidades de Rio Pomba, São João Nepomuceno, Ubá, Cataguases, Astolfo Dutra, Visconde do Rio Branco, Miraí, Guiricema, Coimbra e Ervália, dentre outras. Esta é cortada e contornada por diversas rodovias, dentre as quais a BR-265, BR-267 e BR-116, por diversas rodovias estaduais asfaltadas e inúmeras estradas de terra em boas condições de rodagem ao longo de todo o ano. (Fig 1).

A área de estudo abrange a bacia hidrográfica dos rios Pomba e Novo e, pequena parte, Muriaé. Esta compreende, em grande parte, extensa depressão escalonada da bacia do Rio Pomba, contornada por escarpas da serra da Mantiqueira (segmentos serra de São Geraldo e Divinésia) e terras altas a montante dessas escarpas e cortada por alinhamento de serras (serras do Relógio, Boa Vista e Miraí), de direção NE-SW, condicionado pelo arranjo estrutural (Fig 2).

A área de estudo é coberta pelos mapas geológicos na escala 1:100.000, folhas Ubá, Leopoldina, Juiz de Fora (do projeto Sul de Minas, CODEMIG-2007), Rio Pomba (projeto Barbacena, PLGB-CPRM-1993), Viçosa e Carangola (projeto "Leste de Minas", PLGB-CPRM-2012).

Figura 1 – Recorte do Mapa Rodoviário do Estado de Minas Gerais.



Nota: O polígono limita a área de estudo

Fonte: DER-MG, 2013.

Figura 2 – Recorte de imagem de satélite Landsat.



Nota: O polígono limita a área de estudo, e identificação das manchas urbanas de cidades da região, que ressalta faixa de direção NE-SW, mais rica em cobertura florestal, relacionada ao alinhamento serrano, e segmentos das escarpas da serra da Mantiqueira na parte NNW.

Fonte: GoogleEarth, 2017.

## 1 MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos de elaboração desta tese pode ser separado nas seguintes etapas, algumas realizadas de forma concomitantes: 1) levantamento bibliográfico; 2) trabalhos de campo (mapeamento e coleta de amostras); 3) elaboração de mapas e análise estrutural e perfis geológicos; 4) preparação de amostras; 5) descrição petrográfica; 6) análises de litogeoquímica (geoquímica elementar de rocha total), através de ICP-AES e ICP-MS; 7) geoquímica isotópica para os pares Rb-Sr e Sm-Nd, através de diluição isotópica e análise TI-MS; 8) datação U-Pb em zircão, através LA-ICP-MS; 9) análise e integração dos dados obtidos; 10) redação da tese.

### 1.1 Levantamento bibliográfico

O levantamento e revisão bibliográfica, de geologia e das ferramentas utilizadas, compreendeu na revisão da parte conceitual de geologia e dos métodos analíticos utilizados.

De geologia sobre, estudo sobre rochas de composição básica e ambientes tectônicos, contexto geológico e evolução dos complexos Juiz de Fora e Mantiqueira, da Faixa Ribeira e Cráton do São Francisco, do Arqueano ao Neoproterozoico.

Dos métodos analíticos, estudo dos fundamentos, métodos de obtenção e de tratamento dos dados analíticos, de geoquímica elementar, isotópica e de datação U-Pb em zircão.

Também foi parte desta etapa a organização e compilação de base cartográfica.

Foram utilizadas cartas topográficos do IBGE (escala 1:50.000), mapas geológicos básicos (escala 1:100.000), Projeto Sul de Minas (CODEMIG-2007), maior parte, Projeto Barbacena (PLGB-CPRM-1993) e Programa Geologia do Brasil-PGB (PLGB-CPRM-2012) (*vide* articulação do Mapa Geológico – Anexo 1).

As cartas topográficas IBGE utilizadas foram as folhas Tocantins, Ubá, Mirai, Rio Pomba, Astolfo Dutra, Cataguases, Argirita e Leopoldina.

Do Projeto Sul de Minas, as folhas Juiz de Fora, Leopoldina e Ubá, do Projeto Barbacena, a folha Rio Pomba, e do PGB a folha Viçosa e Carangola. Também foram integrados dados do acervo do LET (Laboratório de Estudos Tectônicos) do grupo de pesquisa TEKTOS/UERJ, folhas São João Nepomuceno, Argirita e Leopoldina (Escala 1:50.000).

## **1.2 Trabalhos de campo – mapeamento e coleta de amostras**

Os trabalhos de campo, de mapeamento e coleta de amostras, compreenderam inicialmente no reconhecimento das unidades mapeadas, na escala 1:100.000, quando foram definidos o escopo desta tese. No restante dos trabalhos de campo, buscou realizar refinamento deste mapeamento, com a descrição de novos pontos e a coleta de amostras para análises (Anexo 2 e 3 – Mapa e Tabela de Pontos, coordenadas UTM).

Os trabalhos foram realizados ao longo de quatro campanhas de campo, que somaram cerca de 40 dias de campo, com descrição de 430 pontos geológicos. Estes são registrados em caderneta, com medidas de estruturas, tiradas fotografias e coletadas amostras representativas, de mão e em quantidades maiores para geocronologia U-Pb em zircão. Os dados de caderneta são compilados em planilha excel.

Os trabalhos de campo consistiram na realização, maior parte de carro, com pontos marcados ao longo das rodovias e estradas, de perfis transversais à estruturação geral, de direção NW-SE. Após domínio sobre o reconhecimento de todas as unidades mapeadas, foi dado enfoque ao registro de rochas do embasamento (complexos Mantiqueira e Juiz de Fora), em detrimento ao registro das demais unidades.

Essa estratégia foi considerada eficaz para o domínio Juiz de Fora, do Complexo Juiz de Fora, o que não ocorreu no Domínio Andrelândia, do Complexo Mantiqueira.

No Domínio Andrelândia, as melhores exposições ocorrem nas escarpas da serra da Mantiqueira e se mostram escassas no restante da área, formada pela depressão da bacia do rio Pomba e nos planaltos além da escarpa, onde predominam espessas coberturas de solos, com exposições limitadas de rochas. Nessas partes, além de planejamento prévio, utilizando mapas e imagens, para identificação de cachoeiras e “*knick points*”, os trabalhos de campo devem ser realizados em parte à pé, acessando nascentes, fundos de vales, brejos, barragens artificiais (açudes), etc.

Na parte norte, na região de e São Sebastião da Vargem Alegre e Guiricema, foi realizado mapeamento de detalhe (escala 1:25:000). Este ocorreu no mês de junho de 2015, pelos alunos do oitavo período do curso de geologia da UERJ, como parte da disciplina Estágio de Campo II.

### **1.3 Processamento dos dados geológicos e estruturais (compilação de dados e elaboração de mapas e perfis geológicos)**

Nesta etapa foram montados banco de dados, utilizando planilha excel, e elaborados mapas e perfis geológicos, gerados estereogramas de elementos estruturais coletados. Os mapas foram originalmente elaborados na escala 1:100.000, sendo contudo apresentados na escala 1:250.000

Os mapas e perfis são produtos de integração dos dados de campo e trabalhos já existentes. Destes, as contribuições mais significativas são para o trend mais a oeste do Domínio Juiz de Fora, coberta pela disciplina Estágio de Campo – II/2015 e separação de grandes corpos de metabasitos. Na área do EC-II foram reveladas intercalações de rochas ainda não reconhecidas e, sentido sul, separação de grandes corpos de metabasitos, já reconhecidos, mas até então inseridos no Complexo Juiz de Fora.

#### 1.4 Petrografia (descrição de lâminas delgadas)

Foram analisadas 33 lâminas delgadas, representativas de rochas máficas (básicas), relacionadas diretamente ao estudo desta tese, estudadas em maior detalhe. Além destas, foram confeccionadas outras 40 lâminas delgadas, em maior parte de litotipos félsicos dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora.

A petrografia compreendeu na descrição da textura e estrutura, granulação, mineralogia, identificação de paragêneses minerais metamórficas.

Para boa parte das rochas básicas, a distinção entre feldspatos alcalinos e cálcicos, bem como entre os clinopiroxênios e ortopiroxênios não foram imediatas, limitando a realização de análise modal. Boa parte dos feldspatos, produtos de recristalização metamórfica, apresentam características comuns, como contatos retos e poligonais e ausência de zoneamento, maclas, exsolução (perfitas) etc. Para os piroxênios, embora de forma menos crítica, boa parte das limitações é decorrente da ausência de seções prismáticas, especialmente nas rochas com texturas granuloblásticas.

#### 1.5 Litogeoquímica e geoquímica isotópica

As escolhas das amostras, para análise geoquímica elementar, foram feitas a partir dos trabalhos de mapeamento e da petrografia, inicialmente com o objetivo de representar as aparentes diversidades. As escolhas das amostras para análise de geoquímica isotópica, realizadas em menor quantidade, foram feitas a partir de grupos litogeoquímicos separados.

A preparação das amostras foi feita no Laboratório Geológico de Preparação de Amostras, da Faculdade de Geologia da UERJ (LGPA-FGEL-UERJ). As análises de geoquímica elementar foram feitas no laboratório ACTLAB (ActivationLaboratoriesLtd.), do pacote oferecido pelo mesmo, referido como *4-litho*, onde são feitas medidas de 55

elementos. As análises de geoquímica isotópica no Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (LAGIR-FGEL-UERJ), onde foram medidas as razões isotópicas dos elementos estrôncio (Sr), neodímio (Nd) e samário (Sm). Os valores de isótopo de rubídio utilizados foram obtidos por meio de cálculo da geoquímica elementar.

Foram utilizadas 37 análises de geoquímica elementar e 21 análises de geoquímica isotópica, maior parte das amostras de composição básica e algumas de composição básica-intermediária.

Os resultados são apresentados em um único capítulo, separadamente para amostras nos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora. As principais fontes utilizadas foram trabalhos Wernick (2004), Rollinson (1993), Wilson (1989), Dickin (1995) e Albarede (2011).

### 1.5.1 Preparação de amostras de litogeoquímica e geoquímica isotópica

A preparação de amostras para geoquímica elementar e isotópica foi feita a partir de um *slab* (tijolinho) de metabasito, obtido quando do corte para confecção da lâmina delgada. O *slab* é de em torno 7-10 cm<sup>3</sup>, tamanho definido de acordo com granulacão da amostra, com vistas a sua representatividade (quanto maior a granulacão, maior deve de ser o seu tamanho, seguido se necessário de quarteamento). O mesmo deve de ser livre de fenocristais e de remobilizados (leucossomas e estruturas *schlieren*) e de sinais de alteracão (hidrotermal e intempérica), sob pena de ser descartado.

A britagem do *slab* é feita manualmente, utilizando bigorna e martelo, com amostra envolta em saco plástico de gramatura grossa. A moagem para reduçã granulometria da ordem de 250# (*mesh*) ou inferior a 50 micra (textura de talco). Esta é em moinho de bolas de tungstênio da SPEX® Sample Preparation – Laboratory Equipment for Sample Preparation & Handling, modelos 8000-Mixer/Mill e 8000-Mixer/MillD. O material moído é embalado, em dois frascos de acrílico de 10g, devidamente identificados e lacrados (um para encaminhamento ao laboratório e outro armazenado para reserva técnica.

### 1.5.2 Procedimentos analíticos

#### 1.5.2.1 Análises (laboratoriais) de litogeoquímica (geoquímica elementar)

Nos resultados de geoquímica elementar, os valores analíticos da concentraçã dos elementos maiores (> 1%) , menores (>1%<0,1%) e de perda ao fogo (C, H<sub>2</sub>O, etc.) são apresentados em termos equivalentes dos pesos dos seus óxidos mínimos e dos elementos traços (<0,1%) são apresentados em ppm (partes por milhão) (Wernick 2004).

Na análise de geoquímica elementar, o processo analítico é feito em duas etapas, uma química, de ataque para a abertura da amostra (dissolução dos silicatos), e uma física de leitura das concentrações elementares. O ataque para abertura é feito utilizando mistura de metaborato e tetraborato de lítio ( $\text{LiBO}_2$  e  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), fusão em alta temperatura, seguido da adição de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$  5%), até completar a dissolução dos silicatos.

A leitura é feita utilizando duas técnicas instrumentais (ou métodos analíticos), de acordo com os elementos analisados. Para os elementos maiores e menores e alguns traços (Ba, Be, Sc, Sr, V, Y, Zr) é utilizado o ICP-AES (*Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy*) e para o restante dos elementos traços é utilizado ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*).

De forma resumida, o ICP é equipamento com fonte de plasma de argônio (Ar), onde são atingidas temperaturas de 6.000 a 10.000 K (temperatura da superfície do Sol), que provoca a ionização da amostra dissolvida. O AES, também conhecido como OES (*Optical Emission Spectrometry*), é equipamento de leitura multielementar, que mede maior parte dos elementos da tabela periódica com boa precisão, que inclui elementos com baixos limites de detecção.

Os átomos ionizados (e excitados) no ICP têm as suas radiações características detectadas no AES, por uma gama de fotomultiplicadores, onde são feitos os registros dos seus comprimentos de onda característicos (dentro da faixa de 125 a 950 nm). A leitura é feita utilizando padrões (ou linhas de calibração), de forma que as intensidades de detecção são convertidas em concentrações elementares.

O ICP-MS, apontado como método mais efetivo para medição de razões isotópicas, é utilizado para analisar uma extensa gama de elementos (metais e diversos não-metais), registrando concentrações muito baixas, da ordem de ppb (em  $10^{15}$ ). No MS os átomos ionizados no ICP são direcionados, por um sistema de bomba de vácuo, sentido a um separador de massas, utilizando um campo magnético. Os átomos ionizados, de acordo com as suas razões massas/carga ( $m/z$ ), são separados e em seguida registrados em coletores dos íons desviados, que geram sinais elétricos, utilizados para realização das leituras.

### 1.5.2.2 Análises (laboratoriais) de geoquímica isotópica

Nas análises de geoquímica isotópica são feitas medições das razões  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e dos elementos Sm e Nd, através do método analítico denominado diluição isotópica. Esta denominação se deve a adição de traçador (ou *spike*), para a medição das razões isotópicas dos elementos Sm e Nd. Para a medição das razões isotópicas de  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  não é utilizado traçador. A razão  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  foi obtida com a multiplicação do teor de Rb, obtido pela geoquímica elementar.

De forma resumida, o processo analítico é feito em três etapas, duas químicas, de ataque para abertura da amostra (dissolução dos silicatos) e de separação elementar, e uma física, de leitura das razões isotópicas dos elementos de interesse separados.

O ataque, após as pesagens das amostras e dos traçadores, é feito utilizando cápsulas de Savillex® (teflon), onde estes são misturados, seguido da adição dos reagentes. Os traçadores são de  $^{146}\text{Nd}/^{150}\text{Nd}$  e  $^{147}\text{Sm}/^{149}\text{Sm}$ . Os reagentes são ácidos nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e clorídrico ( $\text{HCl}$ ), concentrados e destilados.

A mistura de amostra+traçadores+reagentes é levada ao aquecimento a  $60^\circ\text{C}$ , em estufa, durante período de cinco dias seguidos (relativamente demorado), seguido de novas adições de  $\text{HNO}_3$  e  $\text{HCl}$  e posterior secagem.

Para separação elementar, são utilizadas (duas) colunas de troca catiônica, denominadas primária e secundária. O material obtido, após dissolução dos silicatos, é adicionado, na coluna primária, composta por resina AG 50W-X8(\*) e a secundária composta por resina LN(\*), onde os cátions são adicionados às colunas diluídos em água e ficando retidos na resina.

Na coluna primária, através da adição controlada de  $\text{HCl}$  e diluição controlada, é feita filtração e extração dos elementos (cátions) de interesse, no caso os ETR e o Sr, com o descarte dos demais elementos. Na coluna secundária é feita a extração do Nd e do Sm, com descarte dos demais ETR. Os elementos extraídos das colunas (Sr, Nd e Sm) são secos, pesados e encaminhados para leitura das razões isotópicas TIMS.

Na etapa física, a leitura das razões isotópicas é feita separadamente para cada um dos elementos extraídos. A leitura é feita com TI-MS (*Thermal Ionization Mass Spectrometry*), em espectrômetro de massa de multicoletores (Finnigan TRITON<sup>®</sup>). Esta é feita depositando o elemento dissolvido em HNO<sub>3</sub> e H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> em filamento metálico, de rênio (Re) para o Nd e de tântalo (Ta), de alto ponto de fusão (acima de 2.000 K), onde o elemento é ionizado, para leitura no MS.

### 1.5.3 – Tratamento e análise dos dados litogeoquímicos

Os trabalhos de análise e tratamento dos resultados de geoquímica elementar dos metabasito foi feito com auxílio de planilhas EXCEL e do aplicativo (*software*) *Geochemical Data Toolkit (GCDkit)* (Janousek *et al* 2006). Inicialmente foi feita classificação dos mesmos, com relação às grandes séries de cristalização, ~~entre~~ alcalinas e subalcalinas de afinidade toleítica ou calcioalcalina, e separação quanto ao teor de titânio (Ti).

Esta classificação é feita utilizando elementos maiores, corroborado por elementos menores e traços. São utilizados os diagramas: SiO<sub>2</sub> *versus* Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O (TAS – Total Álcalis *versus* Sílica), de Cox *et al* (1979); Nb/Y *versus* Zr/Ti, de de Winchester e Floyd (1977); AFM (A=Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O; F=FeOt; M=MgO), de Irvine e Baragar (1971); e SiO<sub>2</sub> *versus* FeOt/MgO, de Myashiro (1974).

Complementar a esta classificação, foi feito cálculo da composição mineral normativa (norma CIPW), com vistas a verificar a existência ou não de nefelina normativa, uma vez que boa parte das amostras plotam muito próximas aos limites dos campos alcalino e subalcalino.

Para separação das amostras em de baixo titânio (baixo-Ti) e de alto titânio (alto-Ti), utilizado em análises de rochas de composição básica, usou como limite valores entre 2,0%-2,2% TiO<sub>2</sub>.

Posterior a esta classificação inicial, foram feitas tentativas de discriminação de ambientes tectônicos e separação de grupos geoquímicos, com base nas assinaturas de elementos menores e traços, notadamente dos ETR, normalizados pelo condrito.

Interessante ressaltar que os elementos menores e traços, não formadores de minerais principais formadores de rocha, ocorrem substituindo os elementos maiores nas estruturas cristalinas dos minerais. Ao mesmo tempo, comparados aos elementos maiores, apresentam espectros de variação muito mais amplos, de acordo com os tipos de ambiente tectônicos, o que os tornam passíveis de serem utilizados como traçadores de assinaturas geoquímicas.

Estes elementos são separados em compatíveis e incompatíveis, com relação ao líquido magmático e aos sólidos cristalinos (minerais), definidos com relação aos processos de extração mantélica, cristalização magmática, fusão parcial, etc., também separados em, mais ou menos incompatíveis. Os elementos incompatíveis também são separados em de comportamento, móveis e imóveis. Os mais móveis são referidos como LILE (*Large Ion Lithophile Element*) e os imóveis como HFSE (*High Field Strength Element*).

Os ETR fazem parte do HFSE, ao mesmo tempo são separados em leves e pesados, de comportamentos, mais ou menos incompatíveis.

Os diagramas tectônicos de variação são baseados nestes conceitos, de comportamento geoquímico, mas por sua vez são empíricos, desenvolvidos com rochas afaníticas vulcânicas (de natureza isoquímica) e de ambientes contemporâneos conhecidos. Podem assim serem específicos para determinados tipos de ambientes e inadequados ou ambíguos para outros, mas principalmente os seus resultados não são definitivos. Desta forma, os resultados obtidos devem de ser considerados norteadores e não conclusivos das análises, principalmente se considerarmos, a natureza das nossas amostras, antigas (pré-cambrianas), plutônicas (não vulcânicas, faneríticas), que foram sujeitas aos mais diversos processos de transformação, como metamorfismo e migmatização.

São utilizados os diagramas para discriminação de ambientes tectônicos, desenvolvidos para rochas de composição básica e básica-intermediária (basáltica-andesítica):  $Zr-3*Y-Ti/100$ , de Pearce e Cann (1973);  $Zr/4-2Nb-Y$ , de Meschede (1986);  $Ti/Y-Zr/Y$ , de Pearce e Gale (1977); binário  $Zr-Zr/Y$  de Pearce e Norry (1979);  $Zr-3*Y-Sr/2$ , de Pearce e Cann (1973); e  $Mn-TiO_2-P_2O_5$ , de Mullen (1983).

Para os metabasitos estudados, os diagramas de padrões de distribuição de ETR principalmente, normalizados pelo condrito, e determinados de elementos incompatíveis, normalizados manto primitivo e pelo MORB, se mostraram bons para definição de assinaturas geoquímicas, utilizados para separação de grupos geoquímicos.

Os diagramas binários, tipo Harker, de MgO *versus* elementos maiores, menores e traços, são utilizados corroborando as separações feitas.

Também é apresentado uma série de razões elementares, algumas normalizadas pelo condrito, como [La/Yb]<sub>N</sub>, que podem ajudar nestas separações.

A classificação e agrupamentos feitos são corroborados pela geoquímica isotópica, que ajudam a caracterizar as diversidades de fontes e de processos magmáticos, que parecem corroborar a discriminação de ambiente tectônico feita.

#### 1.5.4 Tratamento dos dados das análises isotópicas Sm/Nd e Sr/Sr

Os elementos Rb, Sr e Sm, Nd, cujos isótopos são objetos da geoquímica isotópica, são todos elementos incompatíveis moveis, de comportamentos geoquímicos distintos específicos, utilizados para estudos petrogenéticos e geocronológicos.

O Rb e o Sr são mestais alcalinos e alcalinos terrosos, respectivamente, (LILE), de comportamentos geoquímicos distintos entre si, se fracionam, ao longo da maior parte dos processos magmáticos, metamórficos, hidrotermais, intempericos, etc. e tomam diferentes trajetórias e se alojam em diferentes sítios cristalinos. O Rb mais incompatível, normalmente substitui o K, nos minerais formadores de rocha, notadamente K-feldspatos, biotita, moscovita, dentre outros. O Sr menos incompatível, substitui o Ca e Na e, em menor quantidade, K, em minerais como plagioclásio, apatita. Como consequência, isótopo pai  $^{87}\text{Rb}$  tende a ser mais enriquecido na crosta, comparativamente ao isótopo filho  $^{87}\text{Sr}$  que tende a ser mais enriquecido no manto.

O Sm e o Nd, são ETR (HFSE), com graus de incompatibilidade iguais ou muito semelhantes, tomam as mesmas trajetórias, se alojando nos mesmos sítios cristalinos, ao longo dos processos magmáticos. Estes somente se fracionam, de forma mais significativa, nos processos de extração mantélica (de diferenciação manto-crosta) e são normalmente presentes nos minerais acessórios, notadamente granadas, monazita e zircão. Como consequência desse comportamento, o elemento do isótopo pai  $^{147}\text{Sm}$  é levemente menos incompatível e se torna mais enriquecido no manto e o elemento do isótopo filho  $^{143}\text{Nd}$ , levemente mais incompatível e se torna mais enriquecido na crosta.

Conforme a caracterização acima, a evolução dos isótopos radiogênicos dos sistemas Rb-Sr e Sm-Nd, são opostas e os comportamentos geoquímicos dos seus elementos são variados, utilizados para estudo de assinaturas de fontes, de processos magmáticos e traçadores petrogenéticos, notadamente do Nd.

Importante ressaltar que, em função das variações das concentrações isotópicas, dos isótopos de interesse, serem muito baixas, são feitas medições das razões isotópicas dos isótopos radioativo e radiogênico, em relação a um isótopo estável, adotado como referência.

São assim feitas medidas analíticas das razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . As razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  são menores e as  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  são maiores, nas rochas do manto, ou de afinidades próximas a este, comparativamente às rochas formadas na crosta.

A partir destas medidas analíticas, são calculados de idade modelo  $T_{\text{DMNd}}$  e de parâmetros petrogenéticos  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  e  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  e fator de fracionamento ( $f^{\text{Sm-Nd}}$ ), dentre outros valores isotópicos. São todos cálculos de valores isotópicos conceituais, que tomam como base modelos de reservatórios de fontes magmáticas, do manto superior empobrecido (*Depleted Mantle – DM*), e um hipotético condritico uniforme (*Chondritic Uniform Reservoir – CHUR*), representando a nebulosa solar primordial, anterior às modificações decorrentes dos processos magmáticos e metamórficos terrestres (Fig 3).

Figura 3 – Equações utilizadas Tratamento dos dados das análises isotópicas Sm-Nd e Rb-Sr.

(a) $\epsilon_{\text{Sr}}(t) = \left[ \frac{\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{amostra}(t)} - 1}{\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_{\text{CHUR}(t)}} \right] \times 10\,000$	(b) $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = \left[ \frac{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{sample}(t)} - 1}{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}(t)}} \right] \times 10\,000$
(c) $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} = \left[ \frac{\left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{amostra}(t)} - \left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}}}{\left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}}} \right]$	(d) $T_{\text{DM}} = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln \left[ 1 + \frac{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{sample}} - \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{DM}}}{\left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{sample}} - \left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{DM}}} \right]$ $\lambda_{^{147}\text{Sm}} = 6,54 \times 10^{-12} \text{ a}^{-1} \quad T_{1/2}^{^{147}\text{Sm}} = 106 \text{ Ga}$
(e) $T_{\text{CHUR}} = \left(\frac{1}{\lambda}\right) \ln \left[ 1 + \frac{\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{sample}} - \left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}}}{\left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{sample}} - \left(\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}}} \right].$ $\lambda_{^{87}\text{Rb}} = 1,42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1} \quad T_{1/2}^{^{87}\text{Rb}} = 48,8 \text{ Ga}$	

(a) parâmetro petrogenético de estrôncio ( $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ ); (b) parâmetro petrogenético ( $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ); (c) fator de fracionamento Sm-Nd - ( $f^{\text{Sm-Nd}}$ ); (d) idade modelo  $T_{\text{DMNd}}$ ; (e) idade modelo  $T_{\text{CHUR}}$ .

Fonte: Dickin (1995).

A idade modelo  $T_{\text{DMNd}}$  indica idade máxima de extração mantélica ou evento de extração mantélica.

Os parâmetros petrogenéticos,  $\epsilon_{\text{Nd}}$  e  $\epsilon_{\text{Sr}}$ , indicariam tipos de fontes, se mantélicas, crustais e mistas.

O fator de fracionamento ( $f^{\text{Sm-Nd}}$ ) é utilizado para indicar fonte magmática, assim como o  $\epsilon_{\text{Nd}}$ , e o grau de fracionamento, quando da sua extração mantélica, importante para avaliação do significado do resultado analítico.

Os valores de  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  e  $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$  ou  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$ , calculados para idade de cristalização ou inicial ( $t$ ), são utilizados para indicarem tipos de fontes.

Para  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  positivos fonte juvenil ou mantélica, do tipo MORB, negativos fonte crustal e próximos a zero, levemente negativos e positivos, fontes mistas (de misturas mantélicas e crustal).

Para  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{(t)}$  em torno de 0,702 indicam como fonte o manto superior (tipo MORB), acima de 0,704 fonte ilhas oceânicas (tipo OIB) e acima de 0,711 fontes continentais.

O fator de fracionamento ( $f^{\text{Sm-Nd}}$ ), normalmente negativos, quando próximos a zero indicam baixo grau de fracionamento, que pode limitar e restringir a utilização das demais razões obtidas, e quanto positivos indicaria tratar-se de material residual, como dunito, ou cumulado.

Diagramas elaborados em função desses valores,  $T_{\text{DMNd}}$  versus  $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ , representa a curva modelo de evolução do manto empobrecido ( $_{\text{DM}}$ ), e  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  versus  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ , representa posicionamento em relação ao alinhamento do manto (*mantle array*) e aos diversos modelos de reservatórios.

## 1.6 Geocronologia U-Pb em zircão (LA-ICP-MS)

### 1.6.1 Preparação de amostras para datação U-Pb

#### 1.6.1.1 - Concentração mineral e separação de grãos de zircão

A preparação de amostra para datação geocronológica U-Pb em zircão é feita através da sua cominuição, para liberação de grãos, e concentração de minerais de interesse, de quantidade inicial de material relativamente grande. A liberação é feita através de cominuição, através de britagem e moagem, seguida de peneiramento, e de concentração mineral, através de exploração de propriedades físicas dos minerais, de densidades e magnéticas. A quantidade inicial de material é da ordem de 10 Kg ou mais de rocha e a final, invariavelmente inferior a 5 gramas. Interessante ressaltar que, além do zircão, como subprodutos, são gerados concentrados de minerais diversos, de magnetita, ilmenita, hematita, granada, monazita, titanita, anfibólios, piroxênios, apatita, dentre outros.

A existência de grãos de zircão (em lâmina delgada) e os teores de Zr (que acima de 200 ppm) são garantias para uma boa concentração. Quando possível, estes aspectos devem ser observados, com vista a necessidade de maior ou menor, quantidade de amostra, rigor, assim de formas alternativas de preparação. Os teores de Zr (HFSE), nas rochas félsicas (de composições ácida e intermediária), são da ordem de centenas de ppm, e, nas rochas máficas (básicas), tendem a ser bem menores, da ordem de uma-duas centenas de ppm, ou mesmo inferiores, que limitam a quantidade de zircão na amostra.

A amostra é britada e moída, utilizando britador de mandíbula, Renard Britadores, Mod. BM.85.120- 1990) e moinho de discos, Bico Pulverizer, Burbank, California, type UA.

A amostra moída é peneirada, em telas descartáveis, com separação de frações maiores e menores que 100# (0,15 mm ou 150  $\mu\text{m}$ ), com o objetivo de minimizar a interferência entre grãos de dimensões muito dispare, e promover uma melhor concentração ao longo das etapas de separação. Interessante observar que, as dimensões dos grãos de zircão, normalmente concentrados, são de em torno 150-300  $\mu\text{m}$  e os maiores da ordem de 500  $\mu\text{m}$ , contudo estas dimensões variam muito, de acordo com o tipo de rocha. Ao final do processo, os grãos de zircão separados, em cada uma das frações são misturados.

A primeira etapa de concentração, da amostra moída e peneirada, da ordem de alguns quilogramas, é feita utilizando propriedades hidrodinâmicas, utilizando mesa separadora ou bateia, onde são exploradas diferenças de densidade dos grãos minerais. Na mesa separadora, utilizando pipeta para coletar concentrado sobre a mesa, são normalmente separados quantidades de concentrados, ricos em grãos de zircão, inferiores a 100-50g.

A etapa seguinte à concentração hidrodinâmica, é com líquido denso, onde são separados minerais mais densos, dentre os quais o zircão ( $d$  4,6-4,7), dos minerais mais leves, como quartzo e feldspatos ( $d \sim 2,7$ ), restantes, não separados na concentração hidrodinâmica. Os líquidos densos utilizados são utilizados politungstato de sódio ( $3\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 9\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) ( $d=2,8 \text{ g/cm}^3$ ), bromofórmio ( $\text{CHBr}_3$ ) ( $d = 2,89 \text{ g/cm}^3$ ) e iodeto de metileno ( $\text{CH}_2\text{I}_2$ ) ( $d = 3,32 \text{ g/cm}^3$ ), cada um com vantagens e desvantagens específicas.

Posteriormente, é feita separação dos grãos minerais magnéticos, utilizando imã de mão, e paramagnéticos, utilizando separador magnético Frantz®, (Magnetic Barrier Laboratory), Modelo LB-1, fabricado por S.G.FRANTZ CO.

Neste equipamento, em uma primeira etapa, referida como Frantz inicial (Fi), de acordo o valor da amperagem (A), é separado diferentes minerais, como as ilmenitas-hematita, granada-hornblenda, monazita e titanita, restando ao final minerais referidos como não atraíveis, como zircão, apatita, piratas. Importante ressaltar que, ao longo destas separações, são separados grãos de minerais, não necessariamente “atraíveis”, com inclusões de minerais magnéticos. Em uma segunda etapa, referida como Frantz final (Ff), que não foi feita, através de variação no grau de inclinação da régua, por onde passam os grãos minerais, e variações na amperagem (A), podem ser separados os zircões, mais ou menos diamagnéticos.

A ordem de realização das etapas de separação pode ser variada, assim como procedimentos alternativos de separação também. Por exemplo, amostras muito ricas em

minerais opacos (normalmente ferromagnéticos e paramagnéticos), podem ser separadas primeiramente no imã de mão e separador Frantz® ao líquido denso, com vistas a redução do volume da amostra. As amostras muito ricas em apatita deve de ser utilizado iodeto de metileno, etc., que foi feita para algumas amostras do presente trabalho, no Laboratório do CETEM.

#### 1.6.1.2 – Catação dos grãos de zircão e montagem de seção em resina

Os grãos zircão para datação são montados em resina epóxi, onde são colocados em média quatro amostras, em molde com formato anelar, de 2,5cm de diâmetro, padrão do Laser Ablation (LA). Para cada amostra, utilizando lupa binocular Zeiss, Modelo Discovery V8, foram catados entre 150-200 grãos (ou o máximo que for possível), buscando representar toda variedade de morfologias, tamanhos e cores. (Em uma montagem ideal, os grãos “jogados” aleatoriamente, com vistas a maior representatividade e isenção, porém além de zircão, os concentrados obtidos são sortidos com minerais de apatita, titanita, monazita, dentre outros).

A montagem dos grãos de zircão é feita com a incrustação dos mesmos em resina “epóxi” em uma forma anelar, de 2,5cm de diâmetro, padrão do Laser Ablation (LA), onde são colocados em média quatro amostras.

Os grãos catados são montados de forma organizada, preferencialmente horizontalizados e enfileirados, colados em fita dupla face colada em placa de vidro, para posterior incrustação de resina. Após a incrustação, a superfície ou seção do molde com os grãos é desbastada até revelar as partes internas dos grãos e em seguida polida.

A seção polida é fotografada sob luz refletida e transmitida, por meio de microscópio com câmera acoplada, e metalizada (com filme de ouro) para imageamento (scanner) com catodoluminescência (CL) e elétrons retroespalhados (*backs cattered electrons* – BSE), utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV).

As fotografias e imagens servem de mapas guias para realização das medições, sendo utilizadas de múltiplas formas, antes e depois da realização destas. As mesmas revelam morfologias internas, como fraturas, zoneamentos, fases de crescimento, processos de metamictização, etc. Todas feições importantes, para seleção dos grãos e definição de locais (pontos) serem feitas as medidas, e posteriormente para análises e avaliação dos resultados obtidos.

#### 1.6.2 – Procedimentos analíticos e de tratamento dos dados de geocronologia U-Pb em zircão (LA-ICP-MS)

As datações U-Pb em zircão (LA-ICP-MS) foram feitas no Laboratório de Geocronologia Isotópica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (EM-UFOP), utilizando equipamento *Thermo Scientific Element 2 sector field* (SF), com ICP-MS acoplado a sistema de laser CETAC LSX-213 G2+. Foram datadas sete amostras de rochas de composição básica (três do Complexo Juiz de Fora e quatro do Complexo Mantiqueira), de cada uma feitas entre 70 a 130 medidas, à exceção de pequeno número de grãos com duas medidas, maior parte uma medida apenas por grão.

Os dados obtidos das medições, apresentados em planilha excel (versão 2007), utilizando o *software* Glitter (Van Achterbergh *et al* 2001), foram reduzidos por técnicos do Laboratório de Geocronologia. Na redução é feita depuração dos dados, com a inspeção e avaliação de cada resultado. São feitas análises e correções, de “problemas de fracionamento, de erros nas contagens das massas”, aplicadas a brancos analíticos (Hg e  $^{204}\text{Pb}$  comum), da reprodutibilidade dos padrões utilizados, descritos acima e também eliminação de erros individuais na leitura das razões  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ .

O LA-ICP-MS (*Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*) é uma tecnologia analítica de alta precisão, utilizado para análises pontuais, diretamente sobre amostra em estado sólido, onde são feitas medidas de moléculas, elementos químicos e razões isotópicas. O mesmo é formado por uma série de componentes conjugados, que envolve alta complexidade e sensibilidade, além de um grande número de parâmetros e variáveis.

No LA é extraída fração de amostra do grão mineral, através de bombardeamento pontual e volatilização ou pulverização, com um feixe de *laser*. Nessa extração, são controladas uma série de parâmetros variáveis, como diâmetro do feixe de *laser* (da ordem de 30  $\mu$ m a 20  $\mu$ m), profundidade de perfuração, tempo de duração do bombardeamento, controle dos gases argônio e hélio, ajustes de lente óticas, etc.. O material extraído é direcionado para o ICP, onde é (maior parte) ionizado por um plasma de argônio e direcionado, de forma acelerada, por meio de uma bomba de vácuo, no sentido do MS.

No MS, o material ionizado passa, de forma acelerada, por um separador magnético, sentido a sistema de coletores (contadores) de íons. Este separador é composto por um eletro ímã curvo, que provoca a separação das trajetórias de diferentes tipos de íons, de acordo com as suas razões massa/carga, que são lidas nos coletores.

Para a aferição das medições, são utilizadas amostras padrões certificadas, de grãos de zircão, com idades e razões isotópicas  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  bem conhecidas, as quais se busca reproduzir, com uma tolerância máxima de 5% de variação. Os padrões utilizados foram dos zircões GJ-1, Plesovice e “BB”, sendo realizado uma medição destes a cada sequência de seis medidas da amostra datada.

O mesmos possuem, o GJ-1 idade de  $609 \pm 0,4$  Ma e razões  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  de 0,06014 e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  de 0,09891 (Jackson *et al* 2004), o Plesovice idade de  $337 \pm 0,37$  Ma (Sláma *et al* 2008) e o BB idade de  $565,1 \pm 1,8$  Ma (Santos *et al* 2017).

### 1.6.3 Interpretação dos dados U-Pb

Os dados reduzidos são inicialmente analisados e avaliados um a um (medida por medida), com vistas ao aproveitamento ou não da medida para cálculo de idade. São classificados quanto aos limites analíticos admitidos, para chumbo comum ( $f\text{-}^{206}\text{Pb}$ ), de 0,5%, de discordâncias entre idades  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  e  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , de 5%.

É utilizado o *software* IsoplotEx4 (Ludwig, 2003) para geração de diagramas concórdia, sendo apresentados para cada amostra, diagrama com todas as medidas realizadas,

referidos como “*all zircons*”, e um ou mais diagramas, com medidas dentro dos limites admitidos. Os diagramas utilizados, para cálculo das idades apresentadas, são elaborados com as melhores idades obtidas, portanto suportado por interpretações das mesmas, e com o objetivo de obter-se valores mais precisos ou robustos possíveis.

As idades apresentadas são de intercepto superior ou concordantes, maior parte corroboradas por idades de discórdia. De algumas amostras foram calculados mais de uma concentração de valores de idades de intercepto superior, levando a interpretações destas como de cristalização, de metamorfismo e de herança.

Os valores de razões Th/U são predominantemente (muito) altos, bem acima dos compatíveis para interpretar as idades de metamorfismo feitas, chegando a serem creditadas à uma eventual natureza metamórfica de alto grau. As interpretações de idades metamórficas são assim suportadas mais pelo contexto tectônico e por muito poucas medidas de razão Th/U baixas.

## 2 GEOLOGIA REGIONAL

### 2.1 Introdução

Os metabasitos, objetos do presente estudo, ocorrem no embasamento do Terreno Ocidental da Faixa Móvel Ribeira (Heibron 1995 e Heilbron *et al* 2000) (Fig 41a, b, c). Este terreno é reconhecido como segmento retrabalhado, pelo Evento Brasileiro, do Paleocontinente do São Francisco (Heilbron *et al* 2000 e Heilbron *et al* 2010), o primeiro grande domínio continental nessa porção do planeta (Fig 5a).

O embasamento do Terreno Ocidental é formado pelas rochas ortoderivadas dos complexos Mantiqueira (Machado-Filho *et al* (1983, Brandalise 1991, Pinto 1991, Viana 1991, Figueiredo & Teixeira 1996, Duarte 1998, Nogueira 1999) e Juiz de Fora (Machado Filho *et al* 1983, Heilbron *et al* 1991, Heilbron 1993 e 1995, Figueiredo & Teixeira 1996, Duarte *et al* 1997, Heilbron *et al* 1998, Duarte 1998). Estas unidades ficam situadas em domínios estruturais distintos, o Andrelândia e o Juiz de Fora, respectivamente (Fig 5b, c), e têm em comum rochas de cobertura, reunidas no Grupo Andrelândia (Trouw *et al* 1980, 1981, 1983, 1986, Heilbron 1989, 1990, Paciullo *et al* 1993, Ribeiro *et al* 1995, Paciullo 1997, Paciullo *et al* 2000, Trouw *et al* 2000).

O Paleocontinente do São Francisco (Heibron *et al* 2010) se formou no Riaciano-Orosiriano, com o desenvolvimento e acresção ao Núcleo Arqueano de sistemas de arcos acrecionários (Noce *et al* 2007, Avila *et al* 2010, Teixeira *et al* 2015) representados no Terreno Ocidental e no Cinturão Mineiro, situado no domínio Cratônico (Teixeira *et al* 1998, 2000) (Fig 5b, 8a, b)). No Terreno Ocidental os registros desses sistemas são restritos às rochas ortoderivadas de arcos magmáticos e, em menor quantidade, colisionais e pós-colisionais, das unidades complexos Mantiqueira e Juiz de Fora, enquanto que no Cinturão Mineiro estes também incluem rochas coberturas de arcos (bacias de retro-arco), algumas do tipo greenstone (Barbosa 2015).

Compondo este cenário, na região do Quadrilátero Ferrífero e adjacências, as rochas do Supergrupo Minas (Alkmin e Noce 2006), representam sequências de cobertura de

margem passiva que teriam se desenvolvido no Sideriano, em torno do Núcleo Arqueano, que seriam precursoras desses sistemas de arcos (Barbosa 2015). Também nessa região, relacionadas à fase colisional e pós-colisional desses arcos, as rochas da Formação Sabará e do Grupo Itacolomi, respectivamente, representam coberturas de fases orogênicas e pós-orogênicas (Alkmin e Noce 2006, Heilbron *et al* 2010, Alkmin *et al* 2014).

Do final do Riáciano, ao longo do Estateriano e de todo o Mesoproterozoico, até o início do Neoproterozoico, este segmento continental, formado por terrenos arqueanos e paleoproterozoicos, teria se mantido como plataforma tectônica estável ou íntegra (Tupinambá *et al* 2007, Chemale Jr *et al* 2012, Pedrosa Soares e Alkmin 2011). Neste longo intervalo de estabilidade relativa, ocorreram nesta plataforma rifteamentos, magmatismos máficos e félsicos e o desenvolvimento de coberturas sedimentares ensiálicas, registrados no domínio cratônico e em porções mais externas das suas faixas móveis, inclusive no Terreno Ocidental, embora neste de forma restrita. Estas ocorrências são reunidas em eventos tectônicos, alguns muito bem caracterizados, apontados como de tentativas de fragmentação dessa plataforma continental, que veio a ocorrer no Neoproterozoico, iniciado no Toniano, que teria se estendido até o Criogeniano, marcando o início do Evento ou ciclo tectônico Brasileiro.

Alguns destes eventos, de tentativa de fragmentação, possuem denominações próprias, como a Trafogênese Estateriana (Brito Neves *et al* 1995), e outros são referidos associados ao desenvolvimento de sistemas riftes, como Aulacógeno Paramirim (Pedrosa Soares *et al* 2001), no Calaminiano, e de reativação de sistemas riftes estaterianos e desenvolvimento de bacias do tipo rift-sag, no Esteniano.

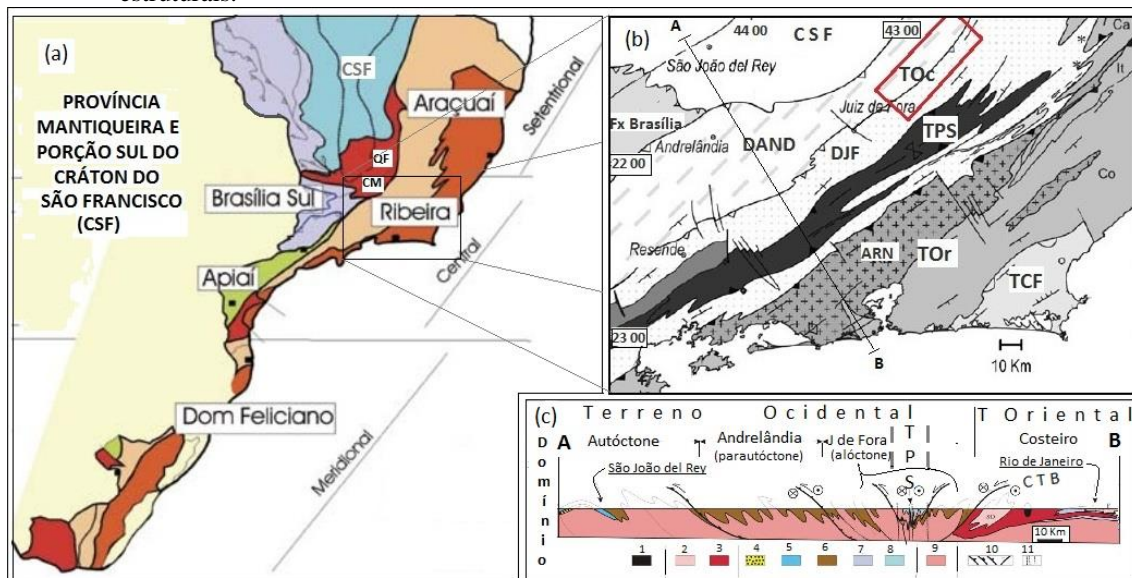
São relacionados a estes eventos, coberturas reunidas nos supergrupos Espinhaço e São João del Rei, dentre outras. Também são relacionados magmatismos intracontinental anorogênicos félsicos alcalinos, subvulcânicos, fissurais, enxame de diques, extrusivos bimodais, félsicos, máficos, bimodais, máficos-ultramáficos, com denominações diversas.

Nos itens seguintes, são feitas apresentações de unidades e eventos de magmatismos máficos, do Terreno Ocidental da Faixa Ribeira e do Cráton do São Francisco, com o objetivo de contextualizar as possíveis origens dos metabasitos, em meio às rochas dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora.

## 2.2 Terreno Ocidental – domínios estruturais Andrelândia e Juiz de Fora

O Terreno Ocidental da Faixa Ribeira é compartimentado nos domínios estruturais Andrelândia e Juiz de Fora (Heilbron 1995, Heilbron *et al* 2000, Heilbron *et al* 2003), que ocorrem dispostos lado a lado, tectonicamente justapostos entre si (Fig 4b,c, 6 e 7). Estes terrenos são separados pelo sistema de zonas de cisalhamento de Abre Campo (Teixeira da Costa 2010), a princípio brasilianas, definida na Faixa Araçuaí, mais ao Norte (Fig 7a).

Figura 4 – Contextualização geológica utilizada para a Área de Estudo, dentro da Plataforma Sul-americana, compartimentada em províncias estruturais, e dentro da Faixa Ribeira, compartimentada em terrenos tectônicos-estratigráficos e destes terrenos em em domínios estruturais.



(a) - Subdivisão da Província (Sistema Orogenético) Mantiqueira em segmentos: Setentrional, composto pela Faixa (Orógeno) Araçuaí; Central, composto pelas faixas Ribeira e Apiaí, limitado a W pela Faixa (Orógeno) Brasília; e Meridional, composto pelas faixas (orógenos) Dom Feliciano e São Gabriel, e o domínio do CSF; (b) mapa tectônico integrado da região Sudeste do Brasil, com divisão de terrenos tectônicos estratigráficos da Faixa Ribeira, com traço de Seção Geológica e polígono apontando área de estudo; (c) Seção Geológica, transversal à estruturação tectônica da Faixa Ribeira, com domínios tectônicos definidos para o TOc.

Nota: Abreviaturas: CSF - Cráton do São Francisco (CSF); TOc – Terreno Ocidental; TOR – Terreno Oriental; TPS – Terreno Paraíba do Sul; TCF – Terreno Cabo Frio; ARN – Arco Rio Negro; DAND – Domínio Andrelândia; DJF – Domínio Juiz de Fora; CTB – *Central Tectonic Boundary*.

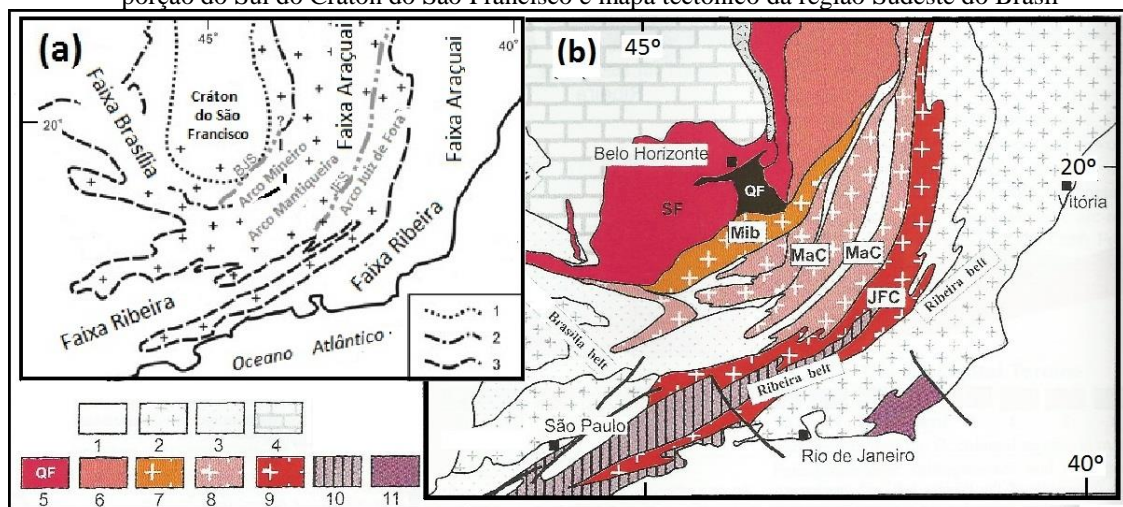
Legenda – 1, rochas alcalinas cretáceas a terciárias; 2 granitoides tardi-tectônicos; 3, Arco Magmático Rio Negro; 4, Bacia São João del Rei; 5, Bacia Carandaí; 6, Bacia Andrelândia; 7, Bacia Itava; 8, Complexo Paraíba do Sul; 9, complexos do embasamento (I – Barbacena (redefinido, maior parte, como unidades de coberturas do Terreno Cinturão Mineiro); II – Mantiqueira; III – Juiz de Fora; IV – Quirino; V – Região dos Lagos); 10, principais contatos tectônicos; 11, zonas de cisalhamentos dúcteis e rúpteis tardias. Fonte: Heilbron *et al* (2003).

Fonte: Heilbron *et al* (2010).

Estes dois domínios diferem entre si, pelas suas unidades de embasamento e pelos seus posicionamentos na Faixa Móvel, em relação ao domínio cratônico. Destas diferenças decorrem as suas diferenças de estilo tectônico-estrutural, de intensidade de retrabalhamento e de metamorfismo. Não obstante a demais complexidades, que envolvem a compartimentação da Faixa Ribeira, estes domínios podem ser apontados como equivalentes aos domínios externo e interno ou núcleo cristalino.

O Domínio Andrelândia, mais externo, correspondente à faixa de dobramentos, seria de natureza para-autóctone. O mesmo ocorre estruturado em médio e baixo ângulo, é caracterizado por predomínio de cinemática frontal, sentido ao domínio cratônico. Localmente ocorre estruturado em alto ângulo, notadamente sentido ao seu limite com o Domínio Juiz de Fora. Conforme Heilbron *et al* (2003), o mesmo é caracterizado por dobras apertadas a isoclinais e por uma foliação de baixo ângulo associada a uma lineação mineral e de estiramento *down dip*, que claramente indicam vergência no sentido do Cráton do São Francisco.

Figura 5 – Esboço tectônico da região Sudeste do Brasil, que descreve os limites propostos para a porção do Sul do Cráton do São Francisco e mapa tectônico da região Sudeste do Brasil



(a) Esboço tectônico da região sudeste do Brasil, que descreve os limites propostos para a porção do Sul do Cráton do São Francisco Propostos por (1) Almeida (1977) e (2) Alkmin *et al* (1993), e a extensão mínima do Paleocontinente do São Francisco (3), com a representação dos complexos do embasamento (representado por cruzes) e as suturas de Jeceaba-Bom Sucesso (JBS) Juiz de Fora (JFS); (b) mapa tectônico da região sudeste do Brasil, com destaque para a localização da sul Cráton do São Francisco, terrenos Cinturão Mineiro (Mib), região do Quadrilátero Ferrífero (QF) e unidades paleoproterozoicas da Faixa Ribeira, complexos Mantiqueira (MaC) e Juiz de Fora (JFC).

Legenda: (1) sedimentos fanerozoicos; (2) arcos magmáticos neoproterozoicos das faixas Ribeira e Araçuaí; (3) seqüências de margem passiva neoproterozoica; (4) Grupo Bambuí; (5) Terreno Apiaí; (6) terrenos Embu e Paraíba do Sul; (7) Terreno Cabo Frio; (8) seqüência mesoproterozoica do Espinhaço; (9) Complexo Juiz de Fora e seqüências neoproterozoicas; (10) Complexo Mantiqueira e rochas relacionadas; (11) Cinturão Mineiro; (12) Supergrupo Minas no Quadrilátero Ferrífero; (13) sucessões arqueanas do Sul do Cráton do São Francisco; (14) Terreno Guanhanês. Heilbron *et al* (2010).

Fonte: Heilbron *et al* (2010).

O Domínio Juiz de Fora, mais interno, corresponderia ao núcleo cristalino da faixa e seria de natureza essencialmente alóctone. O mesmo ocorre estruturado em médio e alto ângulo, é caracterizado pelo predomínio de cinemática direcional, de escape, que contorna o domínio cratônico, relativamente rica em texturas miloníticas, e as suas rochas metamorfasadas no fácies granulito. Este domínio é também caracterizado por intercalações (imbricamento) de rochas orto e paraderivadas, do Complexo Juiz de Fora e Grupo Andrelândia, separadas entre si por zonas de cisalhamentos, descritas como escamas tectônicas. Este domínio é referido como uma megazona de cisalhamento, de escala crustal. Conforme Heilbron *et al* (2003), o mesmo caracteriza-se por outro estilo estrutural, tipo *crustal duplex*, com diversas escamas de empurrão com mergulhos mais íngremes do que no Domínio Andrelândia. A foliação principal é íngreme, milonítica, com lineação de estiramento de atitude variada (desde *strike a down dip*), com predominância de medidas de alta obliquidade. Ocorrem regiões mais preservadas da deformação, nas quais recupera-se a foliação de baixo ângulo.

As unidades de rochas de ambos domínios são metamorfasadas em alto grau. No Domínio Andrelândia no fácies anfibolito superior, com predomínio de texturas nematoblásticas, mais ou menos migmatíticas, e localmente no fácies granulito (Heilbron 1993, 1995, Duarte 1998, Duarte & Valente 1999, Duarte *et al* 2001a 2001b, 2002, Nogueira 1999) . No Domínio Juiz de Fora no fácies granulito, rica em porções com porções anatéticas, e retometamorfisadas no anfibolito superior, com predomínio de texturas protomiloníticas e miloníticas, notadamente nos limites entre as ortoderivadas e as paraderivadas (Oliveira 1983,Barbosa & Grossi Sad 1983a,b,c, Grossi Sad & Barbosa 198, Figueiredo *et al* 1989, 1990, Campos Neto & Figueiredo 1990, Figueiredo e Campos-Neto 1993, Heilbron 1993, 1995, Duarte 1998, Duarte & Valente 1999, Duarte *et al* 2001a 2001b, 2002, Nogueira 1999).

Além do Terreno Ocidental, na Faixa Ribeira são individualizados os terrenos Paraíba do Sul, Oriental e Cabo Frio (Heilbron *et al* 2000) (Fig 4b, c, 6).

O Terreno Paraíba do Sul, interpretado como um *klippen* fica posicionado tectonicamente sobre o Terreno Ocidental, mais especificamente sobre o Domínio Juiz de Fora, próximo ao seu limite com o Terreno Ocidental (Fig 6). É composto por unidade de embasamento paleoproterozoica de rochas ortoderivadas e unidade de cobertura neoproterozoica paraderivada gnáissicas, anfibolíticas com lentes calcárias (Valladares 1996).

Sua rochas são metamorfisadas no fácies anfibolito superior, assim como o Domínio Andrelândia.

O Terreno Oriental, separado do Terreno Ocidental, pela zona de cisalhamento referida como CTB (*Central Tectonic Boundary*) (Almeida 1998) (Fig 4, 5c, 6), é separado em três domínios, composto por unidades de rochas de arco neoproterozoicos, de arcos magmáticas e sedimentares, metamorfisados em alto grau (Heilbron *et al* 2003).

Mais a leste, sem contato com o Terreno Ocidental, fica o Terreno Cabo Frio (Fig 4), apontado como possível fragmento do Paleocontinente do Congo, com unidade de embasamento também paleoproterozoica.

### 2.2.1 Unidades de embasamento e de cobertura do Terreno Ocidental

Os complexos Mantiqueira (Machado-Filho *et al* 1983, Figueiredo & Teixeira 1996, Duarte 1998, Nogueira 1999) e Juiz de Fora (Heilbron *et al* 1991, Heilbron 1993 e 1995, Figueiredo & Teixeira 1996, Duarte *et al* 1997, Heilbron *et al* 1998, Duarte 1998) são compostos por associações de rochas ortoderivadas diversas, gnáissicas e granulíticas félsicas, de composição intermediária e ácida, mais ou menos migmatíticas, com intercalações máficas de composições básica e básica-intermediária (basalto-andesítica). As máficas ocorrem de formas subordinadas, inserida na estruturação gnáissica, sendo originalmente descritas como partes desses complexos, e localmente constituindo litotipo principal ou único.

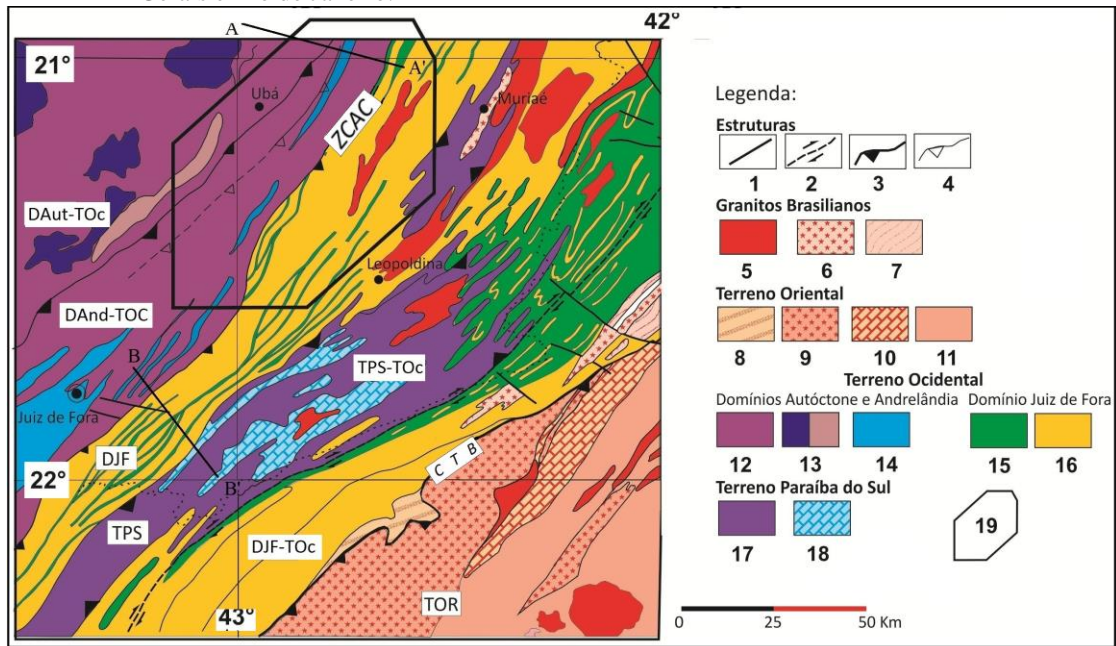
As distinções entre estas unidades são marcadas por variações de intensidades de metamorfismo e de migmatização, mineralogia, feições estruturais como bandamento gnáissico e grau de deformação, etc.. Ao mesmo tempo, são em boa parte classificadas de modo semelhantes, predominantemente subalcalinas. As félsicas são de afinidades calcioalcalinas, separadas em grupos de baixo-K a alto-K, até shoshoníticas. As máficas são maior parte de afinidades toleíticas e menor quantidade classificadas como alcalinas, com máficas calcioalcalinas (basalto-andesíticas).

As associações de rochas calcioalcalinas, corroboradas por dados analíticos, de elementos menores e traços, isotópicos e geocronológicos, somados ao contexto tectônico, são

atribuídas a ambientes tectônicos convergentes, de arcos magmáticos e, em menor quantidade, colisionais e pós-colisionais (Noce *et al* 2007, Heilbron *et al* 2010, Ávila *et al* 2010, Teixeira *et al* 2015). As rochas do Complexo Mantiqueira, produto de rejuvenescimento crustal, são relacionadas a arcos continentais, com registros de herança e de remanescentes de rochas arqueanas, relacionáveis aos complexos do tipo TTG, graníticos e migmatíticos, que teriam sido retrabalhadas no Paleoproterozoico. As rochas do Complexo Juiz de Fora, de natureza juvenil, são relacionadas a ambiente de arcos e ou platôs oceânicos (Heilbron *et al* 2010), sem evidências de remanescentes e de heranças arqueana.

O conhecimento sobre as rochas máficas, dessas duas unidades, é suportado por um menor número de dados, onde estas são caracterizadas de afinidade geoquímica diversas das félsicas, em meio às quais ocorrem intercaladas, e de natureza heterogênea entre si. Do Complexo Juiz de Fora, parte de afinidades toleíticas, são creditadas como membros menos evoluídos, basalto-andesíticos, das calcioalcalinas de arco magmático oceânico. Por sua vez, a maior parte, notadamente do Complexo Mantiqueira, parecem dissociadas das associações félsicas calcioalcalinas, aventadas como mais antigas e mais novas, englobadas e inseridas, em meio a estas pela estruturação gnáissica brasileira superimposta.

Figura 6 – Mapa Geológico simplificado do segmento norte da Faixa Ribeira, no limite dos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro.

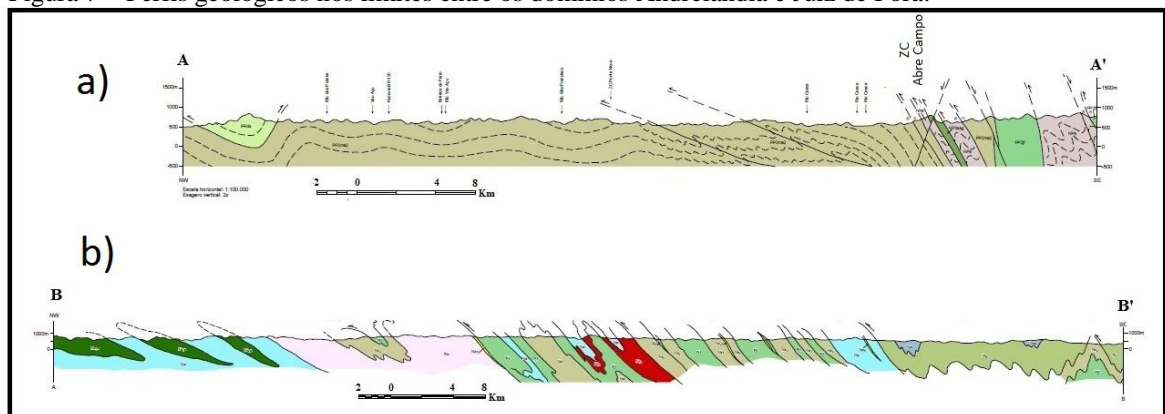


Nota: Abreviaturas: TOC – Terreno Ocidental; TOR – Terreno Oriental; *CTB*- *Central Tectonic Boundary*; DAut – Domínio Autóctone; DAnd – Domínio Andrelândia; DJF – Domínio Juiz de Fora; TPS – Terreno Paraíba do Sul;

Legenda: 1) Falha; 2) Zona de cisalhamento do Paraíba do Sul (Além Paraíba); 3) Limite dos domínios e terrenos tectônicos (empurrões principais); 4) Empurrão subordinado. Unidades litostratigráficas: 5) Granitos neoproterozoicos a ordovicianos sin, tardi e pós-colisionais; Terreno Oriental: 6) Arco magmático Serra da Bolívia; 7) Rochas metassedimentares de alto grau metamórfico; 8) Rochas metassedimentares ante-arco; 9) Arco magmático Rio Negro e Serra da Prata; 10) Rochas metassedimentares ricas em mármore (Grupo Itáva); 11) Rochas metassedimentares de alto grau (Grupo São Fidélis); Terreno Ocidental: 12-13) Ortognaisses, metabasitos e granitoides do Complexo Mantiqueira; 14) Rochas metassedimentares de margem passiva proximal (Grupo Andrelândia); 15) Ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora; 16) Rochas metassedimentares de margem passiva distal (Grupo Andrelândia); Terreno Paraíba do Sul: 17) Ortognaisses do Complexo Quirino; 18) Rochas metassedimentares ricas em mármore (Grupo Paraíba do Sul); 19) Área de estudo.

Fonte: Heilbron *et al* (2017).

Figura 7 – Perfis geológicos nos limites entre os domínios Andrelândia e Juiz de Fora.



Nota: Escala original 1:100.000. Localização Aproximada dos perfis no Mapa da Figura 6. (Obs. As legendas dessas duas figuras são diferentes).

Fonte: (a) extraído Mapa Geológico Folha Viçosa, de Gradim *et al.*, 2011; (b) extraído Mapa Geológico Folha Juiz de Fora, de Duarte *et al.*, 2011.

Importante ressaltar que, em meio aos domínios estruturais de cada uma dessas unidades, possuem características de campo bastante típicas, que a primeira vista possibilitam uma distinção entre as mesmas. Ao mesmo tempo, nas proximidades dos seus limites, essas características se tornam mais ou menos ambíguas. As rochas do Complexo Mantiqueira se tornam estruturadas verticalmente, similar às rochas do Complexo Juiz de Fora, juntamente com aparente aumento da intensidade da migmatização e do grau metamorfismo. Por sua vez, nas rochas do Complexo Juiz de Fora é acentuada a intensidade do metamorfismo retrogrado e da migmatização, mascarando a expressão do metamorfismo no facies granulito.

#### 2.2.1.1 Complexo Mantiqueira

O Complexo Mantiqueira é composto por associações de rochas gnáissicas ortoderivadas diversas (Teixeira e Figueiredo 1991, Machado Filho *et al* 1983, Pinto 1991, Viana 1991, Brandalise 1991, Duarte 1998). De uma maneira geral, são representadas por litotipos félsicos, como biotita-hornblenda gnaisses e hornblenda gnaisses, que variam de bandados a finamente bandados, listrados e maciços, cinzentos com intercalações máficas anfibolíticas, na forma de bandas e lentes estiradas, mais ou menos migmatíticos, com intervalos granulíticos (Nogueira 1999).

Os litotipos félsicos compreendem associações de composições variadas, tonalítica-granodiorítica-granítica, de afinidades calcioalcalinas, separadas em de médio-K e alto-K, trondhjemítica, granítica e sienítica e raras shoshoníticas (Pinto 1991, Viana 1991, Duarte 1998, Duarte & Valente 1999, Duarte *et al* 2001a, 2001b, 2002).

Essas associações são interpretadas como representantes de arco magmático continental, do tipo cordilherano, com registros de herança e remanescentes arqueanos, associadas a processos de rejuvenescimento crustal. São separadas raras ocorrências trondhjemíticas, atribuídas a séries TTG de baixo-K, comuns nos complexos arqueanos, associações de rochas graníticas e sieníticas, de afinidade alcalina, que são atribuídas a ambientes pós-arco, colisionais e pós-colisionais (Figueiredo *et al* 1992).

Os litotipos máficos (metabásicos) são representados por anfibolitos, metadioritos e metagabros, em sua grande maioria, de afinidades toleíticas, de natureza heterogênea, e, em

menor quantidade, de afinidades alcalinas, dissociadas das associações de rochas félsicas (Duarte 1998, Duarte *et al* 2001a, 2001b, 2002). As afinidades toleíticas heterogêneas apontam para variedades de fontes petrogenéticas, relacionadas a fontes mantélicas diversas (tipos E-MORB e intraplaca continental).

#### 2.2.1.2 Complexo Juiz de Fora

O Complexo Juiz de Fora é composto por associações de rochas gnáissicas granulíticas ortoderivadas diversas, de composições básicas a ácidas e ortognaisses miloníticos a blastomiloníticos (Heilbron *et al* 1991, Heilbron 1993, 1995). São reconhecidos em campo pela coloração predominantemente mais escura e esverdeada (dos feldspatos), mesmo para membros félsicos, e pela ocorrência de fenocristais de ortopiroxênio, identificados pela cor de alteração superficial marrom bronze característica, com intercalações máficas granulíticas, na forma de bandas e lentes estiradas e dobradas isoclinalmente.

Os litotipos félsicos compreendem associações de composições de composição intermediária, enderbítica-charnoenderbítica, a ácida, charnockítica, de afinidades calcioalcalinas, separadas em baixo-K e médio-K (Heilbron *et al* 1988, Heilbron 1993 e 1995 e Duarte *et al* 1997).

Essas associações são interpretadas como representantes de ambientes convergentes juvenis oceânicos, do tipo arco de ilhas (Heilbron *et al* 2010), onde parte das toleíticas representariam membros menos evoluídos de séries calcioalcalinas.

Os litotipos máficos compreendem rochas de composição básica-intermediária e básica, tonalítica e gabroica norítica, de afinidade predominante toleítica, próximas a calcioalcalinas (basalto-andesíticas), de baixo-Ti, descritas como heterogêneas (representantes de diferentes grupos petrogenéticas), e também alcalinas. São apontadas para rochas básicas toleíticas (heterogêneas) distintas fontes mantélicas (N-MORB, E-MORB e intracontinental) (Duarte 1998, Duarte & Valente 1999, Duarte *et al* 2001b, 2002).

### 2.2.1.3 Grupo Andrelândia

O Grupo Andrelândia reúne sequências de rochas metassedimentares que tiveram como embasamento, no Terreno Ocidental, os complexos Mantiqueira e Juiz de Fora. Definida nos domínios cratônico e para-autóctone do Terreno Ocidental (Domínio Andrelândia), a estas sequências foram somadas conjuntos de rochas paraderivadas do domínio alóctone (Domínio Juiz de Fora).

A caracterização do Grupo Andrelândia foi proposta por Paciullo (1997) e Ribeiro *et al* (1995), que separaram seis associações de litofácies, que apontam para uma evolução, de ambiente continental fluvial, passando a fase rift, para ambiente marinhos, transgressivos e profundos (Paciullo *et al* 1993). Este conjunto é caracterizado como representante de sequências deposicionais de ambientes de margem passiva, relacionadas à fragmentação do Paleocôntinente do São Francisco, entre o Toniano e o Criogeniano. O mesmo possui equivalente nos demais segmentos de Faixa Móvel em torno do Cráton do São Francisco, como os grupos Araxá, na Faixa Brasília, e Macaúbas, na Faixa Araçuaí.

No Domínio Juiz de Fora, o conjunto de rochas paraderivadas intercaladas às ortoderivadas do Complexo Juiz de Fora, igualmente a estas, metamorfisadas em alto grau metamórfico e intensamente retrabalhadas, foram consideradas por Heilbron (1989, 1990) como correlatas às sequências descritas por Paciullo (1997). São rochas destituídas das suas feições primárias, gnáissicas, com granada e silimanita, com intercalações quartizíticas, calcissilicáticas, gonditos e anfíbolitos.

Associadas ao Grupo Andrelândia tem-se intercalações e intrusões de rochas de composição básica, representadas por anfíbolitos, interpretadas como derivadas de basaltos oceânicos transicionais a normais (Gonçalves e Figueiredo 1992, Paciullo, 1997).

### 2.2.3 Datações geocronológicas e origens tectônicas do Terreno Ocidental

As datações geocronológicas de rochas do embasamento do Terreno Ocidental registram predomínio franco de idades do Riaciano-Orosiriano, e, em menor quantidade, mais antigas, do Arqueano e do Sideriano, e mais novas, do Estateriano, afora idades relacionadas ao Evento Brasileiro. São idades U-Pb em zircão, em sua grande maioria, de rochas félsicas e interpretadas de cristalização, com menor número de idades interpretadas de herança e de metamorfismo.

A geocronologia do embasamento do Terreno Ocidental, mais dados existentes de geoquímica elementar e isotópica (Sr-Nd), dados de campo e a estudos petrográficos e petrogenéticos, não obstante a classificação comum calcioalcalina, confirma a distinção entre os complexos Mantiqueira e Juiz de Fora e a proposição destes como representantes de ambientes tectônicos distintos de arcos magmáticos, continental e oceânico, respectivamente. Estes seriam representantes de sistemas de arcos acrescionários ao Núcleo Arqueano, para composição do Paleocontinente do São Francisco, no Riaciano-Orosiriano.

#### 2.2.3.1 Dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora

No Complexo Mantiqueira as idades U-Pb existentes se concentram entre 2,25 e 2,01 Ga, de cristalização, e, em menor quantidade, entre 3,2 e 2,9 Ga, de cristalização, herança e até metamorfismo (Tabela 1). A estes valores, somam idades modelo  $T_{DMNd}$  entre 3,2 Ga e 2,8 Ga, com parâmetros petrogenéticos  $\epsilon Nd$  acentuadamente negativos, entre -10 e -35 (Fischel *et al* 1998, Noce *et al* 2007), e, em menor quantidade, de razões (Ri)  $^{87}Sr/^{86}Sr$  entre 0,703-0,705 e entre 0,712-0,713, sugerindo diferentes fontes crustais, juvenis e de retrabalhamento crustal mais antigo (Figueiredo e Teixeira 1996) (Tabela 2). Suas associações de rochas são assim interpretadas como representantes de ambientes de arco magmático cordilherano, produtos de fontes mantélicas e de retrabalhamento de terrenos TTG do Núcleo Arqueano, e de granitogênese pós-arco (colisionais) (Figueiredo *et al* 1992).

No Complexo Juiz de Fora as idades U-Pb existentes se concentram entre 2,2 e 1,96 Ga e uma idade isolada de 2,4 Ga e duas idades de em torno 1,75 Ga, todas interpretadas de cristalização (Silva *et al* 2002, Noce *et al* 2007, Heilbron *et al* 2010). A estes valores, somam idades modelo  $T_{DMNd}$  entre 2,6 Ga e 2,3 Ga, com parâmetros petrogenéticos  $\epsilon Nd$  levemente negativos a positivos, entre -1 e + 0,5 (Fischel *et al* 1998, Noce *et al* 2007). Suas associações de rochas são assim interpretadas como representantes plutônicas de ambientes de arco magmático oceânico ou juvenis, produtos de fontes mantélicas (Figueiredo & Teixeira 1996, Duarte *et al* 1997 e Heilbron *et al* 2010).

Ainda sobre o Complexo Juiz de Fora, a idade de 2,4 Ga (Sideriano), de granulito máfico, com assinatura N-MORB, e duas idades de em torno de 1,75 Ga (Estateriano), de enderbitos e granulitos félsicos alcalinos, aventam para tectônicas distensivas desses períodos (Heilbron *et al* 2010). Do Sideriano, esta seria contemporânea, relacionável, ao desenvolvimento da sequência de margem passiva do Supergrupo Minas, de onde também se espera a formação de crosta oceânica. Do Estateriano, estas seriam relacionáveis à Tectogênese Estateriana, quando se desenvolve o sistema de rifts do Espinhaço, bem definida no domínio cratônico e externo da Faixa Araçuaí.

A continuidade e o refinamento dos estudos dessas unidades, que incluem a obtenção de novos dados analíticos, têm corroborado com a proposição acima, mas também apontam para a existência de associações de rochas relacionadas a diferentes ambientes tectônicos, períodos e eras geológicas. Embora não devidamente caracterizados, seriam de ambientes pós-arco, orogênicos e pós-orogênicos riacianos-orosirianos, de remanescentes arqueanos, preservados do rejuvenescimento crustal, notadamente no Complexo Mantiqueira, e de ambientes divergentes, relacionados a tentativas de fragmentação do Paleocontinente do São Francisco, caracterizadas noutros domínios de faixa móvel e cratônico.

As idades de metamorfismo em rochas do Terreno Ocidental se situam maior parte, entre 0,57 e 0,6 Ga (referido como M2), e, em menor quantidade, entre 2,1 e 2,05 Ga (referidos como M1). O metamorfismo M2 é relacionado à colisão brasileira e desenvolvimento da Faixa Ribeira (Noce *et al* 2007, Heilbron *et al* 2010). O metamorfismo M1 é relacionado à colisão paleoproterozoica (Evento Transamazônico), de formação do Paleocontinente do São Francisco (Silva *et al* 2002).

### 2.2.3.2 Do Grupo Andrelândia

As datações existentes de rochas do Grupo Andrelândia apontam idade máxima de deposição, obtidas de zircões detríticos, de  $1.047 \pm 77$  Ma (Esteniano) (Valladares *et al* 2004), mais fontes de contribuição paleoproterozóicas e arqueanas (Machado e Gauthier 1996, Söllner e Trouw 1997, Valladares *et al* 1997, 1999).

As rochas máficas intercaladas no Grupo Andrelândia, representadas por anfibolitos, apresentam idades modelo  $T_{DMNd}$  entre 1,2 e 1,05 Ga (Esteniano), e valores de  $\epsilon Nd(1,0Ga)$  entre +4,8 e +3,1, que apontam para derivação de reservatório de manto empobrecido e curta residência crustal (Heilbron *et al* 1989).

Tabela 1 - Resumo principais valores de idades U-Pb em zircão, dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora e de unidades correlatas . (continua).

Unidade litoestratigráfica	litologia	Idade de cristalização	Idade de metamorfismo (pré-1,8 Ga)	Idade de herança	Método analítico	Identificação da amostra	localização	referência
Complexo Mantiqueira	Granodiorito	2018±3 a 2068±4			SHRIMP	LC-77	rodovia BR-120 - São Domingo do Prata	Noce <i>et al</i> 2007
	Granodiorito	2041±7			SHRIMP	LC-67	corte rodovia - Rio Casca	Noce <i>et al</i> 2007
	Granodiorito	2044±4			SHRIMP	LC-70	rodovia MG-262 (altura rio Gualaxo)	Noce <i>et al</i> 2007
	Hbn Granodiorito foliado	2050±12			SHRIMP	LC 26	(batólito Ritápolis) São Tiago	Silva <i>et al</i> 2002
	Granito	2051±10			SHRIMP	LC-79	Coronel Fabriciano - Pedreira	Noce <i>et al</i> 2007
	Granodiorito	2051±12			SHRIMP	LC-78	Pq Nac Rio Doce - margem do Rio Doce	Noce <i>et al</i> 2007
	Cpx-Hbn-Bt gnaiss tonalítico	2058±7		2160± 6 -16	SHRIMP	LC 1 6	Ewbank da Câmara	Silva <i>et al</i> 2002
	Hbn-Bt gnaiss, tonalíticos granodioríticos	2079±11		2167± 7 - 26	SHRIMP	LC-30	Pedreira Ponte Nova	Silva <i>et al</i> 2002
	Bt gnaiss tonalítico	2102±8		2186± 13 -26	SHRIMP	LC 2 1	Piedade do Rio Grande	Silva <i>et al</i> 2002
	anfíbrito maciço	2103 ± 43			SHRIMP	JF-CM-585II	Juiz de Fora - Pedreira Santo Cristo	Souza 2010

Fonte: Compilação feita pelo autor, 2018.

Tabela 1 - Resumo principais valores de idades U-Pb em zircão do complexos Mantiqueira, Juiz de Fora e correlatos. (continuação).

Unidade litoestratigráfica	litologia	Idade de cristalização	Idade de metamorfismo (pré-1,8 Ga)	Idade de herança	Método analítico	Identificação da amostra	localização	ref. bibliográfica
Complexo Mantiqueira	Leucognaisse	2107 ± 10			LA-MC-ICPMS	1058	Juiz de Fora, bairro Floresta	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Bt gnaisse	2114 ± 39			SHRIMP	JF-CM-585I	Juiz de Fora - Pedreira Santo Cristo	Souza 2010
	Hbn leucognaisse	2119 ± 12		2929 ± 16	SHRIMP	JF-CM-516IV	Juiz de Fora - Pedreira Santo Cristo	Souza 2010
	Hbn-Bt gnaisse	2121 ± 43		2,3 Ga	LA-MC-ICPMS	G-20	Juiz de Fora, bairro Nova Era (zona Norte)	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Hbn leucognaisse	2124 ± 12			SHRIMP	JF-CM-30B	Juiz de Fora - rodovia BR-041	Souza 2010
	Bt gnaisse	2126 ± 8			SHRIMP	JF-CM-577G	Juiz de Fora - Pedreira do Horto	Souza 2010
	gnaisse sienfítico	2127 ± 29			LA-MC-ICPMS	MA-01	10 Km a E de Piedade do Rio Grande - MATOLA	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Hbn leucognaisse granulação grossa	2131 ± 13		2929 ± 66	SHRIMP	JF-CM-564IV	Juiz de Fora - Pedreira Bairro Benfica	Souza 2010
	Bt gnaisse bandado	2133 ± 11		2852 ± 22	SHRIMP	JF-CM-564II		Souza 2010
	Bt gnaisse bandado	2133 ± 14		2796 ± 66	SHRIMP	JF-CM-190E		Souza 2010
	Tonalito	2137±19			SHRIMP	RP-01	Alto Rio Doce - Pedreira	Noce <i>et al</i> 2007
	anfíbolito maciço	2143 ± 9			SHRIMP	JF-CM-577H	Juiz de Fora - Pedreira do Horto	Souza 2010

Fonte: Compilação feita pelo autor, 2018..

Tabela 1 - Resumo principais valores de idades U-Pb em zircão do complexos Mantiqueira, Juiz de Fora e correlatos. (continuação).

Unidade litoestratigráfica	litologia	Idade de cristalização	Idade de metamorfismo (pré-1,8 Ga)	Idade de herança	Método analítico	Identificação da amostra	localização	ref. bibliográfica
Complexo Mantiqueira	Hbn gnaiss bandado migmatítico	2143± 11			SHRIMP	JF-CM-58A	?	Souza 2010
	Hbn tonalito granodiorito gnaiss bandado	2163 ± 16			LA-MC-ICPMS	LI-JRL-12	10 Km a S de Carvalhos	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Hbn-Bt gnaiss tonalítico	2169±44		2208± 46 -16	SHRIMP	LC 13 <sup>a</sup>	Rio Pomba	Silva <i>et al</i> 2002
	augen granito gnaiss	2170 ± 15			LA-MC-ICPMS	1056	Juiz de Fora, bairro Floresta	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Hbn gnaiss migmatítico	2204 ± 7			SHRIMP	JF-CM-29II	Juiz de Fora - Pedreira Barreira do Triunfo	Souza 2010
	augen granito gnaiss	2209 ± 79			LA-MC-ICPMS	LI-JRL-04	5 Km a N de Bocaina de Minas	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Hbn tonalito granodiorito gnaiss bandado	2220 ± 52	2041,0		LA-MC-ICPMS	1061	Juiz de Fora, bairro Nova Era (zona Norte)	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Hbn gnaiss	2256 ± 60			SHRIMP	JF-CM-30A	Juiz de Fora - rodovia BR-040	Souza 2010
	Bt gnaiss tonalítico (fragmento crosta arqueana?)	2777+22			SHRIMP	LC-18	Pedreira Lima Duarte	Silva <i>et al</i> 2002
	Hbn leucognaiss granulação grossa	2891 ± 23			LA-MC-ICPMS	1060	Juiz de Fora, bairro Nova Era (zona Norte)	Heilbron <i>et al</i> 2010

Fonte: Compilação feita pelo autor, 2018..

Tabela 1 - Resumo principais valores de idades U-Pb em zircão do complexos Mantiqueira, Juiz de Fora e correlatos. (continuação).

Unidade litoestratigráfica	litologia	Idade de cristalização	Idade de metamorfismo (pré-1,8 Ga)	Idade de herança	Método analítico	Identificação da amostra	localização	ref. bibliográfica
Complexo Juiz de Fora	anfíbolito maciço			2605 ± 110	SHRIMP	JF-CM-291	Juiz de Fora - Pedreira Barreira do Triunfo	Souza 2010
	granulito félsico	Mnz - Zrn -	2063 ± 10 2037 ± 5	Microsonda eletrônica	LA-ICP-MS	PAC-76	Acaiaca - Pedreira	Medeiros 2016
	granulito aluminoso		2069 ± 15		LA-ICP-MS	PAC-101	?	Medeiros 2016
	Enderbitito	2084±13			SHRIMP	UB-1	Astolfo Dutra – Pedreira	Noce <i>et al</i> 2007
	Norito	2119±16			SHRIMP	LC-66	Abre Campo – Pedreira	Noce <i>et al</i> 2007
	Hbn-Bt gnaiss laminado	2184 ± 9			SRHIMP	LC-90	Bananal de Baixo	Novo 2013
	Granulito charnockítico (alto K)	2199±17 (2154±11) 2134			ID-TIMS	1065	Juiz de Fora, pedreira do Horto (bairro Santo Antônio)	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Granulito máfico (toleítico)	2427 ± 9			ID-TIMS	1070	10 Km a W São José de Ubá	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Opx-Bt granulito enderbítico	2985±17	M1 2856±44		SHRIMP	LC-7	Pedreira Juiz de Fora	Silva <i>et al</i> 2002
C Caparaó	Oox-Bt granulito charnockítico	2195 ± 15			SHRIMP	LC-32	Alto Caparaó	Silva <i>et al</i> 2002

Fonte: Compilação feita pelo autor, 2018.

Tabela 1 - Resumo principais valores de idades U-Pb em zircão do complexos Mantiqueira, Juiz de Fora e correlatos. (conclusão).

Unidade litoestratigráfica	litologia	Idade de cristalização	Idade de metamorfismo (pré-1,8 Ga)	Idade de herança	Método analítico	Identificação da amostra	localização	ref. bibliográfica
Complexo Pocrane	Hbn-Bt-Gnaiss Migmatítico	2086 ± 27			SRHIMP	TN-150	corde BR-259, cruzamento com Rio Doce, Resplendor	Novo 2013
	Bt milonito	2103 ± 25 (2092 ± 15)			SRHIMP	TN4-2	São José do Limoeiro	Novo 2013
	Milonito Quartzo-Biotítico	2124 ± 11			SRHIMP	P3D	Córrego Ubá, Barra Mansa	Novo 2013
	Hbn-Bt ortognaiss Migmatítico	2128 ± 21 (2144 ± 24)			SRHIMP	TN-9B	Alvarenga	Novo 2013
Magmatismo Estateriano	Granulito charno-enderbítico inserido no CJF	1656 ± 69			ID-TIMS	1062	Juiz de Fora, BR-040, altura Represa de São Pedro	Heilbron <i>et al</i> 2010
	Hbn-Bt granito gnaissico Borrachudo no C Guanhões	1740±8			SRHIMP	LC 40	Borrachudos	Silva <i>et al</i> 2002
	Granulito máfico alcalino inserido no CJF	1765 ± 34 (1687 ± 48)			ID-TIMS	CJE-44	12 Km a NW de Conservatória	Heilbron <i>et al</i> 2010
MagmatCal aminiano	anfibolito inserido no Complexo Pocrane	1506 ± 14			SRHIMP	VP-05	Bananal	Silva <i>et al</i> 2002
	anfibolito, inserido no Hbn-Bt gnaiss Pocrane'	1529 ± 37			SRHIMP	TN-8	Bananal, Tarumirim	Novo 2013

Fonte: Compilação feita pelo autor, 2018.

Tabela 2 - Dados de Sm-Nd de rochas dos complexos Mantiqueira e Juiz de Fora.

Unidade litoestratigráfica	litologia	idade de cristalização	Identificação	localização	Ref. bibliografica	T <sub>DM</sub> ND	εNd(t)
Complexo Mantiqueira	Tonalito	2137±19	RP-01	Alto Rio Doce - Pedreira	Noce <i>et al</i> 2007	3	(-13)
	granodiorito	2044±4	LC-70	rodovia MG-262 (altura rio Gualaxo)	Noce <i>et al</i> 2007	2,9	(-9)
	granodiorito	2018±3 a 2068±4	LC-77	rodovia BR-120 - São Domingo do Prata	Noce <i>et al</i> 2007	3,1	(-11)
	granito	2051±10	LC-79	Coronel Fabriciano - Pedreira	Noce <i>et al</i> 2007	2,9	(-9,6)
	granodiorito	2051±12	LC-78	Pq Nac Rio Doce - margem do Rio Doce	Noce <i>et al</i> 2007	3,2	(-12)
	granodiorito	2041±7	LC-67	corte rodovia - Rio Casca	Noce <i>et al</i> 2007	3,2	(-12)
	Grt-Bt gnaiss		BZ-15	MG-262, margem do Rio Gualaxo	Brueckner <i>et al</i> 2000	2,83	-32
	Grt-Bt gnaiss		BZ-18B	12 Km a E Ponte Nova	Brueckner <i>et al</i> 2000	2.78	-34.3

Complexo Juiz de Fora	norito	2119±16	LC-66	Abre Campo - Pedreira	Noce <i>et al</i> 2007	2,3	(-0,4)
	enderbita	2084±13	UB-1	Astolfo Dutra - Pedreira	Noce <i>et al</i> 2007	2,6	-3,5
	Grt charnockito		DC-20	3 Km E de Dom Cavati	Brueckner <i>et al</i> 2000	1.96	-20.3
Comp Po-crane	Hbn-Bt gnaiss laminado	2184 ± 9	LC-90	Bananal de Baixo	Novo2013	2,3	0,43

Fonte: Compilação feita pelo autor, 2018.

## 2.3 Domínios cratônicos – Núcleo Arqueano, Cinturão Mineiro, região do Quadrilátero Ferrífero

### 2.3.1 Núcleo Arqueano

O Núcleo Arqueano compreende conjunto de complexos metamórficos, com denominações geográficas locais diversas e histórias evolutivas complexas, bordejados por sequências de cobertura do tipo *greenstone*. Alguns alojam enxame de diques máficos e sequências acamadadas máficas-ultramáficas, também arqueanos.

São eles os complexos metamórficos Campo Belo, Bonfim, Bação, Santa Bárbara, Guanhões, este situado no domínio externo da Faixa Araçuaí, e as sequências *greenstone* os Supergrupo Rio das Velhas, Pitangui, Rio Paraúnas, dentre outras. (Teixeira *et al* 1996, Campos *et al* 2003, Campos e Carneiro 2008, Alkmin e Noce 2008, Lana *et al* 2013, Romano *et al* 2013). As intrusões acamadadas máficas-ultramáficas, de ocorrências mais restritas, são representadas pela sequência Ribeirão dos Motas (Teixeira *et al* 2000).

Os complexos metamórficos, de uma maneira geral, são formados por terrenos do tipo TTG, migmatitos, e intrusões tonalíticas-graníticas potássicas. As sequências do tipo *greenstone* são compostas por rochas vulcânicas e sedimentares, komatiíticas, basálticas, ácidas, BIFs, metapelitos, xistos, quartzitos. As intrusões acamadadas máficas-ultramáficas possuem composição, principalmente, peridotítica e piroxenítica e, subordinadamente, gabronorítica e anfibolítica.

Este complexo conjunto de rochas foi formado, desde o Mesoarqueano, até o Neoarqueano, entre 3,2-2,6 Ga, ao fim do qual teria se constituído em expressivo segmento de crosta continental, que possibilitou o desenvolvimento de ambiente de margem passiva, representado pelas sequencias de rochas do Supergrupo Minas (Lana *et al* 2013, Teixeira e Oliveira 2015 e Teixeira *et al* 1996, Machado *et al* 1992 e 1996, Noce *et al* 2005, Hartmann *et al* 2006). Anterior a 3,2 Ga os registros de crosta siálica existentes são de dados indiretos, de zircões detríticos e idades modelo  $T_{DMNd}$  (Carneiro *et al* 1997 e Teixeira *et al* 1996), e de idades U-Pb de zircões detríticos das sequências *greenstone*.

A tectônica de formação do Núcleo Arqueano, entre 3,2-2,6 Ga, é separada em dois estágios de evolução (Lana *et al* 2013 e Teixeira e Oliveira 2015), onde são individualizados quatro eventos. O primeiro estágio, de extensão regional, entre 3,2 Ga e 2,76 Ga, onde são individualizados três eventos, de formação das séries TTG, sequências *greenstone*, migmatização e metamorfismo. O segundo estágio, registrado nas regiões Sul do Cráton e do Quadrilátero Ferrífero, entre 2,75 Ga e 2,6 Ga, é marcado por metamorfismo de alto grau, deformação dúctil, fusão intracrustal, intenso magmatismo potássico e estabilização da crosta continental formada (Machado *et al* 1992, Teixeira *et al* 1996, Campos *et al* 2003, Romano *et al* 2013).

Do primeiro estágio, registrados em complexo homônimo e no Cinturão Mineiro, o evento magmático mais antigo, entre 3,22-3,10 Ga, considerado embrionário, referido como Evento Santa Bárbara e Orogenia Campo Belo. Seguido a este evento, com maior quantidade de registros, é separado o Evento Rio das Velhas-I ou Orogenia Rio das Velhas, entre 2,93-2,90 Ga, e de migmatização, de 2,84 Ga, nos complexos Bonfim e Belo Horizonte, no Cinturão Mineiro e em zircões detríticos nas sequências *greenstone* e Supergrupo Minas. O terceiro Evento, referido como Rio das Velhas – II, entre 2,8-2,76 Ga, de magnitude equivalente ao evento anterior, de cristalização e de metamorfismo, registrados nos complexos TTG e anfíbolitos, nos complexos Belo Horizonte, Caeté e Bonfim.

O segundo estágio de evolução do Núcleo Arqueano, corresponde metamorfismo, fusão intracrustal, magmatismo potássico e estabilização da crosta continental formada.

Importante ressaltar a extensão desses núcleos arqueanos para os domínios das faixas móveis neoproterozoicas, nas faixas Araçuaí e Ríberia. Na Faixa Araçuaí pelo Complexo Arqueano Guanhões. Na Faixa Ribeira pelos registros de idades de herança e de cristalização arqueanas no Complexo Paleoproterozoico Mantiqueira, indicadores de resquílios e eventuais fragmentos desse núcleo (Silva *et al* 2002, Noce *et al* 2007).

### 2.3.2 Unidades de coberturas precursoras e orogenéticas paleoproterozoicas da região do Quadrilátero Ferrífero

Ao final do Arqueano tem-se um relativamente extenso segmento de crosta continental estabilizado, em torno do qual foi possível o desenvolvimento de ambiente de margem passiva (Alkmin e Noce 2006, Romano *et al* 2013). Na região do Quadrilátero Ferrífero e adjacências, tem-se sequências de coberturas do Supergrupo Minas (Door 1969), representantes desse tipo de ambiente, que teriam sido precursoras ao desenvolvimento de sistemas de arcos acrescionários, representados no Cinturão Mineiro e Terreno Ocidental.

Essas sequências, depositadas a partir do Sideriano, são representadas pelas rochas de coberturas supracrustais paleoproterozoicas, reunidas nos Supergrupo Minas. As mesmas ocorrem entre rochas dos complexos metamórficos Bação, Bonfim, Caeté, dentre outros, e das sequências *greenstone* arqueanas, reunidas no Supergrupo Rio das Velhas.

Também na região do Quadrilátero se tem rochas de coberturas, que teriam sido depositadas no Riciano até o Estateriano, representantes de bacias de ambientes orogenéticos, pós-arcos, e continentais, pós-orogenéticos, reunidas nos grupos Sabará (Reis *et al* 2001, Alkmin e Noce 2006) e Itacolomi (Alkmin e Marshak 1998), respectivamente.

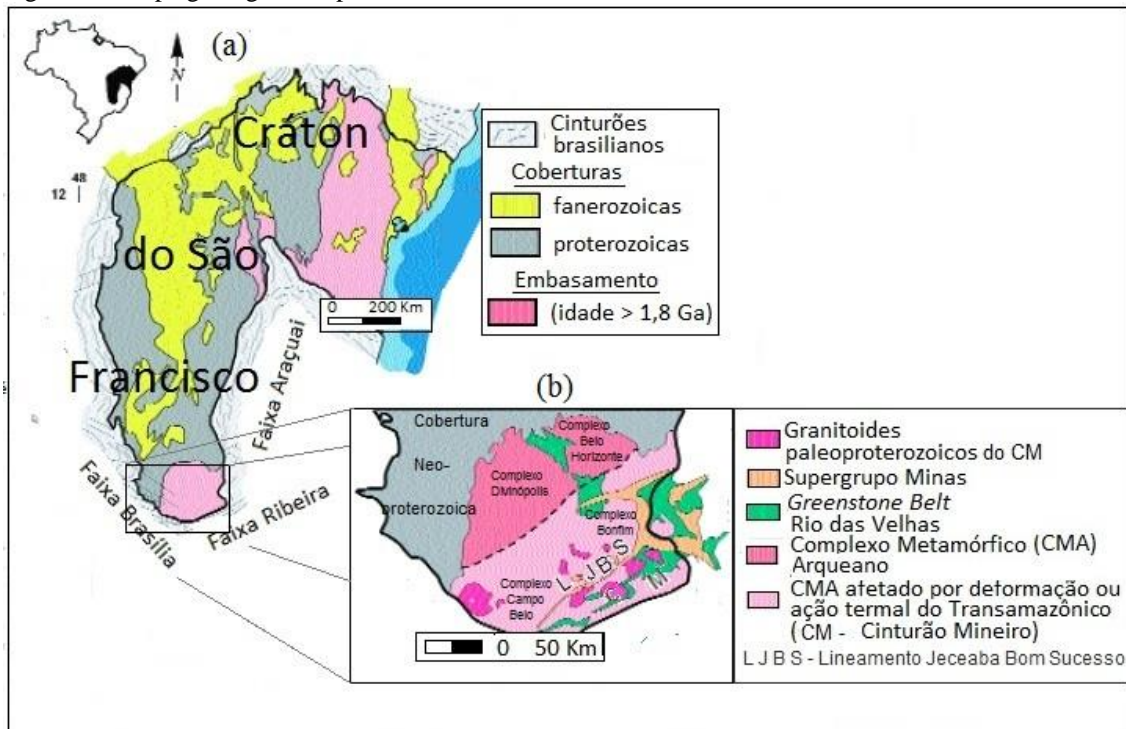
### 2.3.3 Arcos magmáticos paleoproterozoicos do Cinturão Mineiro

O Cinturão Mineiro (Teixeira *et al* 1998, 2000), situado ao sul da região do Quadrilátero Ferrífero, fica em domínio cratônico (Fig 8a, b), preservado da tectônica brasileira, diferentemente do Terreno Ocidental. O Cinturão Mineiro é composto por conjuntos de batólitos, envoltos por sequências de cobertura metavulcanossedimentares (originalmente relacionadas ao Supergrupo Rio das Velhas), ambos de idades ricianas. Estes conjuntos são caracterizados como rochas de arcos magmáticos e as sequências de retro-arco, creditados como representantes de, pelo menos, três sistemas de arcos paleoproterozoicos (Avila *et al* 2010, Toledo 2002, Barbosa 2015).

São eles: arco magmático de Resende Costa-Lagoa Dourada e a sequência Rio das Mortes; arco magmático Serrinha-Tiradentes e sequência Nazareno; e arco magmático Ritápolis-Alto Maranhão e sequência e Dolores de Campos, esta caracterizada do tipo *greenstone*.

O arco magmático de Resende Costa-Lagoa Dourada possui afinidade TTG, o de Serrinha-Tiradentes de afinidade calcioalcalina, de ambientes oceânicos, desenvolvidos entre 2,47-2,31 Ga, e o arco Ritápolis-Alto Maranhão, de afinidade calcioalcalina, de ambiente misto, oceânico e continental, desenvolvido entre 2,22-2,16 Ga (Barbosa 2015).

Figura 8 – Mapa geológico simplificado do domínio Cratônico.



(a) do Cratón do São Francisco; (b) da porção Sul do Cratón do São Francisco, domínio do Cinturão Mineiro (CM) (Teixeira *et al* 1996) e Quadrilátero Ferrífero (QF).

Fonte: Alkmin, 2004

## 2.4 Tentativas de fragmentação do Paleocontinente do São Francisco

### 2.4.1 Eventos tectônicos - rifiteamento, magmatismo e sedimentação

O Paleocontinente do São Francisco teria se estabelecido como plataforma estável ou integrada no final do Riáciano e início do Orosiriano, assim perdurando até o Esteniano-

Toniano, quando se tem início a sua fragmentação. Nesta plataforma, entre estes períodos, que perfaz quase 1 Ga, são separados até 6 eventos tectônicos, referidos como tentativas de fragmentação desse Paleocóntinente (Pedrosa Soares e Alkmin 2011). Estes são registrados nos atuais domínios cratônico e externos das suas faixas móveis.

Estas tentativas de fragmentação são caracterizadas por sistemas de rifteamentos, magmatismos e de sedimentação, relacionados entre si, alguns com correlações na contraparte africana (Tupinambá *et al* 2007, Pedrosa Soares e Alkmin 2011, Chemale Jr *et al* 2012). Os magmatismos variam de anorogênicos batolíticos alcalinos, subvulcânicos e vulcânicos fissurais, na forma de diques, sills e derrames, félsicos, máficos, bimodais e acamadados máficos-ultramáficos. As bacias sedimentares, relacionadas a processos distensivos, de afinamento crustal, mecânico (rifteamento) e flexural termal (sag), bem representadas pelas rochas do Supergrupo Espinhaço, dentre outras unidades, que englobam pelo menos três ciclos ou eventos deposicionais.

O primeiro evento, mais antigo, referido como Trafogênese Estateriana (Brito Neves *et al* 1995), representado na porção Sul e Norte do Cráton, associado a magmatismos batolíticos alcalino (tipo Borrachudos) (Fernandes *et al* 1994) e Complexo Lagoa Real, com desenvolvimento de rifteamento, vulcanismo félsico e sedimentação da porção basal do Supergrupo Espinhaço.

O segundo, ocorrido no Calaminiano, relacionado ao sistema de rifts Aulacógeno Paramirim, tem os seus registros restritos à parte norte do Cráton, associado a enxames de diques máficos e sedimentação da porção intermediária do Supergrupo Espinhaço.

O terceiro, ocorrido no Esteniano, é relacionado à reativação de sistema de riftes estaterianos, seguido de subsidência termal (do tipo sag), com deposição das unidades superiores do Supergrupo Espinhaço, registradas no domínio externo da Faixa Araçuaí, associado a enxame de diques máficos e derrames acamadados (na Faixa Araçuaí).

O quarto, ocorrido no limite Esteniano-Toniano, é representado na contraparte africana, relacionado a formação de rift aulacogeno e por magmatismo félsico do tipo A (anorogênico alcalino), e na parte norte do cráton, por enxame de diques.

O quinto, ocorrido no Toniano, é representado nos domínios cratônico e externo da Faixa Araçuaí, por granitos anorogênicos, da suíte Salto da Divisa, e por diques máficos, da

suíte Pedro Lessa, respectivamente, e na contraparte africana. por vulcanismo bimodal, associado a sedimentação do tipo rift, e por intrusivas félsicas alcalinas. Este evento é também atribuído sucessão basal, do tipo rift, do Grupo Macaúbas (Pedrosa-Soares *et al.* 2008, 2011a; Martins *et al.* 2008; Babinski *et al.* 2011).

O sexto, ocorrido no Criogeniano, relacionado a fragmentação do Paleocóntinente, é representado por magmatismo intrusivo alcalino e extrusivo ácido e máfico. O magmatismo alcalino é registrado no sul Bahia (Teixeira *et al.* 1969, Rosa *et al.* 2007), o vulcânico ácido, na contraparte africana, e o máfico intercalado a sequências deposicionais de ambiente de margem passiva, do Grupo Macaúbas e correlatos noutros segmentos de faixa móvel. Destes correlatos, destaque para o Grupo Andrelândia, representada no Terreno Ocidental.

#### 2.4.2 Magmatismos félsicos e máficos (básicos)

##### 2.4.2.1 Magmatismos intracontinental básico e félsico do Estateriano

Os magmatismos relacionados à Terafogênese Estateriana ocorrem intrusivos e extrusivos fissurais e na forma de derrames, registrados em diversos locais, nos domínios cratônico e externo das faixas móveis. Os mesmos ocorrem na forma de batólitos félsicos, enxame de diques máficos e extrusivas máficas, félsicas e bimodais.

Os intrusivos félsicos, na forma de batólitos, ocorrem no Bloco Guanhães e no estado da Bahia, classificados do tipo A (alcalinos anorogênicos). No Bloco Guanhães compõem a suíte Borrachudos (Dussin *et al.* 1994, Fernandes *et al.* 1994, Fernandes 1994) e correlatos, com idades, U-Pb em zircão de 1,74 Ga (Silva *et al.* 2002). No estado da Bahia a suíte Lagoa Real (Cruz *et al.* 2007, Costa *et al.* 1985, Arcaño *et al.* 2000), com idades U-Pb em zircão de ca 1,7 Ga (Turpin *et al.* 1988, Cordani *et al.* 1992, Pimentel *et al.* 1994).

Os intrusivos de composição básica, na forma de enxame de diques máficos de diabásio, ocorrem no extremo sul do Cráton, no Complexo Belo Horizonte (região de Pará de Minas) (Chaves 2014), e no leste do Cráton, em rochas arqueanas, paleoproterozoicas e base

do Supergrupo Espinhaço (Formação Bandeirinha). São afinidade toleítica de alto-Ti, enriquecidos em ETR e elementos incompatíveis, com forte anomalias negativas Nb e razões iniciais (Ri)  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(t)$  relativamente elevadas (0,705). Da região de Pará de Minas foram obtidas idades, Rb-Sr, Ar-Ar e U-Pb em badaleita, que variam entre 1,75 e 1,71 Ga (Silva *et al* 1995, Chaves 2001, Carneiro *et al* 1998, Oliveira 2004). Considerada mais representativa, a idade de 1,71 Ga, é coincidente com o início de formação do sistema de *rift* do Espinhaço (Guadagnin *et al* 2015; in Girardi *et al* 2017).

Os extrusivos, de composição bimodal, ocorrem em meio às sequências deposicionais do Supergrupo Espinhaço (Formação São João da Chapada, Knauer 2007), descritos como derrames basálticos, com idade U-Pb em zircões de 1,70 Ga (Chemale Jr *et al* 2011).

O registro de magmatismo Estateriano na Faixa Ribeira é representado em meio às rochas do Complexo Juiz de Fora por enderbito (félsico) e granulito máfico (básico) alcalinos (Heilbron *et al* 2010), com idades, U-Pb em zircão, de 1,66 Ga e 1,7 Ga, respectivamente (Heilbron *et al* 2010).

#### 2.4.2.2 Magmatismo básico intracontinental do Calaminiano

Os magmatismos no Calaminiano (1,6-1,4 Ga) são intrusivos, na forma de enxame de diques de diabásios, doleritos e gabros, na porção norte do Cráton (Girardi *et al* 2017), e na forma de lentes máficas (gabróicas) na Faixa Araçuaí, no Complexo Pocrane (Novo 2013). Na porção norte, em duas regiões, com orientações distintas, na Chapada de Diamantina e de Curaça, divisa dos estados da Bahia e Pernambuco.

Na Chapada de Diamantina são intrusivos em rochas arqueanas do Bloco Gavião e metassedimentares mesoproterozoicas do Supergrupo Espinhaço, e na região de Curaça em rochas arqueanas, do Complexo Metamórfico Caraíba (Girardi *et al* 2017). Em ambas regiões, de afinidades toleíticas e ricas em ETR, diferenciados entre si, associadas a fontes mais empobrecida e enriquecidas, respectivamente, relacionadas por Silveira *et al* (2013) a plumas mantélicas.

Os registros de idades, U-Pb em badaleita, obtidas de anfibolitos, são de  $1501 \pm 9$  Ma, para a Chapada de Diamantina, e de  $1506 \pm 7$  Ma, para Curaça (Silveira *et al* 2013). Estas idades são relacionadas à deposição da Bacia do Espinhaço, representado pelo Aulacógeno Paramirim (Battilani *et al* 2005, Guimarães *et al* 2005 e Silveira *et al* 2013: in Girardi *et al* 2017).

Na Faixa Araçuaí, o magmatismo básico Calaminiano é registrado em meio a rochas do Complexo Pocrane (Novo 2013), representado por lentes de ortoanfibolitos, intercaladas aos ortognaisses do Complexo Pocrane. São gabros toleíticos de alto-Ti, caracterizada por alto fracionamento de ETR (do tipo *rift* e derrames de basalto continental). O registro de idade, U-Pb em zircão, é de ca 1530 Ma (Novo 2013).

#### 2.4.2.3 Magmatismo básico intracontinental do Esteniano – 1,2-1,0 Ga

Os magmatismos do Esteniano (1,2-1,0 Ga) são intrusivos ou plutônicos, na forma de enxame de diques máficos semi-radiais, registrado na parte norte do cráton e na Faixa Araçuaí (Fig 9).

Na parte norte do Cráton são intrusivos e plutônicos na região de Salvador-Ilhéus-Olivença (Correa-Gomes e Oliveira 1999, 2000), na forma de enxame de diques máficos de diabásios e anfibolitos toleíticos (tipo MORB), estruturados de forma semi-radial, relacionado a centro de propagação situado na sua contraparte africana do Cráton (Correa-Gomes e Oliveira 1999, 2000). Os registros de idades U-Pb em badaleita são de aproximadamente 0,92-0,93 Ga (Oliveira *et al* 2012).

Na Faixa Araçuaí, região de Alvarenga-Ipanema, na forma de derrames acamadados (Angeli *et al* 2004), e de lentes máficas de ortoanfibolitos no Complexo Pocrane (Novo 2013). Os derrames máficos-ultramáficos acamadados são de dunitos, peridotitos, piroxenitos, anortositos e gabros, corpos ígneos plutônicos metamorfisados no fácies granulito. O registro de idade é isocronica Sm-Nd em rocha total de 1,03 Ga e de idade-modelo ( $T_{DMNd}$ ) de 1,7 Ga (Angeli *et al* 1988). As lentes máficas de ortoanfibolitos são de gabros toleíticos de baixo-Ti (do tipo MORB), que ocorrem intercaladas aos ortognaisses do Complexo Pocrane. A idade U-Pb em zircão é de ca 1.176 Ma (Novo 2013).

Os magmatismos estenianos são apontados, por Pedrosa-Soares e Alkmim (2011) e Chemale Jr *et al* (2012), como marcadores do início do rifteamento continental que culminou com a fragmentação do Paleocontinente e desenvolvimento das bacias precursoras do Orógeno Araçuaí.

#### 2.4.2.4 Magmatismo básico intracontinental do Toniano – 1,0-0,85 Ga

Os magmatismos do Toniano (1,0-0,85 Ga) são de composição básica, ácida (alcalina) e bimodal, intrusivos anorogênicos e hipoabissais, fissurais e vulcânicos (Tupinambá *et al* 2007 e Pedrosa Soares e Alkmin 2011). Estes são registrados, no domínio cratônico, nas suas partes sul (Chaves 2001, Chaves e Correia-Neves 2005) e norte (Correia-Gomes e Oliveira 2000) e na região entre o Quadrilátero Ferrífero e Diamantina (Silva *et al* 1995), e na Faixa Araçuaí e contraparte africana (Silva *et al* 2002) e na Faixa Brasília (Pimentel e Fuck 1986) (Fig 9).

Na parte sul de composição básica e afinidade toleítica, na forma de diques e corpos hipoabissais, que a princípio não cortam as rochas do Grupo Bambuí, com registro de idade isocrônica Sm-Nd, de  $984 \pm 110$  Ma (Chaves 2001, Chaves e Correia-Neves 2005: in Tupinambá *et al* 2007).

Na parte norte diques de diabásios e de anfibólitos, referidos como enxame de diques de Salvador de *trend* NW (Correia-Gomes e Oliveira 2000), com registro de idade, U-Pb em badaleita de 0,92 Ga (Heaman 1991).

Entre o Quadrilátero Ferrífero e Diamantina, referido como Suíte Pedro Lessa (Machado *et al* 1989), ocorrem na forma de enxame de diques, *sills* e de corpos hipoabissais, de espessuras e dimensões variáveis, intrusivos em sequências paleoproterozoicas, dos supergrupos Minas e Espinhaço. São de composição gabroica, (Silva *et al* 1995), com registro de idade é de ca 0,90 Ga (Machado *et al* 1989) e idades-modelo ( $T_{DMNd}$ ) de 2,59 Ga e 1,35 Ga (Silva *et al* 1995).

Nas Faixa Araçuaí, referido como suíte Salto da Divisa, e contraparte africana na forma de magmatismo félsico anorogênico (Silva *et al* 2002). A suíte Salto da Divisa,

formada por granitos do tipo A, é intrusiva em unidades de embasamento paleoproterozoicas, A idade de 0,87 Ga (Silva *et al* 2008). Na contraparte africana é representada por intrusivas, de composição granítica a gabroica, monzo-sienograníticas e granítica alcalina, e vulcânicas, de composição bimodal, básica e riolítica peralcalina, relacionadas a rifteamento continental.

Para as intrusivas, as idades variam entre 0,90 Ga a 0,87 Ga (Thieblemont *et al* 2011), para as vulcânicas (idades U–Pb (SHRIMP) variam entre 0,92 Ga e 0,91 Ga (Tack *et al.* 2001).

Também na Faixa Araçuaí, é registrado de forma indireta, por de zircões detríticos no Grupo Macaúbas, com idades entre 930 e 900 Ma (Pedrosa-Soares e Wiedemann-Leonardos 2000).

Na Faixa Brasília, na região do Arco Magmático de Góias e no Grupo Araxá. No Arco Magmático de Góias, ocorrem como metariolitos na parte basal da sequência vulcanossedimentar de Arenópolis (Pimentel e Fuck 1986), com registro de idade de 0,93 Ga (Pimentel *et al* 2000). No Grupo Araxá como anfíbolitos (Tupinambá *et al* 2007), com registro de idade de 0,96 Ga, esta porém com erro relativamente grande (Valeriano *et al* 2004).

#### 2.4.2.5 Magmatismo máfico e máfico-ultramáfico relacionado a ambiente de margem passiva do Criogeniano

Os magmatismos do Criogeniano são extrusivos, de composição básica e, de forma subordinada, básica-ultrabásica, registrados nos segmentos de faixa móvel, sem registros no domínio cratônico (Fig 9), associados a ambientes divergentes, relacionados á fragmentação do Paleocontinente, desenvolvimento de ambiente de margem passiva e formação de crosta oceânica (Pedrosa-Soares *et al* 1998, Heilbron e Machado 2003, Piuzana *et al* 2003, Queiroga 2010, Aracema 2010).

No domínio externo da Faixa Araçuaí, no seu extremo norte na Formação Ribeirão da Folha (Grupo Macaúbas) (Pedrosa Soares *et al* 1998), mais próximo ao limite com a Faixa Ribeira, na região de Santo Antônio do Grama (Queiroga 2010)

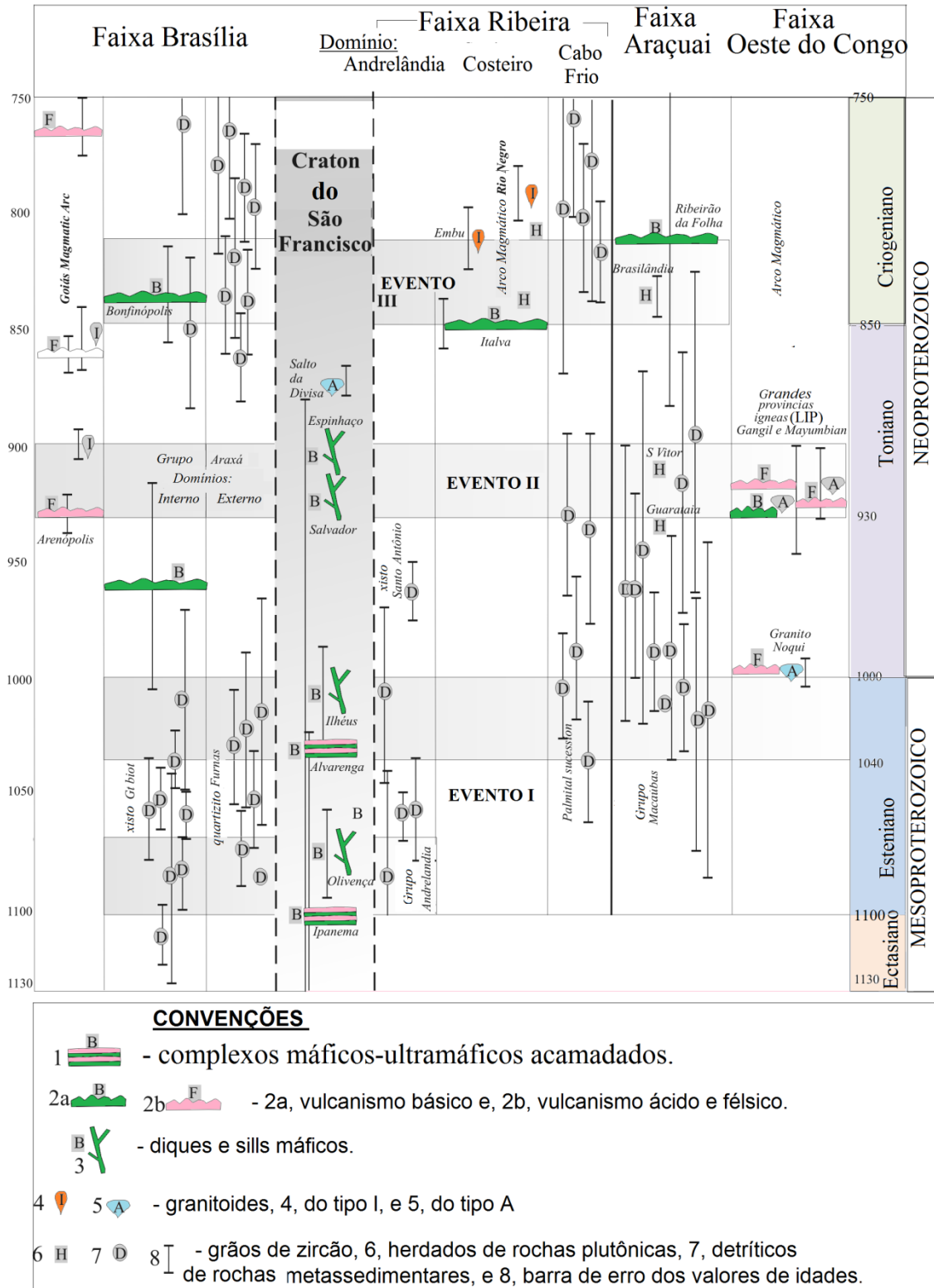
Na Formação Ribeirão da Folha é representado por intercalações de anfibolitos basálticos e de rochas ultramáficas, inseridas tectonicamente em meio à sua sequência deposicional, interpretados como parte superior de seção ofiolítica (Pedrosa-Soares *et al* 1998). A idade U-Pb em zircão de  $646 \pm 3$  Ma e de  $\epsilon_{Nd}$  de +5,1 (Queiroga 2010), obtido de pequenos corpos (creditados como) de plagiogranito oceânico, em meio a orto-anfibolitos (metadolerito a metagabro).

Na região de Santo Antônio do Grama, é representado por rochas básicas toleíticas de baixo-Ti (do tipo MORB). A idade U-Pb em zircão é de  $595 \pm 6$  Ma e idade modelo  $T_{DMNd}$  em torno de 0,9 Ga (Queiroga 2010).

Na Faixa Brasília são representados por tonalitos intrusivos e anfibolitos toleíticos (do tipo MORB), relacionados a magmatismo oceânico (Piuzana *et al* 2003).

No Terreno Oriental da Faixa Ribeira, na Klippe Italva, é descrito anfibolito com indicação de idade de cristalização de 0,85 Ga, também creditado como representante de crosta oceânica (Heilbron e Machado 2003).

Figura 9 – Idades dos principais eventos distensivos registrados no Cráton São Francisco e nas faixas Ribeira, Araçuaí e Brasília e Oeste do Congo, entre 1130 Ma (Período Esteniano) e 750 Ma (Período Criogeniano).



Fonte: Tupinambá *et al* (2007).