

1.1 – Considerações iniciais

Esta tese de doutorado foi realizada com recursos financeiros dos projetos de pesquisa “Evolução e Metalogênese do Arco Magmático da Faixa Araçuaí: Modelo de Orógeno Confinado” e “A Conexão Araçuaí-Ribeira nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo” (financiados pelo CNPq e coordenados por Antônio Carlos Pedrosa Soares), do *grant* associado à bolsa de produtividade em pesquisa do orientador da tese (CNPq, vigência 2008-2011) e do Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFMG. Apoio para trabalho de campo e laboratorial se deve ao CPMTC-IGC-UFMG, incluindo a confecção de lâminas delgadas e seções polidas e a preparação de amostras para análises litoquímicas, e o uso de microsonda eletrônica ao Laboratório de Microscopia e Microanálises do Consórcio Física-Geologia-Química/UFMG – CDTN/CNEM. A preparação de amostras para geocronologia foi realizada no LOPAG-UFOP e as análises isotópicas, pelos métodos U-Pb (LA-ICP-MS e SHRIMP) e Sm-Nd, nos laboratórios de geocronologia da UnB, UFRGS e Australian National University (Canberra). A bolsa de doutorado da autora foi concedida pelo CNPq.

Ofiolitos são fragmentos de antigas litosferas oceânicas formados em margens de placa construtivas e divergentes transformantes. Por meio de extensos falhamentos de empurrão, estes corpos ou parte deles são colocados na crosta continental, dentro de pacotes de rochas dos cinturões orogênicos, em estado sólido, mas podendo estar ainda relativamente quentes (Gass 1990). Os possíveis ambientes produtores de litosfera oceânica incluem cadeias meso-oceânicas, bacias relacionadas a arcos-de-ilhas juvenis e bacias de retroarco (Coleman 1984, Zou *et al.* 1995, Moores 2002). Ofiolitos de idade Fanerozóica são abundantes em cinturões orogênicos ao redor do mundo enquanto que os remanescentes oceânicos do Pré-Cambriano são pouco comuns e encontram-se distribuídos principalmente na Finlândia, Canadá, Marrocos, Arábia Saudita, Egito, Rússia, China e Brasil (Kontinen 1987, Dobretsov *et al.* 1992, Zou *et al.* 1995, Samson *et al.* 2004, Suita *et al.* 2004). Ofiolitos pré-cambrianos são de especial importância por revelarem informações acerca dos processos vulcânicos e acrescionários ao longo do tempo geológico (Zou *et al.* 1995).

Diversos registros de remanescentes oceânicos pré-cambrianos foram reconhecidos no Brasil. A maioria destes corpos situa-se nas faixas orogênicas brasileiras e registram o consumo dos oceanos neoproterozóicos (Suita *et al.* 2004). No Orógeno Araçuaí, remanescentes de rochas magmáticas e sedimentares de assoalho oceânico ocorrem numa faixa alongada de direção aproximada N-S, e localizam-se nos arredores de Ribeirão da Folha, São José da Safira e Santo Antônio do Grama.

Estes corpos ofiolíticos têm terminação setentrional em torno do paralelo 17° 30', sendo a zona de sutura balizada pelo meridiano 42° W (na orientação geográfica atual; Pedrosa-Soares *et al.* 2007).

Nesta tese são apresentados dados de campo e estudos petrográficos, geoquímicos e geocronológicos detalhados que permitem a caracterização dos restos de litosfera oceânica do Orógeno Araçuaí entre os paralelos 17° e 21°S.

Ressalta-se que este projeto de doutoramento representa a continuidade dos estudos iniciados na Dissertação de Mestrado (Queiroga 2006) e inclui a realização, sob a co-orientação da doutoranda, do trabalho de graduação de Ferreira *et al.* (2007) intitulado “*Geologia da região de Santo Antônio do Gramma, Minas Gerais*”.

1.2- Localização e acesso das áreas estudadas

Dois setores principais, portadores de rochas com assinatura de assoalho oceânico, são focalizados nesta tese de doutorado. O **setor 1** situa-se na região nordeste do estado de Minas Gerais e é balizado pela vila de Ribeirão da Folha (distrito de Minas Novas) e pelos municípios de Capelinha e São José da Safira, entre os meridianos de 42° e 42° 40' de longitude oeste e os paralelos 17° e 18° 30' de latitude sul. Ocupa a porção centro-sul da Folha Jenipapo (IBGE 1983, SE-23-X-D-III, Carta do Brasil, escala 1:100.000), e parte das folhas Malacacheta (IBGE 1983, SE-23-X-D-VI, Carta do Brasil, escala 1:100.000) e Santa Maria do Suaçuí (IBGE 1980, SE-23-Z-B-III, Carta do Brasil, escala 1:100.000) (Figuras 1.1 e 1.2). O sistema viário é constituído por rodovias federais, estaduais e estradas vicinais, entre as quais se destacam a BR-040 (Belo Horizonte - Paraopeba), BR-135 (Paraopeba - Curvelo), BR-259 (Curvelo – Diamantina), BR-367 (Diamantina – Turmalina – Minas Novas), MG-308 (Minas Novas – Capelinha) e BR-120 (Itabira - São José da Safira – Capelinha - Turmalina). As alternativas de trajeto, a partir de Belo Horizonte, são:

(i) *Belo Horizonte – Diamantina – Minas Novas – Ribeirão da Folha;*

(ii) *Belo Horizonte – Diamantina – Capelinha – Ribeirão da Folha;*

(iii) *Belo Horizonte – Itabira – Guanhães – Santa Maria do Suaçuí – São José da Safira.*

O **setor 2** situa-se no leste do estado de Minas Gerais, ocupando a porção sudeste da Folha Rio Casca (IBGE 1979, SF-23-X-B-II-2, Carta do Brasil, escala 1:50.000) e a porção centro-oriental da Folha Jequeri (IBGE 1979, SF-23-X-B-II-4, Carta do Brasil, escala 1:50.000), integrantes do Mapa Geológico da Folha Ponte Nova, escala 1:100.000 (SF-23-X-B-II; Brandalise 1991a) (Figura 1.3). O setor 2 é delimitado pelas latitudes 20° e 20° 30'S e longitudes 42° 30' e 42° 60'W (Figura 1.1). A

superfície ocupada por este setor pertence aos municípios de São Pedro dos Ferros, Rio Casca, Santo Antônio do Grama, Abre Campo e Jequeri. A cidade de Santo Antônio do Grama foi a base logística para os trabalhos de campo. A rede viária é constituída por rodovias federais, estaduais e estradas de terra, entre as quais se destacam a BR-262 (Belo Horizonte – Rio Casca), BR-040 (Belo Horizonte – Rio de Janeiro), BR-356 (Itabirito – Ouro Preto – Ponte Nova) e MG-329 (Ponte Nova – Rio Casca). Dois trajetos, a partir de Belo Horizonte, são os mais comuns para se acessar a área em estudo:

(i) *Belo Horizonte – Rio Casca – Santo Antônio do Grama;*

(ii) *Belo Horizonte – Ouro Preto – Ponte Nova – Santo Antônio do Grama.*

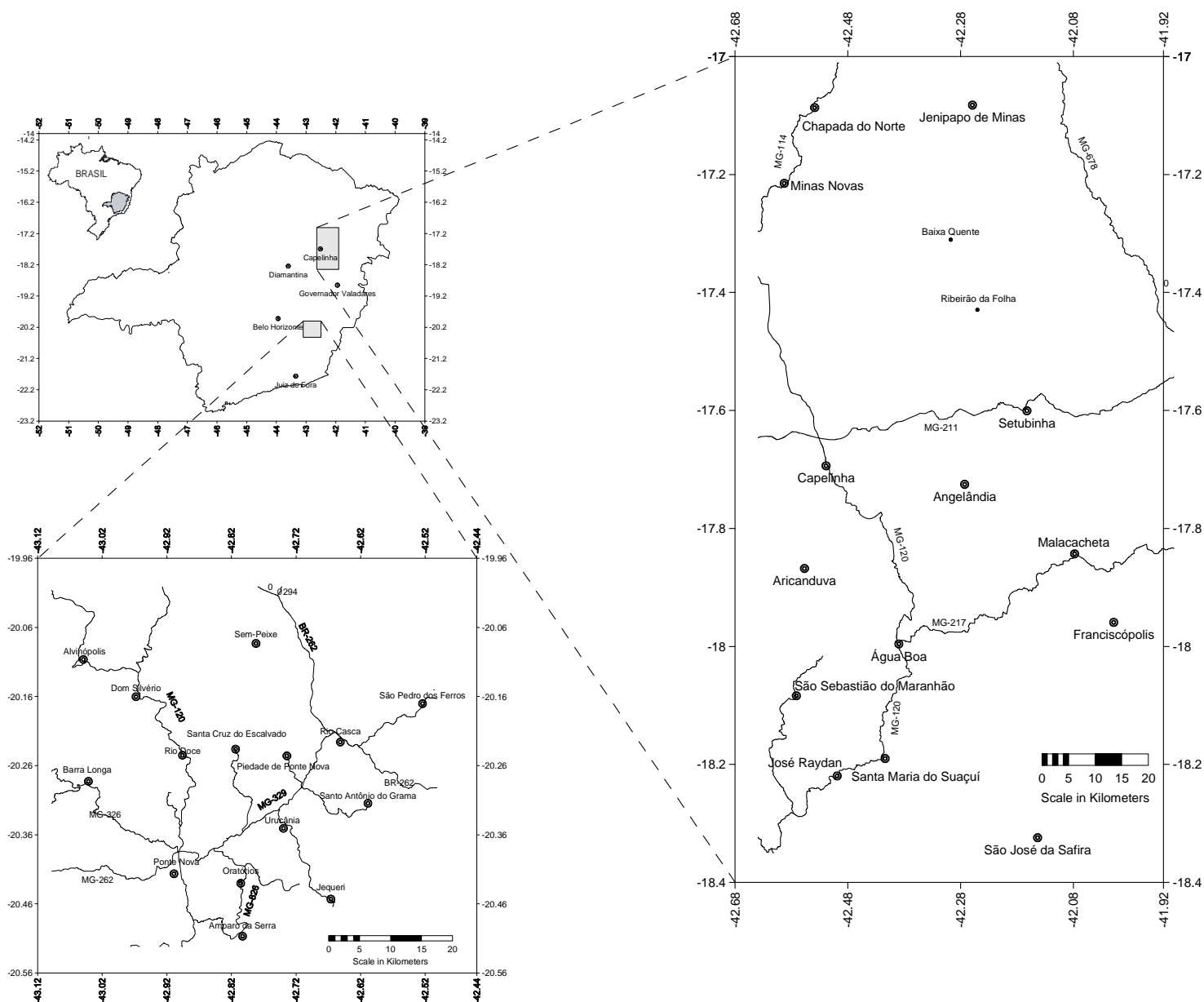


Figura 1.1. Localização e acesso dos setores estudados.

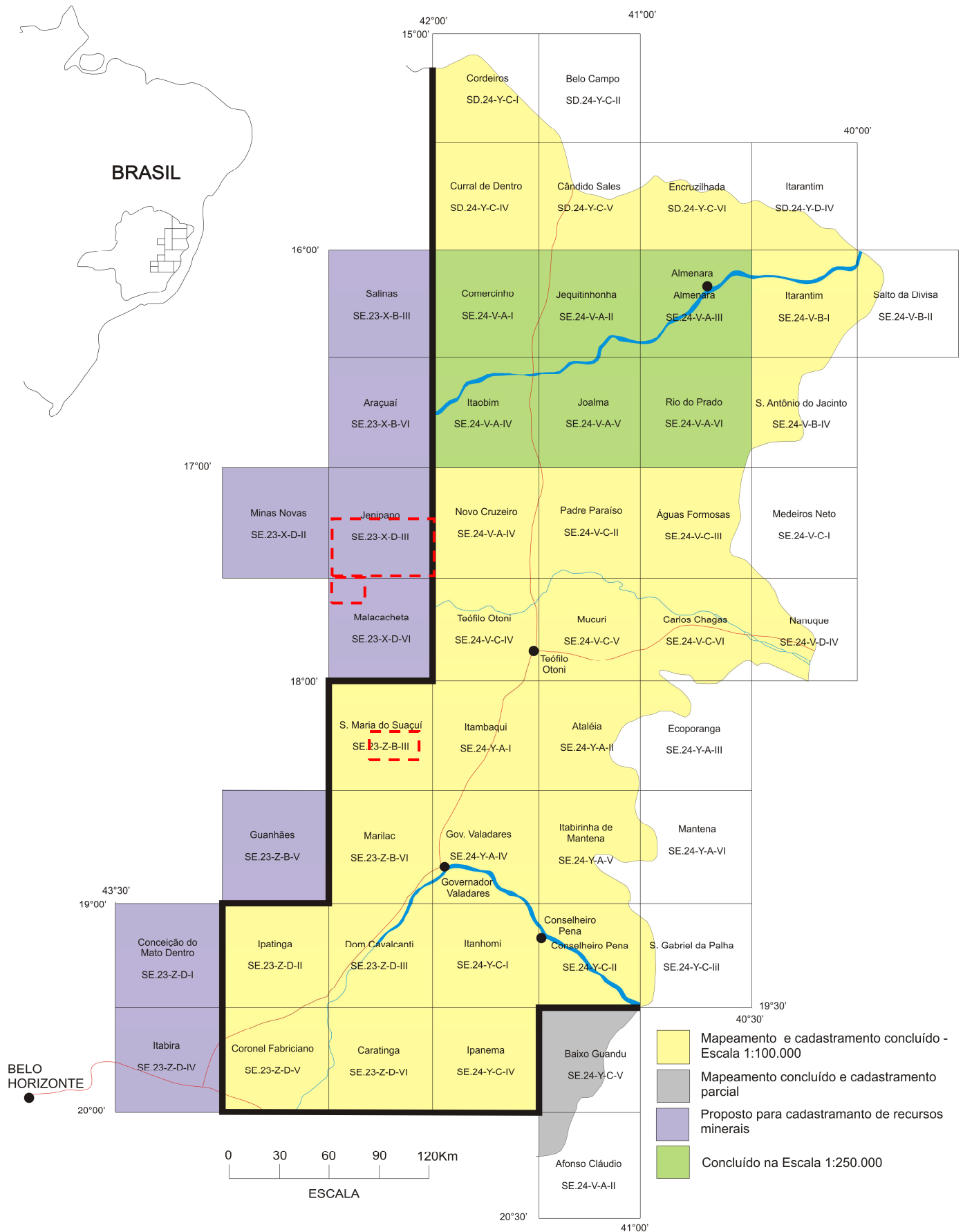


Figura 1.2. Mapa de situação e articulação das folhas 1:100.000 no âmbito dos projetos Espinhaço e Leste, destacando-se, em vermelho, o setor 1 em estudo. Modificado de Silva (2001).

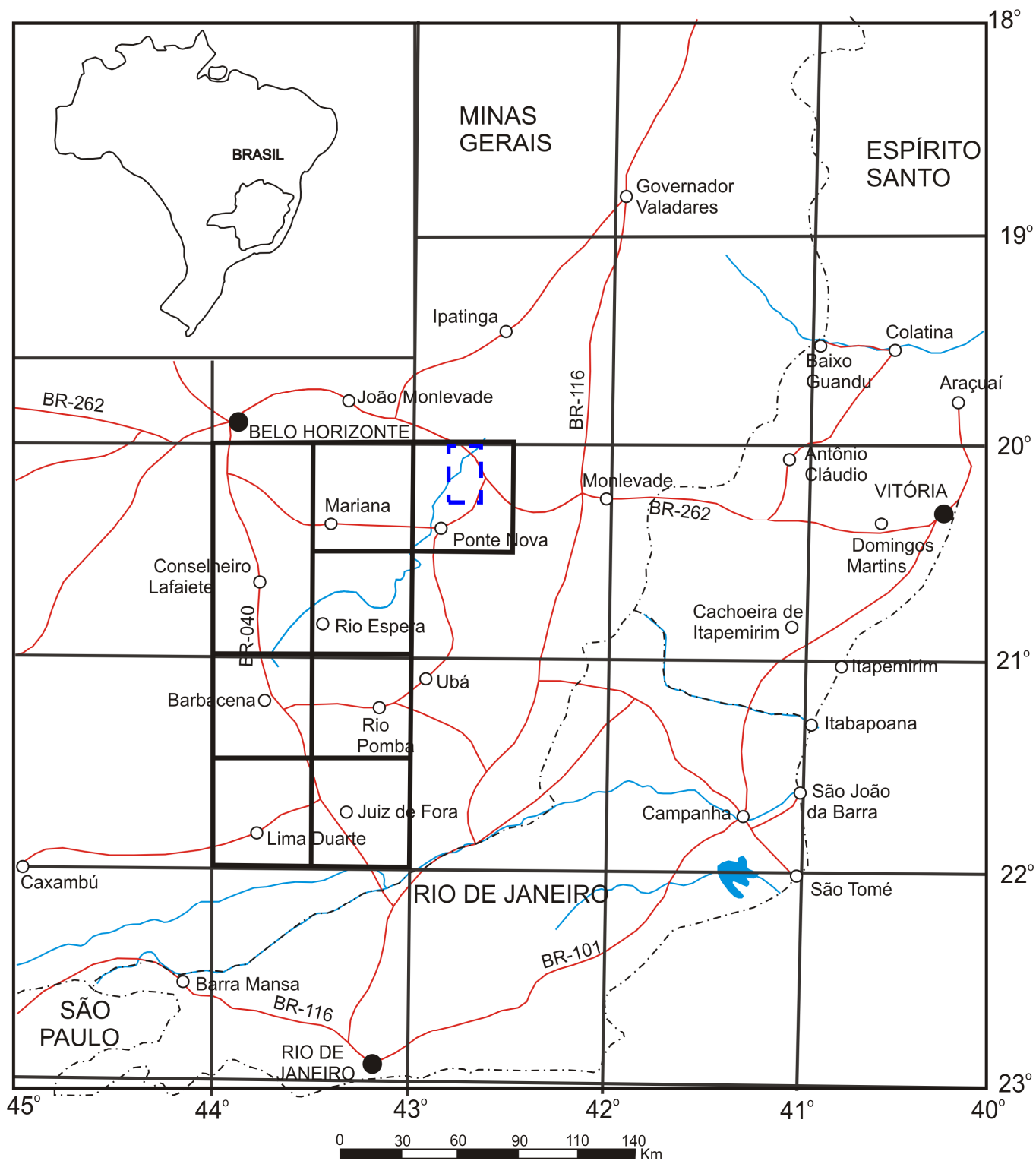


Figura 1.3. Mapa de situação e articulação das folhas 1:100.000 no âmbito do projeto Barbacena, destacando-se, em azul, o setor 2 estudado. Modificado de Brandalise (1991a).

1.3 – Remanescentes ofiolíticos no Orógeno Araçuaí: estado da arte e implicações para o desenvolvimento de um projeto de Doutorado

O termo Araçuaí, originalmente associado ao conceito de faixa de dobramentos marginal ao Cráton do São Francisco (Almeida 1977), foi redefinido em termos do conceito de orógeno (Pedrosa-Soares & Noce 1998, Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos 2000, Pedrosa-Soares *et al.* 2001). Nesta concepção, o Orógeno Araçuaí é a região orogênica neoproterozóica que se situa entre o Cráton do São Francisco e o litoral atlântico, aproximadamente entre os paralelos 15° e 21° S, e que tem a Faixa Congo Ocidental como sua contraparte na África. Esta faixa não apresenta restos ofiolíticos (Tack *et al.* 2001).

Pela Teoria da Tectônica Global, a maioria dos componentes e compartimentos geotectônicos teoricamente previsíveis para um orógeno colisional já foram, pelo menos preliminarmente, identificados no Orógeno Araçuaí (Pedrosa-Soares *et al.* 2005).

A descoberta de restos ofiolíticos neoproterozóicos no Orógeno Araçuaí data do início da década de 1990, quando se iniciaram os trabalhos de caracterização do ofiolito de Ribeirão da Folha (Pedrosa-Soares *et al.* 1990, 1992, 1998, 2001, 2005; Uhlein 1991, Carvalho *et al.* 1992, Pedrosa-Soares 1995, 1997; Aracema *et al.* 2000, Suita *et al.* 2004, Queiroga *et al.* 2005, Queiroga 2006). Os trabalhos sobre este remanescente de litosfera oceânica indicam a preservação de seções tectonicamente desmembradas, que evidenciam partes do manto e da litosfera suboceânicas, representadas por rochas ultramáficas, máficas e sedimentares (químico-exalativas e pelitos pelágicos), metamorfisadas em fácies anfíbolito médio.

No ofiolito de Ribeirão da Folha predomina a pilha de rochas da seção ofiolítica superior, constituída de pelitos pelágicos (quartzo-mica xisto, xisto peraluminoso, xisto grafitoso e xistos sulfetados) e de rochas químico-exalativas (metacherts diversos, formações ferríferas bandadas, diopsidito sulfetado, corpos de sulfeto maciço), detalhadamente caracterizados por Pedrosa-Soares (1995) e Queiroga (2006). A seção máfica deste remanescente oceânico é composta de orto-anfíbolitos diversos, representantes de corpos plutônicos e subvulcânicos (gabro maciço, dolerito com veios de plagiogranito) e de prováveis vulcânicas básicas (Pedrosa-Soares *et al.* 2004, Suita *et al.* 2004). A seção ultramáfica é representada por tremolita xisto (metapiroxenito) com fragmentos de metaperidotito (Carvalho *et al.* 1992, Pedrosa-Soares *et al.* 1992, 2004; Aracema *et al.* 2000, Suita *et al.* 2004). As assinaturas litoquímicas das rochas metamáficas e meta-ultramáficas revelam afinidade ofiolítica e origem em assoalho oceânico, a exemplo de rochas similares encontradas em outros ofiolitos neoproterozóicos (Pedrosa-Soares *et al.* 1998, 2001; Aracema *et al.* 2000, Suita *et al.* 2004). Os dados isotópicos Sm-Nd destas rochas mostram valores positivos de epsilon Nd e as idades modelo e isocrônica sugerem desenvolvimento de litosfera oceânica durante o

Neoproterozóico. Apesar de bem caracterizado do ponto de vista geológico, petrográfico e geoquímico, todas as tentativas de recuperação de zircão e titanita a partir de volumosas amostras de rochas metamáficas, visando à datação da cristalização magmática e do metamorfismo regional, foram infrutíferas (Pedrosa-Soares *et al.* 2008). Desta forma, os corpos leucocráticos semelhantes a plagiogranito (Suíta *et al.* 2004), com composição modal rica em cristais de zircão, se tornaram um dos principais alvos desta tese de doutorado. Amostras de rochas meta-ultramáficas e metamáficas também necessitam de novos estudos isotópicos.

O ofiolito de Ribeirão da Folha é o resto de litosfera oceânica neoproterozóica que se localiza em posição mais setentrional no Orógeno Araçuaí, em torno do cruzamento entre o paralelo 17°30' S com o meridiano 42° W. A partir desta área para sul, ao longo das imediações do meridiano 42° W, vários corpos máficos e ultramáficos, tectonicamente encaixados em rochas metassedimentares similares às de Ribeirão da Folha, foram indicados em mapas dos projetos Jequitinhonha (CPRM-DNPM 1978), Espinhaço (UFMG-CODEMIG 1997) e Leste (CPRM-CODEMIG 2001), a exemplo daqueles identificados nas regiões de Capelinha e São José da Safira, a noroeste de Governador Valadares.

Guimarães & Grossi-Sad (1997), no mapeamento da Folha Malacacheta em escala 1:100.000 (convênio UFMG-CODEMIG), identificaram nos arredores de Capelinha, próximo à desembocadura do Ribeirão Fanadinho com o Rio Fanado, corpos de anfíbolito de forma tabular, com granulação variável entre fina e média. Segundo estes autores, tais corpos parecem marcar a passagem da Formação Ribeirão da Folha para a Formação Capelinha, mas necessitam de estudos de campo (realização de perfis de detalhe para se entender a posição estratigráfica dos mesmos), petrográficos, geoquímicos e geocronológicos de detalhe.

Aracema *et al.* (2000) apresentam estudos preliminares sobre os restos ofiolíticos de São José da Safira. Nesta área encontram-se lascas de rochas meta-ultramáficas tectonicamente intercaladas numa espessa pilha de xisto peraluminoso (pelito pelágico) com intercalações de formações ferríferas bandadas, metachert e diopsidito. Amostras de rocha meta-ultramáfica com núcleos de peridotito preservados, dos arredores de São José da Safira, correlacionam-se a harzburgito ofiolítico. O conjunto litológico dos arredores de São José da Safira é correlacionável ao ofiolito de Ribeirão da Folha, mas carece de estudos geoquímicos e geocronológicos mais detalhados.

Na região de São Pedro dos Ferros-Santo Antônio do Grama ocorre um grande corpo metamáfico (anfíbolito de Santo Antônio do Grama) cuja idade-modelo Sm-Nd (*ca.* 840 Ma, Fischel 1998) sugere idade de cristalização magmática neoproterozóica e, portanto, coloca este corpo como candidato à correlação com os restos de litosfera oceânica toniana (embora, não se disponha de dados geoquímicos e de informação geocronológica sólida). Outros corpos metamáficos ocorrem nesta região, mas não há estudos sistemáticos sobre eles.

A partir de 1997 vão a público os trabalhos que caracterizam o arco magmático pré-colisional do Orógeno Araçuaí (Nalini 1997, Noce *et al.* 1999, 2000; Aracema *et al.* 1999, Pinto *et al.* 2001, Pedrosa-Soares *et al.* 2001, Martins *et al.* 2004).

O par de componentes geotectônicos ofiolito-arco magmático sustenta a proposição de localização da zona de sutura do Orógeno Araçuaí, apresentada por Pedrosa-Soares & Noce (1998), como uma zona balizada pelo meridiano 42° W, entre os paralelos 17° e 19° S, tendo os restos oceânicos a oeste e o arco magmático a leste. Pedrosa-Soares & Wiedemann-Leonardos (2000) e Pedrosa-Soares *et al.* (2001, 2008) sugeriram a continuação desta zona de sutura até a zona limítrofe com o Orógeno Ribeira (paralelo 21° S). Desta forma, a caracterização detalhada de restos ofiolíticos neoproterozóicos entre os paralelos 17° e 21° S é de grande utilidade para se entender a conexão entre os orógenos Araçuaí e Ribeira.

1.4 - Objetivos

Com base no cenário exposto no item anterior, o objetivo principal desta tese é a caracterização química-petrográfica e geocronológica de candidatos a remanescentes de litosfera oceânica neoproterozóica no setor centro-sul do Orógeno Araçuaí, entre os paralelos 17° e 21° S, na perspectiva de trazer subsídios à delimitação mais precisa da zona de sutura deste orógeno e de contribuir para o entendimento da conexão entre os orógenos Araçuaí e Ribeira. Dada a área de influência e a complexidade geológica dos grandes setores estudados neste trabalho, foram determinados objetivos específicos para cada setor e sub-área abrangida pelo projeto:

- ↳ caracterização petrográfica, geoquímica (rocha total e química mineral) e da idade de cristalização magmática dos veios de plagiogranito que compõem o ofiolito de Ribeirão da Folha;
- ↳ determinação da idade de metamorfismo de médio a alto grau na porção central do Orógeno Araçuaí, balizada pelos paralelos 17° e 17° 30'S;
- ↳ realização de estudos geoquímicos e isotópicos detalhados do conjunto litológico de São José da Safira, correlacionável ao ofiolito de Ribeirão da Folha;
- ↳ determinação do significado do Anfíbolito de Santo Antônio do Grama em relação à evolução do Orógeno Araçuaí, com base em análises petrográficas, geoquímicas e isotópicas (idade de cristalização magmática, de metamorfismo e idade-modelo Sm-Nd).

1.5 - Metodologia

O desenvolvimento do projeto de doutoramento foi sistematizado em etapas conjugadas entre os trabalhos de campo e os trabalhos de laboratório, de forma que ambas se completassem. Ressalta-se

que parte dos dados obtidos na Dissertação de Mestrado (Queiroga 2006) foram utilizados no decorrer da tese.

1.5.1 – Trabalhos de Campo

Os trabalhos de campo nos dois setores principais (*Ribeirão da Folha – Capelinha – São José da Safira* e *São Pedro dos Ferros – Santo Antônio do Grama*) incluíram a realização de mapeamento e perfis geológicos de detalhe e coleta sistemática de material para análises geoquímicas e isotópicas. Foram efetuadas diversas campanhas ao longo do período de desenvolvimento da tese, totalizando 80 dias de trabalho.

Os materiais utilizados como apoio para as etapas de campo foram:

⇒ Relatórios (projetos de pesquisa, trabalhos de graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado), artigos publicados em periódicos e mapas geológicos que enfocam as regiões estudadas: Fontes *et al.* (1978), Freitas-Silva & Pereira (1987), Lagoeiro & Menegasse (1987), Silva *et al.* (1987), Brandalise (1991a), Uhlein (1991), Carvalho *et al.* (1992), Pedrosa-Soares (1995, 1997), Guimarães & Grossi-Sad (1997), Fischel (1998), Pedrosa-Soares *et al.* (1998), Raposo (1999), Neves & Ferreira (1999), Aracema (2000), Silva (2001), Brandani & Costa (2004), Queiroga (2006) e Ferreira *et al.* (2007);

⇒ Folhas topográficas *Jenipapo* (IBGE 1983, SE-23-X-D-III, Carta do Brasil, escala 1:100.000), *Malacacheta* (IBGE 1983, SE-23-X-D-VI, Carta do Brasil, escala 1:100.000), *Santa Maria do Suaçuí* (IBGE 1980, SE-23-Z-B-III, Carta do Brasil, escala 1:100.000), *Rio Casca* (IBGE 1979, SF-23-X-B-II-2, Carta do Brasil, escala 1:50.000) e *Jequeri* (IBGE 1979, SF-23-X-B-II-4, Carta do Brasil, escala 1:50.000);

⇒ Aerofotos, originalmente em escala 1:40.000 (vôo SA-558; Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A. 1977), ampliadas para 1:25.000;

⇒ Imagens TM-LANDSAT 5, em escala 1:100.000 (banda 4, 1987 e 1988) e imagens GEOCOVER, em escala 1:50.000;

⇒ Material convencional de campo: GPS, lupa de mão (aumento de 10X), ímã, bússola, martelo, estereoscópio etc.

Adicionalmente às etapas de campo realizadas nas seqüências ofiolíticas do Orógeno Araçuai, cita-se a participação em uma excursão temática na região dos Montes Urais Polares (Círculo Polar Ártico, Rússia), realizada entre os meses de julho e agosto de 2009, como parte do projeto russo

“**Caracterização da região de Timan – Urais Polares**”. O principal objetivo da visita técnica foi o estudo petrológico do ofiolito Voykar, de idade Paleozóica (387 ± 34 Ma – Sm-Nd, rocha total; Saveliev *et al.* 1999). Um grande perfil geológico de detalhe, ao longo do Rio Lagortaju (sessão-tipo do ofiolito abordado, incluindo dunito, piroxenito, gabro, bolsões de plagiogranito e dolerito/diabásio), foi realizado com ênfase na coleta de amostras para estudos geoquímicos (elementos maiores, traços e terras raras) e geocronológicos (*U-Pb LA-ICP-MS*) comparativos.

1.5.1.1 – Mapeamento e perfis geológicos

O setor 1 (*Ribeirão da Folha – Capelinha – São José da Safira*) conta com mapas geológicos de cunho regional, nas escalas 1:100.000 e 1:150.000, e de detalhe na escala 1:25.000. Desta forma, para esta região foi realizada uma compilação dos mapas existentes visando à elaboração da base geológica atualizada do setor do Orógeno Araçuai aqui enfocado. Dois mapas geológicos compilados, nas escalas 1:100.000 e 1:25.000, encontram-se em anexo. O Anexo I (em *CD-Rom*) contém o **Mapa Geológico da região de Ribeirão da Folha – Baixa Quente**, escala 1:100.000, modificado de Freitas-Silva *et al.* (1987), Pedrosa-Soares (1997), Brandani & Costa (2004) e Queiroga (2006). O Anexo II (em *CD-Rom*) contém o **Mapa Geológico da região de São José da Safira**, escala 1:25.000, compilado de Neves & Ferreira (1999).

Perfis lito-estruturais na calha do Ribeirão da Folha e na região de São José da Safira, visando o detalhamento da estratigrafia anteriormente levantada e a localização dos pontos a serem amostrados (vide item 1.5.1.2), foram realizados.

O setor 2 (*São Pedro dos Ferros – Santo Antônio do Grama*) também apresenta mapas geológicos de caráter regional, nas escalas 1:100.000 e 1:250.000. Apesar disso, nenhum dos mapas disponíveis enfatizam o Anfibolito Santo Antônio do Grama e suas relações com gnaisses orto e paraderivados pertencentes aos Complexos Mantiqueira e Juiz de Fora e ao Grupo Andrelândia. Assim, efetuou-se o mapeamento geológico de toda a área de ocorrência deste grande corpo gabróico (cerca de 340 km^2) na escala 1:50.000 como forma de atender a um dos objetivos específicos desta tese. Foram descritas 372 estações de campo e obtidos dados litológicos, estratigráficos e estruturais, por meio de descrições detalhadas de campo, registros fotográficos e/ou desenhos esquemáticos, e coleta de amostras geo-referenciadas. Importante ressaltar que este trabalho foi realizado em conjunto com a equipe do trabalho geológico de graduação, intitulado “*Geologia da região de Santo Antônio do Grama, Minas Gerais*”, no período de julho a dezembro de 2007. O **Mapa Geológico da região de Santo Antônio do Grama** e o **Mapa de Pontos da região de Santo Antônio do Grama** encontram-se nos anexos III e IV (em *CD-Rom*), respectivamente.

1.5.1.2 – Coleta de amostras

A coleta sistemática de rochas máficas, veios de plagiogranito e rochas ultramáficas para estudos de laboratório (litoquímica, química mineral e isótopos) foi realizada, de norte para sul, na calha do Ribeirão da Folha, nos arredores de Capelinha e na região de Santo Antônio do Grama. As amostras foram coletadas em exposições frescas que facilitaram a obtenção de rochas isentas de alteração intempérica, com exceção de uma amostra associada ao Corpo Metaultramáfico do Córrego do Pimenta (região de Santo Antônio do Grama). A Tabela 1.1 apresenta uma síntese das amostras coletadas bem como das análises laboratoriais realizadas. Foram excluídas desta listagem as inúmeras amostras coletadas com fins exclusivos de descrição petrográfica.

Tabela 1.1 – Síntese das amostras coletadas e das análises realizadas.

Amostra	Localização	UTM	Litotipo	Análises				
				Litoquímica	Química Mineral	Sm-Nd	U-Pb LA-ICP-MS	U-Pb SHRIMP
Q-05B	Ribeirão da Folha	790244/ 8067980	Plagiogranito	X	X		X	X
Q-05C	Ribeirão da Folha	790244/ 8067980	Anfibolito (metadolerito/ metagabro)				X	
GQ-263	Ribeirão da Folha	790434/ 8068090	Anfibolito (metagabro)	X				
GQ-264	Ribeirão da Folha	790244/ 8067980	Plagiogranito	X				
GQ-265	Ribeirão da Folha	790244/ 8067980	Plagiogranito	X				
GQ-03	S.A.Grama	751753/ 7749967	Anfibolito	X		X	X	
GQ-04	S.A.Grama	751221/ 7752616	Anfibolito	X				
GQ-09	S.A.Grama	759661/ 7766030	Anfibolito	X		X	X	
GQ-13	S.A.Grama	751000/ 7752900	Anfibolito	X				
GQ-63	S.A.Grama	758867/ 7762829	Anfibolito	X				
GQ-69	S.A.Grama	756167/ 7759152	Anfibolito	X				
GQ-141	S.A.Grama	751868/ 7752050	Anfibolito	X				
B1B	S.A.Grama	749680/ 7750232	Anfibolito	X				
CG9C	S.A.Grama	753596/ 7742945	Anfibolito	X				
GQ-119	S.A.Grama	747543/ 7744905	Tremolita-talco xisto	X				

1.5.2 – Trabalhos de Laboratório

1.5.2.1 – Petrografia microscópica

Foram realizados estudos petrográficos em cerca de 70 lâminas delgadas e 3 seções polidas, em microscópio ZEISS (Axioskop 40), visando a caracterização detalhada dos diferentes litotipos em termos de feições texturais e paragêneses minerais.

Além disso, foram compiladas, após revisão, todas as descrições microscópicas obtidas por Freitas-Silva *et al.* (1987), Pedrosa-Soares (1995), Neves & Ferreira (1999), Aracema (2000), Brandani & Costa (2004) e Queiroga (2006) para os ofiolitos de Ribeirão da Folha e São José da Safira.

Os materiais de suporte utilizados para a etapa de descrição foram:

⇒ Apostila de Petrologia Ígnea e Metamórfica intitulada “Minerais petrográficos de rochas ígneas e metamórficas – resumo das propriedades ópticas e ocorrências”, da Prof^a. Hanna Jordt Evangelista (Departamento de Geologia – UFOP - 1988);

⇒ Livro de mineralogia óptica “The rock forming mineral”, dos autores W. A. Deer, R. A. Howie e J. Zussman (Editora Longman - 2^a edição – 1992).

1.5.2.2 – Química Mineral

As microanálises foram realizadas no Laboratório de Microscopia e Microanálises do Consórcio Física-Geologia-Química/UFMG – CDTN/CNEM, em aparelho de microsonda eletrônica da marca JEOL, modelo JXA-8900RL, utilizando 15 kV de voltagem de aceleração e 20 nA de corrente. Foram obtidas de três a dez análises pontuais em cada cristal utilizando a mesma rotina para cada mineral. As análises foram realizadas segundo a seqüência descrita: (i) identificação dos elementos presentes em cada mineral analisado, por meio do detector EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectrometer*); (ii) aquisição de imagens de elétrons secundários e retroespalhados, com resolução de alguns nanômetros, visando à observação de possíveis zonamentos químicos e, (iii) obtenção de microanálises; os resultados estão dispostos no corpo do texto. Na amostra de plagiogranito (Q-05B) foi realizado um mapeamento químico de detalhe em uma região composta por anfibólio zonado, plagioclásio e epidoto, com a finalidade de verificar o padrão da distribuição e substituição dos elementos químicos Al, Ca, Fe, Mg, Na e Si.

Para todos os minerais foram analisados os elementos Si, Al, Fe, Mg, Mn, Ca, Na, K, Ti, Cl e F. Os padrões utilizados foram microclina para Si e K; Al₂O₃ para Al; olivina para Fe e Mn; hornblenda para Mg; anortita para Ca; albita para Na; rutilo para Ti; tugtupita para Cl; CaF₂ para F. O programa de correção de dados empregado foi **ZAF**. As fórmulas estruturais foram calculadas com base em 32 oxigênios para o plagioclásio, em 24 para os anfibólios, em 36 para os cristais de

clorita, em 12,5 para o epidoto e em 20 para a titanita. O conteúdo de ferro obtido pela microsonda foi considerado como FeO.

Os diagramas ternários utilizados para caracterizar os minerais analisados foram obtidos através do programa *Origin 6.1*.

1.5.2.3 – Litoquímica

As análises químicas de rocha total foram realizadas pelo Laboratório AcmeLabs – ACME Analytical Laboratories Ltd. (Canadá). Os métodos utilizados para as análises quantitativas foram: (i) ICP-ES, com fusão da amostra por metaborato de lítio e digestão com HNO₃, para os óxidos maiores e elementos menores; (ii) ICP-MS, com fusão da amostra por metaborato/tetraborato de lítio e digestão com água régia (apenas metais-base), para elementos traços e terras raras; (iii) carbono e enxofre foram analisados pelo método LECO devido ao baixo limite de detecção. Os resultados das análises encontram-se no corpo do texto.

Além dos resultados litoquímicos obtidos nesta tese, foram tratadas as análises químicas da seção sedimentar do ofiolito de Ribeirão da Folha apresentadas por Pedrosa-Soares (1995) e Queiroga (2006) e dos orto-anfibolitos e rochas meta-ultramáficas dos ofiolitos de Ribeirão da Folha e São José da Safira, a maioria inéditas, obtidas por Pedrosa-Soares (1995), Uhlein (1991) e Aracema (2000). Os diagramas de distribuição dos elementos maiores, traços e terras raras foram obtidos pelos programas *Minpet 2.02*, *Origin 6.1* e *Excel 2003*. Ressalta-se que alguns gráficos binários e ternários, incluindo rochas vulcânicas e plutônicas das seqüências ofiolíticas estudadas, foram usados para fins de comparação litoquímica entre os litotipos mais e menos diferenciados. É importante enfatizar também que a maioria dos diagramas classificatórios utilizados, com base em elementos maiores, traços e terras raras, foram concebidos para rochas vulcânicas, devendo ser interpretados com o devido cuidado para as rochas plutônicas. Os dados de elementos terras raras foram normalizados em relação ao condrito (1,5 vezes os dados originais de Evensen *et al.* 1978), ao MORB-E (Sun & McDonough 1989) e ao NASC- *North American Shale Composite* (Haskin *et al.* 1966). Diagramas do tipo *spider* (multi-elementar) foram normalizados em relação ao MORB de Pearce (1983) e ao condrito de Thompson (1982).

1.5.2.4 – Análises isotópicas

1.5.2.4.1 – Método U-Pb LA-ICP-MS

Este estudo foi realizado sobre amostras de plagiogranito e anfibolito da região de Ribeirão da Folha e sobre anfibolitos de Santo Antônio do Grama (Tabela 1.1). As amostras coletadas foram

processadas pelos métodos convencionais com britagem, moagem, peneiramento e concentração da fração de 80 a 120# por bateia, no laboratório LOPAG – DEGEO – UFOP. A separação dos grãos de zircão e cristais de titanita foi feita de forma manual, com auxílio de lupa binocular, no CPMTIC-IGC-UFMG.

Todos os zircões foram montados em uma seção circular de araldite com 2,5cm de diâmetro e polidos até que zircões ficassem expostos. Imagens foram obtidas com utilização de microscópio óptico (Leica MZ 12₅) e microscópio eletrônico de varredura (Jeol JSM 5800). Os grãos de zircões foram datados com Microsonda a Laser (New Wave UP213) acoplado a um MC-ICP-MS (Neptune), no Laboratório de Geologia Isotópica da UFRGS. Dados isotópicos foram adquiridos pelo modo estático com tamanho do feixe de laser de 15 a 25 µm (Tabela 1.2). Fracionamentos de elementos por indução do Laser e discriminação de massa instrumental foram corrigidos com a utilização de um padrão de referência de zircão GJ-1 (padrão internacional do GEMOC ARC National Key Center, Austrália; Jackson *et al.* 2004). Erros externos foram calculados com a propagação do erro das medidas individuais do padrão GJ-1 e das medidas individuais de cada amostra de zircão (ou spot). As incertezas associadas às razões apresentadas nas tabelas de dados são de 1σ, em porcentagem. As idades foram calculadas utilizando o programa **ISOPLOT 3.0** (Ludwig 2003).

A preparação dos cristais de titanita e as condições de análise seguiram os padrões adotados para os grãos de zircão, com algumas exceções. Para a titanita, o tamanho do feixe de laser é normalmente 40 a 55 µm (Tabela 1.2), visto que este mineral apresenta baixas quantidades de U e Pb. As razões isotópicas e fracionamento inter-elementar dos dados obtidos foram avaliados e corrigidos pelo padrão de titanita Khan (padrão de referência internacional do Cinturão Damara, Namíbia), os quais são analisados a cada 4, 6 ou 10 análises de amostra de titanita. O número de pontos de análises varia conforme a homogeneidade dos grãos, e com a quantidade de Pb, U e de Pb comum (conteúdos consideráveis) presentes nos cristais.

Tabela 1.2 – Resumo das condições de análise por LA-ICP-MS.

Condições de operação do Laser	
Tipo de Laser ⇒ New Wave UP213	MC-ICP-MS ⇒ Neptune
Potência de saída do Laser: 4-6 J/cm ²	Configuração dos Coletores: 1- Faradays ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U 2- MIC's ²⁰² Hg, ²⁰⁴ Hg + ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁷ Pb
Taxa de repetição dos feixes de Laser: 10 Hz	Injeção de gás: 1- Fluxo de resfriamento (Ar): 15 l/min 2- Fluxo auxiliar (Ar): 0,8 l/min 3- Fluxo de transporte de amostra: 0,75 l/min (Ar) + 0,45 l/min (He)
Tamanho do spot de Laser: 15, 25, 40 e 55 µm	Aquisição: 50 ciclos de 1,048 s

Análises pelo método *U-Pb LA-ICP-MS* em amostras de plagiogranito dos Montes Urais Polares foram realizadas no Laboratório Isotópico da Universidade de Brasília. Os métodos analíticos e os resultados encontram-se dispostos no final do capítulo três desta tese.

1.5.2.4.2 – Método U-Pb SHRIMP

A mesma seção de zircões do plagiogranito analisada no Laboratório de Geologia Isotópica da UFRGS foi enviada para análise no Laboratório de Geocronologia da Australian National University (Canberra). As análises SHRIMP foram realizadas utilizando as microssondas iônicas SHRIMP I e II, nas quais foram determinadas as razões entre as massas $Zr^{20}O^+$, $^{204}Pb^+$, $^{206}Pb^+$, $^{207}Pb^+$, $^{208}Pb^+$, $^{238}U^+$, $^{232}Th^{16}O^+$, $^{238}U^{16}O^+$. Os dados são reduzidos no programa SQUID (Ludwig 2000) e as incertezas associadas às razões são de 1σ . As idades foram calculadas utilizando o programa *ISOPLOT 3.0* (Ludwig 2003).

Imagens de catodoluminescência foram obtidas em microscópio eletrônico Hitachi S-2250, sob condições de aceleração de voltagem de 15kV.

1.5.2.4.3 – Método Sm-Nd

As determinações isotópicas pelo método Sm-Nd, realizadas em amostras de anfibolito da região de Santo Antônio do Grama (Tabela 1.1), seguiram o método descrito por Gioia & Pimentel (2000). No procedimento cerca de 50 mg do pó da amostra é misturada a uma solução traçadora de ^{149}Sm e ^{150}Nd . A amostra é dissolvida em cápsulas Savillex® por meio de sucessivos ataques ácidos em HF, HNO₃ e HCl. Os conteúdos de Sm e Nd são extraídos através de colunas de trocas catiônicas, confeccionadas em Teflon e empacotadas com resina LN-Spec (resina líquida HDEHP-ácido di-(etilhexil) fosfórico impregnada em pó de teflon). As frações de Sm e Nd são depositadas em arranjos duplos de filamentos de rênio com ácido nítrico e analisadas na forma metálica, em modo estático, utilizando o espectrômetro de massa Finnigan MAT-262 multi-coletor, do Laboratório de Geocronologia da UnB. As incertezas para as razões de Sm/Nd e $^{143}Nd/^{144}Nd$ são inferiores a $\pm 0,5\%$ (2σ) e $\pm 0,005\%$ (2σ), respectivamente, baseados em análises repetidas dos padrões internacionais BHVO-1 e BCR-1. As razões isotópicas são normalizadas para um valor de $^{146}Nd/^{144}Nd$ de 0,7219 e a constante de desintegração utilizada é $6,54 \times 10^{-12} a^{-1}$. Os valores de T_{DM} foram calculados usando o modelo de De Paolo (1981).

Além dos dados obtidos nesta tese, foram tratados os dados obtidos por Pedrosa-Soares (1995) na seqüência sedimentar e ultramáfica dos ofiolitos de Ribeirão da Folha e São José da Safira, e ainda não trabalhados e publicados.

1.5.3 – Estruturação da tese

A tese está estruturada em sete capítulos, descritos resumidamente a seguir, e apresenta três mapas geológicos e um mapa de pontos em *CD-Rom* anexado ao trabalho.

↪ Capítulo 1: introduz ao leitor as áreas estudadas e apresenta uma visão geral do problema abordado, os principais objetivos da tese e o roteiro metodológico para cumpri-los;

↪ Capítulo 2: apresenta uma compilação de trabalhos que abordam o arcabouço geotectônico e geológico das regiões onde se inserem as seqüências ofiolíticas abordadas. Parte deste capítulo, associada ao Grupo Macaúbas, encontra-se disposto sob a forma de artigo, no qual a doutoranda é um dos co-autores. O artigo intitula-se “*The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí orogen, SE Brazil) with emphasis on the diamictite formations*”, e está aceito para publicação como capítulo do livro “*The geological record of Neoproterozoic glaciations*”, editado por E. Arnaud, G. Halverson & G. Shields, Special Publication – Geological Society of London, 2010. Para melhor diagramação do texto, o artigo está disposto de acordo com as normas adotadas para a tese, diferindo do volume original submetido.

↪ Capítulo 3: expõe uma revisão bibliográfica acerca de complexos ofiolíticos – conceitos e evolução do pensamento geológico. No final do capítulo está exposto um estudo de caso sobre o *Maciço de Voykar* – ofiolito Paleozóico visitado e estudado pela doutoranda em conjunto com pesquisadores russos do Instituto Geológico de Moscou (Academia Russa de Ciências) e do Instituto Geológico da República de Komi. Como resultado desta cooperação científica, foram datadas cinco amostras de plagiogranito coletadas nos Montes Urais Polares e os resultados geocronológicos – importantes por se tratar da primeira idade U-Pb do ofiolito em questão – encontram-se dispostos no corpo do texto e em um trabalho completo publicado no VII SSAGI – South American Symposium on Isotope Geology (Brasília, 25 a 28 de julho de 2010) e exposto no final do capítulo.

↪ Capítulo 4: destina-se à apresentação e discussão de dados petrográficos, geoquímicos, isotópicos e geocronológicos das rochas meta-ultramáficas, metamáficas, veios de plagiogranito e rochas metassedimentares da faixa ofiolítica de Ribeirão da Folha – São José da Safira. Este item contém, no Apêndice 1, a primeira publicação acerca da idade U-Pb do ofiolito de Ribeirão da Folha, intitulada “*Age of the Ribeirão da Folha ophiolite, Araçuaí Orogen: the U-Pb zircon (LA-ICPMS) dating of a plagiogranite*” (revista *Geonomos – Faixa Araçuaí e conexões: 30 anos após Almeida 1977*; Volume 15, número 1, páginas 61-65, 2007). Ressalta-se que o artigo apresentado está disposto de acordo com as normas da tese, diferente do modelo original publicado pela revista.

↪ Capítulo 5: tem como foco a apresentação e discussão dos dados obtidos no mapeamento geológico em escala 1:50.000 da região de Santo Antônio do Grama, com ênfase no corpo máfico-ultramáfico encaixado nos gnaisses do Complexo Mantiqueira ao longo da Zona de Cisalhamento de Abre Campo.

↪ Capítulo 6: discute os resultados obtidos neste projeto de doutoramento, em termos gerais e específicos para cada setor abordado, correlacionando-os aos objetivos propostos no item I.4.

↪ Capítulo 7: expõe a lista das referências bibliográficas consultadas. Este item inclui todas as referências citadas no corpo do texto, bem como aquelas citadas nos artigos apresentados.