**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**
Faculdade de Geologia

Jefferson Lima Fernandes André

# O Complexo Juiz de Fora na região de Três Rios (RJ): litogeoquímica, geocronologia U-Pb (LA-ICPMS) e geoquímica isotópica de Nd

Rio de Janeiro
2009

Jefferson Lima Fernandes André

# O Complexo Juiz de Fora na região de Três Rios (RJ): litogeoquímica, geocronologia U-Pb (LA-ICPMS) e geoquímica isotópica de Nd

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Universidade do estado do Rio de Janeiro.

Orientadora: Profª. Drª. Claudia Sayão Valladares

Co-orientadora: Profª. Drª. Beatriz Paschoal Duarte

Rio de Janeiro

2009

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

A555 André, Jefferson Lima Fernandes.
O complexo Juiz de Fora na região de Três Rios (RJ) : litogeoquímica, geocronologia U-Pb (LA-ICPMS) e geoquímica isotópica de Nd.- 2009.
134 f. : il. color.

Orientadora: Claudia Sayão Valladares.
Co-orientadora: Beatriz Paschoal Duarte.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia.

1. Geoquímica - Teses. 2. Tempo geológico - Teses. 3. Três Rios (RJ) - Teses. 3. Petrologia – Teses. 4. Geoquímica – Isótopos - Teses. I. Valladares, Claudia Sayão. II. Duarte, Beatriz Paschoal. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 550.4

Jefferson Lima Fernandes André

**O Complexo Juiz de Fora na região de Três Rios (RJ): litogeoquímica, geocronologia U-Pb (LA-ICPMS) e geoquímica isotópica de Nd**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da Universidade do estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 24 de março de 2009.

Orientadores:

_____
Profª. Drª. Claudia Sayão Valladares (Orientadora)
Faculdade de Geologia da UERJ

_____
Profª. Drª. Beatriz Paschoal Duarte (Co-orientadora)
Faculdade de Geologia da UERJ

Banca Examinadora:

_____
Profª.Drª. Silvia Regina de Medeiros
Faculdade de Geologia da UERJ

_____
Prof. Dr. Julio Cezar Mendes
Departamento de Geologia da UFRJ

Rio de Janeiro

2009

## DEDICATÓRIA

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original”.

Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

Quando me ponho a refletir sobre esses dois anos sinto-me contente e bastante satisfeito, não apenas pela dissertação ou pelo conhecimento adquirido, mas por toda a experiência, pelo conjunto dessa história que não se reduz apenas a elaboração desse trabalho, pois o que foi vivido vai além do que está escrito nessa dissertação. Existe uma frase de Oscar Niemeyer em que ele diz: “Quando faço palestras para estudantes, digo que a arquitetura não é importante, o importante é a vida”, esse também é meu pensamento.

Agradeço de coração a minha orientadora Claudia pelos seus ensinamentos, pela dedicação e principalmente pela convivência.

Agradeço a minha co-orientadora Bia (Beatriz) que sempre esteve disposta a me ajudar e até mesmo a me orientar em certas ocasiões.

Ao Prof. Júlio C. H. de Almeida pela sua orientação no reconhecimento da geologia estrutural da área de estudo e principalmente pela ajuda na coleta de amostras para análise U-Pb em zircão em que também contou com a colaboração do bolsista Guilherme. Para não deixar passar, foram aproximadamente 60 Kg de “pedra” em algum dia do mês de janeiro de 2008 num calor tipicamente carioca.

Ao Prof. Zé Renato que me passou importantes informações para a análise petrográfica.

Aos funcionários do Laboratório de Preparação de Amostras (LGPA), Jorge, Miguel e principalmente a Rosalva que sempre foi muito atenciosa comigo.

Ao Gilberto do Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR) que foi muito paciente e atencioso, a Carla, estagiaria do LAGIR que também me ajudou muito.

Ao Prof. Júlio Mendes pela colaboração como meu leitor critico e por me disponibilizar o contador modal.

Ao Diogo e a Edna da secretaria da pós-graduação sempre dispostos a ajudar.

Aos funcionários do LET, Thiago, Bruno, Mário e Evânia que em nenhum momento me negaram ajuda, mesmo atrapalhando seus serviços.

Ao Fábio do Laboratório de Mineralogia que em muitas ocasiões esperava além do seu horário trabalho para eu pudesse terminar as descrições das lâminas.

A Gabriela e a Sheila, colegas da pós-graduação que me ajudaram quando eu precisei. A Natália, sempre alto astral, ao Rodson que sempre está disposto a ajudar e os outros colegas da pós pela convivência.

Ao Leo, meu parceiro e confidente de idéias nesses dois anos, agora professor. Grande Leo!

A FAPERJ por me contemplar com a bolsa de mestrado.

O CPRM que pelo PRONAGEO financiou esse trabalho.

A pós-graduação da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro por me fornecer condições necessárias para elaboração dessa dissertação.

E quero agradecer aos meus pais, Elizabeth Fernandes e Edmar Martins André, que mesmo pela ausência são pessoas importantes na minha vida e que torcem por mim.

Obrigado!!

Quando em uma situação de grande dificuldade o homem está próximo de perder a esperança é nesse momento que sua fé se renova.

Jefferson Lima Fernandes André

# RESUMO

André, Jefferson Lima Fernandes. *O Complexo Juiz de Fora na região de Três Rios (RJ)*: litogeoquímica, geocronologia U-Pb (LA-ICPMS) e geoquímica isotópica de Nd. 2009,134 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

O Complexo Juiz de Fora (CJF) na região de Três Rios (RJ) é constituído por uma ampla variedade composicional, tendo desde granitos, tonalitos a rochas de composição gabróica. Através da litogeoquímica pôde-se subdividir essa unidade em 4 conjuntos: (i) cálcioalcalino de alto-K, (ii) cálcioalcalino de médio-K, (iii) toleítico e (iv) alcalino. Pela análise geocronológica (LA-ICPMS, U-Pb) foi obtida a idade de 2,1Ga para o conjunto cácioalcalino de médio-K, duas idades neoproterozóicas (615.9 ± 6.4 Ma e 589.1 ± 5 Ma) foram datadas em um ortogranulito do conjunto toleítico, que foram interpretadas como sendo idades de metamorfismo. A idade modelo de Nd (˜ 2,37 Ga) e os dados de U-Pb e litogeoquímicos balizam a hipótese do conjunto cálcioalcalino de médio-K representar rochas de um arco magmático juvenil. A análise isotópica em conjunto com a litogeoquímica sugere que a série toleítica do CJF da região estudada foi gerada em ambiente de fundo oceânico, sendo diferenciada a partir de uma fonte depletada com alguma contribuição de uma fonte enriquecida.



Palavras-chave: Complexo Juiz de Fora. Três Rios. Litogeoquímica. Geocronologia U-Pb (LA-ICPMS). Geoquímica isotópica de Nd.

**ABSTRACT**

The Juiz de Fora Complex (JFC) in the region of Três Rios (Rio de Janeiro) is appointed by an ample variety composicional, having from granites, tonalite to rocks of composition basic. Through the lithogeochemistry it was possible to subdivide this unity in 4 associations: (i) calc-alkaline of high-K, (ii) calc-alkaline of medium-K, (iii) tholeiitic and (iv) alkaline. By the geochronological analysis(LA-ICPMS, U-Pb) was obtained the age of 2,1Ga for the calc-alkaline group of medium-K, two ages neoproterozoic (615.9 ± 6.4 Ma and 589.1 ± 5 Ma) were dated in an orthogranulite of the toleítico group, what they were interpreted like ages of metamorphism. The model age of Nd (≈ 2,37 Ga) and the data of U-Pb and lithogeochemical mark the hypothesis of the calc-alkaline group of middle-K represents rocks of a youthful magmatic arc. The isotópica together with the lithogeochemistry analysis suggests that the toleítica group of the CJF of the studied region were produced in environment of ocean extensional, being differentiated from a fountain depletada with some contribution of a rich fountain.

Keywords: Juiz de Fora Complex. Três Rios. Litogeochemistry. Geocronology U-Pb (LA_ICPMS). Isotopic Geochemistry of Nd.

## LISTA DE FIGURAS


| | | |
|---|---|---|
| **Figura. 1.1-** | **Mapa geológico simplificado do Orógeno Ribeira, extraído de Heilbron *et al*, 2004** | 2 |
| **Figura 1.2a** | **Mapa de articulação das folhas geológicas do PRONAGEO** | 3 |
| **Figura 1.2b** | **Mapa das vias de acesso da área de interesse, fonte:** http://209.15.138.224/brazil_maps/m_Regiao_Centro-Sul_Fluminensex.htm | 3 |
| **Figura 2.1** | **Fluxograma das etapas laboratoriais para análise U-Pb** | 14 |
| **Figura 2.2** | **Fluxograma das etapas laboratóriais finais para obtenção das razões Sm/Nd. Desde o depósito no filamento de Re até o espectrômetro de massa.** | 20 |
| **Fig. 3.1** | **Localização dos orógenos do Sistema Orogênico Mantiqueira no contexto do Gondwana Ocidental (modificado de Trompette, 1994). 1- Bacias fanerozóicas. 2- Coberturas cratônicas. 3- Orógenos neoproterozóicos (B- Brasília, A- Araçuaí, R- Ribeira, ZI- Zona de Interferência, AP- Apiaí, DF- Dom Feliciano). 4- Crátons neoproterozóicos (CSF- São Francisco, LA- Luis Alves, RP- Rio de La Plata). Na África localizam-se as faixas neoproterozóicas do Congo Ocidental (CO), Kaoko (K), Damara (D), Gariep (G) e Saldania (S), relacionadas aos crátons do Congo e Kalahar; fonte: Heilbron *et al*, 2004.** | 22 |
| **Figura. 3.2** | **Mapa tectônico do Segmento central do Sistema Orogênico Mantiqueira...** | 24 |
| **Figura 3.3** | **Seção estrutural composta do orógeno Ribeira com a relação entre os diferentes terrenos e domínios estruturais...** | 26 |
| **Figura. 4.1** | **Estereogramas de lineações e foliações do CJF na ZCPS.** | 40 |
| **Figura 4.2** | **Disposição do ortogranulitos /ortognaisses félsicos e intermediários no QAP de Streckeisen (1976).** | 48 |
| **Figura 5.1** | **Diagramas que determinam o grau de espilitização das rochas básicas da região de Três Rios, RJ: (a) Floyd, 1976; (b) Mullen, 1983. Legenda: rochas básicas .** | 64 |
| **Figura 5.2** | **Diagramas discriminantes das séries magmáticas. a) diagrama sílica x total de álcalis de Irvine & Baragar** | 66 |

1971; b) diagrama AFM com limite entre os campos toleítico e cálcioalcalino. Legenda: rochas básicas ●, intermediárias e ácidas ■.

Figura 5.3 Diagramas de classificação química para as rochas básicas: a) e b) Winchester & Floyd (1977). Legenda: série alcalina ○ e toleítica ●. 68

Figura 5.4 Diagramas utilizados para distinção de basaltos cálcio-alcalinos e toleíticos: a) Myashiro, 1974, FeO*/MgO x $SiO_2$; b) Middlemost, 1975 A.I (índice alcalico) x $Al_2O_3$. Legenda das amostras igual da figura 5.3. 69

Figura 5.5 Diagrama de classificação química de Le Maitre (1989). Legenda das amostras igual da figura 5.3; B: Basaltos, S1: Traquibasaltos e S2: Traquiandesitos basálticos. 70

Figura 5.6 (a) Diagrama classificatório para séries de baixo, médio e alto-K, Le Maitre 1989; b) Diagrama tipo Harker de $SiO_2$ x $K_2O$, para mostra as amostras que plotam acima da escala utilizada para Le Maitre (op cit). Legenda igual da figura 5.1. 71

Figura 5.7 Caráter metaluminosos dos ortogranulitos/ortognaisses cálcioalcalinos, diagrama de Maniar & Piccoli (1989). Legenda igual da figura 5.1. 72

Figura 5.8 Classificação química da série calcioalcalina (Middlemost 1985). 1-Álcali-feldspato sienito; 2 - Álcali-feldspato quartzo sienito; 3 - Álcali-feldspato granito; 4 – Sienito; 5 – Quartzo sienito; 6 – granito; 7 – Monzonito; 8 – Quartzo monzonito; 9 – Monzodiorito; 10 – Quartzo mozondiorito; 11 – Granodiorito; 12 – Diorito e gabro; 13 – Quartzo diorito; 14 – Tonalito. Legenda: série de alto-K ■, médio-K. 73

Figura 5.9 Diagramas de discriminação tectônica: a) Batchelor & Bowden 1985 e b) Pearce *et al*. 1984. Legenda: Legenda: série de alto-K ■, médio-K ■. 76

Figura 5.10 Diagramas discriminantes para rochas da série toleítica e alcalina: a) Pearce & Cann 1973, Meschede 1986 e c) Shervais 1982. Legenda: série alcalina ●, toleítica ◐ e amostra ECII-98-1-15A ◐. 77

Figura 5.11 Padrão de ETR para amostras do grupo I da série 81

cálcio-alcalina de alto K.

Figura 5.12 Padrão de ETR para amostras do grupo II da série cálcio-alcalina de alto K. 82

Figura 5.13 Padrão de ETR para amostras do grupo I da série cálcio-alcalina de médio K. 82

Figura 5.14 Padrão de ETR para amostras do grupo II da série cálcio-alcalina de médio K. 83

Figura 5.15 Padrão de ETR para amostras do grupo III da série cálcio-alcalina de médio K. 84

Figura 5.16 Padrão de ETR para amostras do grupo I da série toleítica. 85

Figura 5.17 Padrão de ETR para amostras do grupo II da série toleítica. 86

Figura 5.18 Padrão de ETR para amostra da série alcalina. 86

Figura 5.19 Padrão de ETR do grupo I da série cálcio-alcalina de alto-K com as amostras de alto-K do CJF de Dios (*op cit*) e de Duarte (*op cit*). 89

Figura 5.20 Padrão de ETR do grupo II da série cálcio-alcalina de alto-K e as amostras de alto-K do CJF de Duarte (*op cit*). 90

Figura 5.21 Padrão de ETR do grupo I da série cálcio-alcalina de médio-K e as amostras de médio–K do CJF de Duarte (*op cit*). 91

Figura 5.22 Padrão de ETR do grupo III da série de médio-K com as amostras de médio–K do CJF de Dios (*op cit*). 92

Figura 5.23 Padrão de ETR dos basaltos do grupo I da série toleítica do tipo E-MORB com as amostras toléiticas do CJF de Duarte (*op cit*). 93

Figura 5.24 Padrão de ETR dos basaltos do grupo II da série toleítica do tipo intraplaca com as amostras do CJF da série toleítica de Duarte (*op cit*) Dios (*op cit*). 94

Figura 6.1 Elipses dos grãos de zircão analisados da amostra TR-JEF-01C1, mostrando que os grãos são todos discordantes. 99

Figura 6.2a Diagrama das médias das idades $^{206}Pb/^{238}U$ (average 103

| | | |
|---|---|---|
| | **$^{206}Pb/^{238}U$ age) de 7 *spots* analisados em zircões da amostra TR-JEF-01.** | |
| **Figura 6.2b** | **Diagrama das médias das idades $^{206}Pb/^{238}U$ (average $^{206}Pb/^{238}U$ age) de 13 *spots* analisados em zircões da amostra TR-JEF-01.** | 104 |
| **Figura 7.1** | **Curva de evolução do manto depletado dos dois litotipos félsicos estudados do CJF da região de Três Rios.** | 113 |
| **Figura 7.2** | **Diagrama de $^{143}Nd/^{144}Nd$ X $^{87}Sr/^{86}Sr$ para as fontes mantélicas de Zindler e Hart (1986). Legenda: - TR-JEF-01.** | 117 |
| **Figura 7.3** | **a) Diagrama de $La/Sm_N$ *versus* Zr/Nb indicativo de mistura de magma na geração dos MORBs; b) Exemplo do diagrama retirado da literatura, onde se podem observar amostras plotando ao longo da curva de mistura de fontes de MORBs tipo P e N. Fonte: Wilson (1991). Legenda: - Amostra TR-JEF-01.** | 118 |
| **Figura 7.4** | **Injeção de "blobs" do reservatório mantélico enriquecido abaixo da cadeia oceânica. Modelo: Fast-spreading regime (Allègre *et al*., 1984). Fonte: Wilson (1991).** | 119 |

## LISTA DE FOTOS


| | | |
|---|---|---|
| **Foto 2.1** | ***Frantz* final diamagnético, amostra: (a) TR-JEF-1C1, (b)TR-JEF-01.** | 12 |
| **Foto 2.2** | **(a) Grãos de zircão dispostos em lâmina delgada (b) montagem dos grãos.** | 13 |
| **Foto 2.3** | **Superfície dos grãos de zircão após o polimento: (a) TR-JEF-01c1 (granulito félsico); (b) TR-JEF-01 (granulito máfico).** | 13 |
| **Foto 2.4** | **Bulbos da coluna primária para a coleta de Sr e REE.** | 17 |
| **Foto 2.5** | **Bulbos da coluna secundária para a coleta de Sm e Nd.** | 18 |
| **Foto 4.1** | **Afloramento dos ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora as margens do rio Paraíba do Sul. Ponto JA-17, sob a ponte na BR 116 que liga a cidade de Paraíba do Sul a Andrade Pinto.** | 41 |
| **Foto 4.2** | **Afloramento muito intemperizado das rochas do CJF na região Três Rios. Ponto ECII-98-I-15.** | 43 |
| **Foto 4.3** | **Relação de campo observada nos ortogranulitos do CJF na Pedreira Tabaiara: (a) Contato tectônico paralelo entre os litotipos máfico e félsico na zona de cisalhamento do rio Paraíba do Sul; (b) Relação de intrusão do litotipo félsico no máfico (Ponto TR-JEF-03).** | 44 |
| **Foto 4.4** | **Porfiroclásto de opx encontrado no litotipo félsico, na pedreira Tabaiara (ponto TR-JEF-O3).** | 45 |
| **Foto 4.5** | **(a) Cpx retrometamorfisando para hornblenda, lâmina TR-JEF-O1D (não utilizada na análise litogeoquímica); (b) retrometamorfimo nos grãos de opx, lâmina TR-JEF-03C.** | 46 |
| **Foto 4.6** | **(a) Matriz milonítica, grãos de quartzo e feldspato com faces poligonais, lâmina TR-JEF-01C1; (b) Ribbons de quartzo e feldspato, lâmina TR-JEF-03B.** | 47 |
| **Foto 4.7** | **Grãos de opx orientados e fraturados. Lâmina TR-JEF-01C (amostra não utilizada para análise litogeoquímica).** | 47 |
| **Foto 4.8** | **Aspectos mineralógicos e texturais das rochas de composição gabróicas. (a) e (b) Minerais máficos** | 52 |

| | | |
|---|---|---|
| | **orientados (lâminas TR-JEF-01 e JA-17-JEFB) e (c) grãos de plagioclásio com e sem geminação (lâmina TR-JEF-01).** | |
| **Foto 4.9** | **Lâmina ECII-98-I-15A. a) Visão geral da rocha; b) grãos de opx, hornblenda e biotita. Retrometamorfismo pode-se evidenciado pela formação da biotita a partir da hornblenda; c) grão de quartzo no centro; d) vários grãos de plagioclásio com e sem geminação.** | 53 |
| **Foto 4.10** | **Lâmina JA-17-JEFD. a) Visão geral da rocha; (b) quartzo, grãos sem fraturas; (c) grãos de microclina geminados; (d) biotita com forte plecroísmo e orientados; (e) muscovita formada a partir da microclina.** | 54 |
| **Foto 4.11** | **(a) Textura milonítica (lâmina TR-JEF-03B); b) grão de quartzo com faces poligonais (lâmina TR-JEF-04C); c) retrometamorfismo nos grãos de opx (lâmina TR-JEF-03C); d) grãos de K-feldspato alterando através da clivagem.** | 55 |
| **Foto 4.12** | **(a) textura encontrada em ambas as amostras; b) grão de opx (lâmina TR-JEF-03B); c) grãos de microclina geminadas, encontradas na lâmina TR-JEF-04A.** | 56 |
| **Foto 4.13** | **Lâmina JA-17-JEFC. (a) grãos de microclina; b) muscovita retrometamórfica; c) hornblenda alterando para biotita; d) granada (nicol cruzado).** | 57 |
| **Foto 6.1** | **Montagem dos grãos de zircão selecionados da amostra TR-JEF-01C1. A foto 6.1b mostra grãos de uma montagem anterior que foram aproveitados, os outros grãos foram perdidos no polimento.** | 98 |
| **Foto 6.2** | **Detalhes dos grãos Z1 (a) e Z4 (b) da amostra TR-JEF-01C1.** | 100 |
| **Foto 6.3** | **Grãos de zircão da amostra TR-JEF-01 selecionados para análise U-Pb (LA-ICPMS).** | 102 |

## LISTA DE TABELAS


| | | |
|---|---|---|
| **Tabela 3.1** | **Compartimentação tectônica da Orógeno Ribeira segundo Heilbron *et al*., 2004.** | 23 |
| **Tabela 3.2** | **Resumo dos dados geocronológicos acima apresentados.** | 37 |
| **Tabela 4.1** | **Ângulo de obliqüidade da lineação (Ln) na Foliação (Sn) da Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul.** | 42 |
| **Tabela 4.2** | **Dados modais das amostras estudadas nessa dissertação.** | 49 |
| **Tabela 4.3** | **Paragênese metamórfica do CJF (Duarte et al., 1997): OPX – ortopiroxênio; CPX – clinopiroxênio; HBL – hornblenda; BIO – biotita; PLAG – plagioclásio; QZ – quartzo; GRA – granada; ORT- ortoclásio.** | 50 |
| **Tabela 4.4** | **Mineralogia simplificada dos granulitos do CJF, subdivididos pelos grupos geoquímicos (retirado de Heilbron et al. 1997): OPX – ortopiroxênio; CPX – clinopiroxênio; HBL – hornblenda; BIO – biotita; PLAG – plagioclásio; QZ – quartzo; KF – álcali-feldspato; ZIR – zircão; AP – apatita; GRA – granada; OP- minerais opacos.** | 51 |
| **Tabela 5.1a** | **Composição química dos elementos maiores em % peso das amostras utilizadas para litogeoquímica.** | 59 |
| **Tabela 5.1b** | **Composição dos elementos traços em ppm das amostras utilizadas para litogeoquímica.** | 60 |
| **Tabela 5.1c** | **Composição dos elementos traços em ppm das amostras utilizadas para litogeoquímica.** | 61 |
| **Tabela 5.1d** | **Composição dos elementos terras raras em ppm das amostras utilizadas para litogeoquímica.** | 62 |
| **Tabela 5.2** | **Norma CIPW para as rochas básicas, valores estão expressos em %peso. As siglas para os minerais normativos; Q=Quartzo, Z=Zircão, Or=Ortoclásio, Ab=Albita, An= Anortita, Ne= Nefelina, Di=Diopsídio, Hy=Hiperstênio, Ol= Olivina, Mt=Magnetita, Cm= Cromita, Il- Ilmenita e Ap=Apatita.** | 67 |

| | | |
|---|---|---|
| **Tabela 5.3** | **Comparação da classificação adotada em campo com a classificação litogeoquímica e modal para as rochas do CJF na região de Três Rios.** | 74 |
| **Tabela 5.4** | **Relação das amostras de cada suíte magmática com os valores normalizados da razão La/Yb para o condrito de Boynton (1984).** | 79 |
| **Tabela 5.5** | **Razões $La/Yb_N$ normalizados para o condrito de Boynton (1984) para basaltos de diversos ambientes. Fonte: Wilson (1991).** | 80 |
| **Tabela 5.6** | **Razões $La/Yb_N$ das amostras do CJF de Duarte (1998) e Dios (1995) das séries cálcio-alcalinas de médio e alto-K.** | 88 |
| **Tabela 5.7** | **Razões $La/Yb_N$ das amostras do CJF da série toleítica de Duarte (1998) e Dios (1995).** | 92 |
| **Tabela 6.1** | **Resultados obtidos da análise U-Pb (LA-ICPMS) em zircão do ortogranulito félsico do CJF da Região de Três Rios** | 101 |
| **Tabela 6.2** | **Resultados obtidos da análise U-Pb (LA-ICPMS) em zircão do ortogranulito máfico do CJF da Região de Três Rios.** | 105 |
| **Tabela 7.1** | **Concentrações médias de Samário e Neodímio em materiais geológicos terrestres (Faure, 1986).** | 109 |
| **Tabela 7.2** | **Resultados da análise Sm-Nd nos ortogranulitos de composição félsica do CJF na região de Três Rios (RJ).** | 112 |
| **Tabela 7.3** | **Resultados da análise Sm-Nd do ortogranulito de composição básica do CJF na região de Três Rios (RJ).** | 112 |
| **Tabela 7.4** | **Razões isotópicas de reservatórios mantélicos (Zindler e Hart, 1986 e Hart, 1988). Fonte Faure (1986).** | 115 |
| **Tabela 7.5** | **Valores das razões isotópicas $^{143}Nd/^{144}Nd$ e $^{87}Sr/^{86}Sr$ medidas, calculada para a idade de 2,4Ga e para o CHUR, e os respectivos ε.** | 116 |
| **Tabela 7.6** | **Abundancia da razão Sr/Rb para MORBs Normais e de Pluma. Fonte: Wilson (1991).** | 116 |
| **Tabela 8.1** | **Evolução geológica para o Complexo Juiz de Fora na região de Três Rios (RJ) proposta neste trabalho.** | 124 |

**SUMÁRIO**

Capitulo I ..... 1
1-Introdução ..... 1
1.1-Localização ..... 1
1.2-Caracterização do Problema ..... 4
1.3-Objetivo ..... 5
Capítulo II ..... 6
2-Método de Trabalho ..... 6
2.1-Seleção de Amostras ..... 7
2.2 - Preparações das Amostras para Litogeoquímica ..... 7
2.2.1 - Manipulação dos Dados Geoquímicos ..... 8
2.3 – Preparação de amostras para a analise geocronológica ..... 9
2.3.1-Preparação para análise geocronológica U-Pb em Zircão ..... 9
2.3.1.1-Coleta de amostra ..... 9
2.3.1.2-Separação dos grãos de Zircão ..... 10
2.4 - Preparação das amostras para Sm-Nd ..... 15
2.4.1 - Procedimentos para Digestão de Amostras no LAGIR ..... 15
Ataque Químico I ..... 15
Ataque Químico II ..... 15
Ataque Química III ..... 15
2.4.2 - Procedimento para a Coleta do Sm/Nd ..... 16
Coleta de Sr e REE na Coluna Primária ..... 16
Coleta de Sm e Nd na Coluna Secudária ..... 17
2.5.3 – Depósito de Sm e Nd ..... 19
Capitulo III ..... 21
3-Contexto geológico ..... 21
3.1 Magmatismo Neoproterozóico ..... 29
3.2-Metamorfismo Regional ..... 31
3.3-Geologia Estrutural ..... 32
3.4- Complexo Juiz de Fora... ..... 34
3.4.1 - Geoquímica ..... 35
3.4.2 - Geocronologia ..... 36
3.4.3 - Metamorfismo do Complexo Juiz de Fora ..... 38
Capitulo IV ..... 39

4-Geologia Local ..... ...39
4.1 – Dados de Campo ..... .....39
4.2 - Petrografia ..... 46
Capítulo V..... 58
5 – Litogeoquímica ..... 58
5.1 – Investigação sobre os possíveis processos de alteração de fundo oceânico..... 58
5.2 - Discriminação das Séries Magmáticas e Classificação Geoquímica .... 65
5.2.1 - Geoquímica dos ortogranulitos básicos..... 66
5.2.2 - Geoquímica dos Ortogranulitos/Ortognaisses Intermediários e Ácidos ..... 70
5.3 – Ambientes Geotectônicos ..... 75
5.3.1 – Ortogranulitos/Ortognaisses da Série Cálcioalcalina ..... 75
5.3.2 – Ortogranulitos das Séries Toleítica e Alcalina ..... 76
5.4 - Estudo Petrogenético com Base em Elementos Terras Raras (ETRs). 78
5.5 – Comparação dos Dados Litogeoquímicos dessa Dissertação com os Dados Encontrados na Literatura sobre o Complexo Juiz de Fora ..... 87
5.5.1 – Comparação entre os Ortogranulitos/Ortognaisses das Séries de Cálcio-alcalinas..... 89
5.5.2 – Comparação entre as séries de Toleíticas..... 92
5.6 – Discussão dos Dados Obtidos ..... 95
Capítulo VI..... 96
6- Geocronologia U-Pb..... 96
6.1 - Amostra TR-JEF-01C1 ..... 97
6.1.1 - Resultados obtidos ..... 99
6.2 - Amostra TR-JEF-01 ..... 102
6.2.1 - Resultados obtidos ..... 103
6.3 - Discussão dos Dados Obtidos ..... 106
Capítulo VII..... 108
7 – Geoquímica Isotópica de Sr e Nd..... 108
7.1 – Geoquímica do sistema isotópico Sm-Nd ..... 108
7.2 – Evolução do Sistema Isotópico Sm/Nd na Terra e Idade Modelo. ..... 109
7.3 - Resultados Obtidos..... 111
7.4 – Discussão dos Resultados ..... 113

7.5 – Determinação de Fonte a partir dos dados isotópicos de Sr e Nd. ..... .....114

7.6 – Discussão dos Resultados ..... ....116

Capítulo VIII..... .....120

8 – Considerações Finais ..... .....120

8.1 – Evolução Geológica para o Complexo Juiz de Fora na região de Três Rios (RJ) ..... .....122

Referências Bibliográficas..... 125

Anexo I – Tabela de Pontos

Anexo II – Mapa geológico e de Localização de Pontos

# Capitulo I

## 1-Introdução

O projeto apresentado visa recuperar a história geológica de ortogranulitos encontrados na região de Três Rios que segundo Heilbron *et al*. 2004, são relacionados ao Complexo Juiz de Fora (CJF). Para isso foram realizados estudos de litogeoquímica, geocronologia U-Pb e geoquímica isotópica de Nd.

A motivação para a realização desta dissertação se baseia no fato de que, mesmo sendo a área de estudo considerada parte do embasamento Paleoproterozóico (Complexo Juiz de Fora) por Heilbron *et al*, 2004, ainda não existiam dados litogeoquímicos e geocronológicos que substanciassem essa interpretação.

As rochas estudadas se posicionam em uma zona de cisalhamento gerada nos estágios finais da formação do orógeno Ribeira, conhecida como lineamento de Além Paraíba (Almeida *et al*. 1975) ou zona de cisalhamento do Rio Paraíba do Sul (Dayan e Keller 1989). Por terem sido totalmente deformadas, as relações de campo foram deterioradas, o que dificulta o entendimento das relações de contato dos litotipos estudados. Utilizando litogeoquímica, geocronologia e também a petrografia espera-se entender a relação entre os litotipos estudados e com os ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora do Domínio Juiz de Fora norte (Valladares *et al*., 2008). O estudo visa também correlacionar e comparar aos resultados geoquímicos e geocronológicos publicados para os ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora ao norte do Terreno Paraíba do Sul.

### 1.1-Localização

A localização da unidade litoestratigráfica de interesse é mostrada no mapa geológico simplificado do orógeno Ribeira (Heilbron *et al*., 2004 – Figura 1.1). Esta unidade (Complexo Juiz de Fora), na região de Três Rios está posicionada exatamente na Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul (Dayan & e Keller 1989).

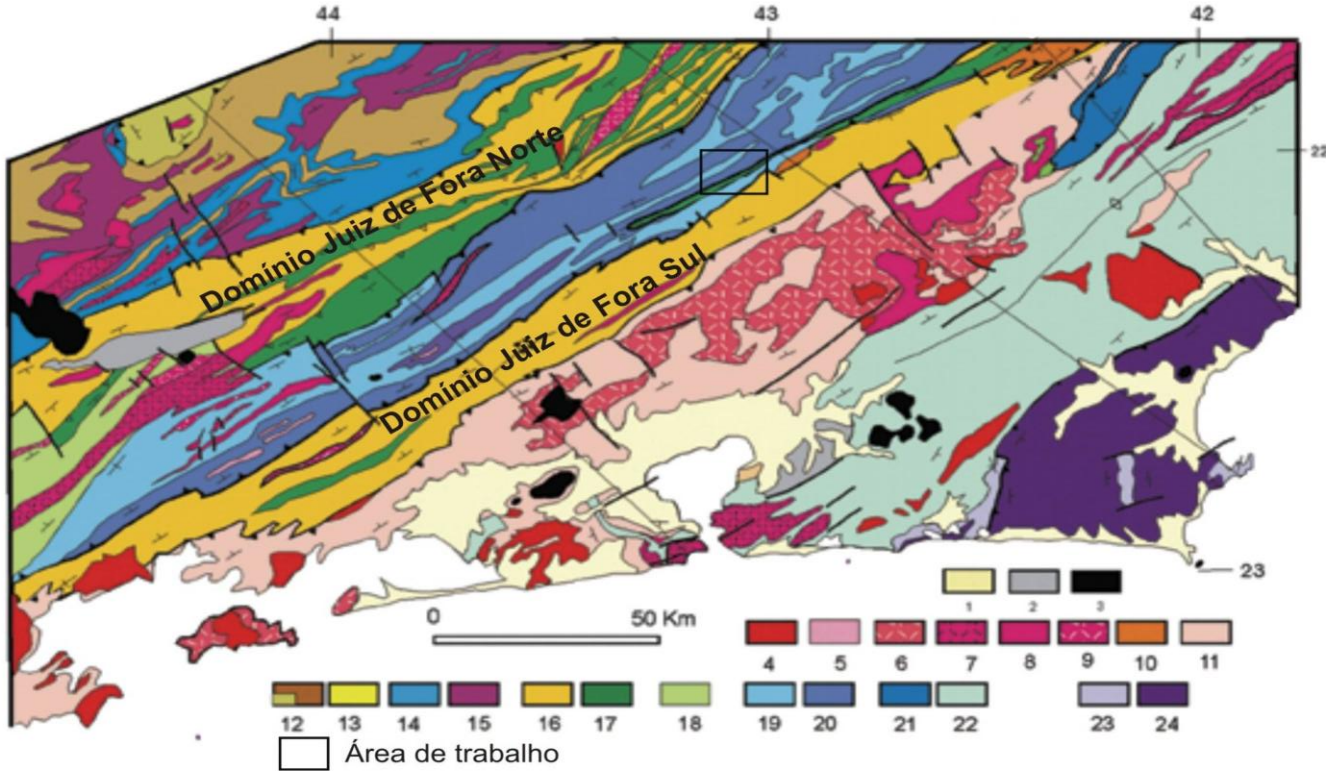


**Fig. 1.1- Mapa geológico simplificado do Orógeno Ribeira, extraído de Heilbron *et al* , 2004. Legenda 1-Sedimentos quaternários, 2- Sedimentos terciários, 3-Rochas alcalinas cretáceas/terciárias, 4-Granitóide Brasilianos sin a pós-colisionais (4-9)- 4-Biotita granitos pós-colisionais (510-480 Ma, G5), 5-Granitos contemporâneos às ZCs D3 (535-520 Ma,G4), 6-granitos e charnockitos tardi-colisionais (*ca.* 560 Ma, G3); 7-Granitos porfiróides sin-colisionais (590-560 Ma); 8-Leucogranitos e charnockitos tipo S ou híbridos sin-colisionais (*ca.* 580 Ma, G2); granitóides com idade indeterminada (9-10): 9-Hornblenda granito gnaisse; 10-Suítes Anta e São Primo; 11-Arco magmático Rio Negro (790-620 Ma); Terreno Ocidental (12-17): Megasseqüência Andrelândia (12-14): 12-Seqüência Rio do Turvo em facies granulito de alta P; 13-Seqüência Rio do Turvo; 14-Seqüência Carrancas; 15-Complexo Mantiqueira; 16-Facies distais da Megasseqüência Andrelândia no Domínio Juiz de Fora; 17-Complexo Juiz de Fora; 18-Complexo Embu indiviso; Terreno Paraíba do Sul (19-20): 19- Grupo Paraíba do Sul; 20-Complexo Quirino; Terreno Oriental (21-22): 21-Sucessão metassedimentar Italva; 22-Sucessão metassedimentar Costeiro; Terreno Cabo Frio (23-24): 23-Sucessão Búzios e Palmital; 24-Complexo Região dos Lagos. 25 -Localização da área de estudo no mapa da Orógeno Ribeira**

**Figura 1.2a – Mapa de articulação das folhas geológicas do PRONAGEO. Legenda:**

**Folha Três Rios 1:100000**

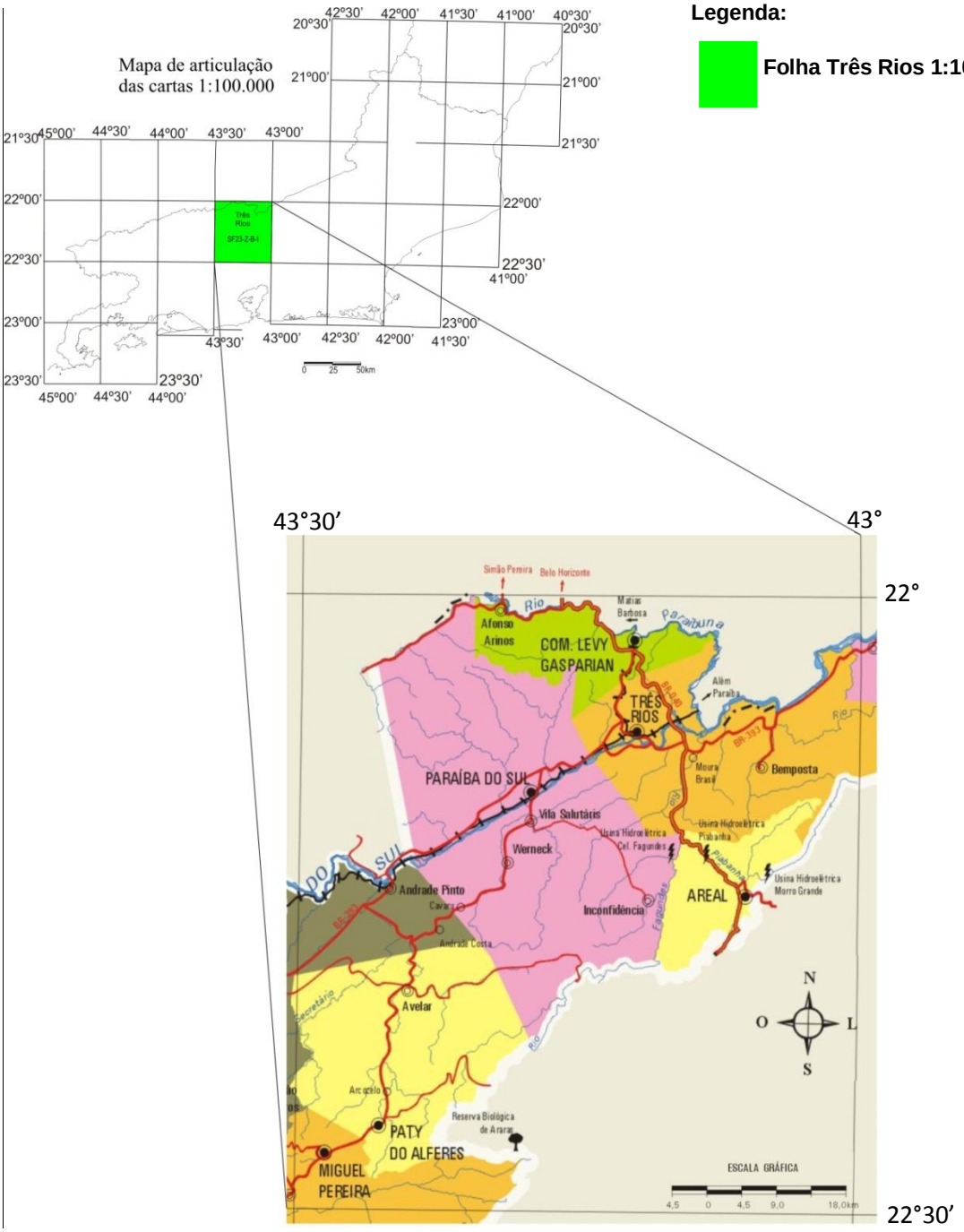


**Figura 1.2b – Mapa das vias de acesso da área de interesse, fonte:**

http://209.15.138.224/brazil_maps/m_Regiao_Centro-Sul_Fluminensex.htm

A área está localizada em sua maior expressão a norte da Folha Três Rios (1:50000) e em uma área menos expressiva a sudeste da Folha Paraíba do Sul (1:50000), aflorando próximo ao rio Paraíba do Sul entre os paralelos 22º00' e 22º

30’, e os meridianos 43º00’ e 43º30’. A área é acessada através da BR-393 e pela BR-040 que liga Rio de Janeiro a Belo Horizonte como mostra Figura 1.2.

A área de trabalho escolhida corresponde aos limites da folha Três Rios 1:100000 (SF-23-Z-B-I), umas das folhas geológicas escolhidas pela equipe do TEKTOS-UERJ para o Programa PRONAGEO (Programa de geologia do Brasil), que subsidia o projeto. O PRONAGEO é financiado pelo Ministério de Minas e Energia e coordenado pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Figura 1.2a e b).

## 1.2-Caracterização do Problema

O Complexo Juiz de Fora ocorre em grande parte em fácies granulito (Oliveira, 1982; Grossi Sad e Barbosa, 1985; Duarte *et al.*, 1997; Heilbron *et al.*, 1997, 1998). Segundo Duarte (1998), as temperaturas encontradas são superiores a 700-750ºC. As avaliações de dados isotópicos indicam idades Paleoproterozóicas entre 2,22 e 1,70 Ga (idades U-Pb em zircão, idades modelos Nd $T_{DM}$; Machado *et al.*, 1996; Fischel *et al*., 1998; Heilbron *et al*., 2001) para os protólitos dos ortognaisses metamorfisados em pressão e temperatura de fácies granulito.

Os dados geoquímicos balizam as hipóteses de que a composição dos protólitos dos granulitos não foi modificada durante os processos metamórficos sugerindo três diferentes grupos petrotectônicos: granulitos cálcio-alcalinos resultantes de uma convergência tectônica, com rochas relacionadas a arcos pré-colisionais e granitos sin-colisionais; rochas básicas alcalinas típicas de magmatismo continental intraplaca; e um grupo toleítico heterogêneo que sugere a ocorrência de um evento tectônico severo, com bacias de *back-arc*, intraplaca continental e basaltos do tipo MORB (Duarte *et al.*, 1997).

Os estudos petrológicos efetuados até o momento no Complexo Juiz de Fora baseados em dados de litogeoquímica, geocronologia e química mineral restringem-se aos ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora aflorantes ao norte do Terreno Paraíba do Sul, que denominaremos de Domínio Juiz de Fora Norte. Dios (1995) investigou, em uma área ao sul do Terreno Paraíba do Sul na região de Mangaratiba (RJ), granulitos denominados de Unidade Ponte de Zinco, que foram relacionados

petrográfica e geoquímicamente aos Ortogranulitos do CJF. No entanto, não há ainda investigação geocronológica ou de geotermobarometria efetuada nos ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora aflorantes ao sul do Terreno Paraíba do Sul, denominado de Domínio Juiz de Fora Sul por Valladares *et al*. (2008). Dados de geocronologia $^{207}Pb/^{206}Pb$ (LA-ICPMS em zircão) de quartzitos em fácies granulito do Terreno Ocidental, Domínio Juiz de Fora Sul, publicados recentemente, indicam grande dispersão das idades do Paleoproterozóico para o Brasiliano. Esta dispersão foi interpretada pelos autores como ocasionada provavelmente por metamorfismo brasiliano em temperaturas superiores às alcançadas no Domínio Tectônico Juiz de Fora Norte (Valladares *et al.*, 2008). No entanto, a existência de fontes mais jovens que Paleoproterozóicas não pode ser descartada. O estudo petrológico nos ortogranulitos do Domínio Tectônico Juiz de Fora Sul pretende dar subsídios para resolver parte destas questões.

## 1.3-Objetivo

O presente trabalho se baseará na utilização da geoquímica e geocronologia (U-Pb), idade modelo Sm-Nd e geoquímica isotópica de Nd dos ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora na região de Três Rios, com o intuito de entender sua evolução. O estudo visa, por outro lado, correlacionar e comparar aos resultados geoquímicos e geocronológicos obtidos com aqueles publicados para os ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora no Domínio Tectônico Juiz de Fora Norte e auxiliar no entendimento da evolução tectônica do orógeno Ribeira.

Objetivos específicos deste projeto incluem os seguintes itens:

1. Produzir e interpretar dados de campo, petrográficos, litogeoquímicos (elementos maiores e traço, incluindo elementos terras-raras), geocronológicos (U-Pb), idade modelo (Sm-Nd) e geoquímica isotópica (Nd) para as rochas ortogranulíticas do Complexo Juiz de Fora, Domínio Tectônico Juiz de Fora Sul.
2. Elaboração de um modelo de evolução petrológica para as rochas ortogranulíticas do Complexo Juiz de Fora, Domínio Tectônico Juiz de Fora Sul.

# Capítulo II

## 2-Método de Trabalho

Para alcançar os objetivos previstos, foi proposto um método de trabalho que inclui ferramentas diversas e realização das seguintes atividades:

**1)** Levantamento e análise do material bibliográfico existente sobre temas afins à pesquisa;

**2)** Seleção dos pontos de coleta de amostras para litogeoquímica a partir da análise petrográfica de lâminas delgadas do TEKTOS, provenientes dos estágios de campo de 1997 e 1998. Nessa etapa foram selecionados pontos que apresentaram paragênese característica de fácies granulito.

**3)** Incursão ao campo para coleta de amostras para geoquímica isotópica de Nd, litogeoquímica e geocronologia U-Pb;

**4)** Preparação de amostras para geocronologia U-Pb, incluindo separação, seleção e montagem dos grãos de zircão;

**5)** Análises petrográficas-petrológicas das amostras laminadas e seleção das amostras para análises litogeoquímicas;

**6)** Preparação das amostras para litogeoquímica com identificação de rocha total e geoquímica isotópica de Nd;

**7)** Tratamento dos dados litogeoquímicos com identificação das suítes magmáticas que compõem o Complexo Juiz de Fora no Domínio Tectônico Juiz de Fora Sul;

**8)** Obtenção, tratamento e interpretação dos dados geocronológicos e determinação das idades de: a) diferentes suítes identificadas do Complexo Juiz de Fora; b) idades de metamorfismo;

**9)** Tratamento e interpretação dos dados isotópicos de Nd

**10)** Elaboração do documento final da dissertação.

## 2.1-Seleção de Amostras

Mapeamentos geológicos realizados pelo grupo TEKTOS da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (FGEL/UERJ) no orógeno Ribeira (Heilbron *et al*., 2004) geraram um grande acervo de dados, como informações sobre os afloramentos, mapas de pontos, um acervo de lâminas delgadas e amostras de mão e mapas geológicos, inclusive da região de Três Rios.

Através dessa base de dados foram selecionados pontos estratégicos para a coleta de amostras. Esses pontos mostram a paragênese típica de fácies granulito (opx ou cpx +granada + quartzo) e estão indicados no mapa de pontos em anexo.

Dentre as 25 lâminas examinadas do acervo existente referentes aos ortogranulitos do CJF, apenas sete lâminas apresentaram paragênese de fácies característica. A falta da paragênese diagnostica de fácies granulito na área de estudo está certamente relacionada às condições de retrometamorfismo que estas rochas foram submetidas pelo desenvolvimento da Zona de Cisalhamento do Rio Paraíba do Sul durante o evento Brasiliano.

## 2.2 - Preparações das Amostras para Litogeoquímica

Após a escolha dos pontos de interesse e ao campo para amostragem, as amostras foram processadas no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras da UERJ (LGPA). Esta etapa consistiu:

a) Fragmentação das amostras com marreta, cobrindo as mesmas com papel virgem para evitar qualquer superfície de contato com a marreta e com a bigorna. O intuito dessa etapa era de fragmentar a amostra para em seguida ser moída no moinho de bolas, além de eliminar partes da rocha como capa de alteração, veios e bandas não pertencentes ao litotipo de interesse.

b) Depois da fragmentação a amostra foi lavada com água destilada e levada para secagem em temperatura ambiente durante um dia.

c) Em seguida as frações foram moídas no moinho de bolas durante 25 minutos, para que fossem reduzidas a pó. Durante esse processo a amostra foi colocada num cadinho de Tungstênio, que antes da moagem principal era limpo com quartzo e com pequenas quantidades dos fragmentos da própria

amostra. Este procedimento é necessário para evitar contaminação de amostras processadas anteriormente. O material processado era descartado

d) Após a moagem, as amostras foram armazenadas em dois potes de acrílico de 10 g cada, que foram devidamente identificados.

No total, foram analisadas 18 amostras. As análises foram realizadas no *Activation Laboratories Ltd – ACTLABS* – Canadá. Os dados foram obtidos a partir do método de fusão das amostras para análise de elementos maiores por ICP/AES e de elementos traços e ETRs por ICP/MS.

Algumas amostras do acervo da FGEL/UERJ que estavam armazenadas na litoteca do LGPA foram aproveitadas para complementar a análise litogeoquímica, são elas: ECII-98-I-10, ECII-98-IV-50, ECII-97-I-10F e ECII-97-III-11.

### 2.2.1 - Manipulação dos Dados Geoquímicos

Segundo os resultados da análise, das 18 amostras analisadas 8 são caracterizadas como rochas ácidas, 4 intermediárias e 6 como rochas básicas. A tabela dos resultados estará disponível no capítulo de litogeoquímica. As amostras estão posicionadas na tabela em ordem decrescente de $SiO_2$.

Na análise dos resultados, observa-se que a soma total dos óxidos está entre 98% e 101% peso, além do LOI (LOSS on IGNITION ou perda ao fogo) não ultrapassar 2%. Estes resultados asseguram a boa qualidade dos dados e descarta as possibilidades de alteração da amostra, contaminação e possíveis erros analíticos.

Os dados foram estocados e manipulados no programa NEWPET, que permite ampla aplicação destes dados para o estudo litogeoquímico, pois possui diversos diagramas dos mais conceituados autores.

Considerando a grande complexidade que os terrenos de alto grau apresentam no reconhecimento das relações litológicas originais, a correta avaliação e a interpretação dos dados litogeoquímicos vêm auxiliar e ampliar a qualidade da informação de campo, permitindo, inclusive, a definição do ambiente de formação das rochas e a definição de possíveis suítes cogenéticas dentre os conjuntos litológicos identificados.

## 2.3 – Preparação de amostras para a analise geocronológica

A analise geocronológica se baseará nos métodos U-Pb (LA-ICPMS) e Sm-Nd para os ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora na região do Domínio Juiz de Fora Sul, Folha Três Rios, 1: 100.000. Este dados associados aos dados de campo e litogeoquímicos, contribuirão para o melhor compreensão da origem dos conjuntos investigados.

### 2.3.1-Preparação para análise geocronológica U-Pb em Zircão

O zircão é dito como “mineral acessório”, ou seja, não formador de rocha, estando sempre em proporções inferiores a 10%, seja em rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares (nesse caso como mineral da área fonte), sendo que, em determinadas condições de formação pode estar até mesmo ausente. Essa baixa concentração exige uma boa quantidade de amostragem, cerca de 20 a 30 Kg para cada litotipo.

Além dessa exigência na coleta de amostras, são necessárias várias etapas laboratoriais para obter o concentrado de zircão.

#### 2.3.1.1-Coleta de amostra

No campo foram distinguidas três composições para os ortogranulitos do CJF: máfico, félsico e intermediário. Desses, apenas os tipos máfico (amostra, TR-JEF-01) e félsico (amostra, TR-JEF-01c1) serão analisados, sendo coletados 30 e 20 Kg, respectivamente.

Vale destacar que houve a preocupação em se coletar amostras num afloramento que é bastante visitado por pesquisadores do orógeno Ribeira devido ao seu fácil acesso (ponto TR-JEF-01, vide a tabela de pontos), localizado no km 19 na rodovia 040, sentido Rio de Janeiro, próximo a ponte sobre o rio Paraíba do Sul.

Na amostragem procurou-se coletar amostras mais homogêneas, sem injeções de veios e não intemperizadas.

As amostras foram fragmentadas manualmente no campo por marretas e armazenadas em sacos plásticos, sendo eles devidamente identificados.

O processo de fragmentação se fez necessário devido ao processo de britagem, etapa seguinte de separação dos grãos de zircão, pois o britador de

mandíbulas é incapaz de triturar amostras de grandes dimensões e, além disso, esta etapa no campo facilita o transporte das amostras coletadas.

#### 2.3.1.2-Separação dos grãos de Zircão

Esta etapa foi realizada no Laboratório Geológico de Processamento de Amostras da UERJ (LGPA), constituído de:

a) britagem dos fragmentos de rochas pelo britador de mandíbulas, seguidos pelo moinho de discos onde são pulverizados até atingirem a granulometria entre 10 a 300 mícron. Antes do processamento de cada amostra, o britador de mandíbulas e o moinho de disco eram montados, sendo cada peça limpa com compressor de ar para evitar contaminação e depois de utilizados, eram desmontados e cuidadosamente limpos, com água, esponja, detergente e compressor de ar.

b) Depois de moídas as amostras passaram pelo processo de bateamento em água corrente, onde os minerais pesados (concentrados de bateia) foram separados dos minerais leves (rejeito). O bateamento exige certa atenção e habilidade, pois o risco de haver perda de material é muito grande, por isso viu-se necessário fazer um pré-bateamento, para só depois, encontrar o concentrado final. O concentrado foi colocado numa estufa para secagem e o rejeito foi armazenado em sacos plásticos. Nessa etapa todos os utensílios como bacia, caneca, Becker e até mesmo a própria bateia foram devidamente limpos, antes e depois do bateamento de cada amostra.

c) Após a secagem, o concentrado foi submetido à separação magnética por imã de mão comum, para a retirada da magnetita (fração ferromagnética), bem como possíveis partículas de metal das placas do britador de mandíbulas e do moinho de disco, em seguida armazenados.

d) Depois o concentrado foi filtrado utilizando um funil de vidro onde a abertura inferior foi lacrada para impedir o escape do Bromorfómio ($CHBr_3$), despejado nesse recipiente. Bromorfómio é um liquido de alta densidade, que serve para a separação de minerais menos densos (em suspensão) que possam existir, dos minerais pesados (depositados no fundo do recipiente). Depois da

filtragem, os minerais pesados foram levados a estufa para nova secagem, os minerais leves foram armazenados.

O objetivo de todas as etapas descritas até agora é o de se alcançar um concentrado de minerais de alta densidade, como o zircão. A etapa seguinte servirá para a separação de minerais com propriedades magnéticas (paramagnéticos) de minerais ausentes de magnetismo (diamagnéticos), por exemplo, o zircão. Para isso, o concentrado foi submetido a várias sessões no separador magnético *Frantz*, etapa descrita a seguir.

O processamento das amostras no *Frantz* resultou em duas frações de magnetismo decrescente, $F_I$ (*Frantz* Inicial) e $F_F$ (*Frantz* Final), de acordo com as combinações entre a inclinação da canaleta do *Frantz* e a variação da amperagem. $F_I$ foi obtido com uma inclinação de 10º na canaleta e variação de amperagens de 0.2, 0.5, 0.75, 1.00 e 1.5 A, separando assim os minerais com maior propriedade magnética. No *Frantz* final, ocorreu a separação dos grãos de zircão com leve magnetismo (devido, por exemplo, a inclusões de magnetita), além de minerais como pirita e grãos sem propriedades magnéticas (diamagnéticos). Para isso manteve-se a amperagem de 1,5 A e a inclinação da canaleta foi reduzida a cada sessão, para os ângulos de 5º, 3º, 1º e 0.5º. Todas as frações foram guardadas em pequenos frascos plástico e devidamente identificadas. Observe os grãos de zircão obtidos após todos os processos descritos (Foto 2.1).

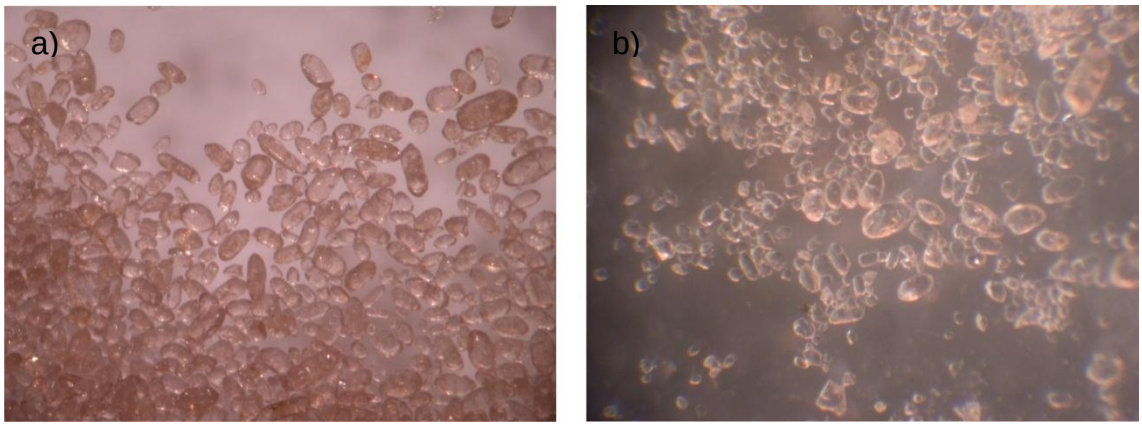


**Foto 2.1 – *Frantz* final diamagnético, amostra: (a) TR-JEF-1C1, (b) TR-JEF-01.**

Antes de processar cada amostra, o separador magnético *Frantz* era completamente limpo com água, detergente, esponja e compressor de ar, para então ser montado e utilizado. Após o uso o aparelho era desmontado e novamente limpo.

Após todo esse processo, foram selecionados os grãos de zircão das frações finais para em seguida ser realizada a montagem. A seleção foi feita de maneira manual com auxílio de pinça e lupa binocular. Procurou-se selecionar os grãos maiores, límpidos, pouco fraturados e, sem inclusões e de todos os diferentes tipos presentes, sendo que foram selecionados até pontas de prismas.

Feita a seleção, os grãos foram dispostos em lâmina delgada coberta com durex dupla face. Para o molde foi usado a parte inferior de uma ponteira de laboratório, seguindo as exigências do Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). Após o preenchimento do molde com resina epóxi espera-se 1 dia para a secagem, para realizar o processo de polimento, no intuito de expor as superfícies dos grãos para a análise. A Foto 2.2 (a) e (b) mostra o resultado final do processo.

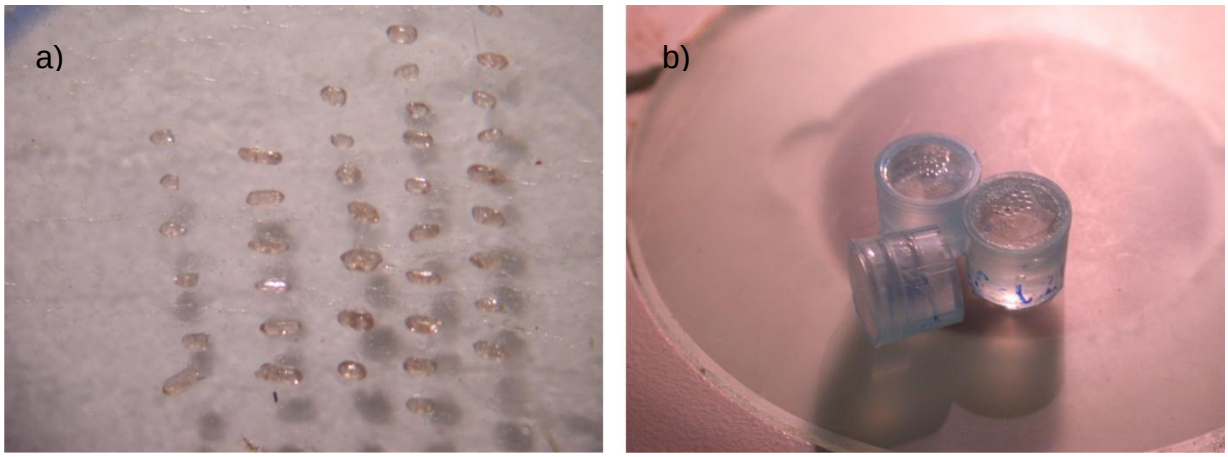


**Foto 2.2 – (a) grãos de zircão dispostos em lâmina delgada (b) montagem dos grãos.**

A superfície dos grãos após o polimento pode ser visualizada na Foto 2.3. Podem-se perceber as características dos grãos como a forma, o tamanho e até fraturas.

Para o litotipo félsico foram selecionados grãos de fração final ($F_F$) diamagnéticos. Para o litotipo máfico, devido a menor quantidade de grãos de zircão encontrados, foram selecionados grãos de fração $F_F$ diamagnéticos 1,5A e paramagnética.

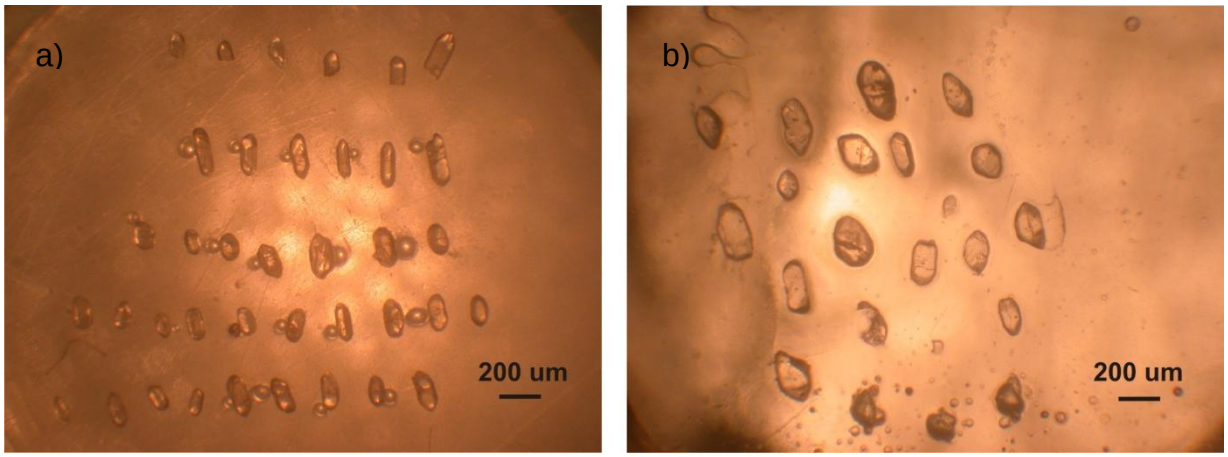


**Foto 2.3 – Superfície dos grãos de zircão após o polimento: (a) TR-JEF-01c1 (granulito félsico); (b) TR-JEF-01 (granulito máfico).**

A Figura 2.1 apresenta um fluxograma de todas as etapas descritas, desde a coleta até polimento.

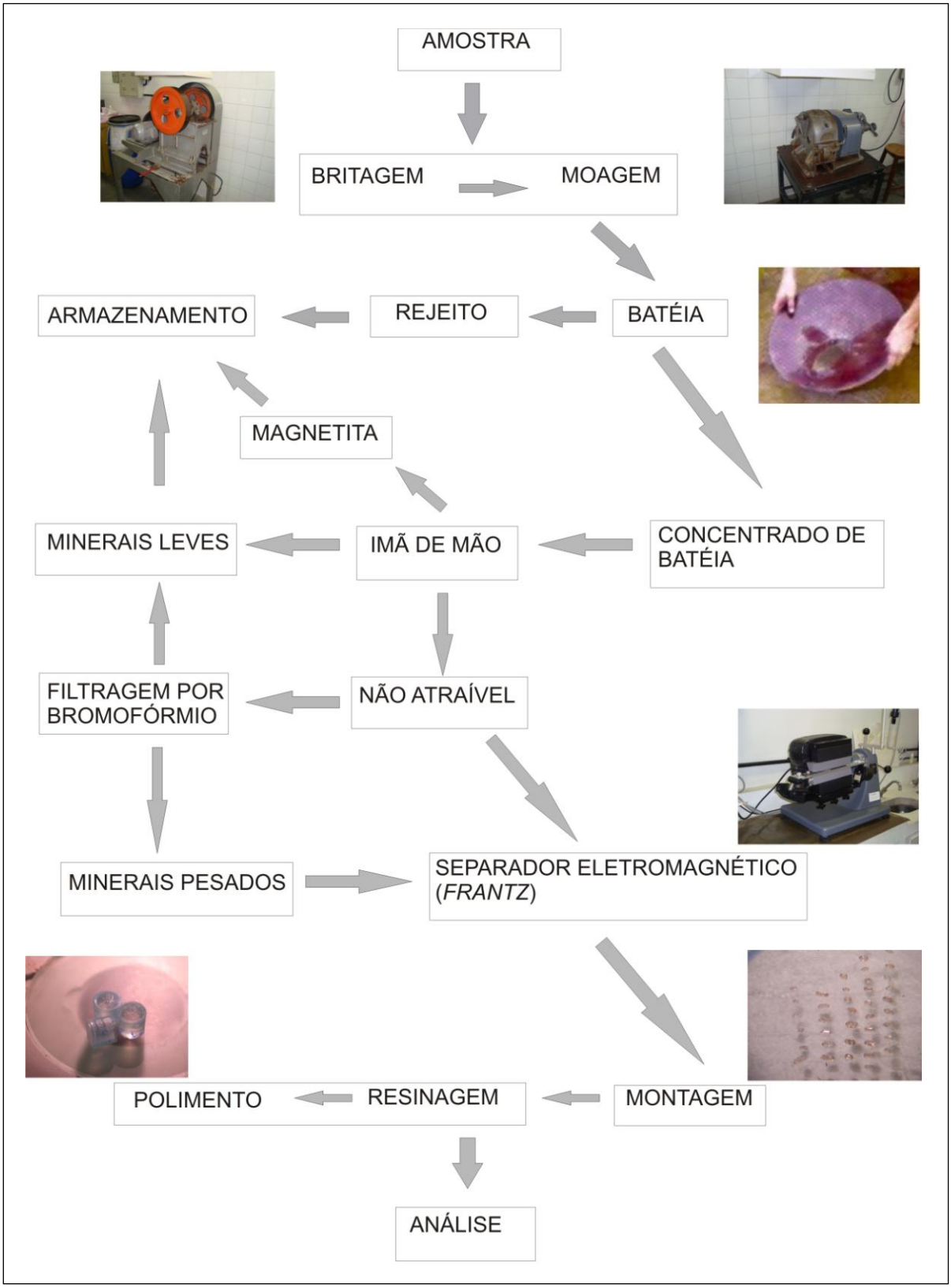


**Figura 2.1 – Fluxograma das etapas laboratoriais para análise U-Pb**

## 2.4 - Preparação das amostras para Sm-Nd

Para análise de idade modelo pelo método Sm-Nd e geoquímica isotópica foi escolhido o mesmo ponto da análise U-Pb, sendo que para esse método foram analisadas três amostras (TR-JEF-01, TR-JEF-01A e TR-JEF-01C1), que foram distinguidas no campo, como litotipo máfico, intermediário e félsico.

Os procedimentos para preparação das amostras são os mesmos utilizados para a litogeoquímica, desde a fragmentação com marreta até a moagem no moinho de bolas.

A análise Sm-Nd foi realizada no Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR) da Faculdade de Geologia da UERJ. Os procedimentos do LAGIR para a abertura das amostras para obtenção das razões Sm-Nd, são descritos a seguir.

### 2.4.1 - Procedimentos para Digestão de Amostras no LAGIR

Pesar aproximadamente 100mg de pó de rocha e cerca de 50mg de Spike Sm-Nd KU 2G em bombas de teflon, revestidas com jaqueta de aço inoxidável. Misturar as alíquotas de Spike e de amostras cuidadosamente.

#### Ataque Químico I

Adicionar 3 ml de HF (concentrado) e 0.25 ml de $HNO_3$ 6N. Aquecer por 30 minutos em chapa quente (80-90ºC), para eliminar parcialmente a $H_2O$ e o $SiF_4$ formados devido à reação química entre a sílica da amostra e o ácido fluorídrico, como mostra a equação esquemática:

$$SiO_{2\,(s)} + 4HF_{(l)} \longrightarrow SiF4_{\,(g)} + 2H_2O_{\,(l)}$$

Após os 30minutos, colocar em estufa (180-190ºC) durante três dias. Em seguida retirar da estufa, deixar esfriar e evaporar em chapa quente (80-90ºC) até a secura.

#### Ataque Químico II

Adicionar 3 ml de HF (concentrado) e 250µl de HNO3 6N. Em seguida colocar em estufa a 180-190ºC, durante dois dias. Após retirar da estufa, deixar resfriar e evaporar em chapa quente (80-90ºC) até a secura.

Adicionar 1 ml de HNO3 6N e evaporar até a secura em chapa quente (80-90ºC), para eliminar o excesso de HF.

#### Ataque Químico III

Adicionar 6 ml de HCl 6N. Aquecer por 2 dias em estufa (180-190ºC). Retirar da estufa, deixar resfriar e evaporar em chapa quente (80-90ºC) até a secura.

Observar se houve a dissolução completa da amostra. Se a dissolução da amostra não estiver completa, evaporar e repetir o procedimento a partir do ataque II. Caso a dissolução esteja completa seguir com a evaporação em chapa quente (80-90ºC) até a secura. Em seguida adicionar 2 ml de HCl 2.5N e reservar para a separação dos elementos de interesse na coluna primária.

Após a abertura das amostras, elas estão prontas para a coleta dos elementos Sm e o Nd, que é realizado através das colunas primária e secundária. O procedimento é descrito a seguir.

### 2.4.2 - Procedimento para a Coleta do Sm/Nd

#### Coleta de Sr e ETR na Coluna Primária

No primeiro momento se despeja HCl 2.5N na coluna primária até a coleta do Sr que é armazenado, em seguida se trabalha com HCl 6N para se coletar os ETRs. O passo a passo dessa etapa é descrita na tabela. Uma foto da coluna primária é mostrada abaixo (Foto 2.4)

| |
|---|
| **HCl 2,5 N** |
| Equilibrar com 10,0 mL |
| Adicionar amostra 1,0 mL |
| Lavar bulbo com 1,0 mL |
| Lavar bulbo com 1,0 mL |
| Lavar bulbo com 1,0 mL |
| Descartar 7,0 mL |
| Descartar 7,0 mL |
| Descartar 7,0 mL |
| **Coletar Sr 8, o mL** |
| Armazenar Sr (nº do Savilex) |
| Descartar 3,0 mL |
| **HCl 6N** |
| **Coletar ETR 15,0 mL** |
| Armazenar ETR (nº do Savilex) |
| Lavar coluna (bulbo cheio) |
| Estocar em tubo de ensaio |

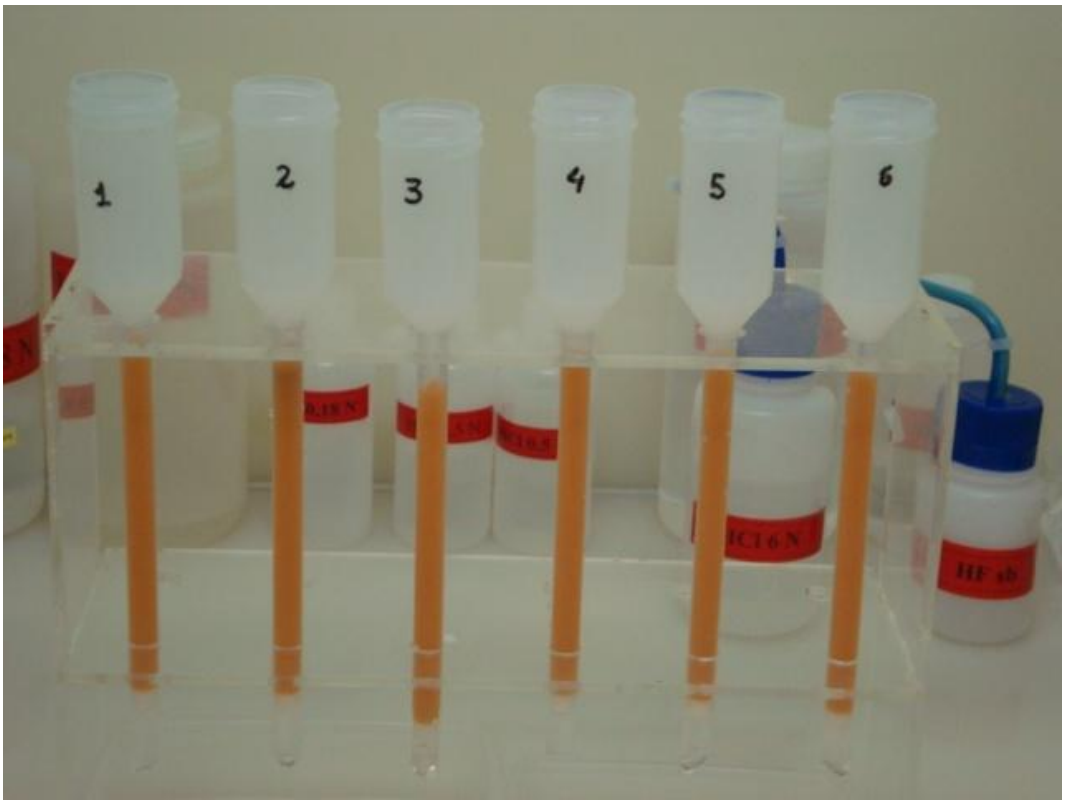


**Foto 2.4 – Bulbos da coluna primária para a coleta de Sr e REE.**

### Coleta de Sm e Nd na Coluna Secundária

Após a coleta das ETR na coluna primária, será coletado os isótopos de Sm e Nd seguindo os passos da tabela. A coluna secundária é apresentada na foto 2.5.

| |
|---|
| **Lavar coluna com H2O MilliQ (bulbo cheio)** |
| **HCl 0,18N** |
| Equilibrar com 3,0 mL |
| Adicionar amostra 0,2 mL |
| Lavar bulbo com 0,2 mL |
| Lavar bulbo com 0,2 mL |
| Lavar bulbo com 0,2 mL |
| Descartar 7,0 mL |
| **Coletar Nd 4,5 mL** |
| Armazenar Nd (nº do Savilex) |

| |
|---|
| **HCl 0,5N** |
| Descartar 1,0 mL |
| **Coletar Sm 3,0 mL** |
| Armazenar Sm (nº do Savilex) |
| **HCl 6N** |
| Lavar coluna (bulbo cheio) |
| Estocar em tubo de ensaio |

**Foto 2.5 – Bulbos da coluna secundária para a coleta de Sm e Nd.**

Depois da coleta do Sm e Nd, o savilex é levado a chapa quente até a total evaporação do acido, e em seguida armazenado. A próxima etapa é a deposição no filamento de rênio (Re) para que possa ser feita a leitura das razões Sm/Nd no espectrômetro de massa.

### 2.5.3 – Depósito de Sm e Nd

Os elementos Sm e Nd são depositados no filamento duplo de rênio para finalmente ser feita a leitura das Sm/Nd e $^{143}Nd/^{144}Nd$ no espectrômetro de massa. Os procedimentos para o depósito são listado abaixo:

1. Montar os filamentos degasados no aparelho para depósito;
2. Fazer barras com parafilme no filamento, aquecendo lentamente até 1A;
3. Colocar 1 ml de HCl normal, aquecer lentamente até 1.5A, tendo o cuidado de secar totalmente;
4. Colocar mais 1 ml de HCl 1N, repetir o procedimento do item 3;
5. Colocar 1microL de HCl 1N para dissolver a amostra e depositar no filamento;
6. Aquecer lentamente até 2A;
7. Elevar a 2.5A, quando o filamento começar a ficar rubro desligar imediatamente.

Em seguida os filamentos são colocados no carrossel e levados ao espectrômetro de massa para ser realizada leitura das razões, assim como mostra o fluxograma da figura 2.2.

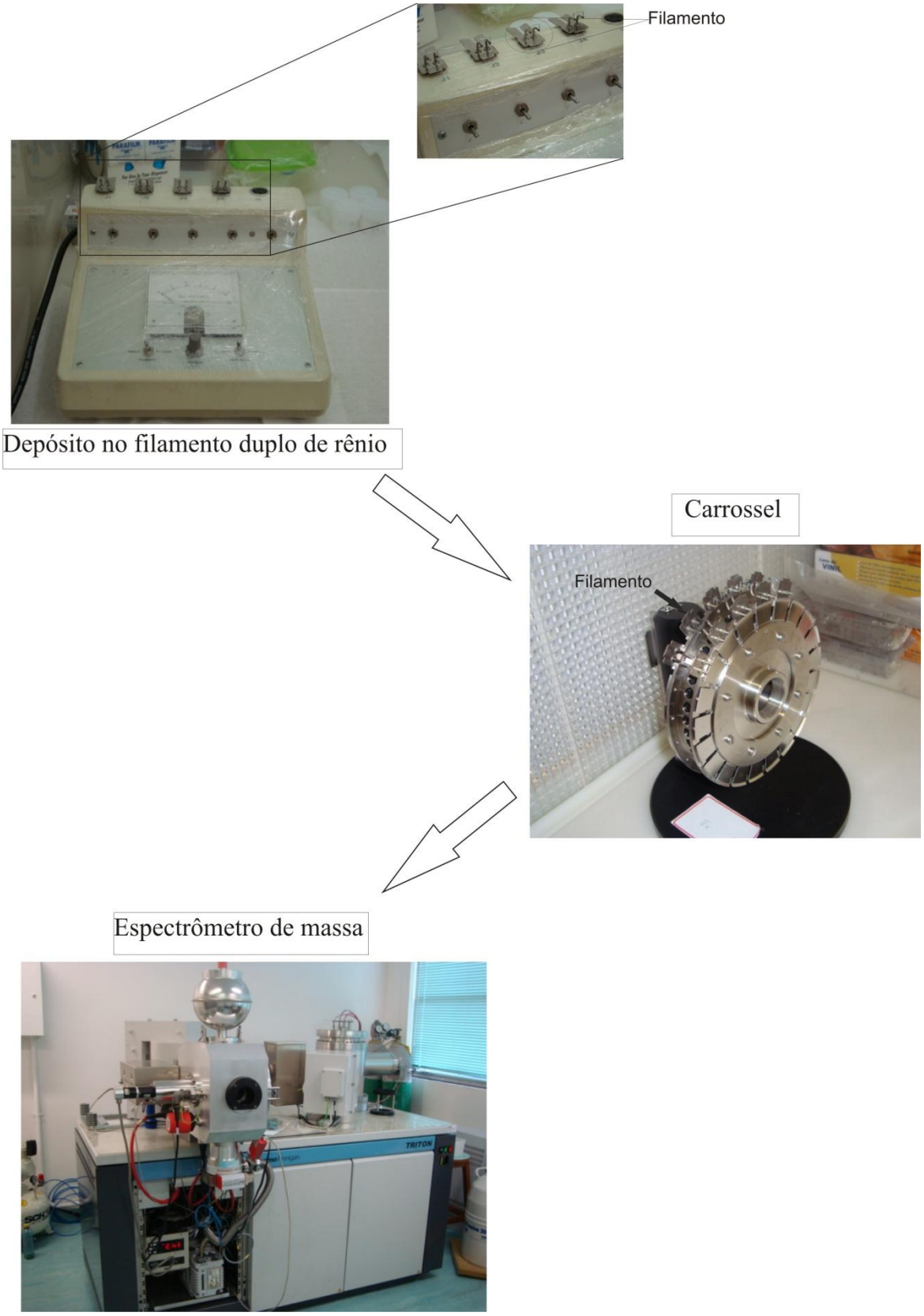


**Figura 2.2 – Fluxograma das etapas laboratoriais finais para obtenção das razões Sm/Nd, desde o depósito no filamento de Re até o espectrômetro de massa.**

# Capitulo III

## 3-Contexto geológico

O orógeno Ribeira resultou da interação entre o Cráton do São Francisco (CFS) e outra(s) placas e/ou micro placa(s) e/ou arco de ilhas situado(s) a sudeste deste cráton, bem como a porção sudoeste do Cráton do Congo (Figura 3.1). O orógeno Ribeira faz parte de um conjunto de faixas de dobramento situados a sul e sudeste do Cráton São Francisco (Província Mantiqueira), que se desenvolveram diacronicamente durante a Orogenia Neoproterozóica Brasiliano-Pan Africana, a qual resultou na formação da porção ocidental do Paleocontinente Gondwana (Almeida 1977; 1981).

Vários autores propuseram a compartimentação tectônica para os terrenos pré-cambrianos do sudeste do Brasil (Ebert 1957, 1968, 1971; Cordani *et al*., 1967; Almeida *et al*., 1973; Heilbron *et al*., 1991; Heilbron 1993; Heilbron *et al*., 1995), mas segundo Heilbron *et al*., 2004, a faixa de dobramentos de direção NE-SW localizada na Província Mantiqueira Central (Figura 3.2), conhecida como “orógeno Ribeira”, é compartimentada em quatro terrenos tectono-estratigráficos, separados ora por falhas de empurrão, ora por zonas de cisalhamento oblíquas transpressivas, com vergência em direção ao Cráton do São Francisco (Figura 3.3).

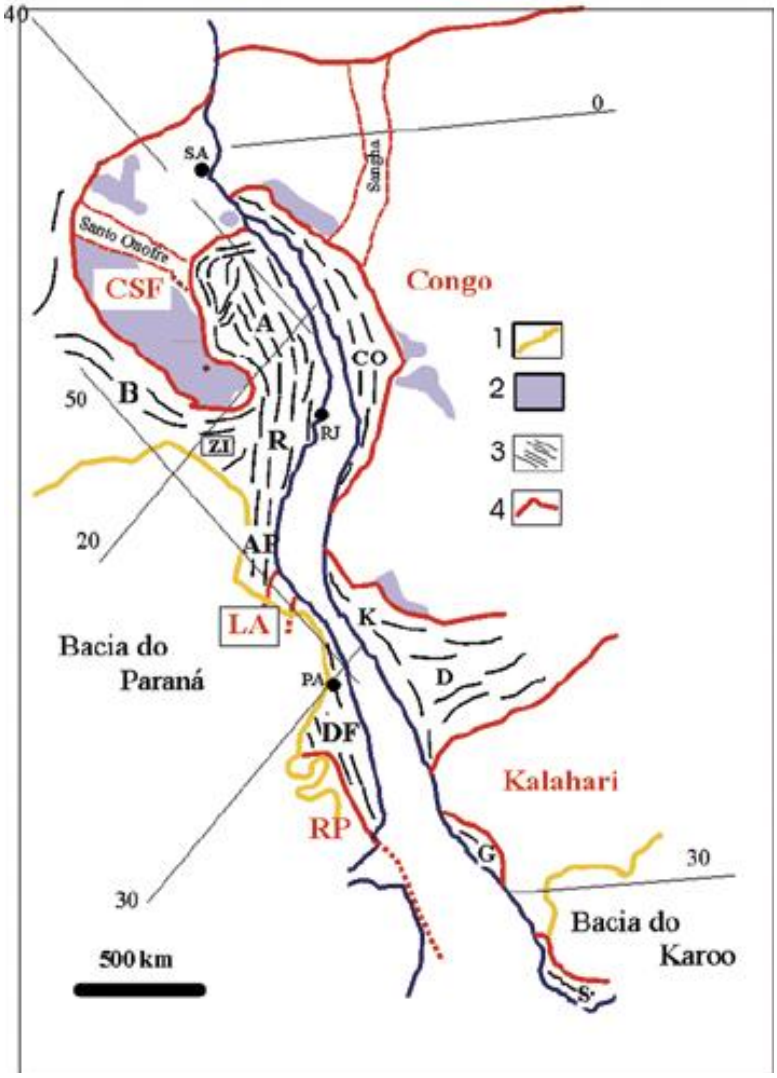


**Fig. 3.1- Localização dos orógenos do Sistema Orogênico Mantiqueira no contexto do Gondwana Ocidental (modificado de Trompette, 1994). 1- Bacias fanerozóicas. 2- Coberturas cratônicas. 3- Orógenos neoproterozóicos (B- Brasília, A- Araçuaí, R- Ribeira, ZI- Zona de Interferência, AP- Apiaí, DF- Dom Feliciano). 4- Crátons neoproterozóicos (CSF- São Francisco, LA- Luis Alves, RP- Rio de La Plata). Na África localizam-se as faixas neoproterozóicas do Congo Ocidental (CO), Kaoko (K), Damara (D), Gariep (G) e Saldania (S), relacionadas aos crátons do Congo e Kalahar; fonte: Heilbron *et al*, 2004.**

Os quatro terrenos tecnoestratigráficos são denominados: Ocidental, Paraíba do Sul, Oriental e Cabo Frio (Heilbron *et al*., 2000, 2004) como mostra a tabela 3.1.

**Tabela 3.1 – Compartimentação tectônica da Orógeno Ribeira segundo Heilbron *et al*., 2004.**

| N-NW | **Terrenos** | **Domínios Estruturais** | **Principal período colisional** |
|---|---|---|---|
| | Ocidental | Autóctone<br>Andrelândia<br>Juiz de Fora | Colisão II<br>ca. 580 Ma<br>(605-560Ma) |
| | Klippe Paraíba do Sul | | |
| | Oriental ou Micro Placa Serra do Mar | Cambuci<br>Costeiro<br>Klippe de Italva | |
| S-SE | Cabo Frio | | Colisão III<br>ca. 520<br>(535-510) |

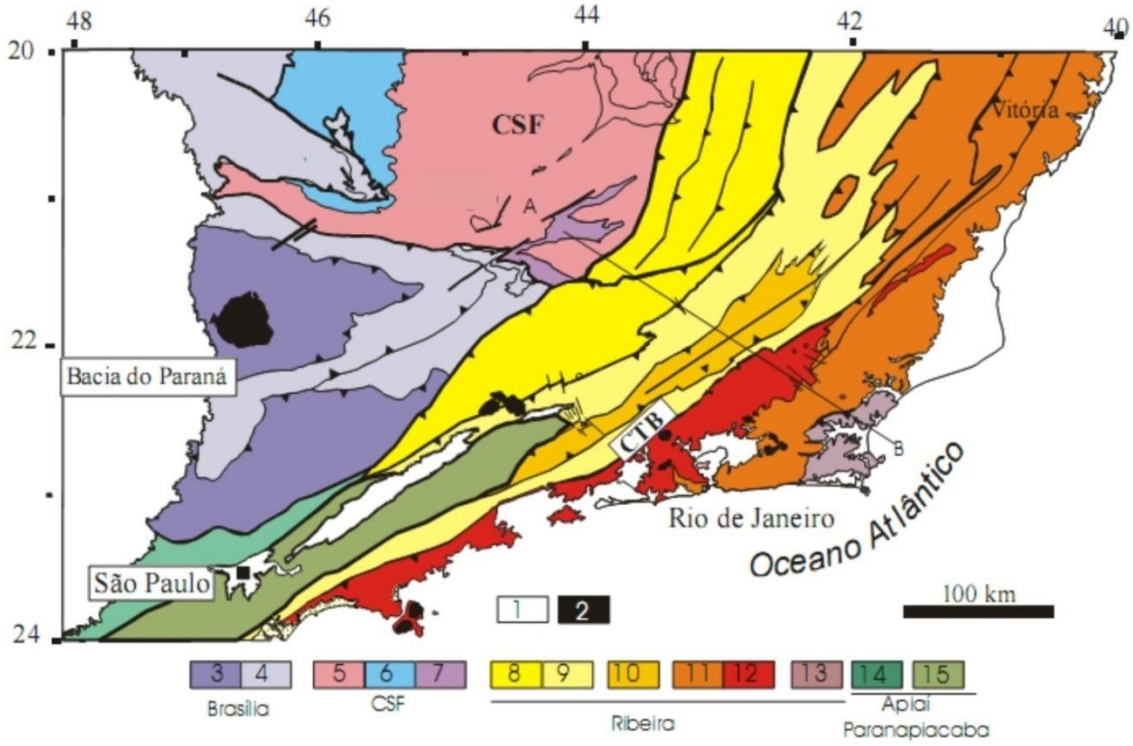


**Fig. 3.2- Mapa tectônico do Segmento central do Sistema Orogênico Mantiqueira. Legenda. 1- Refez Cenozóicos; 2- Rochas alcalinas do Cretáceo e Terciário; Orógeno Brasília (3-4): 3- Nappes Inferiores; 4- Nappes Superiores; 5- Embasamento do CSF e Domínio autóctone; 6- Supergrupo São Francisco; 7- Metassedimentos do Domínio Autóctone; Orógeno Ribeira (8-13): 8- Domínio Andrelândia e 9- Domínio Juiz de Fora do Terreno Ocidental; 10- Klippe Paraíba do Sul; 11- Terreno Oriental incluindo 12- Granitóides do Arco Magmático Rio Negro; 13- Terreno Cabo Frio; Orógeno Apiaí/Paranapiacaba (14-15): 14-Terrenos São Roque e Açungui; 15- Terreno Embu, fonte: Heilbron *et al*, 2004.**

O Terreno Ocidental é produto do retrabalhamento neoproterozóico da margem passiva do paleocontinente São Francisco, e é constituído por dois domínios tectônicos distintos: Domínio Andrelândia e Domínio Juiz de Fora (Heilbron *et al*., 1998).

O Domínio Andrelândia é caracterizado pela ocorrência de rochas metassedimentares da Megasseqüência Andrelândia, que ocorre em todos os domínios que integram o Terreno Ocidental do orógeno Ribeira. Seu embasamento é constituído de ortognaisses do Complexo Mantiqueira. Os ortognaisses são tonalíticos a graníticos, migmatíticos e, subordinadamente, ocorrem ortoanfibolitos.

Os protólitos dessas rochas são arqueanos a paleoproterozóicos (Cordani *et al*., 1973; Figueiredo & Teixeira, 1996; Fischel *et al*., 1998). A Megasseqüência Andrelândia subdivide-se em duas seqüências que gradam lateralmente para sucessões distais semelhantes, com intercalações de fácies pelágicas: (i) Seqüência Carrancas e a (ii) Seqüência Serra do Turvo.

No Domínio Juiz de Fora são descritas três unidades litoestratigráficas: ortogranulitos pré-1.8 Ga (Complexo Juiz de Fora); rochas metassedimentares pós-1.8 Ga; e granitóides e charnockitóides Brasiliano-Pan Africano (Nogueira & Trow, 1993; Duarte *et al* 1994; Nogueira, 1994; Duarte, 1998). Esse domínio apresenta um sistema de falhas de empurrão de médio a alto ângulo, onde ortogranulitos do embasamento pré-1,8 Ga ocorrem como escamas de empurrão nos metassedimentos pós - 1.8 Ga caracterizando uma verdadeira mélange tectônica (Duarte *et al*., 2000, 2003). O embasamento é representado por um conjunto muito heterogêneo de ortogranulitos, denominado de Complexo Juiz de Fora.

O Terreno Paraíba do Sul aflora como uma *klippe* sinformal complexamente dobrada sobre o Terreno Ocidental e seu metamorfismo situa-se na fácies anfibolito (Heilbron, 1993). Seu embasamento é constituído por ortognaisses de idade paleoproterozóica (2,19 e 2,17 Ga) do Complexo Quirino, cuja constituição litológica é dada por extensos corpos de ortognaisses homogêneos, leuco a mesocráticos, de granulometria variando de média à grossa, composicionalmente variando entre granitóides tonalíticos/granodioríticos a graníticos, e apresentando enclaves de rochas ultramáficas, máficas e calcissilicáticas (Heilbron *et al*., 2004; Tupinambá *et al*., 2007).

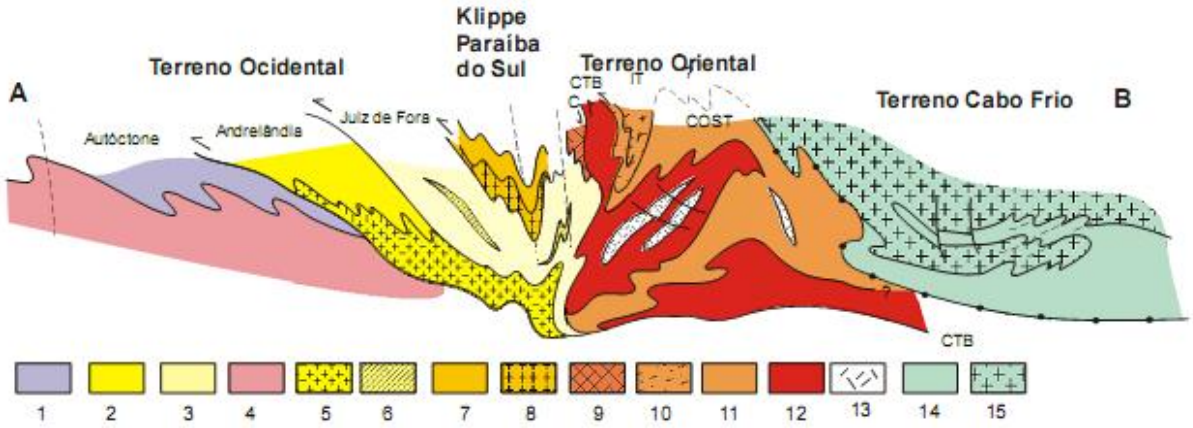


**Figura 3.3- Seção estrutural composta do orógeno Ribeira com a relação entre os diferentes terrenos e domínios estruturais. Legenda: Terreno Ocidental (1-6): 1 a 3- Megassequência Andrelândia nos domínios Autóctone, Andrelândia e Juiz de Fora, Terreno Ocidental; 4 a 6- Associações do embasamento (Complexos Barbacena, Mantiqueira e Juiz de Fora); Terreno Paraíba do Sul (7-8): 7- Grupo Paraíba do Sul; 8- Complexo Quirino; Terreno Oriental (9-13): 9- Seqüência Cambuci; 10- Seqüência Italva; 11- Seqüência Costeiro; 12-arco magmático Rio Negro; 13- Granitos colisionais; 14- Seqüência Búzios e Palmital; 15- Complexo Região dos Lagos. Fonte Heilbron *et al*. 2004**

O Grupo Paraíba do Sul corresponde à cobertura metassedimentar do Terreno Paraíba do Sul e seu pacote metassedimentar consiste de silimanita-granada-biotita gnaisses muito micáceos e xistosos, ricos em silimanita, quartzo e muscovita e níveis de leucossomas granatíferos, com espessuras métricas. Estas rochas passam gradualmente para granada-biotita gnaisses, ricos em porfiroclastos arredondados de feldspatos. Também são encontradas lentes de mármores calcíticos e dolomíticos, bancos de calcissilicáticas e quartzitos (Tupinambá *et al*., 2007).

O Terreno Oriental está justaposto ao Terreno Ocidental (estágio de colisão II). O contato é chamado de Contato Tectônico Central-CTB, representado por uma zona de cisalhamento de baixo a médio ângulo, (Almeida *et al*., 1998), indicado nas Figuras 3.2 e 3.3.

O Terreno Oriental é constituído de três domínios tectônicos distintos (Tupinambá *et al*., 2000; Heilbron & Machado, 2003; Tupinambá *et al*., 2007): Domínios Cambuci, Costeiro (incluindo o arco Magmático Rio Negro) e Italva.

Rochas com paragêneses da fácies granulito são identificadas nos Domínios Cambuci e Costeiro, e de fácies anfibolito no Domínio Italva.

O Domínio Cambuci representa a base do terreno oriental do orógeno Ribeira no Rio de Janeiro e Espírito Santo. Compreende uma sucessão metavulcano-sedimentar metamorfizada em fácies anfibolito alto a granulito, invadida por diversas gerações de rochas granitóides (Tupinambá *et al*., 2007).

No Domínio Cambuci ocorrem granada-biotita gnaisses migmatíticos com lentes de olivina mármore dolomítico e rochas cálcissilicáticas. Lentes de rochas básicas, transformadas em granada diopsídio granulitos, são freqüentes. Estas rochas encontram-se muitas vezes como restitos dentro de leucognaisse e charnockito (Heilbron *et al*., 2004). Dados U-Pb de zircão sugerem derivação tanto a partir do embasamento como do arco magmático neoproterozóico (Heilbron e Machado, 2003).

O Domínio Costeiro consiste de duas sucessões metassedimentares tectonoestratigráficas em fácies anfibolito alto a granulito, a unidade superior São Sebastião do Alto (Tupinambá *et al*., 2007) e a unidade basal São Fidélis (Silva *et al.* 1978; Batista 1984, 1986; Reis & Mansur 1995), respectivamente. Invadidas por diversas gerações de rochas granitóides como os ortognaisses do Complexo Rio Negro (δ1-pré-colisão I/arco magmático), os leucogranitos/leucocharnockitos e granitóides a charnockitóides porfiróides das unidades Bela Joana, Desengano e Angelim, além de granitos tardi a pós-tectônicos (Tupinambá *et al*., 2007).

Idades 207Pb/206Pb e U-Pb/LA – ICPMS, de zircões detríticos da Unidade São Sebastião do Alto indicam fontes arqueanas, paleoproterozóicas e neoproterozóicas, e deposição no neoproterozóico (Valladares *et al.* 1997, Valladares *et al*., 2001). Dados SHRIMP obtidos por Schmitt *et al.* (2003, 2004) para gnaisses desta unidade indicam também deposição no Neoproterozóico, com contribuição de rochas do embasamento e do Arco Magmático Rio Negro.

A Klippe de Italva representa o compartimento estruturalmente superior do Terreno Oriental nas regiões central e noroeste fluminense. Na base da *klippe* encontram-se dioritos, gabros e tonalitos do Complexo Rio Negro, e o restante do

pacote é ocupado por rochas do Grupo Italva. O Grupo Italva é composto por um conjunto metavulcano-sedimentar, rico em mármores e anfibolitos. O metamorfismo está na fácies anfibolito e a deformação principal é moderada, caracterizada por uma xistosidade grossa, além de dobras recumbentes a reclinadas. Os gnaisses do Grupo Italva se apresentam de duas formas distintas (homogêneos ou bandados), que se alternam em várias escalas e apresentam contatos gradacionais entre si (Tupinambá *et al*., 2007).

A idade U-Pb de 840 Ma obtida para anfibolitos intercalados nos mármores é a melhor estimativa da idade de deposição desta sucessão com retrabalhamento metamórfico em 501 Ma (Heilbron e Machado, 2003). Dados litogeoquímicos para os anfibolitos, por Ragatky *et al.*, 2003, indicam protólitos de basaltos toleíticos, variando entre E-MORB a N-MORB.

O Terreno Cabo Frio foi amalgamado em 535 – 510 Ma e representa o último estágio colisional (estágio de colisão III) do orógeno Ribeira, datado por Schmitt (2000). No momento que sucedeu a colisão do Terreno Cabo Frio praticamente todos os orógenos em torno do Paleocontinente São Francisco - Congo já tinham completado sua história evolutiva. Alguns autores sugerem a possibilidade deste episódio estar relacionado com o rápido fechamento de uma bacia oceânica, localizada entre o Arco Rio Negro/Terreno Oriental (bacia retro-arco ?) e a borda sul do paleocontinente do Congo (Heilbron *et al.*, 2000; Heilbron & Machado, 2003).

Diferentemente do Terreno Oriental, o Terreno Cabo Frio apresenta embasamento paleoproterozóico, representado pelo Complexo Região dos Lagos (*ca.* 1,9 Ga), que compreende ortognaisses tonalíticos a graníticos, com enclaves dioríticos e muitas lentes decamétricas de anfibolitos (diques básicos desmembrados). Idades-modelo Sm-Nd sugerem tanto refusão de crosta arqueana como acresção juvenil no Paleoproterozóico (Heilbron *et al*., 2004)

A associação metassedimentar é representada pela sucessão Búzios (Heilbron *et al*., 1982) e Palmital. A sucessão Búzios é constituída por metassedimentos aluminosos (sillimanita-cianita-granada-biotita gnaisses) com freqüentes intercalações de camadas de rochas cálcissilicáticas e corpos de

anfibolitos. Granada-biotita-gnaisses e quartzitos feldspáticos ocorrem subordinamente (Heilbron *et al*., 2004).

A Sucessão Palmital é constituída predominantemente por sillimanita-granada-biotita gnaisses com intercalações de rochas cálcio-silicáticas e granada quartzitos (Heilbron *et al*., 2004).

Schmitt *et al*. (2003) reportaram idades U-Pb (SHRIMP) de zircões detríticos da Sucessão Palmital, que indicam fontes arqueanas (*ca.* 2,5 Ga), paleoproterozóicas (*ca.* 2,0 Ga) e possivelmente neoproterozóicas (*ca.* 1,0 Ga e 800-600 Ma). A posição geográfica destas seqüências, sua constituição litológica (meta-pelitos, meta-carbonatos e metabasaltos), bem como os dados geocronológicos sugere deposição em bacia retro-arco neoproterozóica, relacionada ao Arco Magmático Rio Negro (Heilbron e Machado, 2003).

## 3.1 Magmatismo Neoproterozóico

Segundo Heilbron *et al*., 2004, o orógeno Ribeira é o resultado da convergência de placas seguido por colisão continental que envolveu várias placas e/ou microplacas. E, de acordo com o modelo da tectônica global, nesse tipo de ambiente tectônico há sempre a geração de um arco magmático e/ou arcos de ilhas (magmatismo pré-colisional) ou margem ativa, que evidência o processo de subducção.

No orógeno Ribeira essa feição está representada pelo Arco Magmático Rio Negro, localizado no Terreno Oriental, mais especificamente no Domínio Cambuci (comentado anteriormente, Figura 3.3), sendo que a polaridade da subducção foi para leste. Apenas a porção plutônica do Arco Magmático Rio Negro está preservada e consiste de ortognaisses pertencentes a uma série metaluminosa do tipo gabro-diorito-tonalito e trondhjemito, descritos por Tupinambá *et al.* (1996) como *Complexo Rio Negro (CRN)*. Dados litogeoquímicos indicam a presença de duas suítes magmáticas cálcio-alcalinas, sendo uma mais expandida e de médio-K e a outra de alto-K com predomínio de rochas mais ácidas (Heilbron *et al*., 2004).

Dados isotópicos sugerem pelo menos duas etapas de geração de rochas neste arco: 790 Ma e 635-620 Ma (Tupinambá *et al*., 2000; Heilbron & Machado,

2003). Destaca-se que os dados isotópicos de Pb indicam ausência de herança paleoproterozóica ou mais antiga, e que os dados de Nd indicam dois grupos de rochas, com níveis de contaminação crustal contrastante (Heilbron *et al*., 2004).

Além do magmatismo pré-colisional, o evento brasiliano gerou intensa granitogênese e altas taxas de fusão parcial da crosta no orógeno Ribeira.

A Colisão II que colocou o Terreno Oriental e a Klippe Paraíba do Sul sobre o Terreno Ocidental originou diversas suítes granitóides, a exemplo da suíte porfirítica cálcio-alcalina de alto-K precoce (*ca.* 590-580 Ma; tipos Maromba, Pedra Selada e Serra do Lagarto), leucogranitos (tipo Rio Turvo) e/ou granada charnockitos (*ca.* 580 Ma), suíte cálcio-alcalina de alto-K tardia (*ca.* 575-560 Ma; tipo gnaisse facoidal do Rio de Janeiro), e biotita granitos (*ca.* 560 Ma, tipo Serra dos Órgãos) – Heilbron *et al*., 2004. Os granitóides relacionados à Colisão II são mais abundantes no topo do Terreno Ocidental (Domínio Juiz de Fora) e no Terreno Oriental (Heilbron *et al*., 2004).

A colisão do Terreno Cabo Frio gerou importantes zonas de cisalhamento, como a Zona de cisalhamento do Rio Paraíba do Sul (Dayan & Keller, 1989) e um novo episódio metamórfico ($M_2$ de Machado *et al*., 1996), além de granito contemporâneos às zonas de cisalhamentos (Heilbron *et al*., 2004).

O estágio pós-colisional observado nos Terrenos Oriental e Cabo Frio está relacionado à geração de zonas de cisalhamento além de diversos corpos graníticos com idades entre 510 a 480 Ma. Em geral são granitos cálcio-alcalinos que ocorrem como *stocks* circulares ou na forma de diques e soleiras. Esse magmatismo pós-colisional evoluiu regionalmente, em direção ao estado do Espírito Santo, adquirindo uma tendência mais alcalina (Junho 1993).

Os granitos de Nova Friburgo (Caledônia; Salinas; Campo do Coelho e Frades e outros correlatos da região central do orógeno (Pedra Branca, Serra da Misericórdia, Suruí, Getulândia e Fortaleza) foram considerados por vários autores como maciços intrusivos tardi a pós-orogênicos (Penha *et al*., 1980; Pires *et al*., 1982; Penha & Wiedeman, 1984; Junho, 1993; Heilbron *et al*., 1995; Machado & Demange, 1992; Machado, 1997; Porto Jr & Valente, 1988; Tupinambá, 1999).

## 3.2-Metamorfismo Regional

No orógeno Ribeira estão registrados três eventos metamórficos distintos denominados $M_0$, $M_1$ e $M_2$. As paragêneses minerais e texturas relacionadas à $M_0$ ocorrem impressas apenas nas rochas do Complexo Juiz de Fora (embasamento pré-1,8 Ga do domínio homônimo) e são claramente anteriores à tectônica de empurrões brasiliana responsável pelo empilhamento dos domínios tectônicos nesse setor do orógeno (Heilbron, 1993; Heilbron *et al*., 1995; Duarte, 1998).

A etapa metamórfica $M_1$ atingiu seu ápice de temperatura durante a Deformação Principal $D_1$+$D_2$ e, portanto, as paragêneses resultantes estão materializadas nas foliações $S_1$, $S_2$ ou $S_{1+2}$. O pico metamórfico está registrado pela paragênese cordierita + silimanita + almandina + K-feldspato, presentes nas unidades pelíticas pós 1.8 Ga (Heilbron *et al*., 1995). As condições máximas de pressão variam de média a alta, seguidas por uma etapa de menor pressão. Os valores máximos de pressão foram obtidos por Trouw (1992), que reportou dados geotermobarométricos da ordem de 700-900°C e 8-10 Kb para a região de Andrelândia.

As condições de temperatura da etapa $M_1$ foram suficientemente altas para causar anatexia generalizada em algumas unidades supracrustais, o que acabou originando a geração de granitóides tipo S. Dados U-Pb em zircão, monazita e titanita de granito sin-colisional (Granito Rio Turvo) indicam que $M_1$ teve seu auge em ≈ 580 Ma (Machado *et al*., 1996; Valladares, 1996).

Assim, como o pulso $M_1$ causou retrometamórfismo na paragênse de facies granulito $M_0$ no CJF, o $M_2$ provocou um conjunto de reações retrógradas em relação ao pulso $M_1$ como descrito por Heilbron *et al*., 1995, onde $M_2$ gerou paragêneses de facies xisto verde, retrógradas em relação às paragêneses $M_1$ no Domínio Andrelândia.

A partir dos terrenos situados mais a sul do orógeno, a temperatura aumenta, causando a recristalização dinâmica de minerais na xistosidade S3, especialmente nas zonas de cisalhamento desta fase de deformação (Heilbron *et al*., 1995).

Dados de campo indicam que $M_2$ é contemporâneo às fases de deformação tardia, especialmente $D_3$, e dados U-Pb em zircões, monazitas e titanitas de granitos e leucossomas tardios forneceram idades de 535 Ma para este evento (Machado *et al*., 1996; Valladares, 1996). Heilbron (1993) também relaciona M2 ao período pós-colisional.

O metamorfismo no orógeno Ribeira mostra-se bem dinâmico, pois em cada domínio ele evoluiu em condições bem específicas, variando desde a facies xisto verde, na borda cratônica (Terreno Ocidental), até a facies granulito de média pressão próximo ao contato com os Terrenos Oriental e Paraíba do Sul. Na Klippe Paraíba do Sul o metamorfismo situa-se na facies anfibolito, mas no Terreno Oriental varia da facies anfibolito (Domínio Italva) à facies granulito (Domínios Cambuci e Costeiro). No Terreno Cabo Frio o metamorfismo é de pressão média a alta, apresentando cianita e feldspato potássico nos granulitos peraluminosos (Heilbron *et al*., 2004).

## 3.3-Geologia Estrutural

Segundo Tupinambá *et al*, 2007, quatro fases deformacionais são responsáveis pelas estruturas encontradas em toda a extensão do orógeno Ribeira, sendo este compartimentado em terrenos e, seus domínios estruturais separados por zonas de cisalhamentos dúcteis com componente inverso e transpressivo dextral, geradas durante a deformação principal $D_1$+$D_2$ (Heilbron 1993, Heilbron *et al*.,1998, 2000, 2004a; Almeida, 2000). A deformação possui um padrão complexo e muitas vezes uma mesma zona de cisalhamento passa de um empurrão para zona transcorrente dextral ao longo do *strike*, indicando convergência obliqua (Heilbron 1993).

Além de ter gerado as estruturas mais importantes e penetrativas observadas em quase todos os afloramentos de todos os domínios tectônicos, salvo nas zonas de cisalhamento tardias, onde são mascaradas por fases de deformação mais jovens ($D_3$ e $D_4$) em escala regional, a deformação principal é responsável pela compartimentação tectônica do orógeno, gerada através do empilhamento de escamas de empurrão com transporte tectônico direcionado para a área do Cráton do São Francisco (Heilbron *et al*., 1995).

A principal estrutura do orógeno Ribeira é a foliação $S_1$, que é uma foliação grossa e penetrativa, paralela aos contatos litológicos, e definida por um bandamento gnáissico, de bandas félsica quartzo-feldspáticas e bandas máficas ricas em biotitas e/ou anfibólio dependendo do litotipo. Nos metassedimentos $S_1$ aparece recristalizada paralela ao bandamento migmatítico (Almeida, 2000).

Duas fases deformacionais tardias $D_3$ e $D_4$ redobram a xistosidade principal. $D_3$ gerou dobras empinadas abertas a apertadas, subordinadamente isoclinais, com eixos NE/SW com caimento subhorizontal e planos axiais com mergulhos íngremes para SE ou NW (Heilbron *et al*., 1995). No Terreno Cabo Frio uma deformação de baixo ângulo é relacionada a essa fase deformacional. Nos terrenos Oriental e Paraíba do Sul, e no Terreno Ocidental, essa deformação tardia resultou em redobramento normal de estruturas previamente formadas, associado à geração de zonas de cisalhamento dextrais, espaçadas (Heilbron *et al*., 2004), como por exemplo, as zonas de cisalhamento Além Paraíba, Três Corações e Caxambu.

$D_4$ gerou zonas de cisalhamento subverticais com *trend* ortogonal a extensão do orógeno (NW-SE), associadas dobras de arrasto que giram as foliações previamente formadas (Tupinambá *et al*, 2007). Essa fase é encontrada nos terrenos Cabo Frio e Oriental (Heilbron *et al*., 2004) e está representada por dois conjuntos de estruturas, que são: a) zonas de cisalhamento dúctil-rúpteis, normais, longitudinais ao orógeno e associadas a dobras com vergência para leste, e b) zonas de cisalhamento subverticais, de direção NW e transversais ao orógeno, com regime transtensivo e predomínio do componente lateral dextral e do componente vertical normal (abatimento do bloco leste). Tal como no orógeno Araçuaí esta fase é interpretada como resultante do colapso extensional do edifício orogênico (Heilbron *et al*., 2000; Heilbron & Machado, 2003).

## 3.4- Complexo Juiz de Fora

O termo Juiz de Fora foi introduzido por Ebert (1955), que originalmente usou para designar paragranulitos da porção interna de uma calha geossinclinal de idade assíntica, cujo eixo se encontrava junto ao rio Paraíba do Sul.

Com contínuos trabalhos de mapeamento e, estudos geocronológicos e petrológicos nos estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais, outros termos foram introduzidos.

Ebert (1968) e Delhal *et al*. (1969) denominaram o pacote litológico de Grupo Paraíba e Formação Paraíba do Sul, respectivamente, estando aí agrupadas as Séries Juiz de Fora e Paraíba. Cordani *et al*. (1973) separam as rochas em Formação Juiz de Fora e Paraíba do Sul, apesar de ressaltar a grande semelhança petrológica entre elas.

Oliveira (1983) dá o nome de Complexo Juiz de Fora às seqüências gnáissicas granulíticas, englobando as Séries Juiz de Fora e Paraíba de Ebert. Ele apenas separa a Faixa Juiz de Fora, com rochas charnockíticas e granulíticas predominantemente, e a Faixa Paraíba do Sul, com migmatitos bandados, mas ocorrendo também anfibolitos, quartzitos e cálcio-silicáticas.

Barbosa e Sad (1983) propuseram a designação de Complexo Juiz de Fora para substituir a série homônima de Ebert, enxergando a necessidade de uma definição mais abrangente. Definiram o CJF como uma associação de duas unidades litológicas, intimamente relacionadas: (i) Unidade Comendador Venâncio, onde predomina a seqüência charnockítica, e a (ii) unidade Raposo que corresponde a produtos diaftoréicos dos granulitos da unidade Comedador Venâncio (descharnockitização). Os autores também definiram a unidade Itaperuna, mas não a integraram como parte do CJF, apesar ser uma seqüência granulítica típica, e de considerarem que a mesma derivou-se a partir das rochas do CJF.

Machado Filho *et al*. (1983) dividiram as rochas do complexo tomando como base parâmetros petrográficos e sugeriram a subdivisão em duas unidades: Unidade magmática (ortogranulitos e ortogranulitos diaftoréicos) e Unidade metassedimentar (paragranulitos e paragranulitos diaftoréicos e kinzigitos).

O CJF na seção transversal Bom Jardim de Minas (MG) e Vassouras (RJ), é representado segundo Heilbron *et al*., (1997), por três litotipos: ortogranulitos, ortognaisses de facies anfibolito e paragranulitos. Estes autores consideram que os ortogranulitos do CJF integram parte do embasamento pré 1.8 Ga do orógeno Ribeira.

No atual estado do conhecimento, Duarte (1998) e Heilbron *et al*., 1998 definem o CJF como um conjunto de ortogranulitos gnaissificados com composição variando entre gabros, dioritos, tonalitos e granodioritos, que segundo Heilbron *et al*., 2004, representa o embasamento da margem do Paleocontinente São Francisco.

### 3.4.1 - Geoquímica

Pinto *et al*., (1991) sugeriram que os ortogranulitos básicos e dioríticos representam toleítos de baixo K, provavelmente de arco de ilha ou bacia de retro-arco, enquanto que os granulitos enderbíticos representariam rochas calcioalcalinas de arco vulcânico.

Machado Filho *et al*. (1983) sugeriram que os granulitos toleíticos e calcioalcalinos do CJF representa parte da base da crosta continental Arqueana ou da crosta basáltica.

Heilbron *et al*. (1997), a partir da análise de dados litogeoquímicos do CJF, dividiu-os em duas associações tectônicas distintas: a) uma representada por duas séries cálcio-alcalinas geoquímicamente semelhantes às de arcos magmáticos modernos; b) outra com dois grupos de rochas básicas, um toleítico e outro com basaltos transicionais a alcalinos, ambos indicando ambiente distensivo intracontinental.

Duarte *et al*., (1997) estudando a região de Juiz de Fora, MG, distinguem 3 litotipos para o CJF, com base nos estudos de campo e petrográficos: ortogranulitos máficos, intermediários e félsicos. A análise geoquímica sugere que os granulitos máficos são basaltos toleítos intra-placa, basaltos de fundo oceânico e de arco de ilha, enquanto que os granulitos intermediários e os félsicos são calcioalcalinos considerados produtos magmáticos de convergência tectônica de arcos de ilha ou cordilheirano. Os dados geoquímicos balizam a hipótese de que a composição dos protólitos não foi modificada durante os processos metamórficos.

Duarte & Valente (1999) identificam dois grupos subalcalinos distintos (toleítico e cálcioalcalino) e através de analise litogeoquímica quantitativa apontam a cristalização fracionada como processo responsável pela evolução da suíte cálcioalcalina. A suíte toleítica, segundo os autores mostrou ser bastante heterogênea, impossibilitando o modelamento quantitativo.

Heilbron *et al*., (2004) sugerem que os protólitos deste complexo incluem granitóides cálcio-alcalinos representantes de arco magmático cordilherano e de arco de ilhas, e granitos colisionais gerados entre 2,14 e 2,07 Ga. Os metabasitos podem ser agrupados em duas suítes. Uma delas tem tendência alcalina e é típica de ambiente intraplaca (ca. 1,7 Ga), enquanto a outra, mais heterogênea, é formada por rochas toleíticas com assinaturas típicas de basaltos de fundo oceânico (2,4 Ga).

### 3.4.2 - Geocronologia

Fischel *et al*., 1998, obtiveram dados isotópicos de Sm-Nd para o Complexos Mantiqueira e Juiz de Fora na região de Rio Casca e Abre Campo, MG. Para o Complexo Mantiqueira identificaram idades modelo de Nd ($T_{DM}$) Arqueanas (entre 3,02 – 3,26 Ga) e Neoarqueanas (2,53 – 2,64 Ga). Para os protólitos do CJF idades $T_{DM}$ paleoproterozóicos (2,22 – 2,13 Ga), sugerindo um arco juvenil. Assim, foi sugerido, pelas idades modelo de Nd, dois domínios crustais: o Complexo Mantiqueira, um bloco Arqueano e o CJF, um bloco Paleoproterozóico, ambos amalgamados a borda do Paleocontinente São Francisco, durante o evento Brasiliano.

Silva *et al*. (2002), utilizando o método SHRIMP em zircão em um granulito de composição enderbítica na cidade de Juiz de Fora, MG, determinaram idade de cristalização de 3000 Ma datada no centro do grão, e para as bordas dos cristais de zircão obtiveram idade de 2850 Ma no intercepto superior, interpretada como metamorfismo de idade M1 dos ortognaisses enderbíticos de fácies granulito (CJF).

Heilbron *et al*. (2001) sugerem a partir de dados U-Pb LA- ICPMS em zircão que as suítes calcioalcalinas (2,1 Ga,) são conjuntos de rochas de um arco juvenil, enquanto a suíte toleítica apresenta assinatura de arco de ilha e assoalho oceânico (2,4 Ga).

**Tabela 3.2 – Resumo dos dados geocronológicos acima apresentados.**

| Autor | Localização | Método | Idade |
|---|---|---|---|
| Fischel *et al*., 1998 | Região de Rio Casca e Abre Campo, MG. | Isótopos de Sm-Nd | $T_{DM}$ 2.22 – 2.13 Ga |
| Heilbron *et al*. 2001 | | U-Pb (em zircão, LA-ICPMS) | Suítes cálcioalcalinas: 2.1 Ga; suíte toleítica: 2.4 Ga; |
| Heilbron *et al*. 2004 | | U-Pb (em zircão, LA-ICPMS) | Suítes cálcioalcalinas: 2,14-2,07 Ga; suíte toleítica: 2,4 Ga; suíte alcalina 1,7 Ga |
| Silva *et al*. 2002b | Juiz de Fora, MG | U-Pb (SHRIMP) | 2985 ± 17 Ma (cristalização) e 2856 ± 44 (metamorfismo M1), gnaisse enderbíto. |

### 3.4.3 - Metamorfismo do Complexo Juiz de Fora

No estudo metamórfico realizado nos ortogranulitos do Complexo Juiz de Fora, Heilbron *et al*., 1997 consideram o metamorfismo de facies granulito de idade paleoproterozóica, corroborados por dados U/Pb (Machado *et al*., 1996) e duas isócronas Rb/Sr (Heilbron, 1993)

Duarte 1998 e Duarte *et al*., 2000, identificaram dois pulsos metamórficos para o complexo. O pulso mais antigo ($M_0$) é registrado pela paragênese ortopiroxênio + plagioclásio ± clinopiroxênio ± quartzo ± hornblenda em arranjo granoblástico, claramente anterior à foliação regional brasiliana. Dados geotermais (Cpx-Opx e Hbl-Pl) indicam condições de pico metamórfico por volta de 800 a 850ºC, enquanto que a química de hornblenda sugere condições de baixa pressão, entre 3 e 4 kbar para $M_0$. O pulso $M_1$, segundo os autores é caracterizado pelo crescimento da paragênese com a foliação brasiliana. Cálculos geotermobarométricos indicam que o período tardi-$M_1$ evoluiu sob temperaturas mais altas que 700-750ºC, pressões entre 6 e 7 kbar e gradientes variáveis de $PH_2O$. Para o complexo, M1 teve caráter claramente retrógrado, evidenciado pelo consumo e/ou recristalização de um arranjo granoblástico entre ortopiroxênio, clinopiroxênio, hornblenda e plagioclásio e formação de biotita, hornblenda, plagioclásio e, mais raramente, granada.

Nogueira *et al*. 2000 e Nogueira *et al*. 2004, consideram o metamorfismo mais antigo de facies granulito, gerado pelo porte de fluídos ricos em $CO_2$ durante o evento Transamazônico. Para estes autores, o evento brasiliano foi o responsável pelo retrometamorfismo das fases minerais de Fe-Mg de facies granulito. Os autores balizados nos dados de inclusões fluidas apontam para um evento tectônico extensional, Transamazônico, com a formação de *intra* e *underplating* magmático, provendo fluidos ricos em $CO_2$ e o excesso de calor necessário para o metamorfismo granulítico.