



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÕES DETRÍTICOS E CARACTERIZAÇÃO  
LITOESTRATIGRÁFICA DAS ROCHAS METASSEDIMENTARES DA UNIDADE  
CATARINA MENDES - IMPLICAÇÕES QUANTO A EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA  
DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

**AUTOR:** Frederico Moreira Freitas

**ORIENTAÇÃO:** Prof. Dr. Tiago Amâncio Novo

Nº 203

**BELO HORIZONTE**

**27/05/2019**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**



## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

GEOCRONOLOGIA U-Pb EM ZIRCÕES DETRÍTICOS E CARACTERIZAÇÃO  
LITOESTRATIGRÁFICA DAS ROCHAS METASSEDIMENTARES DA UNIDADE  
CATARINA MENDES - IMPLICAÇÕES QUANTO A EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA  
DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

FREDERICO MOREIRA FREITAS

Dissertação de Mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-Graduação em Geologia  
do Instituto de Geociências, Universidade  
Federal de Minas Gerais, como requisito para  
obtenção do título de Mestre em Geologia.

**Área de concentração:** Geologia Regional

**Orientador:** Prof. Dr. Tiago Amâncio Novo

**Co-orientador:** Ms. Marcelo de Souza Marinho

Belo Horizonte

2019

F866g  
2019

Freitas, Frederico Moreira.

Geocronologia em U-PB em zircões detríticos e caracterização litoestratigráfica das rochas metassedimentares da unidade Catarina Mendes [manuscrito] : implicações quanto a evolução geotectônica do Quadrilátero Ferrífero / Frederico Moreira Freitas – 2019. xiv,83f., enc. (principalmente color.)

Orientador: Tiago Amâncio Novo.

Coorientador: Marcelo de Souza Marinho.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2019.

Área de concentração: Geologia Regional.

Bibliografia: f. 60-75.

Inclui anexos.

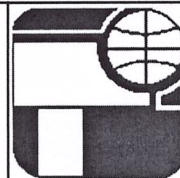
1. Tempo geológico – Teses. 2. Petrologia – Minas Gerais – Teses. 3. Geoquímica – Teses. 4. Quadrilátero Ferrífero (MG) – Teses. I. Novo, Tiago Amâncio. II. Marinho, Marcelo de Souza. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 55(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA




## FOLHA DE APROVAÇÃO

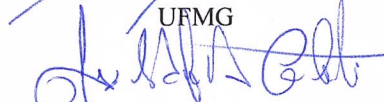
**GEOCRONOLOGIA U-PB EM ZIRCÕES DETRÍTICOS E CARACTERIZAÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA DAS ROCHAS METASSEDIMENTARES DA UNIDADE CATARINA MENDES - IMPLICAÇÕES NA EVOLUÇÃO GEOTECTÔNICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

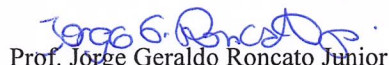
**FREDERICO MOREIRA FREITAS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Mestre em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA REGIONAL.

Aprovada em 27 de maio de 2019, pela banca constituída pelos membros:

  
Prof. Tiago Amâncio Novo - Orientador  
UFMG

  
Prof. José Adilson Dias Cavalcanti  
CPRM

  
Prof. Jorge Geraldo Roncato Junior  
UFMG

Belo Horizonte, 27 de maio de 2019.

*Os lugares estão sempre ai em si, para se confirmar.*

(João Guimarães Rosa em Grande Sertão: Veredas)

## **AGRADECIMENTOS**

A realização deste trabalho só foi possível graças a uma ampla rede de apoio, entre pessoas e instituições, que viabilizaram a pesquisa aqui apresentada e deram suporte ao processo de escrita e discussão dos resultados. Expresso a estas os meus sinceros agradecimentos.

Ao orientador deste trabalho, prof. Dr. Tiago Novo pela oportunidade e orientações ao longo do mestrado.

Ao Dr. Marco Aurélio Piacentini Pinheiro, pelo incentivo, disponibilidade e por todos os debates geológicos que tanto enriqueceram este trabalho.

Ao Instituto de Geociências da UFMG, pelo ensino público gratuito de qualidade.

Ao laboratório de Geoquímica Isotópica da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pela realização das análises isotópicas e redução dos dados.

Agradeço também ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM, pelo incentivo e apoio à capacitação de seu corpo técnico.

Aos geólogos e colegas da CPRM, pelas enriquecedoras discussões geológicas, em especial aos geólogos José Adilson Dias Cavancanti, Raianny Caroline Ramos Ferreira, Joana Magalhães, Marcus Paulo Sotero e Paulo Henrique Amorim Dias.

Aos geólogos responsáveis pelo mapeamento e avanço no conhecimento do Supergrupo Rio das Velhas, que produziram um vasto banco de dados amplamente utilizado ao longo desta pesquisa, em especial aos senhores Orivaldo Ferreira Baltazar, Manuel Pedro Tuller, Nicola Signoreli e José Heleno Ribeiro. Considero um privilégio ter convivido e aprendido com vocês.

Ao amigo Tiago Lucon, pelo apoio nas etapas de campo.

Aos meus familiares, por todo apoio e incentivo ao longo da minha formação.

À Livia, pelo amor, exemplo e companheirismo diário.

Ao Pedro, meu filho, por já me motivar.

## Sumário

AGRADECIMENTOS .....	vi
Lista de Figuras.....	x
Lista de Tabelas .....	xii
Resumo .....	xiii
Abstract.....	xiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Estruturação da Dissertação .....	2
1.3 Objetivos e justificativa: a natureza do problema.....	3
1.4 Localização e acessos .....	4
1.5 - Metodologia.....	5
1.5.1 Revisão bibliográfica .....	5
1.5.2 Etapas de campo e levantamento estratigráfico da seção tipo .....	6
1.5.3 Petrografia.....	8
1.5.4 Litoquímica de rocha total .....	9
1.5.5 Análise U-Pb (LA-ICP-MS) em zircão detrítico .....	9
CAPÍTULO 2 – GEOLOGIA REGIONAL .....	10
2.1 Arcabouço tectônico .....	10
2.2 Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero .....	12
2.2.1 O <i>greenstone belt</i> Rio das Velhas.....	13
2.3 Dados geocronológicos do QF.....	15
CAPÍTULO 3- GEOLOGIA LOCAL .....	16
3.1 Bloco São Bartolomeu.....	16
3.2 Grupo Nova Lima no Bloco São Bartolomeu.....	17
3.2.1 Unidade Catarina Mendes.....	17

3.2.2	Unidade Córrego da Paina .....	19
3.2.3	Unidade Fazenda Velha .....	19
3.2.4	Unidade Pau D'Óleo .....	19
3.3	Geologia estrutural.....	20
CAPÍTULO 4 – ARTIGO: U-Pb ages for metasedimentary rocks of the Catarina Mendes unit and implications for geological setting of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. ....		
4.1	Introduction.....	24
<b>4.2</b>	<b>Geological setting</b> .....	<b>25</b>
4.2.1	The Rio das Velhas greenstone belt overview.....	26
4.2.1	The São Bartolomeu block and Mariana anticline .....	28
<b>4.3</b>	<b>Analytical methods</b> .....	<b>31</b>
4.3.1	Field data and type section .....	31
4.3.2	Whole-rock analysis .....	32
4.3.3	U-Pb geochronology (LA-ICP-MS) .....	32
<b>4.4</b>	<b>Results</b> .....	<b>33</b>
4.4.1	Field geological data and petrography.....	33
4.4.2	Whole-rock geochemistry.....	37
4.4.3	U-Pb geochronology .....	39
<b>4.5</b>	<b>Discussion</b> .....	<b>42</b>
4.5.1	Stratigraphic significance and depositional environment.....	42
4.5.2	Lithochemical signature and related sources .....	43
4.5.3	Geochronological insights and maximum depositional age .....	47
4.5.4	Regional inferences .....	50
<b>4.6</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>52</b>
<b>4.7</b>	<b>Acknowledgments</b> .....	<b>52</b>
CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....		
		53



5.1 Discussão .....	53
5.1.1 Estratigrafia e ambiente deposicional .....	53
5.1.2 Dados litoquímicos e áreas fonte relacionadas .....	53
5.1.3 Idades geocronológicas .....	55
5.1.4 Implicações regionais .....	57
5.2 Conclusões .....	58
CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	60
ANEXOS .....	76

## Lista de Figuras

- Figura 1: Mapa Geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Cavalcanti *et al.*, 2016). O quadrado vermelho corresponde a Figura 3 e representa a região de estudo..... 2
- Figura 2: Imagem de satélite da região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, mostrando as cidades de Ouro Preto e Mariana, os distritos de Mendes, São Bartolomeu e Passagem de Mariana, além da indicação do principal ponto estudado (MF196 - Pedreira de Catarina Mendes) (GoogleMaps). ..... 5
- Figura 3: Mapa geológico local com a localização das amostras..... 7
- Figura 4: Levantamento do perfil de detalhe na pedreira de Catarina Mendes (MF196)..... 8
- Figura 5: A: Localização do Cráton São Francisco no território brasileiro. B: Contexto geológico regional da porção sul do Cráton São Francisco e suas faixas móveis. O limite cratônico passa pela região do Quadrilátero Ferrífero. C: Contexto tectônico da região oeste do Supercontinente Gondwana (extraído e modificado de Silva *et al.*, 2016, Pinheiro *et al.*, 2019). ..... 11
- Figura 6: Coluna Estratigráfica da região do Quadrilátero Ferrífero (modificado de Dopico *et al.*, 2017; com base nas propostas de Dorr, 1969; Alkmin e Martins-Neto, 2012)..... 13
- Figura 7: compilação das idades geocronológicas publicadas na região do Quadrilátero Ferrífero..... 16
- Figura 8: Mapa geológico simplificado de parte da Quadrícula São Bartolomeu (B) no Quadrilátero Ferrífero (A). 1- Complexo Metamórfico Bação; 2- SGRV, 2a - Grupo Nova Lima com camada de metabásica, 2b - Grupo Maquiné; 3 – SGM; 4 - foliação milonítica; 5 - limite entre os domínios D1 e D2; ZCSV - Zona de Cisalhamento São Vicente; ZCTP- Zona de Cisalhamento Tapera; SCFC- Sistema de cisalhamento Fundão-Cambotas. C - Diagrama estereográfico de foliação milonítica e lineação mineral do SGM próximo ao contato com o SGRV. D - foliação milonítica e lineação mineral e estiramento de seixos no SGRV. E – Esboço geológico de dobra

padrão S próximo ao contato com o Bação (extraído de Araújo 2001, modificado de Endo <i>et al.</i> , 1996). .....	21
Figure 9 A) Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero (QF) province (after Cavalcanti <i>et al.</i> , 2016) in the context of the São Francisco craton (Figure B). The compiled ages are presented in the Supplementary data (T1). The São Bartolomeu block is limited by the red line. ....	25
Figure 10: Geological map of São Bartolomeu and Mendes region (Freitas <i>et al.</i> , 2017) and airborne geophysical maps of ternary radiometric data (K-eU-eTh) (A) and first order vertical derivative of magnetic data (B). ....	31
Figure 11: Stratigraphic profile of the section type in the Catarina Mendes unit. Sample MF196 presents U-Pb LA-ICPMS zircon ages. ....	34
Figure 12: a) Compositional bedding and discordant veins in the Catarina Mendes units at this section type (sample MF196). b) Photomicrography of meta-greywacke (sample MF196) showing several granules dispersed in the feldspar-quartz-chlorite-biotite matrix; c) rotated porphyroclasts of garnet with pressure shadows of chlorite and quartz (sample MF170); d) Sigmoid of biotite porphyroclast with pull apart texture and pressure shadows (sample MF162). ....	36
Figure 13: REE spidergrams normalized to chondrite composition (Sun and McDonough, 1989) (A) and to PAAS composition – Post-Archean Average Australian Shale (Taylor & McLennan, 1985) (B). The blue line represents the NASC composition – North American Shale Composition (Gromet <i>et. al.</i> , 1984). ....	38
Figure 14: Cathodoluminescence images of zircon grains from samples MF 196 and MF 391, both meta-greywackes. Spot=30 µm. ....	40
Figure 15: Concordia diagram for sample MF196 (all grains). ....	40
Figure 16: Frequency histograms showing U–Pb age data for samples from sample MF196 and sample MF391. Columns show possible sources of sediment supply. All weighted zircon age data was 90–110% concordant according to the ratio $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ / $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ and treated as sigma-1 errors. ....	41
Figure 17: Concordia diagram for sample MF391 (concordant grains). ....	42

Figure 18: Relation between CIA (Nesbitt & Young, 1982) and ICV (Cox et al., 1995) values for sedimentary rocks of different origins (modified from Teixeira, 2015). The dashed red line represents the Golia (1997) data field. .... 44

Figure 19: REE data obtained in the studied samples (MF162, MF196 and MF391) and also data compiled from literature, normalized to chondrite (Sun and McDonough 1989). A) REE data from the Bação complex (Farina et al., 2015), Santa Bárbara complex (Baltazar & Raposo, 1993) and volcanic felsic of the RVGB (Junqueira, 1997; Zucchetti & Baltazar, 2000; CPRM - Projeto QF internal report); B) REE of metakomatiites from the Quebra Osso Group (Acken et. al., 2016) and tholeiitic basalts from the RVGB (Zucchetti, 1998; Zucchetti & Baltazar 2000), besides OIB, E-MORB and N-MORB patterns (Sun and McDonough, 1989); C) Metasediments of the RVGB (Junqueira, 1997; Zucchetti & Baltazar, 2000; Lima, 2012; CPRM - Projeto QF internal report) and metasediments of the Maquiné Group (Zucchetti & Baltazar, 2000); D) REE values of metasediments from the São Bartolomeu region (Golia, 1997)..... 46

Figure 20: Mixture models involving different Archean lithotypes presented in the QF for the metasedimentary rocks from the Catarina Mendes unit, using REE values compiled in literature (see text for references). The green triangles are the data obtained in this study..... 47

Figure 21: Frequency histograms showing compilation U–Pb age data of QF studies. Yellow crystal highlighting the youngest zircon grains from sample MF-196. <sup>1</sup> Cassino, 2014; <sup>2</sup> Dopico et al., 2017. .... 49

## **Lista de Tabelas**

Table 1: Results of the whole-rock analyses of the samples MF196, MF162 and MF391. .... 37

## Resumo

A unidade de Catarina Mendes (CMU) representa uma sequência do tipo grauvaca-argilito relacionadas ao *Greenstone Belt* Rio das Velhas (GRV), localizada no Quadrilátero Ferrífero (QF), sul do Cráton São Francisco. Essa sequência está estratigraficamente posicionada entre os terrenos granito-gnáissicos do embasamento cristalino arqueano do QF e as rochas metassedimentares Paleoproterozóicas do Supergrupo Minas. As rochas do GRV são hierarquizadas no Supergrupo Rio das Velhas, dividido três grupos: Quebra-Osso (complexo máfico-ultramáfico), Nova Lima (meta-vulcano-sedimentares) e Maquiné (metassedimentares siliciclásticas).

No sudeste do QF, as serras de Ouro Preto e Antônio Pereira representam os flancos da anticlinal de Mariana, que tem em sua região central rochas do Grupo Nova Lima divididas em três unidades informais transicionais entre si, chamadas Catarina Mendes, Córrego da Paina e Fazenda Velha. São metagrauvacas, metapelitos, metarenitos e lentes subordinadas de metaconglomerado, níveis de metagrauvaca félsica, rochas calcissilicáticas, além de corpos restritos de turmalinito. Apresentam bandamento composicional marcado por laminação rítmica grano-decrescentes. A presença de biotita, granada e estauroлита indica metamorfismo na fácies anfíbolito, associado a um posterior retro-metamorfismo em fácies de xisto verde.

Esta dissertação de mestrado apresenta dados U-Pb LA-ICP-MS de análises isotópicas em grãos de zircão detríticos obtidos a partir de amostras da unidade Catarina Mendes, além de sua caracterização litoestratigráfica e litoquímica. Duas amostras foram analisadas, uma delas representando a seção tipo da unidade. Os dados indicam uma idade máxima de sedimentação de  $2481 \pm 12$  Ma para esses sedimentos e registram pelo menos dois eventos tectono-metamórficos períodos distintos, um no Riáciano ( $2114 \pm 5$  Ma) e outro no Criogeniano ( $678 \pm 4$  Ma), relacionados aos eventos Transamazônico e Brasiliano, respectivamente. A partir desses dados, é discutida a relação dessa unidade com os Supergrupos Rio das Velhas e Minas, trazendo novos elementos a compreensão da arquitetura do QF.

## Abstract

The Catarina Mendes unit (CMU) is a greywacke-argillite metasedimentary association of the Rio das Velhas greenstone belt (RVGB), in the Quadrilátero Ferrífero province (QF), southern São Francisco craton. This unit is stratigraphically positioned between the granite-gneiss terrains that constitute the crystalline basement of the QF and the paleoproterozoic metasedimentary sequence of the Minas Supergroup. The RVGB rocks are constrained in the homonymous Supergroup, which comprises three groups (from bottom to top): i) Quebra-Osso Group (metamafic-ultramafic complex); ii) Nova Lima Group (metavulcano-sedimentary sequence); and iii) Maquiné Group (siliciclastic metasedimentary rocks).

To southeast of the QF, in the core area of the Mariana anticline, i.e. between the flanks of this regional fold, topographically represented by the Ouro Preto and Antônio Pereira ridges, the upper Nova Lima Group is subdivided into three informal units, named Catarina Mendes, Córrego da Paina and Fazenda Velha. These units comprise turbidite-gravel-clay associations that show transitional contacts with each other and common intercalations of amphibolites, tourmalinites and carbonate-rich rocks, besides metaconglomerates. The metasedimentary rocks in these upper units of the Nova Lima Group show a compositional banding marked by rhythmic intercalation of centimetric layers and an upward coarsening pattern. These rocks register amphibolite facies metamorphic conditions containing staurolite, biotite and garnet assemblages, which later retrogressed to greenschist facies conditions.

In addition, this work presents new geochronological data for CMU and new insights of its source area and environmental setting through detailed lithostratigraphy at its section type area, besides petrographic and lithochemical investigation. Two samples were analyzed (U-Pb LA-ICP-MS in detrital zircon grains) to constrain maximum depositional age, that yielded of  $2481 \pm 12$  Ma. The U-Pb isotopic results also presented Cryogenian and Rhyacian records, respectively at  $678 \pm 4$  Ma and  $2114 \pm 5$  Ma, considered as tectono-metamorphic overprints. These data disclose new elements on the QF architecture and basins development and unravel how CMU relates to the Rio da Velhas and Minas Supergroups.

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

Os terrenos metamórficos do tipo *greenstone belts* são formados por associações de rochas vulcanosedimentares encontradas como remanescentes supracrustais ao longo do tempo geológico, presente principalmente nas regiões crônicas arqueanas (Condie, 1994). As associações formadas por essas rochas e os complexos graníticos associados constituem os principais elementos da crosta durante os períodos iniciais de evolução e desenvolvimento do planeta Terra (Anhaeusser, 2014). Devido às particularidades da geologia do arqueano e do paleoproterozoico, como a inacessibilidade de dados diretos e a inexistência de sistemas terrestres análogo modernos, essas associações de rochas se destacam como de extrema relevância no entendimento das condições primordiais de formação da Terra. Nesse contexto, a geocronologia coloca-se como uma valiosa ferramenta que contribui na construção de modelos geológicos e é por isso abordada de maneira exaustiva pelas mais diversas áreas das geociências ao redor do mundo.

Na região central de Minas Gerais, inserido na província mineral do Quadrilátero Ferrífero (QF), extremo sul do cráton São Francisco (Almeida 1977), ocorre um cinturão do tipo *greenstone belt* associado ao Supergrupo Rio das Velhas (Loczy & Ladeira, 1976). Esse supergrupo é formado por associações de rochas vulcanosedimentares e sedimentares que registram ambientes marinhos e vulcânicos em épocas compreendidas entre 2,9 e 2,7 Ga (Baltazar & Zucchetti, 2007). Suas unidades ocorrem deformadas pelas orogenias paleo e neoproterozoicas, registrando metamorfismo em condições de fácies xisto verde a anfíbolito (Dorr, 1969; Baltazar & Zucchetti, 2007). Inserida entre as unidades metavulcanossedimentares do Grupo Nova Lima, a unidade Catarina Mendes (Ribeiro & Tuller, 1996), de ocorrência restrita à porção sul do QF, abrange xistos derivados de arenitos, grauvacas, argilitos e subordinadamente metaconglomerados, calcissilicáticas e turmalinitos, metamorfisados nas fácies xisto-verde a anfíbolito e retrometamorfismo em fácies xisto-verde. A principal área de ocorrência dessa unidade está inserida na região central da anticlinal de Mariana (Figura 1).

Estudos isotópicos a partir de zircões detríticos constituem uma importante ferramenta no entendimento da origem e evolução de rochas sedimentares, uma vez que

o espectro de idades encontrado proporciona evidências temporais na compreensão dos modelos geológicos das bacias e suas áreas fonte. Essa dissertação apresenta os resultados da pesquisa que teve como objetivo principal a obtenção das idades U-Pb dos zircões detríticos extraídos dos metassedimentos da Unidade Catarina Mendes (CMU). Através dos resultados das análises isotópicas U-Pb (LA-ICP-MS), litogeoquímica de rocha total e da descrição de um perfil estratigráfico detalhado da pedreira seção-tipo dessa unidade, esse trabalho avança no entendimento quanto a proveniência sedimentar e os processos geoquímicos envolvidos, as idades de cristalização e metamorfismo registradas nesses sedimentos, além de propor uma idade máxima de sedimentação para essa unidade.

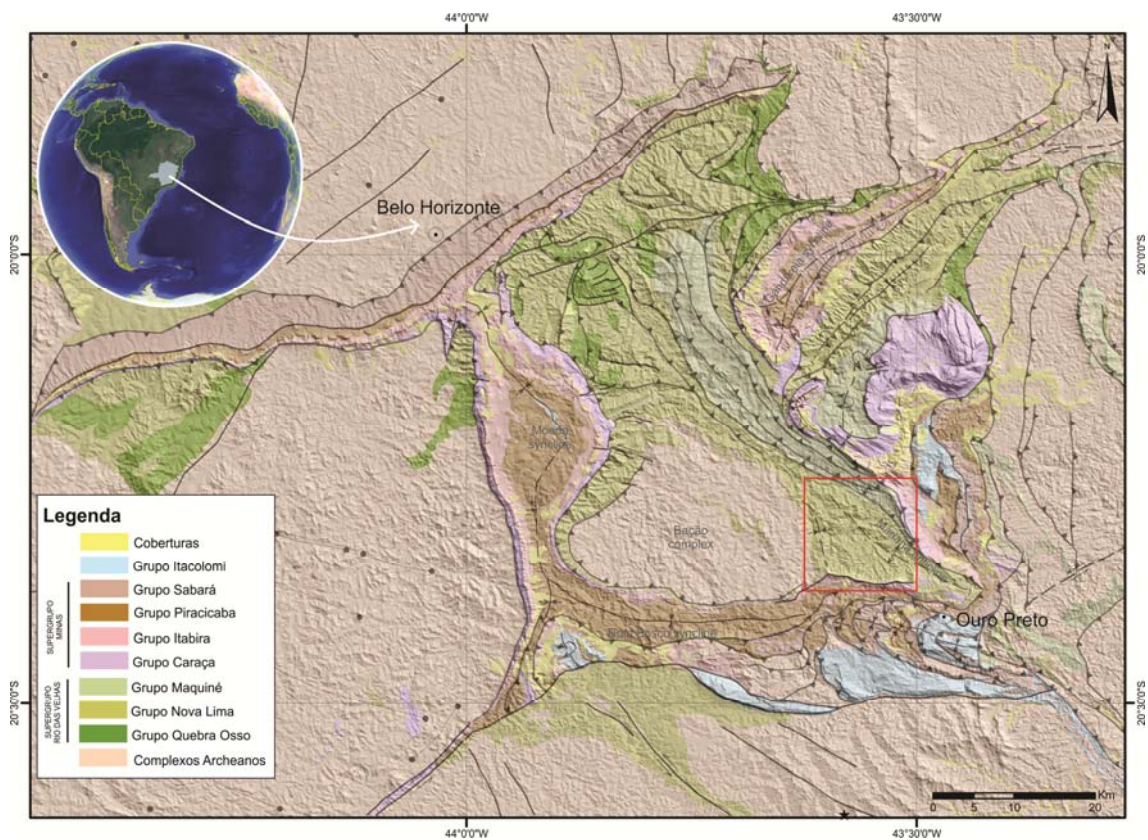


Figura 1: Mapa Geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero (modificado de [Cavalcanti et al., 2016](#)). O quadrado vermelho corresponde a Figura 3 e representa a região de estudo.

## 1.2 Estruturação da Dissertação

Esta dissertação está organizada ao longo de seis capítulos, cujos conteúdos são:



Capítulo 1 - Introdução: apresenta ao leitor uma introdução geral sobre o tema, a localização da área estudada, a natureza do problema, os objetivos do trabalho e o roteiro metodológico seguido durante a pesquisa;

Capítulo 2 – Geologia Regional: discorre sobre o contexto geológico regional do Quadrilátero Ferrífero e do *Greenstone Belt* Rio das Velhas;

Capítulo 3 – Geologia Local: apresenta ao leitor a geologia local da região de São Bartolomeu - Mendes;

Capítulo 4: apresenta os resultados da pesquisa desenvolvida ao longo do mestrado através do artigo científico intitulado “*U-Pb ages for metasedimentary rocks of the Catarina Mendes unit and implications for geological setting of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*”, submetido à publicação na Revista *Brazilian Journal of Geology*.

Capítulo 5: apresenta a discussão a partir dos dados adquiridos e as conclusões da pesquisa realizada;

Capítulo 6: lista as referências bibliográficas utilizadas durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

### 1.3 Objetivos e justificativa: a natureza do problema

O objetivo geral que norteou este projeto de mestrado foi a obtenção das idades geocronológicas de zircões detríticos presentes nas rochas metassedimentares da unidade Catarina Mendes, além da caracterização litológica, petrográfica e geoquímica, visando ampliar o conhecimento dessas rochas localizadas na região do alto Rio das Velhas.

Trabalhos anteriores já apontavam as características distintas dessa unidade quando comparada às demais unidades metassedimentares do Supergrupo Rio das Velhas, destacando-se o mais alto grau metamórfico, em fácies anfibolito, além da ausência de vulcanitos máfico-ultramáficos (Zucchetti *et al.*, 1996). A partir dessas observações e considerando os poucos dados geocronológicos publicados dessa região, foi proposta a aplicação de análises LA-ICP-MS e a descrição detalhada do empilhamento estratigráfico dos litotipos na seção tipo, buscando-se obter um espectro de idades das áreas fonte e a caracterização estratigráfica e, assim, a partir dos

resultados, aprofundar nas discussões sobre o ambiente sedimentar, a assinatura geoquímica e as idades registradas. Através da interpretação dos dados geocronológicos, pretendeu-se analisar a proveniência dos zircões, definir os eventos magmáticos e metamórficos registrados no espectro de idades, correlaciona-los aos dados disponíveis na literatura, verificar a correlação com as demais unidades metassedimentares do Grupo Nova Lima e discutir a relevância desses registros na compreensão da evolução crustal da porção sul do Cráton São Francisco.

#### 1.4 Localização e acessos

A área alvo deste trabalho está localizada no sudeste do Quadrilátero Ferrífero, região central do estado de Minas Gerais, a norte da cidade de Ouro Preto. Essa região, entre os distritos de São Bartolomeu e Mendes, apresenta a área de maior expressão da ocorrência das rochas relacionadas ao Grupo Nova Lima no sul do QF (Figura 2). A área é limitada a sul pela Serra de Ouro Preto, localmente conhecida como Serra do Veloso, e a leste/nordeste pela Serra de Antônio Pereira, que juntas representam os flancos da Anticlinal de Mariana. O limite oeste é com o Complexo do Bação

Essa região pode ser acessada a partir de Ouro Preto, subindo-se a Serra do Veloso em direção ao bairro Morro São Sebastião e, a partir daí, segue-se por estradas de terra em direção aos distritos de Mendes e São Bartolomeu. Uma alternativa é acessar a área a partir de Cachoeira do Campo, seguindo-se por estradas de terra em direção ao Morro São Bartolomeu. A seção tipo da unidade Catarina Mendes, principal afloramento descrito neste trabalho, fica a aproximadamente 10 km a noroeste da cidade de Ouro Preto (Figura 2).



Figura 2: Imagem de satélite da região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, mostrando as cidades de Ouro Preto e Mariana, os distritos de Mendes, São Bartolomeu e Passagem de Mariana, além da indicação do principal ponto estudado (MF196 - Pedreira de Catarina Mendes) (GoogleMaps).

## 1.5 - Metodologia

Buscando alcançar os objetivos propostos, foi adotada uma metodologia de trabalho ao longo da pesquisa apresentada nesta dissertação de mestrado. Essa metodologia foi organizada nas diferentes etapas descritas a seguir.

### 1.5.1 Revisão bibliográfica

Este estudo teve início com a pesquisa bibliográfica de trabalhos sobre a geologia regional e local do Quadrilátero Ferrífero. Foram compilados artigos, dissertações, teses, relatórios técnicos, mapas geológicos e imagens geofísicas da região do Quadrilátero Ferrífero, priorizando os que tinham como foco o *Greenstone belt* Rio das Velhas e possuíam dados geocronológicos publicados. Esse levantamento permitiu a compilação dos dados geocronológicos do QF. Seguiu-se com levantamento bibliográfico de referências metodológicas quanto a geocronologia, a petrografia, a sedimentologia e a geoquímica, buscando um bom embasamento teórico para as etapas seguintes. Esse trabalho de compilação de referências foi contínuo ao longo de todo o período de duração do mestrado para acompanhar a publicação de trabalhos recentes.

Em seguida, foi montado um banco de dados e elaborada uma base geológico-cartográfica em SIG, utilizando os dados levantados que incluíam dados diversos do mapeamento geológico da Folha São Bartolomeu executado pelo Projeto Rio das Velhas, parceria entre a CPRM e o DNPM entre 1992 e 1996 que conduziu o mapeamento geológico na escala 1:25.000 das rochas do Supergrupo Rio das Velhas. Dentre esses dados estão mapas geológicos e geofísicos, descrições de afloramentos, lâminas petrográficas e relatórios. Esses dados podem ser acessados através do GeoSGB – Dados, Informações e Produtos do Serviço Geológico do Brasil ([www.geosgb.cprm.gov.br](http://www.geosgb.cprm.gov.br)). Também foram utilizados dados adquiridos por esse autor em seu trabalho como pesquisador no Projeto ARIM – QF Central, desenvolvido atualmente pelo Serviço Geológico do Brasil – CPRM e que aborda a revisão do mapeamento realizado pelo Projeto Rio das Velhas.

#### 1.5.2 Etapas de campo e levantamento estratigráfico da seção tipo

A primeira etapa de campo, com duração de 12 dias, foi realizada concomitante a etapa de campo do Projeto ARIM-QF Central do SBG-CPRM, visando o reconhecimento, descrição e amostragem das rochas da região entre São Bartolomeu e Mendes e da região de Itabirito.

A segunda etapa, com um dia de duração, foi dedicada ao reconhecimento da pedreira de Catarina Mendes e de afloramentos relevantes nas proximidades. Essa etapa foi guiada pelo Geólogo Manuel Pedro Tuller, um dos autores do mapeamento da Folha São Bartolomeu e da definição e caracterização da unidade.

Posteriormente, foi realizada uma terceira etapa de campo de 5 dias, novamente concomitante ao campo do Projeto ARIM-QF Central. Essa etapa foi dedicada ao reconhecimento da continuidade lateral da unidade e de seus contatos com as demais unidades descritas na área. Foram realizadas amostragens de rochas destinadas às análises de U-Pb e litoquímica de rocha total, de acordo com a disposição espacial dos melhores afloramentos, selecionando os que apresentavam rochas pouco intemperizadas e afastadas das zonas de cisalhamento. Além da seção tipo (MF196), boas exposições foram observadas ao longo da ferrovia do aço (MF170, MF391) e nas cachoeiras de Catarina Mendes (MF162) e São Bartolomeu (MF135) (Figura 3).

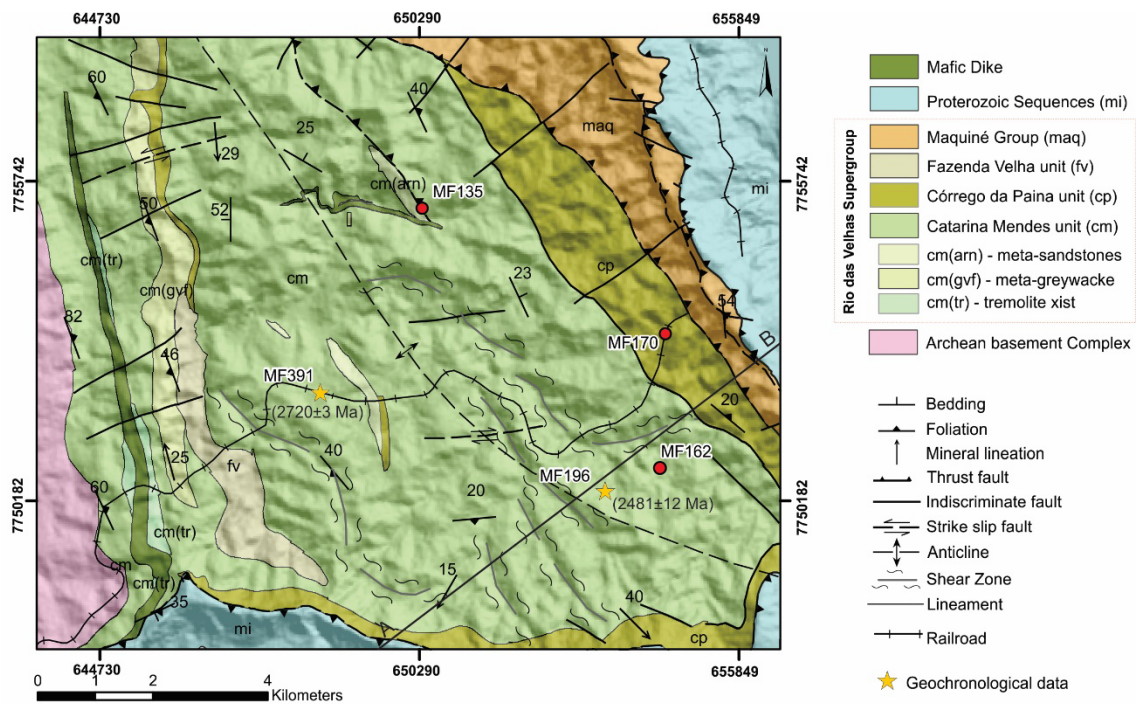


Figura 3: Mapa geológico local com a localização das amostras.

A última etapa de campo, com duração de 3 dias, foi dedicada ao levantamento detalhado (escala 1:50) do empilhamento estratigráfico observado na pedreira Catarina Mendes, visando o reconhecimento da seção tipo da unidade. A pedreira corresponde a uma exposição vertical de rocha com aproximadamente 32 metros de altura por 200 metros de comprimento. Durante essa etapa foram empregadas técnicas verticais de acesso por corda para viabilizar a descrição e amostragem ao longo da exposição vertical (Figura 4). Dados gamaespectrométricos foram medidos ao longo do perfil, com um espaçamento de 1 metro, utilizando um gamaespectrômetro modelo RS-230.





Figura 4: Levantamento do perfil de detalhe na pedreira de Catarina Mendes (MF196)

### 1.5.3 Petrografia

O reconhecimento da composição e texturas mineralógicas das rochas da Unidade Catarina Mendes foi realizado através da confecção de um total de 23 lâminas petrográficas, 13 delas a partir de amostras coletadas ao longo do perfil realizado e confeccionadas pelo laboratório de laminação do IGC-UFMG, as outras 10 foram

confeccionadas pela Litoteca da CPRM em Caeté/MG. Além disso, foram consultadas outras 192 lâminas de afloramentos dessa região pertencentes ao acervo do Projeto Rio das Velhas. Esse acervo encontra-se arquivado na Superintendência de Belo Horizonte da CPRM e suas descrições foram obtidas através do GeoSGB.

#### 1.5.4 Litoquímica de rocha total

Para a realização dos estudos de litoquímica foram selecionadas três amostras representativas de rocha, preservadas do intemperismo, na região de Mendes e São Bartolomeu. Foram coletadas amostras na base da pedreira Catarina Mendes (seção-tipo – MF196), a Cachoeira Catarina Mendes (MF162) e um afloramento nas margens da Ferrovia que corta a área (MF391). As amostras selecionadas foram preparadas na Litoteca da CPRM em Caeté/MG, onde foram serradas de modo a se retirar a alteração superficial, descartando também partes fraturadas e com evidências de alteração hidrotermal.

As análises foram realizadas pela SGS Geossol Laboratórios Ltda, através do Projeto ARIM – QF - Central. Os pacotes analíticos utilizados foram o XRF79C (análise de rocha por fusão com tetraborato de lítio e quantificação por XRF para determinação de elementos maiores e alguns óxidos), IMS95A (determinação dos elementos traços por fusão com Metaborato de Lítio) e o ICP MS 31 (dissolve os principais minerais formadores de rocha e alguns traços).

Para tratar os resultados obtidos, foi utilizado o *software* Iqpet (Carr & Gazzel, 2017). Através da comparação com os dados geoquímicos compilados na região do QF, foram realizados modelamentos da composição química das áreas fontes.

#### 1.5.5 Análise U-Pb (LA-ICP-MS) em zircão detrítico

As análises geocronológicas foram realizadas em duas amostras, uma coletada na base da seção tipo (MF196) e a outra ao longo da ferrovia (MF391). Os dados U-Pb (LA-SF-ICP-MS) foram adquiridos no Laboratório de Geoquímica Isotópica na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e estão disponíveis no Anexo 1. As amostras foram britadas e posteriormente moídas usando um moinho de disco. O material obtido foi concentrado na bateia, seco em estufa entre 50 e 70°C e a fração magnética foi separada usando um ímã de neodímio. A fração não magnética foi separada por densidade utilizando diiodometano e um funil de decantação. O material com densidade superior a 3,31 foi submetido ao separador magnético Frantz, resultando

em porções diamagnética e paramagnética. Com a porção diamagnética, contendo os zircões, foi confeccionado uma pastilha mount com resina epoxy, posteriormente polida utilizando alumina em pó.

Após a preparação das amostras e confecção do mount, imagens de Catodoluminescência dos grãos de zircão foram executadas utilizando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As análises U-Pb foram obtidas por um LA-SF-ICP-MS (ThermoFisher Scientific Element 2) acoplado a um Sistema de Laser ArF Excimer com  $\lambda = 193$  nm da Photon Machines. Os zircões foram analisados com tempo de leitura de 20 segundos e de 30 micrometros de spot. Os dados foram reduzidos no Software GLITTER (Van Achterbergh *et al.*, 2001). As correções comuns dos dados foram feitas utilizando o Software MsExcel e o suplemento Isoplot (Ludwin, 2003), com erros de 2 sigma. Na validação dos dados, foram descartadas as análises de grãos que apresentaram discordância superior a 10%.

## CAPÍTULO 2 – GEOLOGIA REGIONAL

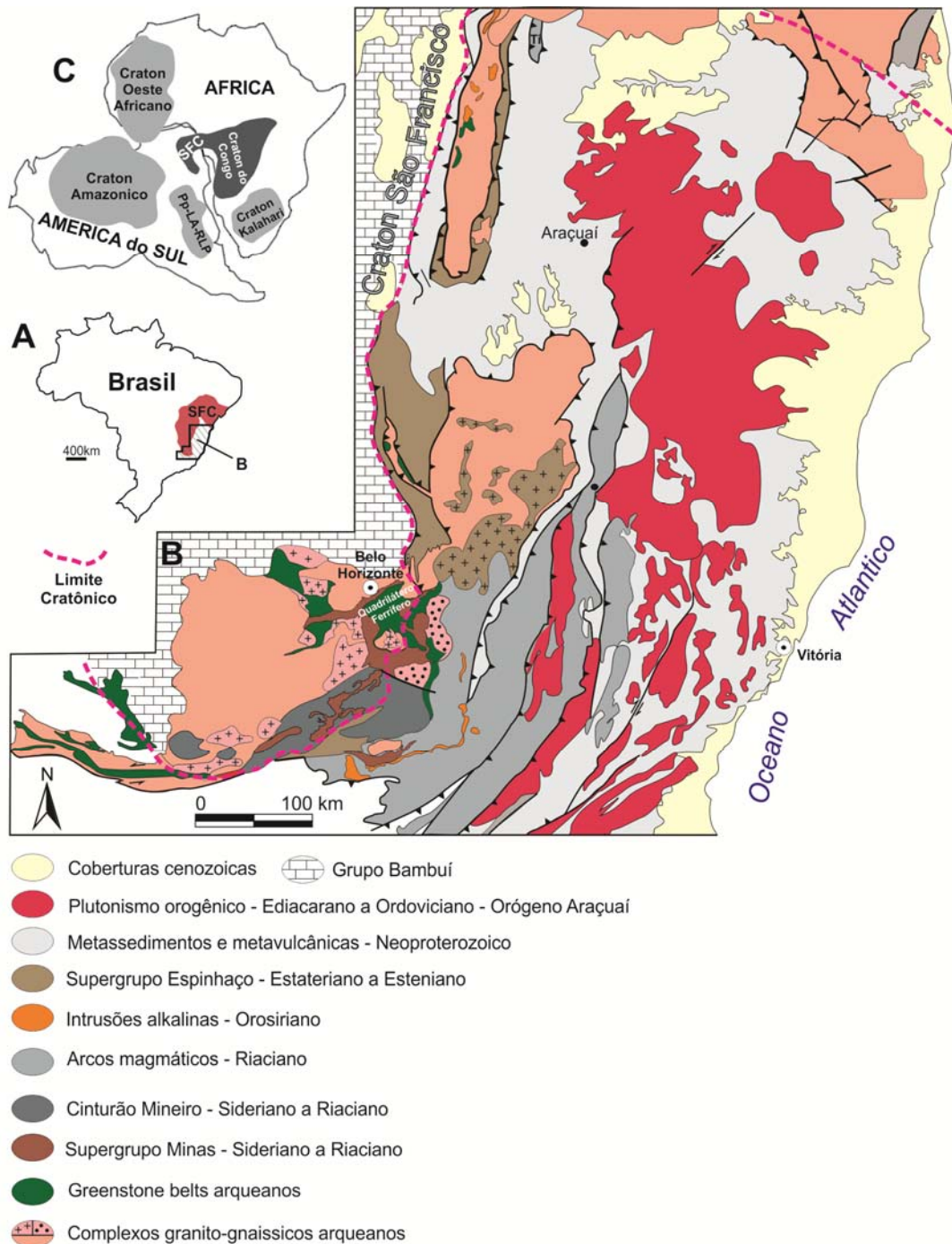
### 2.1 Arcabouço tectônico

Almeida (1977) descreve o Cráton São Francisco (CSF) como uma região estável após o evento arqueano Jequié, ocorrido entre 2,9 e 2,7 Ga, com suas bordas retrabalhadas nos ciclos orogênicos Transamazônico e Brasileiro. O Transamazônico (Hurley *et al.*, 1967) é tido como o mais importante evento de formação da crosta continental, desenvolvido no paleoproterozóico entre 2,1 e 1,9 Ga. No extremo sul do CSF, o representante do Transamazônico é o Cinturão Mineiro e suas unidades crocorrelatas (Teixeira *et al.*, 1996; Alkmim, 2004, Teixeira & Alkmim, 2017), de estruturação na direção ENE, formado por complexos ígneo-metamórficos arqueanos e paleoproterozóicos, além de unidades supracrustais correlatas aos Supergrupos Rio das Velhas e Minas.

O Quadrilátero Ferrífero (QF) ocupa uma área de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup> no limite sul do Cráton São Francisco (Figura 5). É assim chamado devido a forma aproximadamente quadrangular formada pela serra do Curral, a norte, Sinclinal Moeda a oeste, Sinclinal Dom Bosco a sul e as serras do Caraça e Gandarela a leste. Essa geometria é o resultado de uma estruturação na forma de domos e quilhas (Alkmim & Marshak, 1998), associada a grandes sistemas de falhas de natureza compressional,



transcorrente e extensional, geradas principalmente durante o evento Transamazônico. [Endo et al.\(2005\)](#) propõe a existência de uma megaestrutura alóctone no QF, denominada *nappe* Curral, mais antiga e superposta pela *nappe* Ouro Preto ([Almeida 2004](#)), sendo a zona de cisalhamento São Vicente o contato entre essas duas mega estruturas ([Madeira 2016](#)).



cratônico passa pela região do Quadrilátero Ferrífero. C: Contexto tectônico da região oeste do Supercontinente Gondwana (extraído e modificado de [Silva et al., 2016](#), [Pinheiro et al., 2019](#)).

## 2.2 Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero

O QF apresenta três grandes grupos de rochas: i) o embasamento siálico arqueano, correspondente aos complexos granito-gnáissicos; ii) as associações supracrustais do tipo *Greenstone Belt*, correspondente ao Supergrupo Rio das Velhas (SGRV) ([Loczy & Ladeira, 1976](#)), formado por complexos metamáfico-ultramáficos e sequências metavulcano-sedimentares arqueanas; sobreposto em discordância angular pelas iii) sucessões metassedimentares e metavulcanossedimentares paleoproterozóicas do Supergrupo Minas ([Dorr, 1969](#)) e do Grupo Itacolomi.

O primeiro mapeamento geológico sistemático do QF foi realizado pelo USGS (*United States Geological Survey*) através do convênio com o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), no período entre 1946-1964, que teve como resultado um mapa geológico na escala 1:150.000 ([Dorr, 1969](#)). Através do mapeamento de 42 cartas geológicas na escala 1:25.000, foram definidas as unidades litoestratigráficas formais do Supergrupo Minas, sequência que hospeda os depósitos de minério de Ferro do QF. Ainda, foram definidos no Supergrupo Rio das Velhas os Grupos Nova Lima (indiviso) e Maquiné (Figura 6).

Posteriormente, entre os anos de 1992 e 1996, foi realizado o mapeamento da sequência *greenstone* do QF através do “Projeto Rio das Velhas”, visando o avanço no conhecimento da unidade estratigráfica que hospeda os grandes depósitos auríferos do QF. Esse projeto, parceria entre o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e o DNPM, mapeou 26 quadrículas na escala 1:25.000 e teve como resultado um mapa geológico integrado na escala 1:100.000, que apresentou a primeira divisão litoestratigráfica do Grupo Nova Lima em unidade informais e representava o Supergrupo Minas como indiviso. ([Baltazar & Silva, 1996](#); [Zucchetti et al., 1996](#); [1998](#)).

A integração desses dois mapeamentos regionais foi realizada pelo projeto “Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG”, parceria entre a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e da CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais) e resultou no primeiro mapa integrado do QF na escala 1:100.000, abrangendo o detalhamento estratigráfico dos Supergrupos Rio das Velhas e Minas ([Lobato et al., 2005](#); [Baltazar et al., 2005](#)).

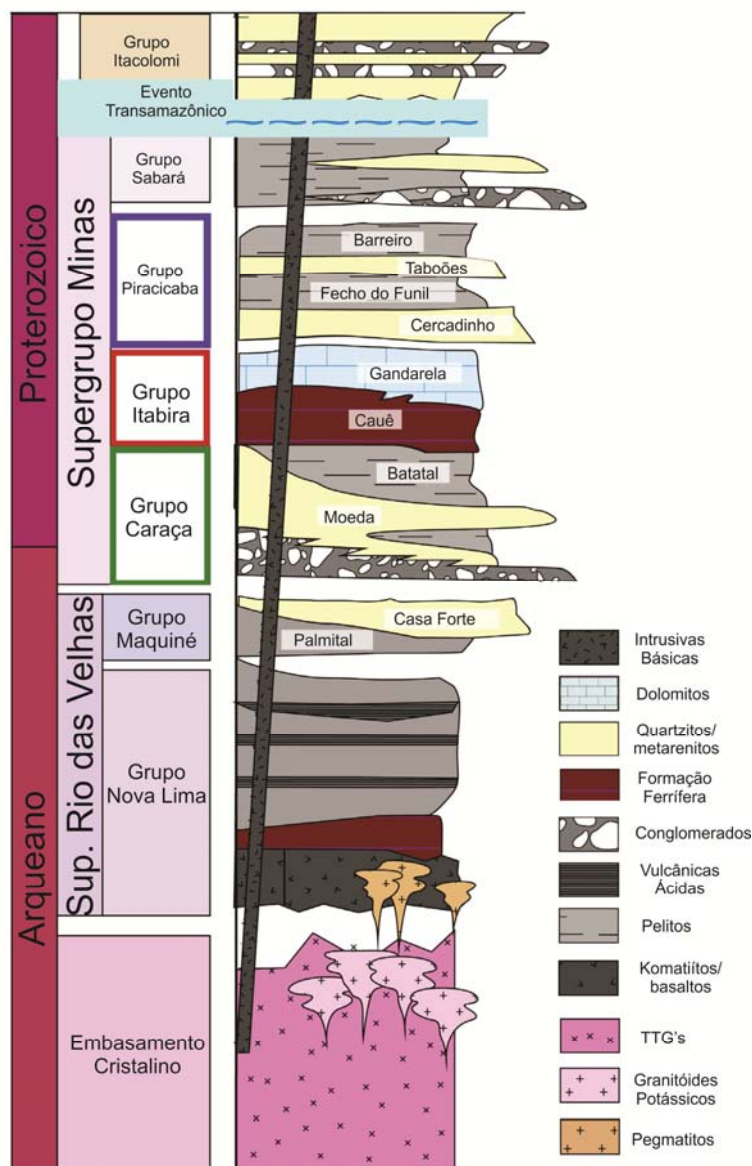


Figura 6: Coluna Estratigráfica da região do Quadrilátero Ferrífero (modificado de [Dopico et al., 2017](#); com base nas propostas de [Dorr, 1969](#); [Alkmin e Martins-Neto, 2012](#)).

### 2.2.1 O *greenstone belt* Rio das Velhas

[Dorr et al. \(1957, 1969\)](#) chamou de Série Rio das Velhas a sequência de rochas meta-vulcano-sedimentares do QF, posteriormente dividida nos Grupos Nova Lima na base e Maquiné no topo. [Loczy & Ladeira \(1976\)](#) elevaram a série Rio das Velhas à categoria de Supergrupo, enquanto [Schorscher \(1976\)](#) e [Almeida \(1976\)](#) sugeriram a definição de um cinturão do tipo *greenstone* para tal sequência. Em seu trabalho, Schorscher (op. cit.) definiu ainda o Grupo Quebra Osso como unidade basal do

Supergrupo Rio das Velhas, formado por komatiitos e metavulcânicas máficas/ultramáficas.

O Grupo Nova Lima representa as porções basais e intermediária da sequência *greenstone*. Contém em suas unidades basais rochas magmáticas máficas e ultramáficas compatíveis rochas de filiação mantélica e basaltos modernos tipo NMORB (Normal Mid-Ocean Ridge Basalt) (Zucchetti, 1998). Essas unidades abrangem rochas metamórficas variadas como basalto toleíticos komatiíticos com texturas primárias preservadas (pillow lavas, amídalas, variólas) (Schorscher, 1979). Estão associados a metassedimentos químico-exalativos como formação ferrífera bandada e tufos, metassedimentares marinhas de granulometria fina, como metapelitos carbonosos. O Grupo Maquiné (Dorr *et al.*, 1957), em porção estratigráfica superior, é constituído por metassedimentos clásticos de fonte continental e vulcanogênica, dividido nas Formações Palmital (O'Rourke, 1957) e Casa Forte (Gair, 1962).

Zucchetti & Baltazar (1998) dividiram o GBRV em quatro blocos lito-tectônicos, caracterizados por distintos domínios estruturais e colunas lito-estratigráficas, limitados por falhas e zonas de cisalhamento. Foram descritos os blocos São Bartolomeu, a sul; Santa Bárbara, a leste; Nova Lima e Caeté a norte. Esses autores dividiram ainda o Grupo Nova Lima em unidades litoestratigráficas utilizando o conceito de associações de litofácies de Ericksson *et al.*(1994), através do reconhecimento de litotipos, fácies sedimentares e vulcano-sedimentares e suas correlações estratigráficas. Assim, o Grupo Nova Lima foi dividido nas unidades Ouro Fino, Córrego dos Boiadeiros, Morro Vermelho, Santa Quitéria, Ribeirão Vermelho, Mestre Caetano, Mindá, Córrego do Sítio, Catarina Mendes, Córrego da Paina, Fazenda Velha e Pau d'Oleo (Baltazar *et al.*, 1995; Pedreira & Silva, 1996; Zucchetti *et al.*, 1996, Pinto & Silva, 1996; Baltazar & Pedreira, 1996, 1998).

Baltazar & Zucchetti (2007) apresentam modelo evolutivo para GBRV com pelo menos quatro gerações de estruturas e quatro ciclos sedimentares, através da identificação de sete associações de litofácies. Agrupam as (1) metavulcânica máfica-ultramáfica; (2) metavulcanossedimentar química; (3) metassedimentar clasto-química; (4) vulcano-clástica; (5) ressedimentada; (6) metassedimentar costeira e (7) não marinha.

### 2.3 Dados geocronológicos do QF

A compilação de dados geocronológicos realizada na região do QF é apresentada na Figura 7 e a tabela no Anexo 2. . Cinco eventos magmáticos de geração de crosta são reconhecidos no QF através de um vasto acervo de idades geocronológicas. São eles: Santa Bárbara (3220 – 3200 Ma), Rio das Velhas I (2930 – 2900 Ma), Rio das Velhas II (2800 – 2760 Ma), Mamona I (2750-2700 Ma) e Mamona II (2620-2580) (Lana *et al.*, 2013; Farina *et al.*, 2016, Dopico *et al.*, 2017). O evento Rio das Velhas II é relacionado ao GRV, com expressivo registro entre 2,78 e 2,70 Ga (Teixeira *et al.*, 1985; Carneiro 1992; Machado & Carneiro 1992; Noce 1995; Machado *et al.*, 1996; Teixeira 1996, 2000; Endo 1997; Noce *et al.*, 2005; Noce *et al.*, 2007).

No Grupo Nova Lima, Machado *et al.*(1989) apresentam idade U-Pb  $2772\pm 6$  Ma para zircões de rocha vulcânica félsica da faixa do Grupo Nova Lima na região de Piedade do Paraopeba, oeste da Serra da Moeda. Os resultados indicam a presença de zircão herdado com uma idade mínima de  $2883\pm 6$  Ma na rocha félsica. Hartmann *et al.*(2006) apresenta idades do Grupo Nova Lima, que utiliza a idade do zircão mais jovem encontrado ( $2749 \pm 7$  Ma) para estabelecer a idade máxima de sedimentação do Grupo Nova Lima:  $<2749$  Ma. Coelho (2015) apresenta idades U-Pb (LA-ICPMS) de cristalização de  $2744,6 \pm 5,7$  Ma e  $2761,4 \pm 3,5$  Ma obtidos a partir de grãos de zircões extraído de anfíbolito e granada xisto do Grupo Nova Lima. Suas amostras foram extraídas de lascas supracrustais em meio ao Complexo do Bação. Dopico *et al.*(2017) apresenta idade de  $2679\pm 20$  Ma para o Grupo Nova Lima na região da Serra de Ouro Preto, Cassino, 2014 idades de  $2707 \pm 21$  Ma para o Grupo Nova Lima na mesma região e Cutts *et al.*, 2019 idade de  $2775 \pm 6$  para metassedimentos da unidade Catarina Mendes ao redor do Complexo do Bação.

No Grupo Maquiné, Moreira *et al.*(2016) em trabalho realizado no Grupo Maquiné relacionam o desenvolvimento dessa parte da bacia à sedimentação *flisch* evoluindo para molassa, com forte contribuição de fonte de arco magmático TTG com idade entre 2770–2780 Ma.

No Supergrupo Minas, a idade dos metassedimentos Caraça-Itabira foi estimada entre 2.614 Ma e 2.420 Ma (Noce 1995, Babinski *et al.*, 1995, Machado *et al.*, 1996). Babinski *et al.*, (1995) apresentam idade Pb-Pb em rocha total da Formação Gandarela de  $2420 \pm 19$  Ma, e discute que a sedimentação dos litotipos do Grupo Itabira iniciou-se por volta de 2,52 Ga. Dopico *et al.*(2017) apresenta idade de  $2453\pm 18$  Ma para a



Formação Cauê na região da Serra de Ouro Preto. As rochas do Grupo Sabará tem idade entre 2.125 Ma e 2.030 Ma (Machado *et al.*, 1996).

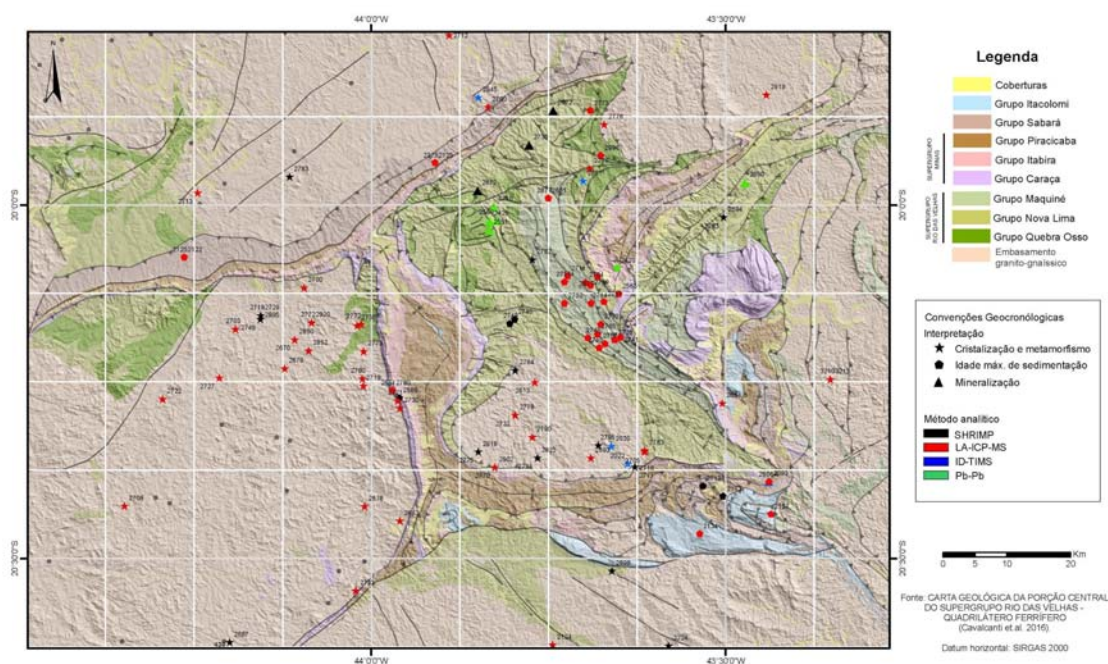


Figura 7: compilação das idades geocronológicas publicadas na região do Quadrilátero Ferrífero.

## CAPÍTULO 3- GEOLOGIA LOCAL

### 3.1 Bloco São Bartolomeu

O Bloco São Bartolomeu, na porção sul do QF, envolve o Complexo do Bação e é limitado pelas falhas Bem-te-vi e pelas zonas de cisalhamento São Vicente e Fundão-Cambotas (Zucchetti *et al.*, 1996). Nesse bloco, os mais espessos pacotes de rochas associadas ao Grupo Nova Lima estão na área interior da anticlinal de Mariana. A área é marcada por morros e vales encaixados, com destaque para o vale do Rio das Velhas. É limitada a sul pela serra de Ouro Preto, a norte e a leste pela serra de Antônio Pereira, ambas formadas pelos metassedimentos do Supergrupo Minas; e a oeste pelo Complexo do Bação.

Zucchetti *et al.*(1996) evidenciaram o caráter peculiar do Bloco São Bartolomeu, que se distingue dos demais pelo seu grau metamórfico mais alto ( fácies anfibolito), pela ausência de vulcanismo máfico/ultramáfico (encontrado nos demais blocos) e pela natureza de sua sedimentação com contribuição de fonte granítica (seixos de gnaiss

trondhjemítico) e vulcânica (seixos de metadacito nas camadas de metaconglomerado da Unidade Catarina Mendes), além da fonte vulcanogênica detectada nos demais blocos.

[Golia \(1997\)](#) descreve cinco fácies sedimentares para os metassedimentos da região de São Bartolomeu: metapelítica; metagrauvaqueana, metaconglomerática, calcissilicática e metarenítica impura. Através da petrografia e da geoquímica desses metassedimentos, identifica áreas-fonte bimodais máfica-félsica, com contribuições de komatiitos (15%), basaltos (35%), granitoides potássicos (15%), dacitos e tonalitos (35%). As lentes conglomeráticas mostram contribuição de rochas plutônicas (seixos de gnaiss trondhjemítico) e vulcânicas (seixos de metadacito). Esse autor propôs ainda duas associações de fácies em termos de ambiente tectônico, metagrauvaqueana-metaconglomerática, originadas em arco de ilha continental envolvendo a redeposição de dacitos e tonalitos; metapelítica-calcissilicática-metarenítica, em estágio mais estável da evolução desta bacia, com aporte de sedimentos oriundos do complexo metamórfico adjacente.

O mapa geológico da Folha São Bartolomeu ([Ribeiro e Tuller, 1996](#)) separa os xistos do Grupo Nova Lima dessa área nas unidades informais Catarina Mendes, Córrego da Paina e Fazenda Velha. Representam sequências turbidíticas do tipo gravaca-argilito, transicionais entre si, com frequentes intercalações de lentes de conglomerado, anfíbolito e rochas calcissilicáticas, com metamorfismo nas fácies xisto verde a anfíbolito. Os metassedimentos apresentam camadas cíclicas granodecrescentes, com espessuras entre 1mm a 50 cm, contatos abruptos na base e estratificação horizontal plano-paralela. Essas unidades foram interpretadas com sequências turbidíticas da associação de litofácies ressedimentada de [Baltazar e Zucchetti \(2007\)](#).

### 3.2 Grupo Nova Lima no Bloco São Bartolomeu

#### 3.2.1 Unidade Catarina Mendes

A unidade Catarina Mendes ([Ribeiro & Tuller, 1996](#)) possui ocorrência restrita ao bloco São Bartolomeu. Tem como seção-tipo uma pedreira localizada próximo ao distrito de Mendes, município de Ouro Preto. Essa unidade é constituída por metagrauvas, metapelitos, metarenitos e lentes subordinadas de metaconglomerado, níveis de metagrauva félsica, níveis centimétricos de rochas calcissilicáticas, além de

corpos restritos de tremolita xisto e turmalinito. Apresenta bandamento composicional marcado por intercalações rítmicas de granulação grossa nas porções basais e muito fina nas porções superiores, em uma sucessão de ciclos geralmente granodecrescentes e contatos abruptos na base. A composição mineralógica essencial é quartzo, feldspato, biotita, clorita, carbonato, anfibólio, estauroлита e granada. Os litotipos que compõem a unidade Catarina Mendes são: carbonato-clorita-biotita-plagioclásio-quartzo xisto, sericita-biotita-clorita-quartzo xisto, quartzo-clorita xisto, granada-biotita-quartzo xisto e clorita-biotita-plagioclásio-quartzo xisto com cianita, estauroлита e granada. Litotipos subordinados são metagrauvacas félsicas (biotita-clorita-sericita-plagioclásio-quartzo xisto) de granulação fina a grossa; metaparaconglomerado com seixos de metadacito, quartzo de veio e trondhjemito em matriz quartzosa; metarenito impuro (clorita-biotita-quartzo xisto); tremolítico (antofilita-clorita-tremolita xisto). Associam-se também camadas pouco expressivas de formação ferrífera bandada pouco magnética, fácies carbonato; camadas centimétricas de rocha calcissilicática (metamarga), composta de quartzo, anfibólio, biotita, granada, epidoto e raras camadas de turmalinito (Zucchetti e Baltazar, 1998). O metamorfismo é da fácies anfibolito (presença de estauroлита, biotita titanífera e granada) com retrometamorfismo na fácies xisto verde. Foi inicialmente interpretado como auréolas metamórficas ao redor do Complexo do Bação, porém a ausência de isógradas típicas de metamorfismo de contato (Tuller & Ribeiro, 1994), leva a interpretação de um metamorfismo regional. Diques de rochas básicas correspondentes a diabásio, anfibolito e gabro cortam esses metassedimentos e sugerem atividade magmática tardia de idade ainda indeterminada. É interpretada como uma sequência turbidítica proximal em relação à fonte, depositada em ambiente marinho (Zucchetti et al., 1996). O protólito é um provável arenito lítico quartzoso com finas camadas de arenito lítico menos quartzoso, com os grãos suportados pela matriz ("mud-supported").

O contato da unidade Catarina Mendes com os xistos pelíticos e carbonosos da unidade Córrego do Sítio, assim como com as rochas do Supergrupo Minas, é tectônico, sendo transicional com as unidades metassedimentares Fazenda Velha, Córrego da Paina e Pau d'Óleo. Já com o Complexo de Bação, os contatos são tectônicos, mas de difícil verificação devido ao grande aporte de álcalis para as rochas do Supergrupo Rio das Velhas, milonitizadas junto ao contato.



### 3.2.2 Unidade Córrego da Paina

Essa unidade ocorre também restrita ao Bloco São Bartolomeu, com boas exposições na região do córrego da Paina, em trecho da BR-356 próximo ao trevo para Itabirito e ao longo da ferrovia EFMV. Esta unidade é caracterizada por intercalações de metargilito, metassilito, metassilito arenoso, metarenito impuro e metagrauvascas, com predomínio da fração argilosa e delgados níveis de xisto carbonoso e formação ferrífera fracamente magnética. É constituída de quartzo mica clorita xisto, quartzo clorita xisto e biotita plagioclásio quartzo mica xisto, com delgadas intercalações de xisto carbonoso e formação ferrífera. Encontram-se foliados, laminados a centimetricamente bandados, com estratificações gradacional, plano-horizontal e cruzada de pequeno porte. Representa uma sequência turbidítica argilosa, depositada em ambiente marinho distal em relação à fonte. Os contatos com as unidades Catarina Mendes e Fazenda Velha são transicionais, com as rochas do complexo do Bação, tectônico, e com o Grupo Maquiné e Supergrupo Minas por empurrão.

### 3.2.3 Unidade Fazenda Velha

Essa unidade é composta por metagrauvascas (feldspática e quartzosa), metarenito feldspático, finos níveis de metargilito carbonoso e de rocha calcissilicática, que se distribuem em ciclos granodecrescentes de espessura centimétrica a métrica. Os principais litotipos são plagioclásio clorita quartzo xistos, sericita plagioclásio biotita clorita quartzo xistos e biotita plagioclásio quartzo mica xistos. O metamorfismo é na fácies anfíbolito com retrometamorfismo na fácies xisto verde. As estruturas primárias observadas nesta unidade são estratificações gradacional, cruzada tabular e cruzada acanalada (Zucchetti e Baltazar, 1998).

### 3.2.4 Unidade Pau D'Óleo

A unidade Pau D'Óleo (Zucchetti e Baltazar, 1998) foi definida na porção norte do Bloco São Bartolomeu, arredores da cidade de Itabirito. Trata-se de uma sequência arenosa com contribuição carbonática. É constituída por plagioclásio carbonato quartzo mica xisto e sericita carbonato plagioclásio quartzo xisto. Apresenta um bandamento composicional caracterizado por maior concentração de sericita, muscovita e clorita que se alterna com bandas enriquecidas em quartzo, feldspato e carbonato. Esse bandamento representa ciclos marcados por níveis de metassilito, metarenito e metagrauvasca, que deram origem a xistos de composição alternada.

### 3.3 Geologia estrutural

Nalini *et al.*(1994) propõem que a atual geometria do Anticlinal de Mariana e consequência de dois eventos deformacionais, um distensivo e outro compressivo, ambos de idade Transamazônica. Os granitos dessa idade alojados no Complexo do Bação seria uma evidencia deste evento distensivo. O evento compressivo é dividido em três fases, sendo a primeira caracterizada por vergência WNW, a segunda e terceira caracterizadas por clivagens de crenulação orientadas EW e NS, associadas ao brasileiro.

Um detalhado estudo de análise estrutural de Endo *et al.* (1996) na região interna da Anticlinal de Mariana caracterizou uma tectônica transcorrente N-S nas sequências de rochas metavulcânicas básicas metassedimentos psamo-pelíticos do Supergrupo Rio das Velhas (Figura 8). As estruturas transcorrentes guardam uma história deformacional polifásica e encontram-se em discordância com as estruturas de idade proterozóica impressas nas sequências metassedimentares do Supergrupo Minas (SGM), principalmente na porção sul da área, onde as direções das foliações miloníticas nas unidades do SGRV e SGM formam ângulos quase ortogonais (Figura 8 C e D). Esta área foi compartimentada estruturalmente da seguinte maneira: domínio D1 na porção central da área, preservado pelos processos deformacionais de idade proterozóica; o domínio D2 envolve o domínio D1 ao longo de uma faixa bordejante próxima ao contato entre as unidades do SGRV e do SGM. No primeiro compartimento (D1), as rochas do Supergrupo Rio Velhas apresentam foliação milonítica de direção NS, subvertical. As lineações mineral e de estiramento mostram componente direcional (Figura 8 D). As estruturas que compõem o acervo cinemático incluem: foliação S-C, dobras intrafoliais em padrão S, assimetrias do tipo sigma e diques de pegmatito de orientação NW. No segundo compartimento (D2) as estruturas NS são obliteradas resultando em arcabouço com atuação do Sistema de Cisalhamento Fundão-Cambotas e da Zona de Cisalhamento São Vicente.

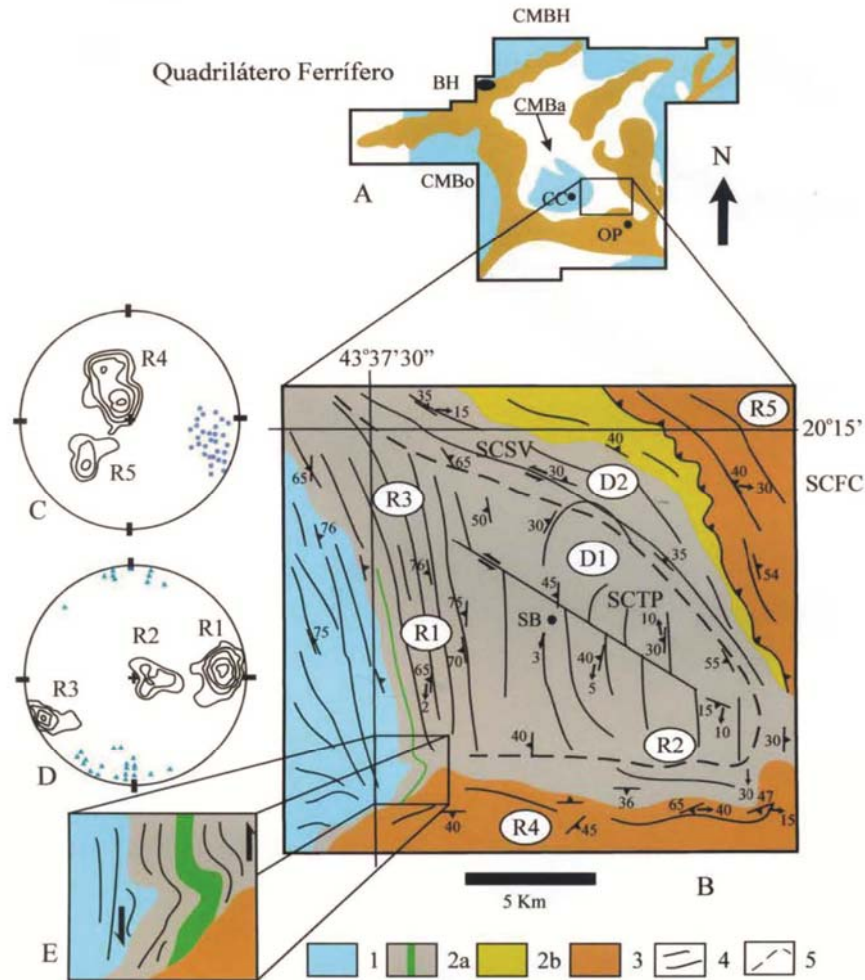


Figura 8: Mapa geológico simplificado de parte da Quadrícula São Bartolomeu (B) no Quadrilátero Ferrífero (A). 1- Complexo Metamórfico Bação; 2- SGRV, 2a - Grupo Nova Lima com camada de metabásica, 2b - Grupo Maquiné; 3 - SGM; 4 - foliação milonítica; 5 - limite entre os domínios D1 e D2; ZCSV - Zona de Cisalhamento São Vicente; ZCTP- Zona de Cisalhamento Tapera; SCFC- Sistema de cisalhamento Fundão-Cambotas. C - Diagrama estereográfico de foliação milonítica e lineação mineral do SGM próximo ao contato com o SGRV. D - foliação milonítica e lineação mineral e estiramento de seixos no SGRV. E - Esboço geológico de dobra padrão S próximo ao contato com o Bação (extraído de Araújo 2001, modificado de Endo *et al.*, 1996).

A Zona de Cisalhamento São Vicente (ZCSV) (Correa Neto & Baltazar, 1995) é uma estrutura de direção SE-NW que se desenvolveu em uma faixa de aproximadamente 3 km de largura, envolvendo unidades do Grupo Nova Lima. Estas rochas estão foliadas nas direções norte e noroeste. Seu traçado inicia na anticlinal de Mariana e se estende para norte, até a região das cidades de Nova Lima e Sabará/MG. Inicialmente, Dorr (1969) a definiu como uma falha de empurrão cega, de traço curvo e não aflorante. Posteriormente, foi reinterpretada como uma zona de cisalhamento com

cinemática direcional sinistral, representando uma importante descontinuidade crustal com expressiva mineralização aurífera associada (Scarpelli 1991, Baltazar *et al.*, 1993).

A Zona de Cisalhamento Tapera (ZCT) foi definida como dúctil-rúptil de cinemática direcional sinistral (Endo, 1997). Desenvolveu-se na unidade Catarina Mendes, aproximadamente paralela a ZCSV a uma distância média de 1,5 km. As rochas apresentam uma foliação milonítica vertical e anastomosada, que corta a foliação N-S de idade neoarqueana, preservada no interior do Anticlinal de Mariana (Endo *et al.*, 1996). A evolução destas duas zonas de cisalhamento fizeram parte de um mesmo sistema tectônico no Neoarqueano. A ZCSV foi reativada ainda no Transamazônico, enquanto ZCT, que trunca as estruturas neoarqueanas NS, foi preservada dessa deformação. O domo representado pelo Complexo do Bação serviu de anteparo rígido para deformações pós-arqueanas, no interior do Anticlinal de Mariana (Araújo, 2001).

## CAPÍTULO 4 – ARTIGO

U-Pb ages for metasedimentary rocks of the Catarina Mendes unit and implications for geological setting of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.

**Abstract:** The Catarina Mendes unit (CMU) is a greywacke-argillite metasedimentary association of the Rio das Velhas greenstone belt (RVGB), in the Quadrilátero Ferrífero province (QF), southern São Francisco craton. This unit is stratigraphically positioned between the granite-gneiss terrains that constitute the crystalline basement of the QF and the paleoproterozoic metasedimentary sequence of the Minas Supergroup. The RVGB rocks are constrained in the homonymous Supergroup, which comprises three groups (from bottom to top): i) Quebra-Osso Group (metamafic-ultramafic complex); ii) Nova Lima Group (metavulcano-sedimentary sequence); and iii) Maquiné Group (siliciclastic metasedimentary rocks).

To southeast of the QF, in the core area of the Mariana anticline, i.e. between the flanks of this regional fold, topographically represented by the Ouro Preto and Antônio Pereira ridges, the upper Nova Lima Group is subdivided into three informal units, named Catarina Mendes, Córrego da Paina and Fazenda Velha. These units comprise turbidite-gravel-clay associations that show transitional contacts with each other and common intercalations of amphibolites, tourmalinites and carbonate-rich rocks, besides metaconglomerates. The metasedimentary rocks in these upper units of the Nova Lima Group show a compositional banding marked by rhythmic intercalation of centimetric layers and an upward coarsening pattern. These rocks register amphibolite facies metamorphic conditions containing staurolite, biotite and garnet assemblages, which later retrogressed to greenschist facies conditions.

In addition, this paper presents new geochronological data for CMU and new insights of its source area and environmental setting through detailed lithostratigraphy at its section type area, besides petrographic and lithogeochemical investigation. Two samples were analyzed (U-Pb LA-ICP-MS in detrital zircon grains) to constrain maximum depositional age, that yielded of  $2481 \pm 12$  Ma. The U-Pb isotopic results also presented Cryogenian and Rhyacian records, respectively at  $678 \pm 4$  Ma and  $2114 \pm 5$  Ma, considered as tectono-metamorphic overprints. These data disclose new

elements on the QF architecture and basins development and unravel how CMU relates to the Rio da Velhas and Minas Supergroups.

Keywords:

Quadrilátero Ferrífero province, Archean-Paleoproterozoic, Detrital zircons geochronology, U–Pb (LA-ICP MS)

## 4.1 Introduction

Archean greenstone belts and associated granitic rocks constituted the main crustal elements during the early periods of evolution and formation of the Earth (e.g., [Anhaeusser, 2014](#)). Because of the particularities of Archean environments, the inaccessibility to direct data and the inexistence of analogous modern systems, the greenstone belt associations stand out as extremely important keys for understanding, not only the evolution of the early Earth, but its constitution and primordial life. Thereby, the Archean elements are approached in multidisciplinary ways by the most diverse areas of geosciences around the world ([Barley et al., 2005](#); [Condie, 1994, 2016, 2018](#); [Condie et al., 2017](#); [Flower et al., 2003](#); [Griffin et al., 2014](#); [Sizova et al., 2015](#); [Hawkesworth and Kemp, 2006](#); [Staudigel et al., 2015](#)).

In this scenario, Archean sedimentary basins and their lithofacies associations are essential to understand the dynamic evolution and the environment conditions of the formation and development of the crustal accretion through the early times of the Earth. Moreover, they also allow unraveling hidden elements of erstwhile source areas and the physical-chemical conditions at the time of their deposition.

Based on lithostratigraphic, lithochemical (whole rock) and isotopic data (U-Pb LA-ICP-MS in detrital zircon grains), this paper presents the characterization, provenance and depositional environment of the Catarina Mendes unit (CMU), a metasedimentary sequence associated with the Rio das Velhas greenstone belt (RVGB) in the Quadrilátero Ferrífero province (QF), southeastern Brazil ([Almeida, 1977](#); [Door, 1957](#); [Ribeiro & Tuller, 1996](#); Figure 9). CMU stands out as a key in elucidating the understanding of the evolution and development of the southern portion of the QF province and its related basins in Archean/Paleoproterozoic times. It comprises sandstones, greywackes, pelites, carbonate rich rocks and subordinately conglomerates, metamorphosed in green-schist to amphibolite facies conditions. The significant granitic



source contribution, the lack of mafic/ultramafic volcanic rocks and its metamorphic grade, distinguish CMU from its congeners of other units of the Rio das Velhas Supergroup. Indeed, it represents a segment apart from the typical greenstone belt sequence in the region, showing some elements that resembles other metavolcano-sedimentary sequences outside the QF province domain, (Zucchetti and Baltazar, 1998, 2000).

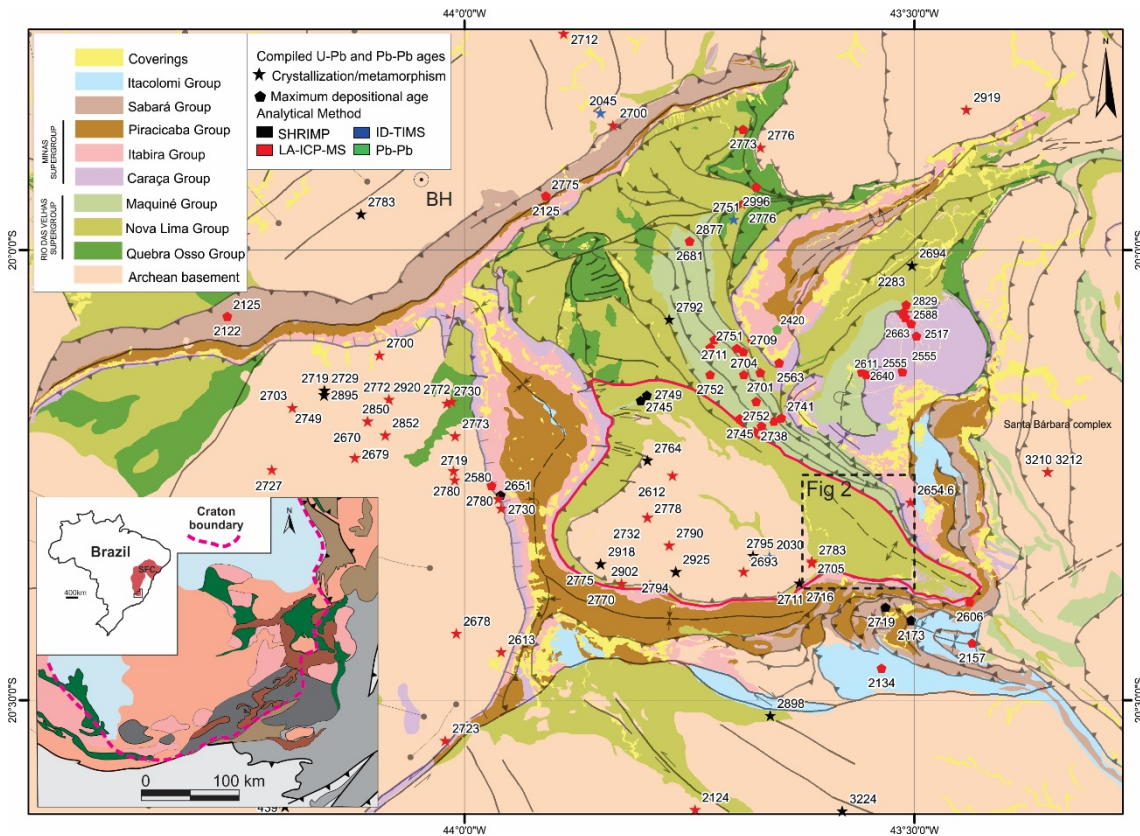


Figure 9 A) Simplified geological map of the Quadrilátero Ferrífero (QF) province (after Cavalcanti et al., 2016) in the context of the São Francisco craton (Figure B). The compiled ages are presented in the Supplementary data (T1). The São Bartolomeu block is limited by the red line.

#### 4.2 Geological setting

The Quadrilátero Ferrífero stands out as one of the most important mineral provinces in the Brazilian territory. It occupies an area of approximately 7,000 km<sup>2</sup>, at the southern end of the São Francisco craton (Almeida, 1977), southeastern Brazil (Figure 9). The QF is characterized by polycyclic TTG-type granite-gneiss complexes and metavolcano-sedimentary sequences of Rio das Velhas greenstone belt, both of Archean ages, and the paleoproterozoic sedimentary and volcano-sedimentary cover sequences, grouped in the Minas Supergroup. The QF presents a structural framework in dome-and-keel style (Alkmim & Marshak, 1998), which are considered to have been

architected in polycyclic events occurring from between the Archean and Paleoproterozoic Eons (Cutts et al., 2019).

The Archean evolution of the QF crustal complexes have been divided, at least, by five magmatic pulses of crust generation and crustal accretion: Santa Bárbara (3220-3200 Ma), Rio das Velhas I (2930-2900 Ma), Rio das Velhas II (2800-2760 Ma), Mamona I (2750-2700 Ma) and Mamona II (2620-2580 Ma) (Lana et al., 2013; Farina et al., 2016; Dopico et al., 2017).

The metavolcano-sedimentary associations and its related rocks were grouped in the Rio das Velhas Supergroup (Loczy & Ladeira, 1976), which presents a basal sequence of meta-mafic and meta-ultramafic volcanic rocks, including komatiite spinifex-textured rocks (Quebra Osso Group), superimposed by cycles of chemical and clastic sedimentary successions and basaltic magmatism (ca 2900-2780 Ma; Baltazar & Zucchetti, 2007).

The paleoproterozoic units are grouped in the Minas Supergroup and the Itacolomy Group, which overlap the Archean sequences through angular discordance surfaces or regional scale faults (Dorr et al., 1957; Dorr, 1969). The Minas Supergroup basin is interpreted as a record of the continental rift that evolved into a passive margin (Alkmim and Martins-Neto, 2012) with maximum depositional ages for its base unit (Moeda Formation) determined as ca 2.6 to 2.5 Ga (2650 Ma, Machado et al., 1996; 2580 Ma, Hartmann et al., 2006; 2520 Ma, Nunes, 2016). Babinski et al., (1995) presenting the age of diagenesis of stromatolitic carbonates of Minas Supergroup, dated as old as 2420 Ma by Pb-Pb isochron.

#### 4.2.1 The Rio das Velhas greenstone belt overview

The metavolcano-sedimentary units of the QF region was first organized by Dorr et al. (1957). They grouped these units in the Rio das Velhas series, the former Pre-Minas series by Rynerson et al., (1954). Later, these units were subdivided by their lithological predominance into the lower Nova Lima and the upper Maquiné groups (Dorr, 1969).

Loczy & Ladeira (1976) elevated the Rio das Velhas series to the category of Supergroup due its lithological expressiveness and lateral correlation. Furthermore, Schorscher (1976) and Almeida (1976) elevated up these sequences to a greenstone belt



association comparing these units to other greenstone sequences worldwide. [Schorscher](#) (op. cit.) individualized the basal komatiitic unit, the algonia-type iron formations and the metavolcaniclastic associations, characterizing the Quebra Osso Group, the base of the greenstone belt sequence.

Posteriorly, [Ladeira \(1980\)](#) defined three informal units for the Rio das Velhas Supergroup, instead of using the Nova Lima and Maquiné group names. These units comprise a sequence denominated as: lower metavolcanics, intermediate chemical metasedimentary, and upper clastic metasedimentary units. Subsequent subdivisions such as [Oliveira et al., \(1983\)](#), [Vieira and Oliveira \(1988\)](#) and [Vieira \(1991\)](#) refer to the units only as lower basal, intermediate and upper units.

In the 90's, several detailed studies subdivided the Nova Lima Group in informal units as: Quebra Osso, Ouro Fino, Morro Vermelho, Santa Quitéria, Ribeirão Vermelho, Mestre Caetano, Catarina Mendes, Córrego da Paina, Fazenda Velha, Pau d'Oleo, Mindá e Córrego do Sítio ([Baltazar et al., 1995](#); [Pedreira & Silva, 1996](#); [Baltazar & Pedreira, 1996, 1998](#); [Baltazar & Silva, 1996](#); [Zucchetti et al. 1996, 1998](#)). In a broad sense, these units were conceived based on the concept of lithofacies associations ([Baltazar & Zucchetti, 2007](#)), through the recognition of sedimentary and volcano-sedimentary associations and their stratigraphic correlations. Moreover, there was presented seven main associations of lithofacies: (1) volcanic mafic-ultramafic; (2) volcano-chemical-sedimentary; (3) clastic chemical sedimentary; (4) volcanoclastic; (5) resedimented; (6) coastal and (7) non-marine. From this, three structural domains were recognized and individualized, which are delineated mainly by structural lineaments and regional shear zones, as: i) São Bartolomeu; ii) Santa Bárbara; and iii) Nova Lima-Caeté. In their conception, these blocks consist of granitic-gneissic cores circumscribed by metavolcano-sedimentary belt sequences, each one with its characteristic stratigraphic column.

Over the last forty years, a huge set of ages have been determined for both the crystalline basement and supracrustal units (Figure 9). Concerning the Rio das Velhas Supergroup, [Machado et al. \(1992\)](#), two U-Pb zircon ages of  $2776 \pm 6$  and  $2721 \pm 3$  were obtained for the volcanic rocks of the Nova Lima Group in the northern sector of QF. [Noce et al. \(2005\)](#) present SHRIMP and ID-TIMS U-Pb zircon ages of three graywacke samples dating the eruptive event between  $2792 \pm 11$  and  $2751 \pm 9$  Ma, which is a range of about 40 Ma for the felsic magmatism. [Hartmann et al. \(2006\)](#)

presented a maximum depositional U-Pb age of  $2746 \pm 5$  Ma from zircon grains of metasedimentary rocks of the Nova Lima Group in the northern Bação complex. [Coelho \(2015\)](#) yielded U-Pb (LA-ICPMS) zircon ages of  $2744 \pm 5.7$  Ma and  $2761 \pm 3.5$  Ma from amphibolite and garnet shale of the Nova Lima Group, respectively, within the Bação complex. The upper Maquiné Group revealed a maximum depositional U-Pb zircon ages between 2780–2770 Ma ([Moreira et al., 2016](#)).

#### 4.2.1 The São Bartolomeu block and Mariana anticline

The São Bartolomeu block is located in the southern portion of the QF province. It comprises the granite-gneiss dome of the Bação complex, bordered by metavolcanic sequences of the RVGB. The São Bartolomeu block is delineated by the Bem-te-vi fault to the north and São Vicente and Fundão-Cambotas shear zones to the east (Figure 9). Its southern and western limits are tectonically bounded by the Minas Supergroup.

[Nalini et al. \(1992\)](#) presents a review of the structural geology of the Mariana anticline, pointing out the disagreements among several authors regarding the structure of the area and describes the geometry of this anticline as an open normal fold, with SE-axis anomalous to other QF regional folds, being the result of a polyphase evolution with E-W direction motions related to Proterozoic deformations. [Endo et al. \(1996\)](#) describes two tectonic domains for the region of Mariana anticline that register a N-S transcurrent tectonic, pointing that the central region was preserved from the proterozoic deformation (domain 1) and the foliations of Minas and Rio das Velhas Supergroups are almost orthogonal to each other (domain 2). Almost a decade later, [Endo et al. \(2005\)](#) proposed the existence of two allochthonous mega-structures in the Quadrilátero Ferrífero: the Curral and Ouro Preto Nappes. The Curral nappe is older and is superimposed on the Ouro Preto nappe ([Almeida, 2004](#)), with the São Vicente shear zone being the contact between these ([Madeira 2016](#)), dividing the anticline region into two distinct portions.

The metavolcano-sedimentary units present its maximum thickness in the Mariana anticline, southeastern domain of this block, with its contours easily recognizable through aerogeophysical surveys (Figure 10). In this region, [Ribeiro & Tuller \(1996\)](#) separated the schists of the Nova Lima Group in the informal units Catarina Mendes, Córrego da Paina and Fazenda Velha. These units are mainly

composed of varieties of schists and quartzites, suggesting a greywacke-sandstone-argillite cyclic sequence. They are transitional to each other, and show abrupt contacts at the base of each cycle and horizontal plane-parallel stratification, frequently containing intercalations of conglomerate lenses, amphibolite and calci-silicate rocks. These units are interpreted as turbiditic sequences being related to the resedimentated lithofacies association of [Baltazar & Zucchetti \(2007\)](#). The metamorphism do not exceeded the green-schist to amphibolite facies conditions.

[Golia \(1997\)](#) described five sedimentary facies in the sequences of the Nova Lima Group in the region of the São Bartolomeu block: meta-argillite, meta-greywacke, meta-conglomerate, calci-silicate rock and impure sandstone. Through the petrography and geochemistry approach, this author proposes a mixed source for these metasedimentary rocks, with contributions of komatiites (15%), basalts (35%), potassium granites (15%), dacites and tonalites (35%). Conglomeratic lenses show contribution of plutonic (trondhjemitic gneiss) and metavolcanic rocks (meta-dacite), gravels and clasts. Also, two tectonic environments as the setting for this metasedimentary association were proposed. One is related to a continental arc, involving the redeposition and reworking of dacites and tonalites, mainly represented by the greywackes and conglomerates. The second is related to a more evolved and stable stage of this basin, with contribution of sediments originating from the adjacent metamorphic complex, mainly represented by the metapelitic-calci-silicate-metasandstone sequences.

The Catarina Mendes unit (CMU), focus of this paper, has its section type characterized in a quarry located near the Mendes district, Minas Gerais state ([Ribeiro & Tuller, 1996](#)). The peculiar character of this unit was first revealed by [Zucchetti et al. \(1996\)](#). Comparing its sequence to other metasedimentary rock units of the RVGB, CMU presents a higher metamorphic grade that reaches amphibolite facies conditions and lacks mafic/ultramafic volcanic rocks preserved within its strata. Besides this, metasiliclastic rocks show a strong contribution of granitic rocks. This unit consists of metagreywacke, meta-argillite, meta-sandstones, subordinate carbonate rich rocks and conglomerate lenses. It presents a textural and compositional layering defined by rhythmic intercalations of coarse-grained sediments in the basal portions that grades to very fine-grained cyclic layered sediments in upper portions, in a succession of granodecrescent cycles. The essential mineralogy is quartz, feldspar, biotite, chlorite,

carbonate, amphibole, staurolite and garnet, in varied proportion that define a wide range of rock types.

The contact between CMU and the adjacent metasedimentary rocks of the Nova Lima Group (Fazenda Velha, Córrego da Paina and Pau d'Óleo units) in the Mariana anticline region is transitional, while the contact with the granites and gneisses of the Bação complex is tectonized. (Figure 10). The presence of garnet and staurolite evidence the conditions of amphibolite facies metamorphism. Initially, these mineral assemblages were interpreted as a contact metamorphism product around the Bação complex. However, the absence of isograds discards a contact metamorphism origin for the onset of its metamorphic assemblages (Tuller and Ribeiro, 1994), leading to a regional metamorphism as the genesis of these minerals. Basic dykes, mainly diabase, amphibolites and gabbros cut these metasediments and suggest late magmatic activity of undetermined age.

Through the last century, many detailed structural geological undertakings have characterized the Mariana anticline in the studied region. Freyberg (1932) was the first to suggest the existence of a fractured and eroded anticline structure in the region between Mariana and São Bartolomeu-Mendes. Lacourt (1938) describes the São Bartolomeu dome as an anticline structure whose axis points to the azimuth 125 °, with a dip of 10-20 ° for SE. Marshak and Alkmin (1989) suggest that the Mariana anticline is a cover fold over a blind basement-involved thrust, with the Fundão fault acting as a lateral ramp.

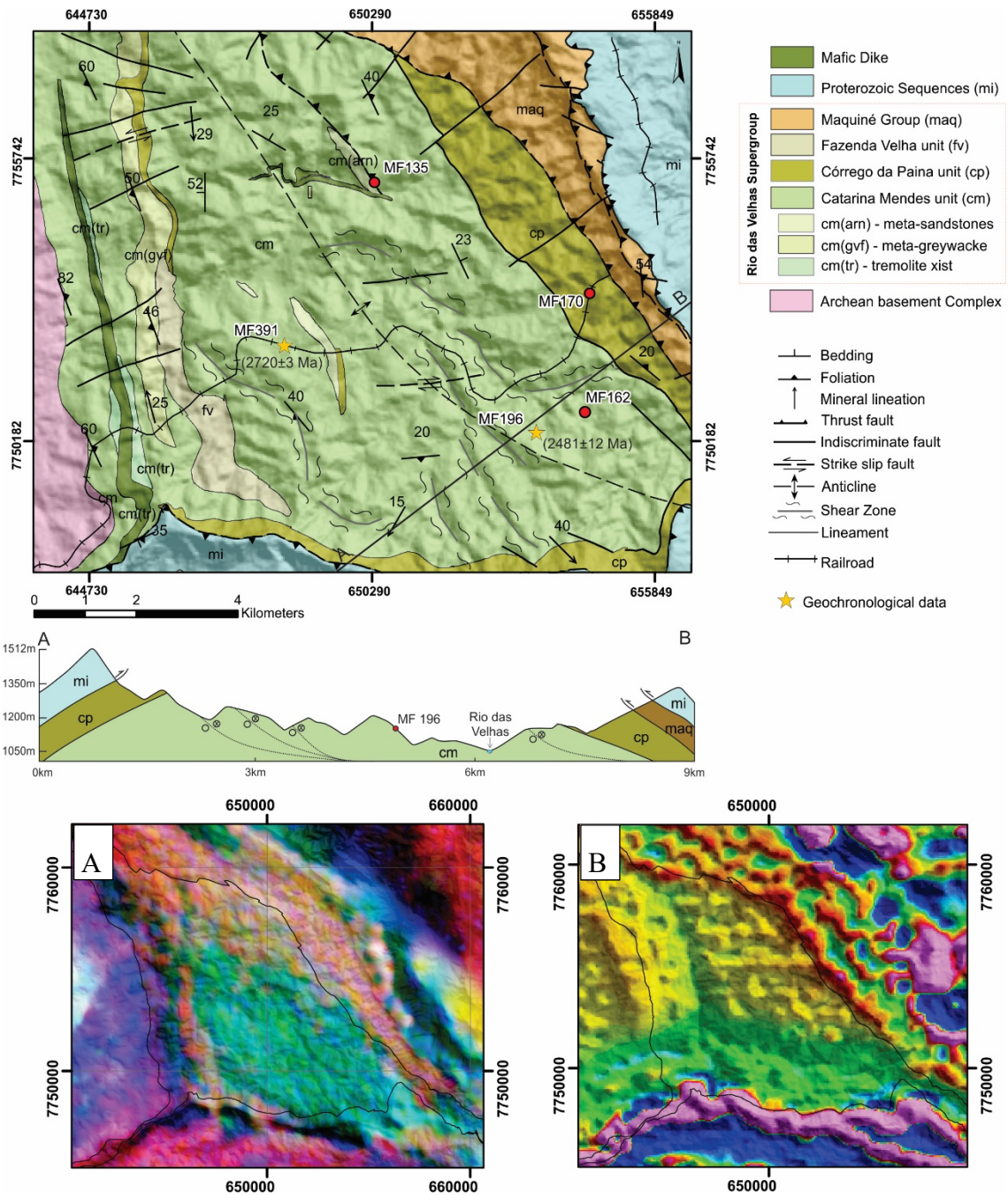


Figure 10: Geological map of São Bartolomeu and Mendes region (Freitas et al., 2017) and airborne geophysical maps of ternary radiometric data (K-eU-eTh) (A) and first order vertical derivative of magnetic data (B).

### 4.3 Analytical methods

#### 4.3.1 Field data and type section

The recognition of the stratigraphic features of the Catarina Mendes unit was done through a detailed stratigraphic profile of the section type, in a quarry with vertical rock exposition of approximately 32 m high by 200 m long, oriented in the direction



NW-SE. The vertical stratigraphic profile, represented in the scale 1:50, was made from the description with spacing of 25 cm, recording different lithologies and structures. Point gamma-spectrometric data were measured every 1 m along the profile using a handheld spectrometer, model RS-230. Petrographic data were obtained mainly in samples collected along the profile and in others representative outcrops, seeking the recognition of lateral continuity of the unit.

#### 4.3.2 Whole-rock analysis

Whole-rock geochemical analyses were conducted on three samples of metagreywacke and micaschists from the Catarina Mendes Unit. The samples were analyzed for major and trace elements in the SGS Geossol Laboratory LTDA, Belo Horizonte, Brazil. Major element oxides were determined by XRF and trace elements by ICP-MS. The results are available in Table 1 and the analytical data were treated and mixture models were built using the software Iqpet (Carr & Gazzel, 2017).

#### 4.3.3 U-Pb geochronology (LA-ICP-MS)

Two samples of meta-greywacke (MF196 and MF391) from the Catarina Mendes unit were selected for U-Pb LA-ICP-MS geochronology. From each sample, 10-15 kg was prepared for analyses in the Isotopic Geochemistry Laboratory of the Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP, Brazil). Zircon separation was performed using conventional methods (crushing, grinding, gravimetric, and magnetic-Frantz isodynamic separator). For geochronological analyses, zircon grains were selected from the least magnetic fractions, aiming to determine detrital zircon ages. A final concentration of zircon crystals was obtained by density separation using a decantation funnel and diiodomethane. As this concentrate consisted of almost only zircon grains, the grains were randomized in an alcohol solution and then pipetted over epoxy mounts, guaranteeing minimum bias on the selection of zircon crystals for analysis. The mounts were submitted to polishing for exposing grain centers, and cathodoluminescence (CL) images were obtained for revealing morphological features and internal structures of zircon grains.

Analytical spots were performed avoiding grain areas with inclusions, fractures, and/or metamict features. U-Pb isotopic analyses were carried out in the Laser Ablation Multicollector Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-MCICP-MS) laboratory at the Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP, Brazil). To test the

validity of the applied methods of LA-MC-ICP-MS analytical routines, were used GJ-1 ( $608 \pm 1\text{Ma}$ ; Jackson et al., 2004), Plešovice ( $337 \pm 1\text{Ma}$ ; Sláma et al., 2008) and 91500 ( $1065 \pm 1\text{Ma}$ ; Wiedenbeck et al., 1995) zircons standards. In this study, the spot size in LA-MC-ICP-MS analysis had a diameter of 30  $\mu\text{m}$ . Data reduction used the Glitter software (Van Achterbergh et al., 2001), and the Excel sheet developed by Ludwig (2003). Data evaluation for each spot took into account the common Pb contents, errors of isotopic ratios, the position of each analyzed spot, and the existence of inherited grains and percentage of discordance. From the selected spots, only those with discordance less than 10% were used for age calculations and plotted in Concordia and histogram diagrams. The diagrams were obtained with the Isoplot 4.15 software (Ludwig, 2008). The U-Pb analytical results are available on Supplementary data file.

## **4.4 Results**

### **4.4.1 Field geological data and petrography**

The stratigraphic profile of the section type of the Catarina Mendes unit is presented in Figure 11. The stratigraphic features of this section type, as well as other outcrops of this unit in the adjacencies, allowed to define varieties of rhythmic layering constituted of siliciclastic rocks with thicknesses from 1 mm to 1.5 m. These metamorphic rocks are intercalations of meta-greywacke, meta-sandstones and meta-argillites, matrix supported, with grain size ranging from clay to coarse sand and gravels, normally showing an upward coarsening trend. When preserved from weathering, they have light to dark gray and green colors. Massive and laminated sets (Figure 12a), separated by thin layers of phyllosilicates, plane-parallel to the main sub-horizontal foliation, with a maximum dip of  $20^\circ$  for SE, are characterized. The top of the section presents more advanced weathering and an increase of opaque mineral content.

#### 4.4.1.1 Stratigraphic profile of the type section

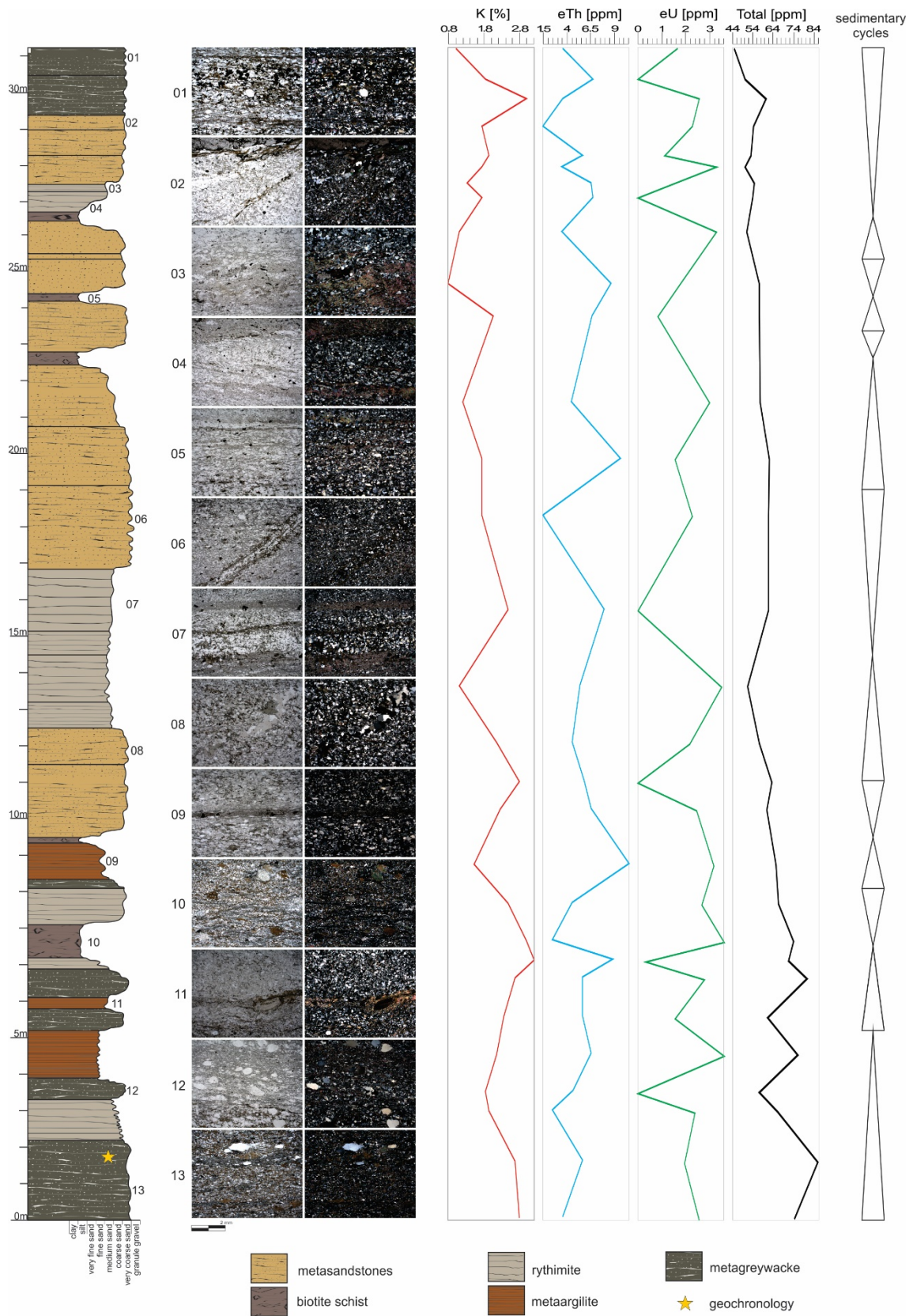


Figure 11: Stratigraphic profile of the section type in the Catarina Mendes unit. Sample MF196 presents U-Pb LA-ICPMS zircon ages.



Five petrographic types were recognized throughout the section type: i) meta-greywacke, ii) meta-sandstone, iii) meta-argillite, iv) meta-rhythmite and v) biotite schists.

- i) Meta-greywacke: exhibits quartz granules, which are stretched and recrystallized (30%), feldspar with twinning (10%) and lithic fragments (5%), varying between 0.2 and 0.5 mm, dispersed in fine matrix (clay/silt) representing approximately 55% of the modal composition. This matrix consists of aggregates of quartz, biotite, chlorite and carbonate. Bands composed of biotite, carbonate, white mica and opaque minerals vary from 0.1 to 0.5 mm in thickness occur subordinated (Figure 12b). A few grains of quartz have an embayment texture that resemble a volcanic feature;
- ii) Meta-sandstone: essentially quartz-rich strata (quartz = 80%), ranging from fine to coarse sand, are poorly selected, and sometimes separated by thin pelitic layers. Opaque minerals are abundant;
- iii) Meta-argillite: strata composed mainly of clay minerals, quartz grains and lithic fragments in silt grain size, whose modal abundance define laminated rocks with plane-parallel stratification of millimetric thickness;
- iv) Meta-rhythmite: rhythmic bedding of clay-sandy rocks defined by the alternation of meta-argillites and meta-sandstones layers with thicknesses varying from 0.5 mm to 2 cm, in a plane-parallel arrangement;
- v) Biotite schist and milonites: siliciclastic rock defined by fine matrix (clay/silt) composed of aggregates of quartz, biotite and chlorite (45%), clasts of biotite (10-35%), carbonate aggregates (3 - 9%) and garnet (2-8%), which reach up to 1.5 mm in length. It presents an anastomosed foliation defined by the lepidoblastic arrangement of fine filossilicates, which surround the granoclasts commonly deformed and rotated, with pressure shadows (Figure 12c) and pull apart texture (Figure 12d).

The amphibole occurs dispersed throughout the described lithotypes and is characterized by anhedral and granoblastic hornblende grains. In the same way epidote is found as aggregates of cloudy prisms associated with feldspars. Zircon, tourmaline and rutile are accessory phases. Quartz and carbonate venules crosscut the whole package, showing thickness ranging from mm to cm and arranged parallel to the main

foliation or cutting it in the varied angular relationships. Chlorite is a late phase and is related to the alteration of biotite. The gamma-spectrometric data exhibit a positive relationship between the increase of U content in meta-argillite and biotite schist, while Th amount presents a positive correlation with the sandy strata.

Due to the intense tropical weathering, fresh outcrops of CMU are scarce. Besides the section type area, where sample MF196 was collected, representative outcrops are also observed in local waterfall sites (MF 162 and MF 135) and railroad cuts (MF 170 and MF 391; Figure 10).

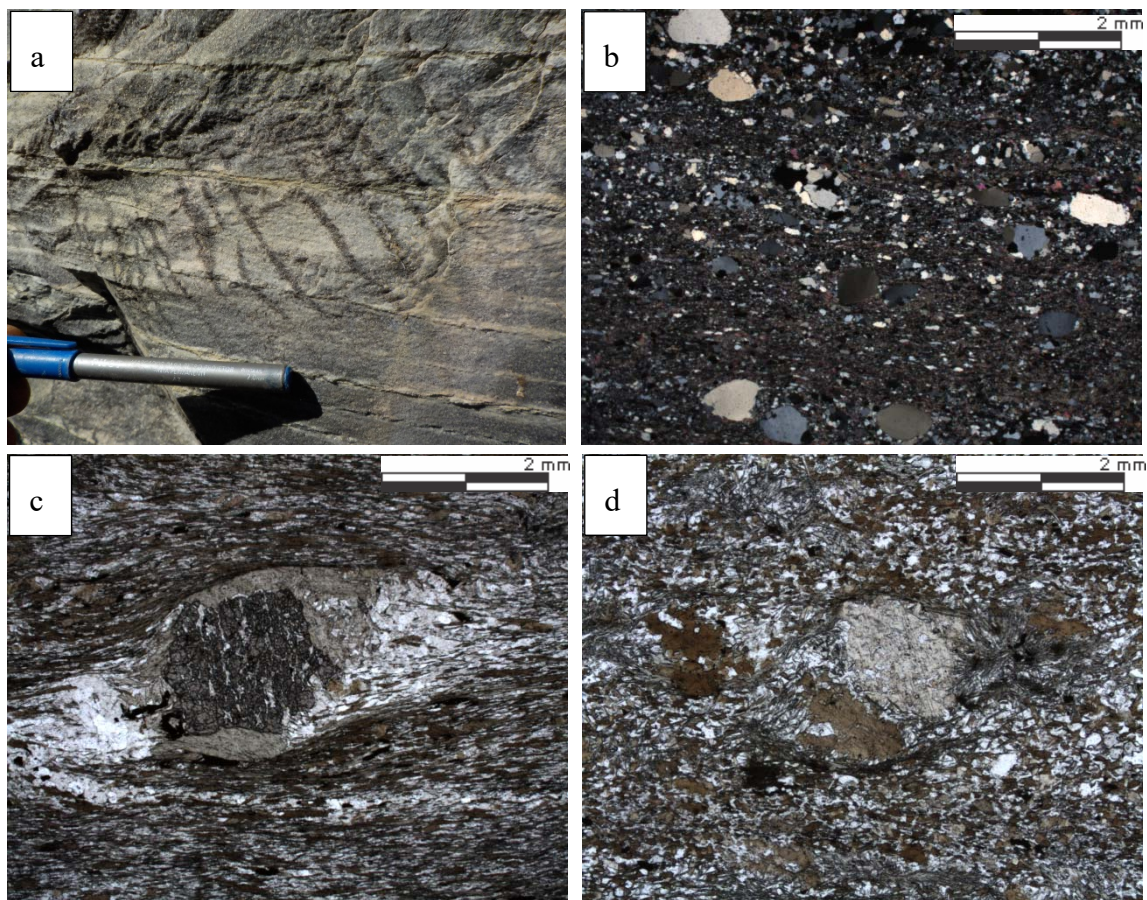


Figure 12: a) Compositional bedding and discordant veins in the Catarina Mendes units at this section type (sample MF196). b) Photomicrography of meta-greywacke (sample MF196) showing several granules dispersed in the feldspar-quartz-chlorite-biotite matrix; c) rotated porphyroclasts of garnet with pressure shadows of chlorite and quartz (sample MF170); d) Sigmoid of biotite porphyroclast with pull apart texture and pressure shadows (sample MF162).

#### 4.4.2 Whole-rock geochemistry

Three representative samples of the Catarina Mendes unit were analyzed for major and trace elements (MF196 - meta-greywacke, MF391 - meta-sandstone, MF162 - meta-rhytmite). The results are listed in Table 1. The samples have SiO<sub>2</sub> content varying from 58.70 to 71.00 wt%, which are inversely related to MgO (3.45 and 7.61 wt%) and CaO (1.79 to 3.49 wt%). Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> values show a restricted range (13.30-14.30 wt%). The contents of Na<sub>2</sub>O and K<sub>2</sub>O vary from 1.21 to 2.24 wt% and 1.94 to 3.42 wt%, respectively. LOI values range from 0.60 to 4.34 wt% and show positive correlation to those of MgO and inversely to that of SiO<sub>2</sub>, according the content of hydrated Fe-Mg minerals.

Transition elements such as Co (15.90 to 35.90 ppm), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.03 to 0.06 wt%) and TiO<sub>2</sub> (0.41 to 0.42 wt%) display positive correlation to the MgO values, as well as some incompatible elements such as Rb (65.60 to 114.00 ppm) and Zr (95.50 to 114.30 ppm).

Table 1: Results of the whole-rock analyses of the samples MF196, MF162 and MF391.

Element	Sample			Element	Sample		
	MF196	MF162	MF391		MF196	MF162	MF391
SiO <sub>2</sub>	58.70	56.40	71.00	Ta	<0.05	0.12	<0.05
TiO <sub>2</sub>	0.62	0.61	0.41	Nb	6.01	6.72	5.08
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.00	14.30	13.30	Hf	3.29	3.25	2.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	8.01	9.16	4.34	Zr	114.30	109.50	95.50
MnO	0.16	0.12	0.05	Y	17.69	18.48	13.77
MgO	7.61	6.69	3.45	Th	5.30	5.20	5.00
CaO	3.49	1.79	2.00	U	1.72	1.48	1.93
Na <sub>2</sub> O	1.21	1.71	2.24	Tl	<0.5	<0.5	<0.5
K <sub>2</sub> O	3.42	2.59	1.94	La	19.90	22.60	20.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.10	0.08	Ce	36.80	38.70	34.60
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.06	0.05	0.03	Pr	4.28	4.62	4.00
BaO	0.08	0.11	0.04	Nd	16.70	18.20	15.10
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.02	0.02	Sm	3.40	3.90	2.70
LOI	1.70	4.34	0.60	Eu	1.01	1.11	0.87
Ni	210.00	239.00	105.00	Gd	3.40	3.65	2.44
Co	33.40	35.90	15.90	Tb	0.51	0.56	0.39
Cu	52.00	36.00	14.00	Dy	3.41	3.38	2.48
Rb	114.00	102.40	65.60	Ho	0.65	0.71	0.51
Cs	12.61	18.04	8.34	Er	1.90	1.96	1.44
Ba	787.00	1132.00	506.00	Tm	0.33	0.30	0.23
Sr	122.50	168.30	75.30	Yb	1.80	1.90	1.40
Ga	18.90	19.50	15.90	Lu	0.29	0.29	0.23

The REE in the multi-elementary diagram (Figure 13a) normalized to chondrite values (Sun and McDonough 1989) show a similar pattern for all samples. The LREE delineate a negative slope, with La/Sm ratios between 3.74 and 4.87, while the HREE define a sub-horizontal pattern (Sm/Dy: 1.65 to 1.91, Sm/Lu: 1.94 to 2.23). Eu shows negative anomalies for samples MF196 and MF162 (0.90 and 0.89, respectively) and around 1.0 for sample MF391.

The REE normalized to PAAS composition (Post-Archean Average Australian Shale; Taylor & McLennan, 1985) (Figure 13b), define flat patterns (La/Sm: 0.85 to 1.11, Sm/Lu: 0.90 to 1.03), showing REE values slightly lower than NASC and positive Eu anomalies. Similar behavior is observed when samples are normalized to NASC composition (North American Shale Composition; Gromet et al., 1984) (La/Sm: 1.15 to 1.51; Sm/Lu: 0.90 to 1.04). The La/Th (3.75 to 4.34) and Th/U ratios (2.59 to 3.51) suggest a detrital contribution from the Archean upper crust (Floyd & Leveridge, 1987; McLennan et al., 1990). However, the high concentrations of Ni (105 to 240 ppm) and Cr (205 to 411 ppm) point to a significant contribution from less evolved sources, as basic rocks.

Additionally, these samples exhibit immature character revealed by the SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratios (4.2 to 5.3), which are similar to the values reported by Roser et al., (1996) for immature metasedimentary rocks (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 3-5).

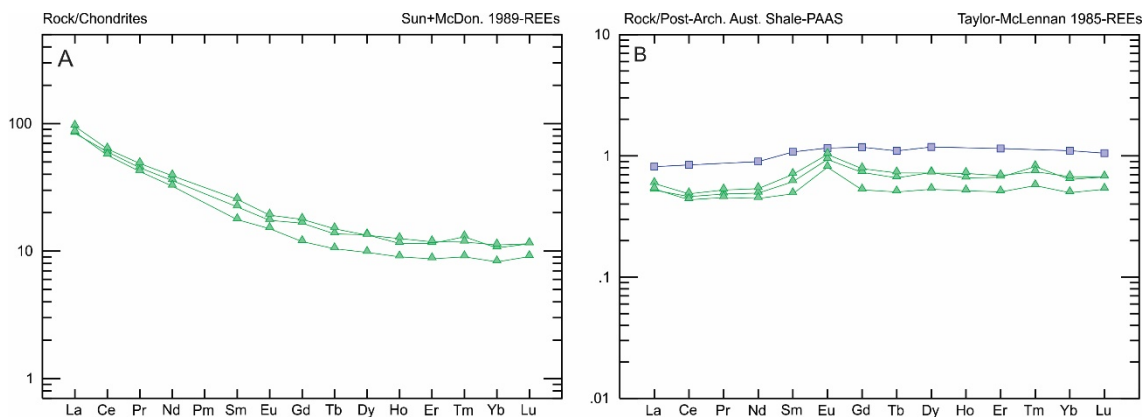


Figure 13: REE spidergrams normalized to chondrite composition (Sun and McDonough, 1989) (A) and to PAAS composition – Post-Archean Average Australian Shale (Taylor & McLennan, 1985) (B). The blue line represents the NASC composition – North American Shale Composition (Gromet et al., 1984).

#### 4.4.3 U-Pb geochronology

Two CMU samples of CMU were selected for Zircon U-Pb analyses MF196 (meta-greywacke) and MF391 (meta-sandstone). The sample MF162 was discarded because its position in a shear zone.

##### 4.4.3.1 Sample MF196

The 110 analyzed zircon grains from sample MF196 are sub-rounded to prismatic, short to elongated, with a maximum length of 200  $\mu\text{m}$ . Most of the grains are pyramidal with a pronounced zoning texture, some of them showing a rounded core (Figure 14). After data reduction, 80 spots were used for age calculations. Representing 7% of the analyzed zircon grains, the statistic peak around  $2481 \pm 12$  Ma encompasses the youngest grains of the sample (Figure 16), which represents a younger component of the source, thus constraining the maximum depositional age for this greywacke sample. The most significant sources for the MF196 metasediment are Neoproterozoic, indicated by age peak at  $2756 \pm 4$  Ma, which represents 78% of the sample (62 determinations). Other important sources are indicated by age peak at  $3003 \pm 10$  Ma (11%). Minor Paleoproterozoic ages point to sources around 3253 Ma and 3301 Ma (Figure 16). The Figure 15 shows the Concordia diagram for sample MF196 with all analysed grains.



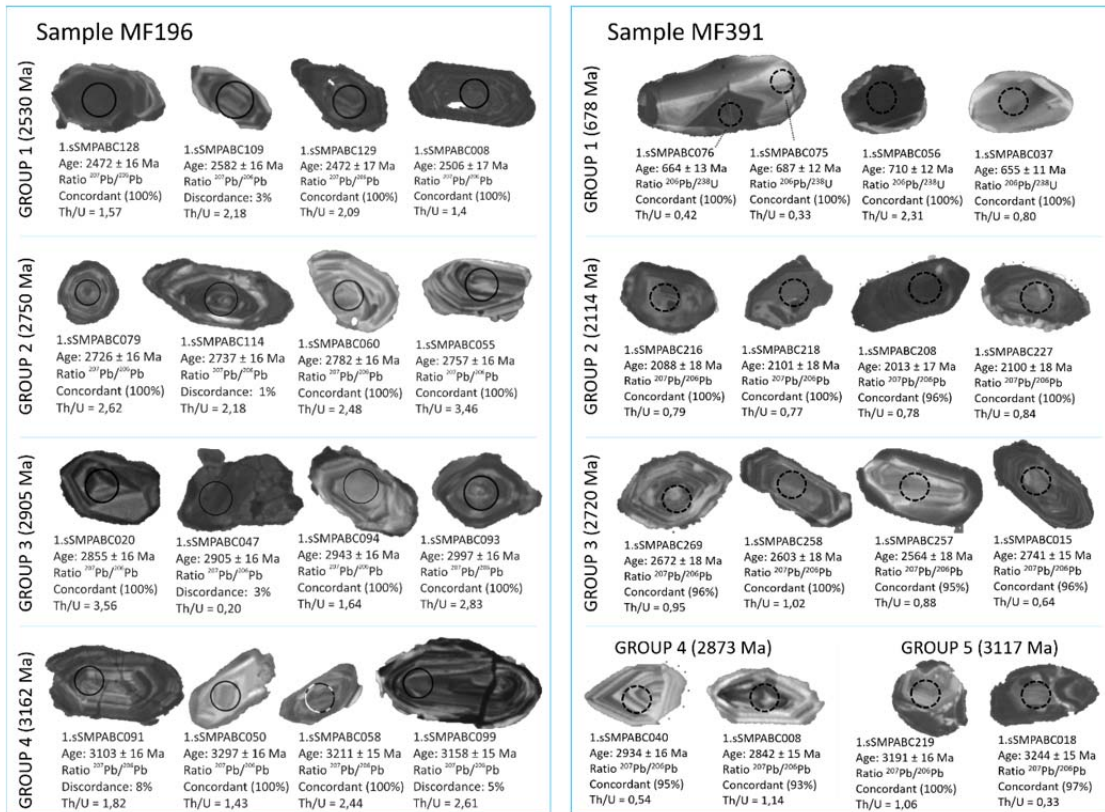


Figure 14: Cathodoluminescence images of zircon grains from samples MF 196 and MF 391, both meta-greywackes. Spot=30 µm.

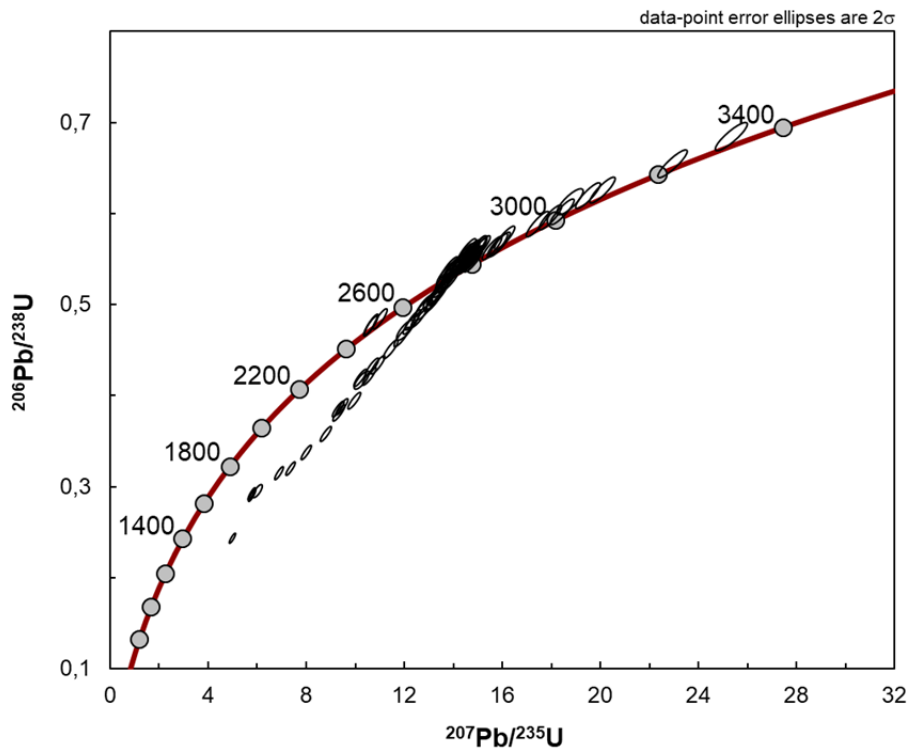


Figure 15: Concordia diagram for sample MF196 (all grains).

#### 4.4.3.2 Sample MF391

The 140 analyzed grains are rounded to sub-rounded, short to elongated, with a maximum length of 210  $\mu\text{m}$  and distinct internal features (e.g., oscillatory zoning, core and overgrowth, high to low luminescence; Figure 14). After data reduction, 99 spots could be used for age calculations. The statistic peaks around  $678 \pm 4 \text{ Ma}$  and  $2114 \pm 5 \text{ Ma}$  encompass the youngest grains of the sample, representing 13%, and 17% of the analyzed zircon grains, respectively (Figure 16). Cathodoluminescence (CL) images from zircon grains of these younger populations reveal typical habits and textures of metamorphic zircons, like sub-rounded grains with equant morphology and internal sector zoning textures (Figure 14). Therefore, these populations do not necessarily represent the younger component of the source, neither constrain the maximum depositional age of the Catarina Mendes unit. The most significant source of the MF391 meta-greywacke is indicated by age peak at  $2720 \pm 3 \text{ Ma}$  (52%), suggesting a substantial contribution from the sediment source located in the surrounding granite-gneiss complex. Minor Mesoarchean ages point to sources around  $2873 \text{ Ma} \pm 6 \text{ Ma}$  (10%) and  $3117 \pm 6 \text{ Ma}$  (7%). The Figure 17 shows the Concordia diagram for sample MF391 with concordant grains.

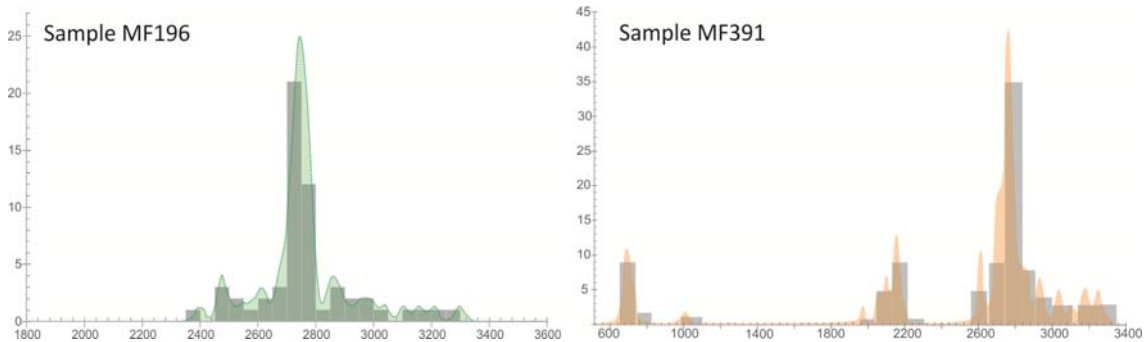


Figure 16: Frequency histograms showing U–Pb age data for samples from sample MF196 and sample MF391. Columns show possible sources of sediment supply. All weighted zircon age data was 90–110% concordant according to the ratio  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  /  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  and treated as sigma-1 errors.



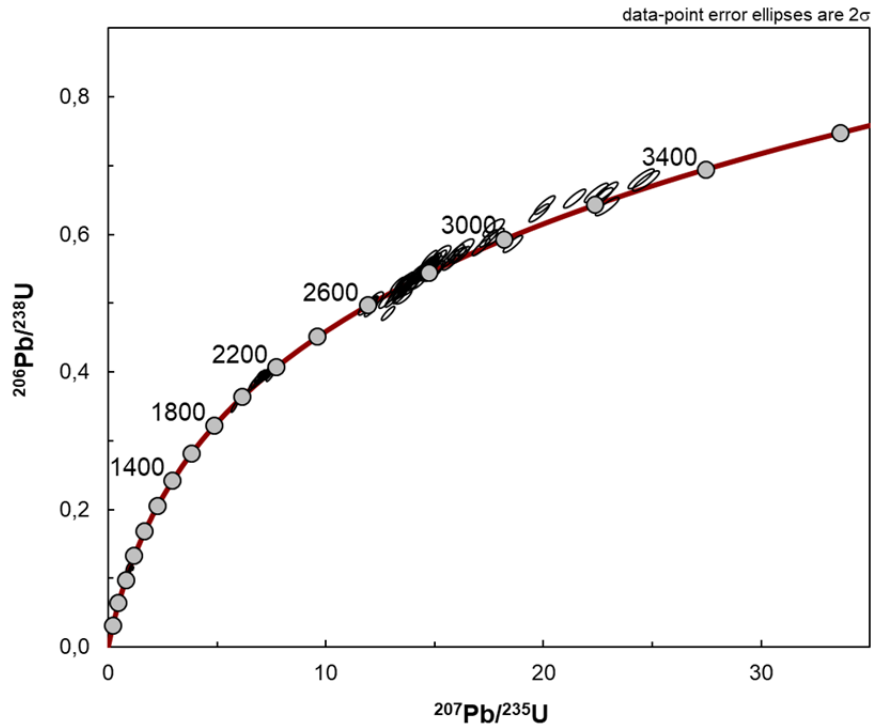


Figure 17: Concordia diagram for sample MF391 (concordant grains).

## 4.5 Discussion

### 4.5.1 Stratigraphic significance and depositional environment

The CMU metasedimentary succession, characterized in detail from its stratotype, refers to an immature sequence of arkose to lithic sandstones interlayered with mud-supported sandstone and pelites. The fingerprint of this unit is its plane-parallel cyclicity and interstrata presenting upward coarsening gradation, commonly showing a sharp boundary between each metasedimentary set. In a broad sense, the sets are mainly composed of lower immature coarse to medium laminated sandstone that grades upwards to interstratified plane-parallel siltstone with an upper strata of laminated to massive argillites.

Through the recognition of an incomplete sequence of Bouma (1962) in the CMU section type, sediment features suggest a deposit of turbidity current flows, as already suggested by Zucchetti et al., 1996. The continuous variation of the energy of these turbidity flows, which generate deposits of lower to higher densities indicate proximity to the source area, with the upper argillites of the sequence being related to a decrease in current flow energy in a proximal turbidite lobe environment (Bouma, 1962; Selley, 1988; Walker and James, 1992).

#### 4.5.2 Lithochemical signature and related sources

To constrain the source material and qualify the sediment origin and the main effect of its post-depositional modifications, some chemical nuances and parameters are used. According to [Nesbitt and Young \(1992\)](#), the main result of chemical weathering in metasedimentary rocks is the alteration of feldspar, because it is a very reactive and abundant mineral in the crust composition. In this way, large ionic elements such Ca, Na and K are removed in this process, causing a proportional enrichment in Al. In order to establish a parameter for chemical weathering, these authors established a formula to calculate a chemical index of alteration ( $CIA = 100 \times [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)]$ ) which reflects the weathering intensity.

Additionally, [Cox et al. \(1995\)](#) established a parameter to measure the compositional maturity of sedimentary rocks. It is based on the relationship between the chemical composition of rocks, their minerals and resistance to weathering, whose formulation defines the Index of Compositional Variability ( $ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO + TiO_2) / Al_2O_3$ ). The relationship between CIA and ICV values allows making reliable considerations about the nature of sedimentary rocks. High values of ICV (high degree of immaturity) are found in tectonically active environments, usually associated with low CIA values (low chemical weathering). On the other hand, rocks with high CIA values, submitted to intense chemical weathering, tend to present higher compositional maturity (low ICV values).

CIA and ICV values were calculated for the analyzed samples from the Catarina Mendes unit and the result is presented in Figure 18, that also presents the same parameters obtained by the previous studies of [Golia \(1997\)](#) (dashed line in red), in rocks of the CM unit in the same region. All the samples show immature composition and low chemical weathering, corroborating with its petrographic features, pointing to a proximal source area for these metasedimentary rocks, which include biotite clasts preserved and evolved by the main matrix foliation.

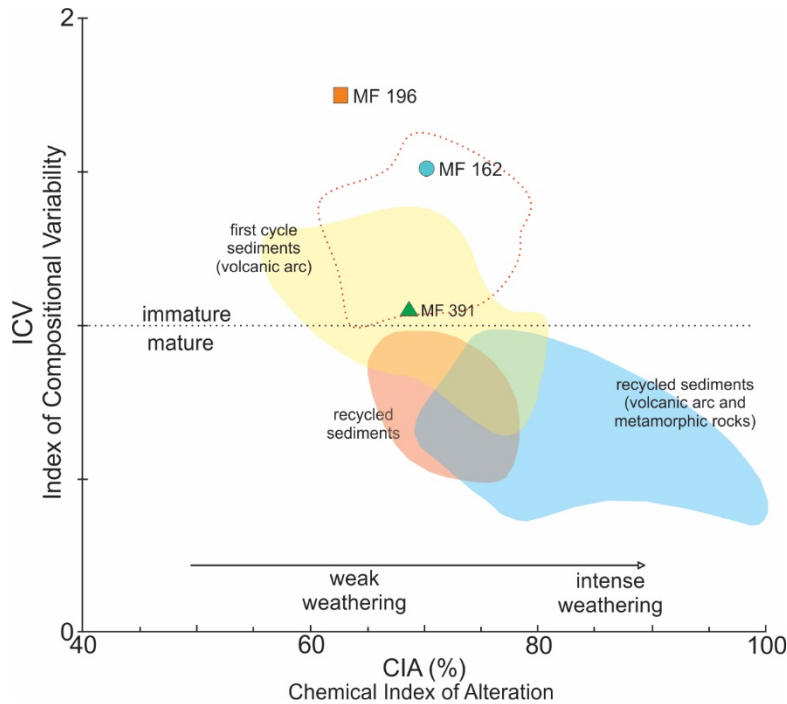


Figure 18: Relation between CIA (Nesbitt & Young, 1982) and ICV (Cox et al., 1995) values for sedimentary rocks of different origins (modified from Teixeira, 2015). The dashed red line represents the Golia (1997) data field.

The compilation of REE data published in literature for some lithological associations of the QF region allows making comparisons with the analyzed samples from this study (Figure 19). The Figure 15A shows the REE pattern of granite-gneiss and leucogranite from the Bação complex (Farina et al., 2015), gneiss from the Santa Bárbara complex (Baltazar & Raposo, 1993) and also the RVGB felsic volcanic rocks (Junqueira, 1997; Zucchetti & Baltazar, 2000; CPRM - Project QF internal report). These patterns, when compared to the analyzed samples, reveal that the studied rocks present LREE pattern similar to the volcanic rocks, with their HREE values analogous to the Bação complex rocks. On the other hand, the pattern presented by the REE of the Santa Bárbara complex differs completely from the analyzed samples, indicating that this was not a potential source for the metasedimentary rocks of CMU.

CMU shows the same REE pattern as the tholeiitic basalts from the RVGB (Zucchetti, 1998; Zucchetti & Baltazar 2000; Figure 15B). These basalts present values compatible with the E-MORB signature. Moreover, the REE values of the metakomatiites from the Quebra Osso Group (Acken et al., 2016) are much lower than the values obtained for the studied samples, not being associated as a probable source area for the rocks of the CM unit.

The REE pattern of other metasedimentary rocks from the Nova Lima Group (Junqueira, 1997; Zucchetti & Baltazar, 2000, Lima, 2012; internal report CPRM - Project QF) is very similar to those presented in this study (Figure 15C), pointing to an expressive source for the precursor basin of the CMU unit. In the same way, the LREE of the Maquiné Group samples (Zucchetti & Baltazar, 2000) are analogous to the analyzed samples, suggesting a parental source to the metasedimentary rocks of the CM unit. Figure 15D presents the REE behavior obtained for the metasediments of the São Bartolomeu region (Golia, 1997), which shows similar values for the meta-argillites analyzed in this study and a slight depletion in the HREE obtained in the meta-wacke. Despite some local chemical variations, these data are part of the same metasedimentary sequence, with a local bulk composition acting as the main factor for its chemical nuances and differences, mainly because of its lateral variation.

Previous studies suggested that both mafic and felsic sources were involved in the formation of metasedimentary rocks from the Catarina Mendes unit (e.g., Golia, 1997). Thus, in order to characterize the possible source rocks and their contribution, models of mixtures involving different Archean lithotypes presented in the QF region were studied, using the REE values compiled from literature (Figure 20). The results show that the composition of metasedimentary rocks from the Catarina Mendes unit can be explained by binary mixing between the granite-gneissic basement and tholeiitic basalts from the RVGB (Figure 16A-B). However, the model composition that best adjusts with the studied data is equivalent to 30% of the granite-gneissic basement (Bação complex), 30% of volcanic felsic and 40% of the E-MORB basalts representing the basal magmatism of the greenstone (Figure 16C-D).

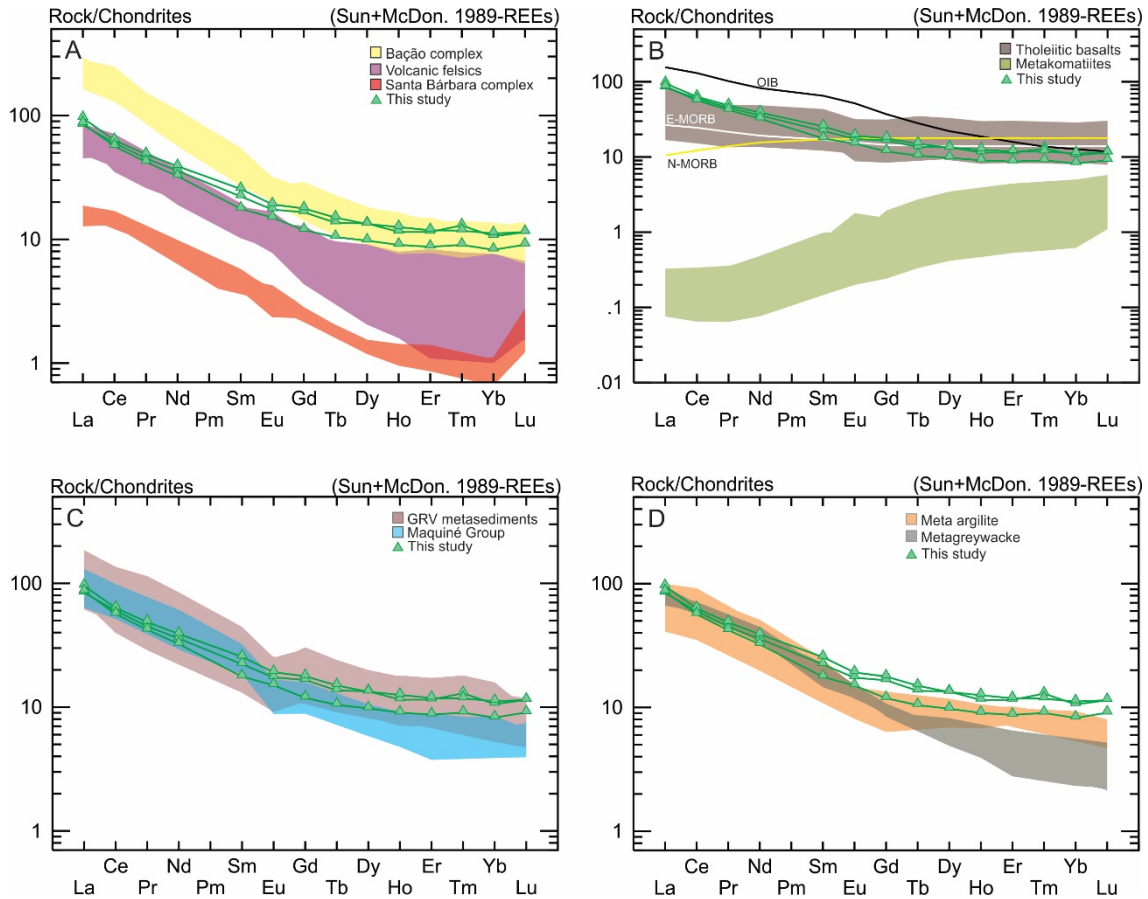


Figure 19: REE data obtained in the studied samples (MF162, MF196 and MF391) and also data compiled from literature, normalized to chondrite (Sun and McDonough 1989). A) REE data from the Bação complex (Farina et al., 2015), Santa Bárbara complex (Baltazar & Raposo, 1993) and volcanic felsic of the RVGB (Junqueira, 1997; Zucchetti & Baltazar, 2000; CPRM - Projeto QF internal report); B) REE of metakomatiites from the Quebra Osso Group (Acken et. al., 2016) and tholeiitic basalts from the RVGB (Zucchetti, 1998; Zucchetti & Baltazar 2000), besides OIB, E-MORB and N-MORB patterns (Sun and McDonough, 1989); C) Metasediments of the RVGB (Junqueira, 1997; Zucchetti & Baltazar, 2000; Lima, 2012; CPRM - Projeto QF internal report) and metasediments of the Maquiné Group (Zucchetti & Baltazar, 2000); D) REE values of metasediments from the São Bartolomeu region (Golia, 1997).

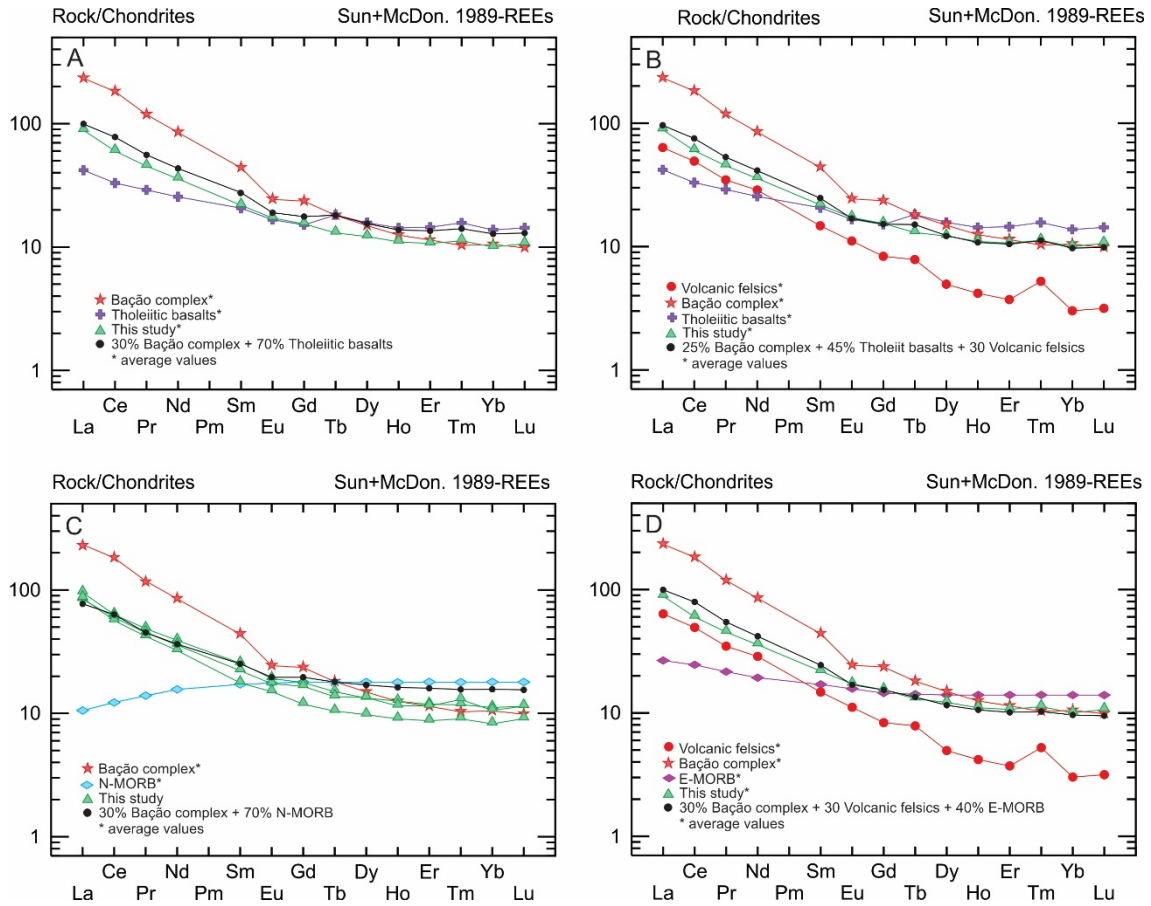


Figure 20: Mixture models involving different Archean lithotypes presented in the QF for the metasedimentary rocks from the Catarina Mendes unit, using REE values compiled in literature (see text for references). The green triangles are the data obtained in this study.

In a broad sense, the similarity between the REE compositions of the Bação Complex rocks, the tholeiitic basalts of RVGB and the studied samples enable us to consider them as main sources for the metasedimentary sequence of the CMU. Indeed, the distinct pattern presented by the Quebra Osso group and the Santa Bárbara complex suggests that the east region of the QF does not act as the source area for the metasediments of the São Bartolomeu region, or else, have a very limited contribution. The Gd/Lu ratio of the analyzed samples presents a flat HREE pattern, similar to the E-MORB and N-MORB signatures, suggesting that there was no OIB contribution.

#### 4.5.3 Geochronological insights and maximum depositional age

The geochronological data (U-Pb LA-ICP-MS) obtained from zircon grains from two samples of the Catarina Mendes unit unravel new data on the stratigraphy of the Precambrian metasedimentary succession in the Quadrilátero Ferrífero and its post-

deposition geodynamic history. The depositional age spectra of sample MF196 reveals statistic age peaks at around 2905 Ma and 2750 Ma, that can be related to the Rio das Velhas I and II events, and the oldest age peak (3162 Ma) may be related to the Santa Bárbara event (Figure 21). However, the youngest group (2530 Ma) shows high concordance with the youngest age of  $2481 \pm 12$  Ma, obtained from concordant zircon grains of this sample that do not present metamorphic evidence and can constrain the maximum depositional age for the CMU. This Siderian age is much younger than any other previous maximum depositional ages reported for the Nova Lima Group in this part of QF ( $2679 \pm 20$  Ma of [Dopico et al., 2017](#);  $2707 \pm 21$  Ma of [Cassino, 2014](#);  $2744 \pm 6$  of [Coelho, 2015](#); and  $2775 \pm 6$  of [Cutts et al., 2019](#)).

Although the maximum depositional age is an estimative from detrital zircon grains, it is very useful if the analyzed samples are representative and contain information of its source region ([Andersen, 2005](#)). It constrains the temporal position of the stratigraphic unit based on the age spectra of zircon grain populations. However, the lack of some age records does not represent a decisive factor to limit the minimum age of a basin.

The maximum depositional age obtained for the CMU is clearly out of the RVGB age record range, but is similar to ages published from zircon grains of the Itabira Group (Minas Supergroup) in the Ouro Preto Hill ( $2453 \pm 18$  Ma, Cauê Formation, [Cassino, 2014](#); [Dopico et al., 2017](#)) and in the western flank of Moeda Syncline, in the west portion of QF ( $2559 \pm 22$  Ma, Batatal Formation, [Dopico et al., 2017](#)). [Bongiolo et al., \(2013\)](#) also present an age of  $2452 \pm 15$  Ma in zircon grains from a banded iron formation in the region of São Tiago/MG, southwest of QF and related to the Minas Supergroup. The spectrum these ages indicates a siderian source influence in the Minas basin, but this source does not have a solid record of a magmatic event within the QF province. However, siderian sources of this age occur in the Mineiro Belt region, southern QF province and associated with Minas Supergroup units ([Barbosa et al., 2018](#)).

We interpreted the statistic peaks to be around  $678 \pm 4$  Ma and  $2114 \pm 5$  Ma, obtained from sample MF391, as a record of two distinct tectono-metamorphic overprints of Cryogenian and Rhyacian times, respectively. These two ages are related to large magnitude periods of crustal accretion that affected the São Francisco paleocontinent. The Rhyacian age is related to the main crustal accretionary period



since the Archean Eon. During this time, the Archean nuclei of SF paleocontinent was diachronically conjugated by a succession of magmatic arcs around its margins, especially those that surrounds the Quadrilátero Ferrífero domain (*e.g.*, Alkmim and Teixeira, 2017; Avila et al., 2010, 2014; Barbosa et al., 2018; Cardoso et al., 2019; Heilbron et al., 2010; Pinheiro et al., 2019, Seixas et al., 2013; Silva et al., 2016; Teixeira et al., 2000, 2015).

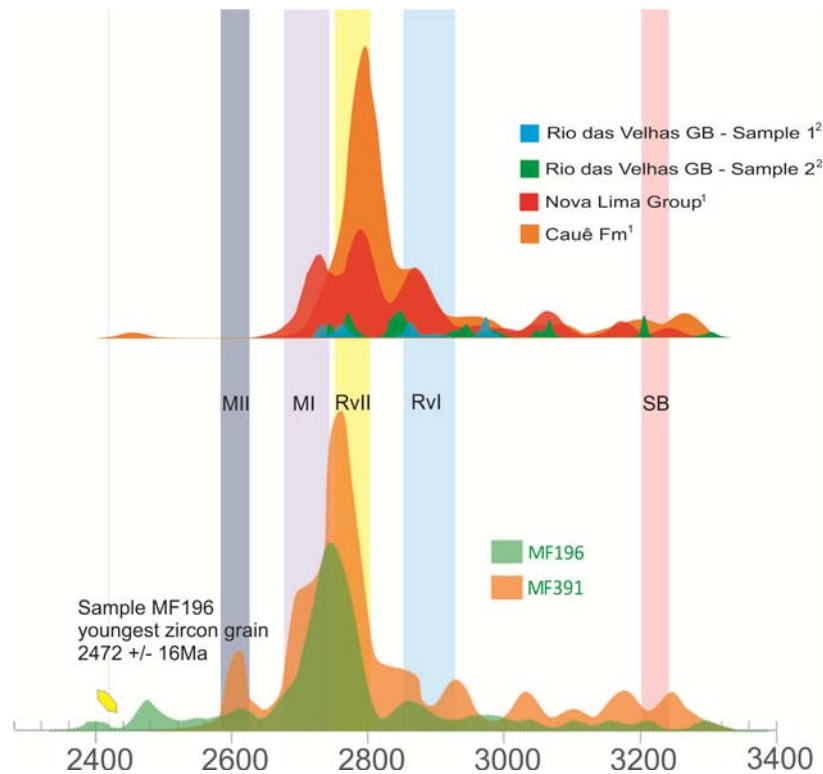


Figure 21: Frequency histograms showing compilation U–Pb age data of QF studies. Yellow crystal highlighting the youngest zircon grains from sample MF-196. <sup>1</sup> Cassino, 2014; <sup>2</sup> Dopico et al., 2017.

Cryogenian and Ediacaran periods ( $678 \pm 4$  Ma) correspond to a widespread range of ages recorded around the São Francisco craton. This period is related to the amalgamation of Western Gondwana, that built several orogenic systems and reworked the Archean-Paleoproterozoic units of the SF paleocontinent in a large inland extension (Coelho et al., 2017; Heilbron and Machado, 2003; Heilbron et al., 2010, 2017; Pinheiro et al., 2017; Silva et al., 2016; Tupinambá et al., 2000; Valeriano, 2017).

Although Rhyacian ages are well documented within the QF domain (Alkmim and Teixeira, 2017; Avila et al., 2008; Coelho, 2015), the Cryogenian-Ediacaran overprint disclose new insights about the influence of the Neoproterozoic tectonic with consequences for the cratonic delimitation.

#### 4.5.4 Regional inferences

The detailed stratigraphic features in the studied area (São Bartolomeu-Mendes district) show clearly that the Minas Supergroup units lies above the metasedimentary rocks of the Córrego da Paina unit that grades downward to the immature metasedimentary rocks of the Catarina Mendes unit. This stratigraphic relationship is in agreement with that established for the Mariana anticline structure (Nalini et al., 1992; Endo et al., 1996).

The isotopic U-Pb data obtained in this study discloses new elements in the QF architecture. The siderian maximum deposition age obtained from zircon grains of the CMU reveals ages younger than the base of Minas basin ages (Moeda Formation), which until now is considered of ca 2.6 Ga. However, the structure of the studied region is well established and define a regional anticline, which is in agreement with most of the structural geological studies on one of the most studied gold and iron provinces in the world.

In this panorama, considering the structure and the lithostratigraphic relationship of the Mariana anticline, the relationship of contacts between the Minas Supergroup above the RVGB, and that these siderian ages do not represent a metamorphic record, these results place a younger package in the anticline core, opening a window for discussion. Hartmann et al., (2006) proposes a maximum depositional age for the Minas basin (Moeda Formation) at ca 2580 Ma, while Babinski et al. (1995) reveal a Pb-Pb age of ca 2420 Ma from carbonates of the Itabira Group (Gandarela Formation). These ages constrain the interval of formation of the Minas basin at least around 160 Ma.

Moreover, detrital zircon grains extracted from banded iron formation related to the Minas Supergroup, around the Archean São Tiago block (Alkmim and Teixeira, 2017; Simon et al 2018), Southwest of the area, yielded maximum depositional ages around 2392<sup>+43</sup> and 2452<sup>-15</sup>Ma (Bongiolo et al., 2013). In a distinct geotectonic framework, the São Tiago block and its banded iron formation occur within the Mineiro belt, a paleoproterozoic crustal accretionary system that composes a mosaic of magmatic arcs amalgam, from Siderian to Rhyacian, in the south of the São Francisco craton (Alkmim and Teixeira, 2017; Avila et al 2010, 2014; Barbosa et al., 2018; Cardoso et al., 2019).

These siderian maximum depositional ages recorded in the QF domain and in nearby areas unravel new insights on the architecture of the southern portion of the São Francisco craton. Volcanic rock ages in the northern portion of QF ( $2721 \pm 3$  Ma, Machado et al., 1992) show that the greenstone in the north is older than CMU, separated by an interval of almost 240 Ma. These new data support the idea that CMU, which until now has been considered a part of the Rio das Velhas Supergroup, is really a basin apart from it. Its Siderian ages, coupled with similar data from literature, highlights Siderian source(s) from CMU and the lower units of the Minas Supergroup in the QF and in the Mineiro belt region, indicating a similar provenance source age between these units and indicates CMU as a coeval with the Minas basin.

## 4.6 Conclusion

The data provided herein has led to the following conclusions:

- The maximum depositional age obtained for CMU is ca  $2481 \pm 12$  Ma;
- The Catarina Mendes unit is younger than indicated in previous studies and can be interpreted as a basin apart from the Rio das Velhas Supergroup;
- The magmatism event registered in the zircon grains of meta-greywacke samples indicate a source not well documented in the literature for the Quadrilátero Ferrífero region; however, it is characterized within the Mineiro belt;
- The Bação complex plays an important role as the source area for CMU sediments. Considering its age (around 2.7 Ga), the sedimentary rocks of the CMU must be necessarily younger than this age;
- The geochemical data indicate that the eastern region of QF had little or no influence as source for CMU sediments;
- The post-magmatic Rhyacian ( $2114 \pm 5$  Ma) and Criogenian ( $678 \pm 4$  Ma) ages obtained are related to tectonic overprint events, respectively, with the gondwana amalgamation and the late stages of the accretionary events of the Mineiro belt.

## 4.7 Acknowledgments

The authors thanks the support by the by the Instituto de Geociências (IGC) of Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), the Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) and the Geological Survey of Brazil (SGB/CPRM). We also thank the Isotope Geochemistry Lab. from Ouro Preto Federal University (UFOP).

## CAPÍTULO 5 – DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

### 5.1 Discussão

#### 5.1.1 Estratigrafia e ambiente deposicional

A descrição das rochas metassedimentares da unidade Catarina Mendes (CMU) no afloramento que representa sua seção tipo permitiu o reconhecimento de uma sequência do tipo grauvacas-argilito, imatura, com arenitos, arcoseos e fragmentos líticos suportados pela matriz, intercalados por pelitos e rochas calcissilicáticas. Essas camadas apresentam ciclicidade plano-paralela com grano-decrescência ascendente, e contatos entre os sets abruptos.

De modo geral, é possível identificar diversas sucessões metassedimentares associadas a depósitos de turbidez, que embora de maneira incompleta, provavelmente compõe as diversas facies metassedimentares propostas por Bouma (1962), com os metarenitos grossos e finos, basais, e estratificação gradacional laminada, siltitos interlaminados com argilitos e níveis pelíticos no fechamento dos ciclos. Assim, de uma maneira geral, representam turbiditos proximais. O protólito é um arenito lítico quartzoso e feldspático, com finas camadas de arenito lítico menos quartzoso, com os grãos suportados pela matriz ("mud-supported"). As características como a ciclicidade, gradação interestratal nos ciclos e contatos abruptos entre si, corroboram a gênese desses metassedimentos como associados a depósitos gerados por correntes de turbidez (Selley, 1988, Walker e James, 1992, Mutti, 1992), de densidade variável, com o aporte de sedimentos oriundos do complexo metamórfico adjacente. As correntes de baixa densidade geradoras desses depósitos indicam proximidade com a área de origem, com as argilitos superiores da sequência sendo relacionadas a uma diminuição na energia de fluxo atual em um ambiente de turbidítico proximal, como observado por Zucchetti *et al.*, 1996.

#### 5.1.2 Dados litoquímicos e áreas fonte relacionadas

Através dos resultados obtidos nas amostras analisadas foram calculados os valores de CIA e ICV e o resultado é apresentado na Figure 18. Segundo Nesbitt e Young (1992), o principal resultado do intemperismo químico é a degradação dos feldspatos, por serem esses os mais reativos dentre os minerais mais abundantes na composição da crosta. Elementos maiores como Cálcio, Sódio e Potássio são removidos

nesse processo, ocasionando um enriquecimento proporcional de Alumínio. Visando estabelecer um parâmetro para o intemperismo químico, esses autores estabeleceram uma fórmula para se calcular o Índice de Alteração Química (CIA). Já [Cox et. al. \(1995\)](#), buscando um parâmetro para medir a maturidade composicional de rochas sedimentares, utilizaram a relação entre a composição química de rochas e minerais e sua resistência ao intemperismo para calcular o Índice de Variação Composicional (ICV). A relação entre os valores de CIA e ICV permite a formulações de considerações confiáveis sobre a natureza de rochas sedimentares e metassedimentares. Altos valores de ICV (alto grau de imaturidade) são encontrados em ambientes tectonicamente ativos, normalmente associados a baixos valores de CIA (baixo intemperismo químico). Por outro lado, rochas com altos valores de CIA, submetidas a um intenso intemperismo químico, tendem a apresentar maior maturidade composicional (baixos valores de ICV).

Para as amostras analisadas, observa-se composição imatura e baixa taxa de alteração por intemperismo químico, valores compatíveis com os dados apresentados por [Golia \(1997\)](#) para a mesma região. Essas informações sugerem que a área fonte é proximal, evidência também corroborada pela petrografia, como a presença de porfiroclastos de biotita (Figure 12 d).

A partir da compilação de dados de ETR publicados para a região do QF foram confeccionadas envoltórias de comportamento químico de diversas unidades do QF vislumbrando uma comparação com os dados deste estudo (Figure 19) e a caracterização das unidades fontes. Na Figure 19A, que apresenta as envoltórias dos padrões dos ETR do complexo do Bação ([Farina et. al., 2015](#)), do complexo Santa Bárbara ([Baltazar & Raposo, 1993](#)) e de vulcânicas félsicas do GRV ([Junqueira, 1997](#); [Zucchetti & Baltazar, 2000](#); relatório interno CPRM - Projeto QF), se observa a compatibilidade dos ETR leves das amostras analisadas com os valores das rochas vulcânicas e dos ETR pesados com o complexo do Bação. O padrão apresentado pelos ETR do complexo Santa Bárbara diverge totalmente das amostras analisadas. A Figure 19B apresenta a envoltória dos padrões ETR de basaltos toleíticos do GRV ([Zucchetti, 1998](#); [Zucchetti & Baltazar 2000](#)) compatível com os resultados encontrados nas amostras analisadas. Esses basaltos apresentam valores compatíveis com o padrão E-MORB (Enriched Mid\_Ocean Ridge Basalts) e divergem do padrão OIB (Ocean Island Basalts). A envoltória dos metakomatiites do Grupo Quebra Osso ([Acken et. al., 2016](#)) apresentam empobrecimento do ETR, sendo incompatíveis aos valores analisados. A

Figure 19C apresenta as envoltórias dos demais metassedimentos do Grupo Nova Lima (Junqueira, 1997; Zucchetti & Baltazar, 2000; Lima, 2012; relatório interno CPRM - Projeto QF), totalmente compatíveis com as amostras analisadas. Já a envoltória do Grupo Maquiné (Zucchetti & Baltazar, 2000) apresentam compatibilidade para os ETR leves e empobrecimento dos ETR pesados. A Figure 19D apresenta as envoltórias obtidas para os metassedimentos da região de São Bartolomeu (Golia, 1997), apresentando valores compatíveis aos analisados para os metargilitos e leve empobrecimento de ETR pesados para as metagrauvas.

A semelhança com o padrão do complexo do Bação permite a definição deste como uma das principais áreas fontes dos metassedimentos da unidade Catarina Mendes, junto aos basaltos toleíticos do SGRV. A incompatibilidade observada para os padrões REE apresentados pelo Grupo Quebra Osso e pelo Complexo Santa Bárbara indica que a região leste a leste do QF não serviu de fonte para os metassedimentos da região de São Bartolomeu. A razão Gd/Lu das amostras analisadas apresentam um padrão subhorizontalizado para os ETR pesados, semelhante as assinaturas E-MORB e N-MORB, indicando que não houve contribuição de basaltos do tipo IOB.

A partir da comparação com os dados compilados, foram confeccionadas modelagens através dos valores médios encontrados para esses padrões (Figure 20). A composição encontrada que melhor ajusta ao dados da unidade Catarina Mendes é 30% granito-gnaisses, 30% de vulcânicas e 40% basaltos.

### 5.1.3 Idades geocronológicas

O zircão é um componente menor em rochas sedimentares (geralmente ocorre como mineral acessório), porém tem importância crucial no estudo de proveniência, determinação de idade máxima deposicional, evolução tectônica de bacias sedimentares e processos magmáticos continentais (e.g., Andersen, 2005; Dickinson & Suczek, 1979; Garzanti I., 2007; Condie *et al.*, 2009; Hawkesworth *et al.*, 2010; Cawood *et al.*, 2007, 2012; Moreira *et al.*, 2016). Quando bem associado à idade de deposição, zircões detriticos fornecem boa discriminação do ambiente tectônico da petrogênese dos sedimentos (Hawkesworth *et al.*, 2009). Grosso modo, duas variáveis controlam a distribuição do espectro: i) presença ou ausência de atividade magmática sin-sedimentar; e ii) o espalhamento e proporção dos diferentes registros de idade (Cawood



*et al.*, 2012). O uso e análise de espectros de zircão detrítico ganha maior importância no estudo de bacias antigas e deformadas, que já tiveram suas estruturas sedimentares primárias destruídas e obliteradas por eventos tectônicos posteriores à sua gênese. Diversos estudos apontam que o registro isotópico (U-Pb) em zircão detrítico em conjunto com observações estratigráficas de campo fornecem importantes informações acerca do ambiente deposicional da bacia e tectônico da fonte (e.g., Davis, 2002; Condie *et al.*, 2009; Lancaster *et al.*, 2014; Gehrels, 2014).

Os dados geocronológicos (U-Pb LA-ICP-MS) obtidos nos zircões detríticos de duas amostras da CMU trazem novas informações a estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero e sua história geodinâmica. O espectro de idades encontrado na amostra MF196 revela picos estatísticos em torno de 2905 e 2750 Ma, que são relacionados aos eventos Rio das Velhas I e Rio das Velhas II. O pico de idades mais antigas (3162 Ma) corresponde ao registro do evento Santa Bárbara. O pico formado pelas idades em torno de 2530 Ma, foi obtido a partir de zircões concordantes e sem evidências de metamorfismo, com a idade mais jovem de  $2481 \pm 12$  Ma. Essa idade foi interpretada aqui como a idade máxima de deposição dos metassedimentos CMU. Essa idade, no entanto é bem mais jovem do que as idades anteriormente publicadas para o Grupo Nova Lima ( $2679 \pm 20$  Ma, Dopico *et al.*, 2017;  $2707 \pm 21$  Ma, Cassino, 2014;  $2744 \pm 6$  Coelho, 2015;  $2775 \pm 6$ , Cutts *et al.*, 2019).

A idade máxima de sedimentação obtida neste estudo mostra clara divergência com os dados publicados na literatura para as rochas associadas ao Supergrupo Rio das Velhas, porém são similares as idades propostas para o Grupo Itabira na região da serra de Ouro Preto ( $2453 \pm 18$  Ma, Formação Cauê, Cassino, 2014; Dopico *et al.*, 2017) e na região do Sinclinal Moeda ( $2559 \pm 22$  Ma, Formação Batatal, Dopico *et al.*, 2017). Porém, essas idades siderianas provenientes de metassedimentos, não tem fontes magmáticas caracterizadas e conhecidas na região circunscrita pela contornos do QF. Por outro lado, idades semelhantes são largamente conhecidas na região do Cinturão Mineiro, sudeste do QF (Barbosa *et al.*, 2018). Nessa região, Bongiolo *et al.*, (2013) apresenta idade de  $2452 \pm 15$  Ma em zircões detríticos de Formações Ferríferas bandadas consideradas correlatas ao Supergrupo Minas próximo a cidade de São Tiago/MG.

Os dados geocronológicos da amostra MF391, que refletem idades neoproterozoicas ( $2114 \pm 5$  Ma e  $678 \pm 4$  Ma) foram aqui interpretados como o registro

de dois eventos tectono-metamórficos: o Transamazônico no Riáciano e o Brasileiro no Criogeniano-Ediacarano. O Transamazônico representa um importante período de acreção crustal, com a geração de sucessivos de arcos magmáticos nas margens do CSF (e.g., Alkmim and Teixeira, 2017; Avila *et al.*, 2010, 2014; Barbosa *et al.*, 2017; Cardoso *et al.*, 2019; Heilbron *et al.*, 2010; Pinheiro *et al.*, 2019, Seixas *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2016; Teixeira *et al.*, 2000, 2015). O Brasileiro, ocorrido nos períodos Criogeniano-Ediacarano, é correlacionado a amalgamação da parte oeste do Supercontinente Gondwana através de vários cinturões orogênicos ao redor do CSF que retrabalharam suas unidade arqueanas e paleoproterozoicas marginais (Coelho *et al.*, 2017; Heilbron and Machado, 2003; Heilbron *et al.*, 2010, 2017; Pinheiro *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2016; Tupinambá *et al.*, 2000; Valeriano *et al.*, 2017).

Se por um lado as idades Riácianas correspondem a um evento amplamente caracterizado no domínio do QF e do Cinturão Mineiro, (Alkmin and Teixeira, 2017; Avila *et al.*, 2008; Coelho, 2015), as idades relacionadas ao Brasileiro abrem espaço para a discussão da influência desse evento no QF e para a delimitação do Cráton São Francisco em sua porção meridional. A capacidade da orogenia brasileira de resetar os zircões detríticos nessa região do QF foi observada por Cabral & Zeh (2015), que encontraram idades U-Pb discordantes de cerca de 500 Ma em zircões da Mina da Passagem, confirmado através de idade concórdia em grãos de xenotima (496 Ma).

#### 5.1.4 Implicações regionais

Os estudos estratigráficos na região dos distritos de São Bartolomeu e Mendes mostram as rochas da unidade Catarina Mendes posicionadas abaixo da unidade Córrego da Paina, em contato transicional. De acordo com a geologia estrutural da região da Anticlinal de Mariana, os contatos com os pacotes relacionados ao Grupo Maquiné e ao Supergrupo Minas são tectônicos, através de zonas de cisalhamento e empurrão (Nalini *et al.*, 1992; Endo *et al.*, 1996)

Os dados U-Pb obtidos neste trabalho trazem novos elementos a serem discutidos na compreensão da arquitetura do QF. Idades de rochas vulcânicas do SGRV na porção norte do QF ( $2721 \pm 3$  Ma, Machado *et al.*, 1992) estabelece um intervalo de 240 Ma em relação aos metassedimentos da CMU, estendendo o tempo de atuação da bacia Rio das Velhas. A idade máxima de sedimentação encontrada é mais jovem

também que as idades estabelecidas para a Formação Moeda, base do SGM, em torno de 2,6 Ga. Como esses pacotes estão inseridos em uma estrutura anticlinal, esses dados implicam a colocação de um pacote mais jovem na região central dessa estrutura, trazendo um problema estrutural ao modelo geológico dessa área. [Hartmann et al., \(2006\)](#) apresenta idade máxima de sedimentação para a Formação Moeda de 2580 Ma enquanto [Babinski et al.\(1995\)](#) apresenta idade Pb-Pb de 2420 para os carbonatos do Grupo Itabira (Formação Gandarela), o que resulta em um intervalo de 160 Ma de formação para a bacia Minas. Além disso, a idade das Formações Ferríferas de São Tiago ([Bongiolo et al., 2013](#)) reforça a crono-correlação dessas com as unidades do Supergrupo Minas através de registro semelhante de [Cassino \(2014\)](#), no Grupo Itabira na Serra de Ouro Preto.

Os dados obtidos correlacionam as idades do CMU com as idades do Grupo Itabira, Supergrupo Minas. Esses dados sugerem que a CMU constitua uma bacia a parte do SGRV e crono-correlata ao SGM, porem posicionada estratigraficamente abaixo deste. Ainda, o registro de dois eventos diacronicos tectono-metamórficos, Brasiliano e Riacciano, em apenas uma das amostras foi interpretado como resultado da maior proximidade dessa amostra (MF391) com o Complexo do Bação, que serviu como anteparo a essas deformações.

## 5.2 Conclusões

A partir dos dados e informações obtidas, pode-se concluir:

- A idade máxima de sedimentação determinada neste trabalho para os metassedimentos da Unidade Catarina Mendes é  $2481 \pm 12$  Ma, é aproximadamente 200 Ma mais jovem do que as demais unidades estratigráficas relacionadas ao Supergrupo Rio das Velhas, portanto, constitui uma bacia a parte das associadas as sequencias do tipo greenstone belt;
- O evento magmático Sideriano registrado na população de zircões concordantes mais jovem da amostra MF196 ainda carece de precedência magmática para a região do Quadrilátero Ferrífero, sendo encontradas na literatura apenas algumas idades semelhantes no Supergrupo Minas e unidades a ele correlacionadas.
- As idades Criogeniana ( $678 \pm 4$  Ma) e Riacciana ( $2114 \pm 5$  Ma) são interpretadas como metamórficas e correspondem aos eventos acrecionários relacionados à amalgamação

do Gondwana Ocidental e a estruturação do Cinturão Mineiro, respectivamente. Estão registradas na amostra geograficamente mais próxima ao Complexo do Bação, que teve papel de anteparo à esses eventos deformacionais.

- Os dados ETR obtidos neste estudo, quando comparados aos dados publicados para a região do QF permitem inferências sobre as possíveis áreas fonte dos sedimentos analisados e mostram que a região leste do QF, representada pelo Grupo Quebra-Osso e pelo Complexo Santa Bárbara, não serviu como fonte significativa para a unidade Catarina Mendes.

- Dentre as rochas que apresentam assinaturas de ETR compatíveis com as amostras analisadas estão os granitos e gnaisses do Complexo do Bação, os basaltos toleíticos e rochas vulcânicas félsicas do Grupo Nova Lima (Supergrupo Rio das Velhas), como indicam os modelamentos de área fonte propostos. Considerando as idades de cristalização conhecidas para o Complexo do Bação, em torno de 2,7 Ga, a bacia representada pelos sedimentos Catarina Mendes deve necessariamente ser mais jovem do que essa fonte.

## CAPÍTULO 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acken, D. V., Hoffmann, J. E., Schorscher, J. H. D., Schulz, T., Heuser, A., Luguét, A. 2016. Formation of high-Al komatiites from the Mesoarchean Quebra Osso Group, Minas Gerais, Brazil: Trace elements, HSE systematics and Os isotopic signatures. *Chemical Geology*, Vol. 422, 108-121.
- Alkmim, F.F., Marshak, S., 1998. The Transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic Collision and Collapse in the Southern São Francisco Craton region. *Precambrian Research*. 90, 29-58.
- Alkmim, F.F., Martins-Neto, M.A., 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco Craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 33, 127–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>.
- Alkmim, F.F., Teixeira, W., 2017. The Paleoproterozoic Mineiro belt and the Quadrilátero Ferrífero. In: Heilbron, M., Cordani, U., Alkmim, F. (Eds.), *São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*. Springer International Publishing, *Regional Geology Reviews*, pp. 71–94.
- Almeida, F. F. M. 1976. Estruturas do Pré-Cambriano inferior brasileiro. In: *Congresso Brasileiro de Geologia*, 29, Ouro Preto, 1976. Resumos. Belo Horizonte, SBG, p. 201 – 202.
- Almeida, F. F. M. de (1977) O cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, p. 349-364.
- Almeida, L. G. 2004. Estratigrafia e geologia estrutural da porção central do sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais. Dissertação de Mestrado, DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 109p.

- Andersen, T. 2005. Detrital zircons as tracers of sedimentary provenance: limiting conditions from statistics and numerical simulation. *Chemical Geology* 216 (2005) 249–270.
- Anhaeusser, C. R. 2014. Archaean greenstone belts and associated granitic rocks – a review. *African Earth Sciences* (2014), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.07.019>
- Araújo, J. G. M., 2001. Influência das zonas de cisalhamento de São Vicente e Tapera na mineralização aurífera do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, IG – Instituto de Geociências. 110p.
- Ávila, C. A., Cherman, A. F., Valença, J. G. 2008. Metamorfismo paleoproterozóico do Cinturão Mineiro: considerações petrográficas a partir dos dioritos Brumado e Rio Grande. *Arquivos do Museu Nacional, Rio de Janeiro*, v.66, n.2.
- Ávila, C.A., Teixeira, W., Cordani, U.G., Moura, C.A.V., Pereira, R.M. 2010. Rhyacian (2.23–2.20) juvenile accretion in the southern São Francisco craton, Brazil: Geochemical and isotopic evidence from the Serrinha magmatic suite, Mineiro belt. *Journal of South American Earth Sciences*, 29, 143–159.
- Ávila, C.A., Teixeira, W., Bongioiolo, E.M., Dussin, I.A., Vieira, T.A.T. 2014. Rhyacian evolution of subvolcanic and metasedimentary rocks of the southern segment of the Mineiro belt, São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Research*, 243: 221–251.
- Babinski, M., Chemale Jr., F., Van Schmus, W.R., 1995. The Pb/Pb age of the Minas Supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Precambrian Res.* 72, 235–245.
- Baltazar, O.F., Pedreira, A.J., 1996. Associações de litofácies. In: CPRM–Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Projeto Rio das Velhas–Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, p. 43–48.



- Baltazar, O.F., Pedreira, A.J., 1998. Associações litofaciológicas. In: M. Zucchetti and O.F. Baltazar (Eds.), Projeto Rio das Velhas–Texto Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000. 2nd edition, Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, p. 43–47.
- Baltazar, O. F., Raposo, F. O. 1993. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-X-B-I. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000. Brasília, DNPM/CPRM, 1993
- Baltazar, O.F., Rosière, C.A., Corrêa Neto, A.V., Silva, J.N., 1995. Geologia estrutural do Grupo Maquiné, Supergrupo Rio das Velhas, na porção central do Quadrilátero Ferrífero (MG). 5th Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. Sociedade Brasileira de Geologia, Gramado, pp. 11–13.
- Baltazar, O.F., Silva, S.L., 1996. Projeto Rio das Velhas: Mapa Geológico Integrado do Supergrupo Rio das Velhas, escala 1:100.000. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte.
- Baltazar, O. F., Zucchetti, M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32, 1-2.
- Barbosa, N., Teixeira, W., Ávila, C.A., Montecinos, P.M., Bongiorno, E.M., Vasconcelos, F.F., 2018. U-Pb geochronology and coupled Hf-Nd-Sr isotopic-chemical constraints of the Cassiterite Orthogneiss (2.47-2.41-Ga) in the Mineiro belt, São Francisco craton: Geodynamic fingerprints beyond the Archean-Paleoproterozoic Transition. *Precambrian Research*. V326, p 399-416.
- Barley, M. E., Bekker, A., & Krapež, B., 2005. Late Archean to Early Paleoproterozoic global tectonics, environmental change and the rise of atmospheric oxygen. *Earth and Planetary Science Letters*, 238(1-2), 156-171.

- Bongiolo, E.M. ; ÁVILA, C.A. ; TEIXEIRA, W. ; Dussin, I.A. ; Ramsauer, R. Geocronologia U-Pb (LA-ICPMS) em grãos detríticos de zircão da formação ferrífera bandada da região de São Tiago (MG) e sua correlação com os BIF do Supergrupo Minas. In: XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2013, Diamantina. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Geoquímica, 2013.
- Bouma, A. H. 1962. Sedimentology of some flysch deposits. Amsterdam, Elsevier. 198p.
- Cabral, A. R; Zeh, A. 2015. Detrital zircon without detritus: a result of 496-Ma-old fluid-rock interaction during the gold-lode formation of Passagem, Minas Gerais, Brazil. *Lithos*, volumes 212-215, páginas 415-427, janeiro de 2015.
- Cardoso, C. D., Ávila, C. A., Neumann, R., Oliveira, E. P., de Morisson Valeriano, C., & Dussin, I. A., (2019) A Rhyacian continental arc during the evolution of the Mineiro belt, Brazil: Constraints from the Rio Grande and Brumado metadiorites. *Lithos*, 326, 246-264.
- Cameiro M.A. 1992. O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional - Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento da crosta continental do Arqueano. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 233p.
- Carr, M. J., & Gazel, E. (2017). Igpets software for modeling igneous processes: examples of application using the open educational version. *Mineralogy and Petrology*, 111(2), 283-289.
- Cassino, L. F., 2014. Distribuição de idades de zircões detríticos dos supergrupos Rio das Velhas e Minas na Serra de Ouro Preto, Quadrilátero Ferrífero, MG – implicações para a evolução sedimentar e tectônica. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia. 44p.
- Cavalcanti, J. A. D.; Araújo, J .C.S .; Ferreira, R .C.R .; Freitas, F.M.; Queiroz , S .F. de; Santos, L.D.; 2016. Projeto ARIM Carta Geológica e de

Recursos Minerais da porção central do Supergrupo Rio das Velhas – Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte: CPRM, 2016, 1 mapa colorido. Escala 1:100.000.

- Cawood, P., Johnson, M. R. W., Nemchin, A. A. 2007. Early Palaeozoic orogenesis along the Indian margin of Gondwana: Tectonic response to Gondwana assembly. *Earth and Planetary Science Letters* 255(1):70-84
- Cawood, P. A., Hawkesworth, C. L., Dhuime, B. 2012. Detrital record and tectonic setting. *Geology* (2012) 40 (10): 875-878.
- Coelho, M.B., Trouw, R.A.J., Ganade, C.E., Vinagre, R., Mendes, J.C., Sato, K., 2017. Constraining timing, PT conditions of continental collision, late overprinting in the Southern Brasília Orogen (SE-Brazil): U-Pb zircon ages, geothermobarometry of the Andrelândia Nappe System. *Precamb. Res.* 292, 194–215.
- Coelho, V. V. 2015. Modelagem metamórfica e geocronologia de xistos e anfibolitos do Grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. (Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia da EM/UFOP).
- Condie, K.C. 1994. Greenstones through time. Chapter 3 from *Archean Crustal Evolution*. Elsevier, Amsterdam, 1994.
- Condie, Kent C. 2016. A planet in transition: The onset of plate tectonics on Earth between 3 and 2 Ga? *Geoscience Frontiers*.
- Condie, K.C., 2018. A planet in transition: The onset of plate tectonics on Earth between 3 and 2 Ga. *Geosci. Front.* 9 (1), 51–60.
- Condie, K.C., Aster, R.C., 2009. Zircon age episodicity, growth of continental crust. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union* 90 (41), 364.
- Condie, K.C., Arndt, N., Davaille, A., Puetz, S.J., 2017. Zircon age peaks: production or preservation of continental crust? *Geosphere* 13 (2), 227–234.
- Correa Neto, A. V. & Baltazar, O. F. 1995. Compartimentação estrutural do greenstone belt Rio das Velhas o interior do Quadrilátero Ferrífero (MG). In: *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 5º*, Gramado/RS. P 15-17.

- Cox, R.; Lowe, D. R.; Cullers, R. L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 59, Nº 14, pp. 2919-2940, 1995.
- Cutts, K.; Lana, C.; Alkmim, F. F.; Farina, F.; Moreira, H.; Coelho, V. 2019. Metamorphism and exhumation of basement gneiss domes in the Quadrilátero Ferrífero: Two stage dome-and-keel evolution? *Geoscience Frontiers*. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.02.009>
- Dickinson, W. R., Suczek, C. A. 1979. Plate Tectonics and Sandstone Compositions. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. V. 63, Nº 12. P 2164-2182.
- Dopico, C.I.M., Lana, C., Moreira, H.S., Cassino, L.F., Alkmim, F.F. 2017. U-Pb ages and Hf isotope data of detrital zircons from the late Neoproterozoic Minas Basin, SE Brazil. *Precambrian Research*, 291: 143–161.
- Dorr, J. V. N.; Gair, J. E.; Pomerene, J. B.; Rynearson, G. A. 1957. Revisão da estratigrafia pré-cambriana do Quadrilátero Ferrífero, Brazil. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 31p. (Avulso 81).
- Dorr, J.V.N. 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Geol. Surv. Prof. Pap.* 110.
- Endo I., Fonseca M.A., Oliveira C.G. 1996. Tectônica Transcorrente NS de idade Neoproterozoica no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. *Congr. Bras. Geol.*, 39, Salvador, 1996. *Anais*, Salvador, SBG, 1: 437-439.
- Endo, I., 1997. Regimes tectônicos do arqueano e proterozóico no interior da placa sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais. São Paulo. 243p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Endo I. Oliveira A.H., Peres G.G., Guimarães M.L.V., Lagoeiro L.E., Machado R., Zavaglia G., Rosas C.F. & Melo R.J., 2005. Nappe Curral: Uma megaestrutura alóctone do Quadrilátero Ferrífero e controle da mineralização. In: X Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos / IV

Symposium on Tectonics, Curitiba. Boletim de resumos expandidos. P.279-282.

- Farina, F., Albert, C., Lana, C. 2015b. The Neoproterozoic transition between medium- and high-K granitoids: Clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil). *Precambrian Research*, 266: 375–394.
- Farina, F., Albert, C., Martínez Dopico, C., Aguilar Gil, C., Moreira, H., Hippertt, J., Cutts, K., Alkmim, F., Lana, C., 2016. The Archean Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): current models and open questions. *J. South Am. Earth Sci.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2015.10.015>.
- Floyd, P. A.; Leveridge, B. E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *Journal of the Geological Society*, vol. 144, 531-542.
- Flower, M.F., 2003. Ophiolites, historical contingency, the Wilson cycle. In: Dilek, Y., Newcomb, S. (Eds.), *Ophiolite concept, the evolution of geological thought*. Special papers. Geological Society of America, pp. 111–136.
- Freitas, F. M.; Dias, P. H. A.; Marinho, M. S.; Cavalcanti, J. A. D. 2017. Unidade Catarina Mendes, Grupo Nova Lima, Greenstone Belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero. In *GEOSUDESTE, Diamantina, anais*, outubro de 2017.
- Freyberg, B. 1932. *Ergebnisse geologischen Forschungen in Minas Geraes, Brasilien*. N. J. f. Min. Geol. U Pal. In: Nalini *et al.*, 1992.
- Gair, J.E.. 1962. *Geology and Ore Deposit of the Nova Lima and Rio Acima Quadrangles, Minas Gerais, Brazil*. United States Geological Survey Professional Paper 341-A, 67p.
- Garzati, E., Doglioni, C., Vezzoli, G., Andò, S. 2007. Orogenic Belus and Orogenic Sediment Provenance. *The Journal of Geology* 115 (3):315-334.

- Golia, A., Oliveira da Cunha, E. M., Ferreira, G. 1995. Geologia do greenstone belt Rio das Velhas no distrito aurífero de São Bartolomeu. Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS eGERAIS. 8, Diamantina. 1995 Anais. Diamantina p. 67-69 (Bol n°13)
- Golia, A., 1997. Petrografia e Geoquímica dos metassedimentos do Grupo Nova Lima, Greenstone Belt Rio das Velhas na região de São Bartolomeu: modelagem de área-fonte, proveniência e ambiente tectônico. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., O'Neill, C. O. S. Y., O'Reilly, S. Y., Malkovets, V., Pearson, N. J., ... & Wilde, S. A., 2014. The world turns over: Hadean–Archean crust–mantle evolution. *Lithos*, 189, 2-15.
- Gromet, L.P.; Haskin, L. A.; Korotev, R. L.; Dymek, R. F. 1984. The “North American shale composite”: Its compilation, major and trace element characteristics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 48, 2469-2482.
- Hartmann, A., Endo, I., Suita, M.T.F., Santos, J.O.S., Frantz, C.J., Carneiro, M.A., McNaughton, N.J., Barley, M.E. 2006. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U–Pb isotopes. *The Journal of South American Earth Sciences*, 20: 273–285.
- Hawkesworth, C. J., Kemp, A. I. S.. 2006. Evolution of the continental crust. *Nature*, Vol 443/19. Doi:10.1038/nature05191
- Hawkesworth, C. J., Cawood, P. A., & Dhuime, B. (2016). Tectonics and crustal evolution. *GSA Today*, 26(9), 4-11.
- Hawkesworth, C., Dhuime, B., Pietranik, A., Cawood, P., Kemp, T., Storey, C., 2010. The generation and evolution of the continental crust. *J. Geol. Soc.* 167, 229–248.
- Heilbron M. & Machado N. 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Res.*, 125(1-2):87-112.
- Heilbron, M., Duarte, B.P., Valeriano, C.M., Simonetti, A., Machado, N., Nogueira, J.R., 2010. Evolution of reworked Paleoproterozoic basement rocks within the Ribeira belt (Neoproterozoic), SE-Brazil, based on U/Pb



- geochronology: implications for paleogeographic reconstructions of the São Francisco-Congo paleocontinent. *Precambr. Res.* 178, 136–148.
- Heilbron, M.; Cordani, U. G.; Alkmim, F. F.; 2017. São Francisco Craton, Eastern Brazil Tectonic Genealogy of a Miniature Continent. Ed Springer.
- Hurley, P.M.; Almeida, F.F.M.; Melcher, G.E.; Cordani, U.G.; Rand, J.R.; Kawashita, K.; Vadoros, P.; Pinson Jr., W.H.; Fairbairn, H.W. 1967. Test of continental drift by means of radiometric ages. *Science*, 157(3788):495-500
- Jackson, S.E., Pearson, N.J., Griffin, W.L., Belousova, E.A., 2004. The application of laser ablation- inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon geochronology. *Chemical Geology*. Vol. 211, 47–69.
- Junqueira, P.A., 1997. Geologia do depósito de ouro da Mina de Raposos, Quadrilátero Ferrífero, com ênfase na alteração hidro-termal. MSc Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, Brazil, 141 pp
- Lacourt, F. 1938. Anticlinal de São Bartolomeu – Passagem. *Revista Mineração e Metalurgia*, n.15, p. 147-151.
- Ladeira, E.A., 1980. Metallogenesis of Gold at the Morro Velho Mine and in Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Ph.D. Thesis, University of Western Ontario. Department of Geology, London, Canada, 272 pp.
- Lana, C., Alkmim, F.F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini, H.A. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Research*, 231: 157–173
- Lima, L. C. 2012. Geologia dos Depósito LODE Au-As-Sb Laranjeiras em metaturbiditos do Grupo Nova Lima, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2012. 298p.

- Loczy, L. & Ladeira, E. A. 1976. *Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica*. São Paulo, Edgard Blücher. 528 p.
- Ludwig, K.R., 2003. *Isoplot/ExVersion 3.00: a Geochronological Tool kit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA.
- Ludwig, K.R., 2008. *User's Manual for Isoplot 3.70*. Berkeley Geochronol. Cent. Spec.Publ. 76.
- Koglin, N., Zeh, A., Cabral, A.R., Gomes, A.A.S., Neto, A.V.C., Brunetto, W.J., Galbiatti, H. 2014. Depositional age and sediment source of the auriferous Moeda Formation, Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil: New constraints from U–Pb– Hf isotopes in zircon and xenotime. *Precambrian Research*, 255: 96–108.
- Machado, N.; Noce, C. M.; Ladeira, E. A.; Belo de Oliveira, O. 1992. U-Pb Geochronology of Archean magmatism and Proterozoic metamorphism in the Quadrilátero Ferrífero, Southern São Francisco craton, Brazil. *Geological Society of America Culletin*, v. 104, p. 1221-1227. September 1992.
- Machado, N., Schrank, A., Noce, C.M., Gauthier, G., 1996. Ages of detrital zircon from Archean–Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters* 141, 259–276.
- Madeira, T. J. A. 2016. *Análise Geofísica e Estrutural da zona de cisalhamento São Vicente, Quadrilátero Ferrífero, MG*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. DEGEO. Ouro Preto, 2016, 186p.
- Marshak, S., Alkmim, F. F., 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics* 8, 555-571.
- Machado N. & Cameiro M.A. 1992. U-Pb evidence of Late Archean tectono-thermal activity in the southern São Francisco Shield, Brazil. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 29:2341-2346.

- Mclennan, S. M.; Taylor, S. R.; Mcculloch, M. T.; Maynard, J. B. Geophysical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 54, n. 7, p. 2015-2050, 1990.
- Moreira, H., Lana, C., Nalini, H.A., 2016. The detrital zircon record of an Archaean convergent basin in the Southern São Francisco Craton, Brazil. *Precambrian Res.* 275, 84–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2015.12.015>.
- Mutti, E. 1992. *Turbidite Sandstones*. S. Donato Milanese, Agip S. p. A., 275 p.
- Nalini Júnior, H. A.; Rosière, C. A.; Endo, I. 1992. Sobre a geologia estrutural do anticlinal de Mariana, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Uma revisão. *Revista da Escola de Minas, Ouro Preto*, 45(1 e 2): 18-20, 1992.
- Nesbitt, H. W; & Young, G. M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, vol. 299, 21 October 1982.
- Noce C.M. 1995. *Geocronologia dos eventos magmáticos, sedimentares e metamórficos na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. Tese de Doutorado, 128 p.
- Noce, C.M., Pedrosa-Soares, A.C., Silva, L.C., Armstrong, R., Piuzana, D., 2007. Evolution of polycyclic basement in the Aracuaí Orogen, based on U-Pb SHRIMP data: implications for the Brazil-Africa links in the Paleoproterozoic time. *Precambrian Research* 159, 60-78.
- Noce, C.M., Zuccheti, M., Baltazar, O.F., Armstrong, R., Dantas, E., Renger, F.E., Lobato, L.M. 2005. Age of felsic volcanism and the role of ancient continental crust in the evolution of the Neoproterozoic Rio das Velhas Greenstone belt (Quadrilátero Ferrífero, Brazil): U-Pb zircon dating of volcanoclastic graywackes. *Precambrian Research*, 141: 67–82.
- Nunes, F.S. 2016. *Contribuição à estratigrafia e geocronologia U-Pb de zircões detríticos da Formação Moeda (Grupo Caraça, Supergrupo Minas) na*

- Serra do Caraça, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. MS Dissertation, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 79 p.
- O'Rourke, J.E., 1957. The stratigraphy of metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Ph.D. thesis, University of Wiscosin. Wiscosin, 106p.
- Oliveira, G. A. E.; Clemente, P. L. C.; Vial, D. S. 1983. Excursão a Minas de Ouro de Morro Velho. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 2, Belo Horizonte, 1983. Anais, SBG, Bol. 3, p.497-505.
- Pedreira, A.J., Silva, S.L., 1996. Sistemas deposicionais do greenstone belt Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. 39th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador, pp. 138–140.
- Pinheiro, M. A. P., Suita, M. T. F., Lesnov, F. P., Tedeschi, M., Silva, L. C., Medvedev, N. S., Korolyuk, V. N., Pinto, C. P., Sergeev, S. A. 2019. Timing and petrogenesis of metamafic-ultramafic rocks in the Southern Brasília orogen: Insights for a Rhyacian multi-system suprasubduction zone in the São Francisco paleocontinent (SE-Brazil). *Precambrian Research*, 321:328-348.
- Raposo, F.O. 1996. Formações Ferríferas e metassedimentos químicos de áreas selecionadas do Quadrilátero Ferrífero e seu papel como possíveis fontes dos conglomerados da área. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 166 p
- Ribeiro, J. H.; Tuller, M. P. 1996. Sinopse Geológica da Folha São Bartolomeu, in Projeto Rio das Velhas Mapeamento geológico escala 1:25.000 Sinopses Geológicas. CPRM. Belo Horizonte.
- Roser, B. P., Cooper, R. A., Nathan, S., & Tulloch, A. J. (1996). Reconnaissance sandstone geochemistry, provenance, and tectonic setting of the lower Paleozoic terranes of the West Coast and Nelson, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 39(1), 1-16.

- Rynearson, G.A., Pomerene, J.B., Dorr II, J.V., 1954. Contato basal da Série Minas na parte ocidental do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais Brasil. Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, Rio de Janeiro, Avulso, vol. 34, pp. 1–18.
- Schorscher, H. D. 1976. Polimetamorfismo do Pré-Cambriano na região de Itabira, MG, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29. Ouro Preto, 1976. Resumos. Ouro Preto, SBG, p. 194-195.
- Schorscher H. D., 1979. Evolução geotectônica e petrogenética do embasamento arqueano do Quadrilátero Ferrífero. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 51, p. 766-768.
- Scarpelli W. 1991. Aspects of gold mineralization in the Iron Quadrangle, Brazil. In: Ladeira E. A. ( ed) Proceedings of GOLD '91, the Economics, Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits, Proceedings, Rotterdam, A.Balkema, 151-157.
- Seixas, L.A.R., Bardintzeff, J.M., Stevenson, R., Bonin, B., 2013. Petrology of the high-Mg tonalites, dioritic enclaves of the ca. 2130Ma Alto Maranhão suite: evidence for a major juvenile crustal addition event during the Rhyacian orogenesis, Mineiro Belt, southeast Brazil. *Precamb. Res.* 238, 18–41.
- Selley, R. C. 1988. *Applied Sedimentology*. London, Academic Press, 446p.
- Silva, L.C., Pedrosa-Soares, A.C., Armstrong, R., Pinto, C.P., Magalhães, J.T.R., Pinheiro, M.A.P., Santos, G.G., 2016. Disclosing the PaleoArchean to Ediacaran history of the São Francisco craton basement: the Porteirinha domain (northern Araçuaí orogen, Brazil). *J. S. Am. Earth Sci.* 68, 50–67.
- Simon, M. B., Bongiolo, E. M., Ávila, C. A., Oliveira, E. P., Teixeira, W., Stohler, R. C., Soares de Oliveira, F. V. 2018. Neoproterozoic reworking of TTG-like crust in the southernmost portion of the São Francisco Craton: U-Pb zircon dating and geochemical evidence from the São Tiago Batholith. *Precambrian Research*. 314, 353-376.

- Sizova, E., Gerya, T., Stüwe, K., & Brown, M., 2015. Generation of felsic crust in the Archean: a geodynamic modeling perspective. *Precambrian Research*, 271, 198-224.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D.J., Crowley, J.L., Gerdes, A., Hanchar, J.M., Horstwood, M.S.A., Morris, G.A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M.N., Whitehouse, M.J., 2008. Plešovice zircon – a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*. Vol. 249, 1–35.
- Staudigel, H., Furnes, H., & DeWit, M., 2015. Paleoarchean trace fossils in altered volcanic glass. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(22), 6892-6897.
- Sun S.S., and McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In *Magmatism in the Ocean Basins* (eds. A. D. Saunders and M. J. Norry, vol. 42.). The Geological Society, pp. 313–345.
- Taylor, S. R.; McLennan, S. M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford: Blackwell Scientific.
- Teixeira, A. W. 2015. Depósitos orogênicos e bacia extensional: o embasamento metassedimentar e a cobertura da margem passive no Orógeno Brasília Meridional. Tese de Doutorado. IGc/USP. São Paulo, 2015. 147p.
- Teixeira, W., Sabate, P., Barbosa, J., Noce, C.M., Carneiro, M.A. 2000. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the Sao Francisco Craton, Brazil. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Fo, A., Campos, D.A. (eds.). *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro, p. 101–137.
- Teixeira, W., Ávila, C.A., Dussin, I.A., Corrêa Neto, A. V., Bongiollo, E.M., Santos, J.O., Barbosa, N.S. 2015. A juvenile accretion episode (2.35-2.32Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U-Pb-Hf and geochemical evidences. *Precambrian Research*, 256: 148–169.



- Teixeira W. 1985. A evolução geotectônica da porção meridional do Cráton do São Francisco, com base em interpretações geocronológicas. Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Douroramento, 207p.
- Teixeira, W., Carneiro, M.A., Noce, C.M., Machado, N., Sato, K., Taylor, P.N., 1996. Pb, Sr, Nd isotopic constraints on the Archean evolution of gneissic–granitoid complexes in the southern São Francisco Craton, Brazil. *Precamb. Res.* 78, 151–164
- Tuller, M. P.; Ribeiro, J. H. 1994. Projeto Rio das Velhas fase II - Folha São Bartolomeu/Cachoeira do Campo. Relatório de atividades. CPRM. Belo Horizonte, 1994.
- Tupinambá, M., Teixeira, W., Heilbron, M., 2000. Neoproterozoic Western Gondwana assembly, subduction-related plutonism: the role of the Rio Negro Complex in the Ribeira Belt, Southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 30, 7–11.
- Valeriano, C.M., 2017. The Southern Brasília Belt. In: Heilbron, M., Cordani, J., Alkmin, F.F. (Eds.), *São Francisco Craton, Eastern Brazil*. Springer International Publishing, pp. 189–203.
- Van Achterbergh, E., Ryan, C.G., Jackson, S.E., Griffin, W., 2001. Data reduction software for LA-ICP-MS. In: Sylvester, P. (Ed.), *Laser Ablation ICPMS in the Earth Science*, vol. 29. Mineralogical Association of Canada, pp. 239–243.
- Vieira, F.W.R., 1991. Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil. In: Ladeira, E.A. (Ed.), *Proceedings of Brazil Gold 91*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 319–325.
- Vieira, F. W. R. & Oliveira, G. A. I. 1998. Geologia do Distrito Aurífero de Nova Lima, Minas Gerais. In: Shobbenhaus, C. & Coelho, C. E. S., coord. *Principais Depósitos Mineraiis do Brasil*. Brasília, DNPM/CVRD, . v.3, p. 377-391.
- Zucchetti, M., Baltazar, O.F., Raposo, F.O., 1996. Estratigrafia. In: *Companhia de Pesquisa de Recursos Mineraiis. Projeto Rio das Velhas–Texto*

- Explicativo do Mapa Geológico Integrado, escala 1:100.000. Departamento Nacional de Produção Mineral/CPRM–Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, p. 13–42.
- Zucchetti, M., Baltazar, O.F. (Eds.), 1998. Projeto Rio das Velhas– Texto explicativo do mapa geológico integrado, escala 1:100,000. 2nd ed. Departamento Nacional da Produção Mineral/CPRM– Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte, Brazil, 121 pp.
- Zucchetti, M. & Baltazar, O. F., 2000. Rio das Velhas Greenstone Belt lithofacies associations, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. 31th International Geological Congress, Rio de Janeiro, Brazil, CD-ROM.
- Zucchetti, M., 1998. Geoquímica dos metabasaltos do Grupo Nova Lima, Supergrupo Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. MSc thesis, Instituto Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil, 124 pp.
- Walker, R.G., James, N.P., 1992. Facies Models: Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada, St. John's. 454 pp.
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W.L., Meier, M., Oberli, F., von Quadt, A., Roddick, J.C., Spiegel, W., 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. Geoanal. Res.* 19, 1–23. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1751-908X.1995.tb00147.x>.

## ANEXOS













## Compilação de idades geocronológicas para a região do Quadrilátero Ferrífero

Referência	Amostra	Long	Lat	Unidade estratigráfica	Rocha	Material	Metodo	Idade (Ma)	erro (Ma)	Interpretação	Periódico
Carneiro 1992	DJ8	-44.191667	-20.175556	Complexo Bonfim	Granito Brumadinho	Zircão	LA-ICP-MS	2703	24	crystalização	Tese de doutorado, Inst. Geociências da Usp
Carneiro 1992	DJ8	-44.084482	-20.166344	Complexo Bonfim	Gnaiss Alberto Flores	Zircão	LA-ICP-MS	2772	6	crystalização	Tese de doutorado, Inst. Geociências da Usp
Carneiro 1992	DJ8	-44.084482	-20.166344	Complexo Bonfim	Gnaiss Alberto Flores	Zircão	LA-ICP-MS	2920	0	crystalização	Tese de doutorado, Inst. Geociências da Usp
Carneiro 1992	MN10	-44.0125	-20.245833	Complexo Bonfim	Tonalito Samambaia	Zircão	LA-ICP-MS	2780	3	crystalização	Tese de doutorado, Inst. Geociências da Usp
Farina et al. 2015	FQ1	-43.628063	-20.370569	Complexo Bação	Granito	Zircão	LA-ICP-MS	2711	3	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ11	-43.772783	-20.328452	Complexo Bação	Granito porfirítico	Zircão	LA-ICP-MS	2790	3	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ17	-43.797102	-20.297541	Complexo Bação	Gnaiss	Zircão	LA-ICP-MS	2778	2	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ23	-43.61436	-20.347234	Complexo Bação	Gnaiss	Zircão	LA-ICP-MS	2783	18	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ29	-44.010599	-20.207159	Complexo Bonfim	Granitoide	Zircão	LA-ICP-MS	2773	2	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ37	-44.011402	-20.255747	Complexo Bonfim	Anfibolito	Zircão	LA-ICP-MS	2719	14	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ40	-44.107806	-20.190422	Complexo Bonfim	Gnaiss	Zircão	LA-ICP-MS	2850	0	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ41	-44.088228	-20.206233	Complexo Bonfim	Leucogranito	Zircão	LA-ICP-MS	2852	16	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ44	-44.122288	-20.230992	Complexo Bonfim	Leucogranito	Zircão	LA-ICP-MS	2679	37	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ51	-44.009503	-20.426233	Complexo Bonfim	Granitoide	Zircão	LA-ICP-MS	2678	10	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	OPU4094	-43.690244	-20.357495	Complexo Bação	Dique pegmatítico	Zircão	LA-ICP-MS	2693	13	crystalização	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Lana et al 2013	CAM-1	-43.797611	-20.298529	Complexo Santa Bárbara	Gnaiss Trondjemítico	Zircão	LA-ICP-MS	3210	8	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	CAM-2	-43.797611	-20.298529	Complexo Santa Bárbara	Gnaiss Trondjemítico	Zircão	LA-ICP-MS	3212	9	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	CO-1	-43.447016	-20.269183	Complexo Belo Horizonte	Trondjemito Foliado Cocais	Zircão	LA-ICP-MS	2919	12	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D04	-43.679658	-20.340077	Complexo Bação	Gnaiss Trondjemítico Bandado	Zircão	SHRIMP	2795	7	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D06	-43.765669	-20.357664	Complexo Bação	Trondjemito	Zircão	SHRIMP	2925	8	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D07A	-43.848879	-20.348827	Complexo Bação	Trondjemítico	Zircão	SHRIMP	2918	10	metamorfismo	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D09	-43.660719	-20.517377	Serra de Ouro Branco	Trondjemito	Zircão	SHRIMP	2898	7	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D11	-44.156334	-20.16143	Complexo Bonfim	Gnaiss Tonalítico Bandado	Zircão	SHRIMP	2895	13	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D12	-43.796963	-20.234014	Complexo Bação	Granodiorito Foliado	Zircão	SHRIMP	2764	10	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D14	-44.115351	-19.960263	Complexo Belo Horizonte	Gnaiss Bandado	Zircão	SHRIMP	2783	23	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	MP-1	-43.825808	-20.370773	Complexo Bação	Gnaiss Trondjemítico	Zircão	LA-ICP-MS	2902	12	crystalização	Precambrian Research, 231: 157-173
Machado et al 1989	11-1	-43.962809	-20.276852	Complexo Bonfim	granodiorito Mamona	Zircão	LA-ICP-MS	2721	3	crystalização	Anais, 50 Simp. Geologia de Minas Gerais, p.1-5
Machado et al 1989	13-A	-43.661371	-20.341396	Complexo do Bação	pegmatito	Monazita	ID-TIMS	2030	0	crystalização	Anais, 50 Simp. Geologia de Minas Gerais, p.1-5
Machado et al 1989	15	-43.638171	-20.366083	Complexo do Bação	pegmatito	Monazita	ID-TIMS	2022	0	crystalização	Anais, 50 Simp. Geologia de Minas Gerais, p.1-5
Machado et al 1989	2	-43.671362	-19.886384	Complexo Caeté	granitoide Caeté	Zircão	LA-ICP-MS	2776	7	crystalização	Anais, 50 Simp. Geologia de Minas Gerais, p.1-5
Machado et al 1989	4	-43.691884	-19.949142	Grupo Nova Lima	vulcânica Félsica	Zircão	LA-ICP-MS	2776	23	crystalização	Anais, 50 Simp. Geologia de Minas Gerais, p.1-5
Machado et al 1989	PP-120-1	-44.014353	-20.168752	Grupo Nova Lima	vulcânica Félsica	Zircão	LA-ICP-MS	2772	6	crystalização	Anais, 50 Simp. Geologia de Minas Gerais, p.1-5
Noce 1995, Noce et al. 1998	N22	-43.743955	-20.622079	Batólito Alto Maranhão	tonalito	Zircão	LA-ICP-MS	2124	2	crystalização	Tese de doutorado, Inst. Geociências da Usp
Noce 1995, Noce et al. 1998	N4	-43.849	-19.848	Complexo Metamórfico Belo Horizonte	Granito Córrego do Brumado	monazita	ID-TIMS	2045	0	crystalização	Tese de doutorado, Inst. Geociências da Usp
Noce 1995, Noce et al. 1998	N57	-43.89	-19.76	Complexo Metamórfico Belo Horizonte	Granito Santa Luzia	Zircão	LA-ICP-MS	2712	5	crystalização	Tese de doutorado, Inst. Geociências da Usp
Romano et al 2013	MR01	-43.628063	-20.370569	Complexo Bação	granito intrusivo	Zircão	SHRIMP	2716	5	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR10A	-44.156043	-20.156124	Batólito Bonfim	granito	Zircão	SHRIMP	2719	5	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR10C	-44.156043	-20.156124	Batólito Bonfim	Granodiorito cinza	Zircão	SHRIMP	2729	9	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR-137A	-44.348136	-20.425933	Granitoide Piracema	Leucogranito rosa	Zircão	LA-ICP-MS	2708	7	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR148A	-44.294368	-20.274788	Batólito Souza Noschese	leucogranito	Zircão	LA-ICP-MS	2722	9	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR14A	-43.959479	-20.2875	Batólito Mamona	Granodiorito cinza	Zircão	LA-ICP-MS	2730	7	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR22A	-44.020103	-20.170519	Batólito Souza Noschese	Granodiorito cinza	Zircão	LA-ICP-MS	2730	8	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR234A	-44.521057	-19.819306	Batólito Florestal	Granodiorito cinza	Zircão	LA-ICP-MS	2755	8	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR31A	-44.094954	-20.117031	Batólito Souza Noschese	leucogranito	Zircão	LA-ICP-MS	2700	8	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR51A	-43.835613	-19.861763	Batólito General Carneiro	Leucogranito	Zircão	LA-ICP-MS	2700	8	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR70A	-44.02185	-20.545432	Batólito Mamona	Leucogranito	Zircão	LA-ICP-MS	2723	7	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Romano et al 2013	MR87A	-43.959494	-20.446948	Batólito Mamona	granodiorito cinza	Zircão	LA-ICP-MS	2613	6	crystalização	Precambrian Research, 224 (2013): 143-159
Silva et al 2012	LS-548A	-43.580364	-20.623377	Complexo Santo Antônio de Pirapitinga	Tonalito gnaissico	Zircão	SHRIMP	3224	12	crystalização	Relatório Interno, CPRM. 2012, 17p.
Silva et al 2012	RS-230	-44.199599	-20.618456	Granito gnaiss Alto Jacarandá	Granito gnaiss	Zircão	SHRIMP	2687	7	crystalização	Relatório Interno, CPRM. 2012, 17p.
Cabral et al. 2012	MC-01	-43.504964	-20.280725	Grupo Itabira	metavulcânica félsica	Zircão	LA-ICP-MS	2654.6	6.3	crystalização	Precambrian Research, 204-205: 40-45
Noce et al. 2005	FR-38	-44.263889	-20.073611	Grupo Nova Lima (associação grauauca-arenito)	Metagruauuca	Zircão	SHRIMP	2792	11	crystalização	Precambrian Research, 141 (2005): 67-82
Noce et al. 2005	MZ-53	-44.263889	-20.073611	Grupo Nova Lima (associação clastica-química-sedimentar)	Gruauuca	Zircão	ID-TIMS	2751	9	crystalização	Precambrian Research, 141 (2005): 67-82
David 2006	DB-2	-43.503133	-20.017599	Córrego do Sitio	dique máfico com alteração hidrotermal	Zircão	SHRIMP	2694	0	crystalização	Dissertação de Mestrado IG-USP, 2006, 75p.
David et al. 2006	DB2(2)	-43.502748	-20.017242	Dique máfico com alteração hidrotermal	muscovita-carbonato-clorita xisto	Zircão	SHRIMP	2283	68	metamorfismo	Dissertação de Mestrado, Inst. Geociências da Usp
Farina et al. 2015	FQ17	-43.797102	-20.297541	Complexo Bação	Gnaiss	Zircão	LA-ICP-MS	2732	10	metamorfismo	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ2	-43.614295	-20.349148	Complexo Bação	Gnaiss	Zircão	LA-ICP-MS	2705	18	metamorfismo	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ40	-44.107806	-20.190422	Complexo Bonfim	Gnaiss	Zircão	LA-ICP-MS	2670	15	metamorfismo	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ52	-44.214283	-20.244657	Complexo Bonfim	Gnaiss trondjemítico	Zircão	LA-ICP-MS	2727	11	metamorfismo	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Farina et al. 2015	FQ70	-44.245045	-19.983245	Complexo Belo Horizonte	Leucogranito	Zircão	LA-ICP-MS	2713	3	metamorfismo	Precambrian Research, 266 (2015): 375-394
Lana et al 2013	D06	-43.765669	-20.357664	Complexo Bação	Trondjemito	Zircão	SHRIMP	2794	15	metamorfismo	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D07A	-43.848879	-20.348827	Complexo Bação	Gnaiss Trondjemítico	Zircão	SHRIMP	2775	39	metamorfismo	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D11	-44.156334	-20.16143	Complexo Bonfim	Gnaiss Tonalítico Bandado	Zircão	SHRIMP	2749	10	metamorfismo	Precambrian Research, 231: 157-173
Lana et al 2013	D14	-43.825808	-20.370773	Complexo Bação	Gnaiss Trondjemítico	Zircão	LA-ICP-MS	2770	29	metamorfismo	Precambrian Research, 231: 157-173
Silva et al 2012	RS-230	-44.199599	-20.618456	Granito gnaiss Alto Jacarandá	Granito gnaiss	Zircão	SHRIMP	439	110	metamorfismo	Relatório Interno, CPRM. 2012, 17p.
Albert et al. 2016	FQ-8	-43.769297	-20.2508	Complexo Bação	migmatito	Zircão	LA-ICP-MS	2612	10	metamorfismo	Lithos, 266-267 (2016): 64-86
Babinsky et al. 1995	MF-13	-43.652777	-20.088333	Formação Gandarela	mármore	Rocha totPb-Pb conuen		2420	19	idade máxima	Precambrian Research, 72(3): 235-246
Hartmann et al. 2006	Sample 1	-43.804238	-20.167098	Grupo Maquiné	quartzito	Zircão det SHRIMP		2749	7	idade máxima	South American Earth Sciences, 20: 273-285
Hartmann et al. 2006	Sample 2	-43.79759	-20.161359	Grupo Maquiné	quartzito	Zircão det SHRIMP		2745	6	idade máxima	South American Earth Sciences, 20: 273-285
Hartmann et al. 2006	Sample 4	-43.9601	-20.27213	Formação Moeda	quartzito	Zircão det SHRIMP		2580	7	idade máxima	South American Earth Sciences, 20: 273-285
Hartmann et al. 2006	Sample 5	-43.532042	-20.396745	Grupo Sabará	xisto	Zircão det SHRIMP		2719	20	idade máxima	South American Earth Sciences, 20: 273-285

Hartmann et al. 2006	Sample 6	-43.503713	-20.411212	Grupo Itacolomi	quartzito	Zircão det SHRIMP	2173	8 idade máxima	South American Earth Sciences, 20: 273-285
Konglin et al. 2014	FS06/84DN-	43.650327	-20.125051	Formação Moeda; Unidade III	Quartzito	Zircão LA-ICP-MS	2563	12 idade máxima	Precambrian Research, 255 (2014): 96-108
Konglin et al. 2014	PM3-2	-43.68067	-20.100619	Formação Moeda; Unidade II	Metaconglomerado aurífero	Zircão LA-ICP-MS	2677	13 idade máxima	Precambrian Research, 255 (2014): 96-108
Machado et al. 1989	SAB-1	-44.263889	-20.073611	Grupo Sabará	metagrauvaca	Zircão LA-ICP-MS	2125	4 idade máxima	Anais, 5o Simp. Geologia de Minas Gerais, p.1-5
Machado et al. 1996	FR1	-43.436512	-20.436575	Grupo Itacolomi	quartzito	Zircão det LA-ICP-MS	2157	53 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	FR3	-43.536667	-20.464444	Grupo Itacolomi	quartzito	Zircão det LA-ICP-MS	2134	63 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	M88-10	-43.97	-20.261944	Formação Moeda	Quartzito	Zircão LA-ICP-MS	2651	33 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	M93-1	-43.75	-19.99	Grupo Maquiné	quartzito	Zircão LA-ICP-MS	2877	3 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	M93-2	-43.75	-19.99	Formação Moeda	quartzito	Zircão LA-ICP-MS	2681	21 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	M93-4	-43.91	-19.94	Grupo Piracicaba	quartzito	Zircão LA-ICP-MS	2775	9 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	M93-4	-43.91	-19.94	Grupo Piracicaba	grauvaca	Zircão LA-ICP-MS	2125	0 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	M94-CAE-	-44.263889	-20.073611	Grupo Nova Lima	metagrauvaca	Zircão LA-ICP-MS	2996	38 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	QF1	-43.97	-20.261944	Formação Moeda	quartzito	Zircão LA-ICP-MS	2780	59 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Machado et al. 1996	SAB	-44.263889	-20.073611	Grupo Sabará	xisto	Zircão LA-ICP-MS	2122	140 idade máxima	Earth and Planetary Science Letters, 141(1996): 259-276
Moreira et al. 2016	H03	-43.727242	-20.108147	Formação Palmital	Xisto com nódulos ferruginosos	Zircão det LA-ICP-MS	2751	20 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H11a	-43.690159	-20.112881	Formação Casa Forte	Metaconglomerado polimítico	Zircão det LA-ICP-MS	2709	17 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H15	-43.689574	-20.138319	Formação Casa Forte	Metaconglomerado polimítico	Zircão det LA-ICP-MS	2714	17 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H19	-43.678173	-20.201711	Formação Palmital	Filito sericítico com nódulos ferruginosos	Zircão det LA-ICP-MS	2740	16 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H20	-43.670092	-20.195344	Formação Casa Forte	Metaconglomerado	Zircão det LA-ICP-MS	2757	19 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H21	-43.648331	-20.186451	Formação Casa Forte	Metarenito microconglomerático	Zircão det LA-ICP-MS	2741	21 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H23	-43.69413	-20.187529	Formação Palmital	Xisto sericítico	Zircão det LA-ICP-MS	2745	16 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H26	-43.680557	-20.182286	Formação Casa Forte	Metarenito microconglomerático	Zircão det LA-ICP-MS	2765	0 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H29	-43.726996	-20.138485	Formação Palmital	Xisto com nódulos ferruginosos	Zircão det LA-ICP-MS	2752	20 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H30	-43.671379	-20.136104	Formação Casa Forte	Quartzito	Zircão det LA-ICP-MS	2701	17 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H33	-43.697383	-20.109104	Formação Casa Forte	Metaconglomerado monomítico	Zircão det LA-ICP-MS	2704	20 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H34a	-43.722633	-20.099757	Formação Casa Forte	Metaconglomerado-grauvaca	Zircão det LA-ICP-MS	2711	15 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H7	-43.656576	-20.190272	Formação Casa Forte	Quartzito	Zircão det LA-ICP-MS	2738	16 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Moreira et al. 2016	H9	-43.676169	-20.168132	Formação Casa Forte	Metarenito conglomerático	Zircão det LA-ICP-MS	2752	20 idade máxima	Precambrian Research, 275 (2016): 84-99
Noce et al. 2005	SS-144	-44.263889	-20.073611	Grupo Nova Lima (associação vulcanoclastica)	Aglomerado	Zircão LA-ICP-MS	2773	7 idade máxima	Precambrian Research, 141 (2005): 67-82
Schrank & Machado 1996a	MGF2	-43.438983	-20.390797	Formação Moeda	Quartzito	Zircão det LA-ICP-MS	2606	47 idade máxima	Anais do CBG, Salvador, 6 (1996): 470-472