



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Gabriel Paravidini de Souza

Litogeoquímica e isótopos de Sm-Nd-Sr e sua relação com a proveniência sedimentar de rochas do Grupo Bambuí na porção Sul do Craton São Francisco

Rio de Janeiro

2020

Gabriel Paravidini de Souza

Litogeoquímica e isótopos de Sm-Nd-Sr e sua relação com a proveniência sedimentar de rochas do Grupo Bambuí na porção Sul do Craton São Francisco

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Evolução tectônica de Faixas Móveis

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Morisson Valeriano

Coorientador: Prof. Dr. Humberto Siqueira Reis

Rio de Janeiro

2020

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

S729 Souza, Gabriel Paravidini de.
Litogeoquímica e isótopos de Sm-Nd-Sr e sua relação com a
proveniência sedimentar de rochas do Grupo Bambuí na porção Sul do
Craton São Francisco / Gabriel Paravidini de Souza. – 2020.
94f.: il.

Orientador: Claudio de Morisson Valeriano.
Coorientador: Humberto Siqueira Reis
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro,
Faculdade de Geologia.

1. Geoquímica – São Francisco, Rio, Bacia – Teses. 2. Rochas
sedimentares – São Francisco, Rio, Bacia – Teses. 3. Geologia isotópica –
São Francisco, Rio, Bacia – Teses. 4. Sedimentos (Geologia) – São
Francisco, Rio, Bacia – Teses. 5. Petrologia – São Francisco, Rio, Bacia –
Teses. I. Valeriano, Claudio de Morisson. II. Reis, Humberto Siqueira. III.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV.
Título.

CDU 550.42: 552.5(282.281.5)

Bibliotecária responsável: Taciane Ferreira da Silva / CRB-7: 6337

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

Assinatura

Data

Gabriel Paravidini de Souza

Litogeoquímica e isótopos de Sm-Nd-Sr e sua relação com a proveniência sedimentar de rochas do Grupo Bambuí na porção Sul do Craton São Francisco

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Evolução Tectônica de Faixas Móveis.

Aprovada em 02 de dezembro de 2020.

Orientador: Prof. Dr. Claudio de Morisson Valeriano
Faculdade de Geologia – UERJ

Coorientador: Prof. Dr. Humberto Siqueira Reis
Universidade Federal de Ouro Preto

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Candido Augusto Veloso Moura
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Fernando Flecha Alkmim
Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. Gustavo Macedo Paula Santos
Universidade Estadual de Campinas

Rio de Janeiro

2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Silvia e Gilberto, meu irmão João Vitor e minha avó Arlete por todo o amor e apoio nesses anos fora de casa. Por nunca me segurarem, ao contrário, sempre me empurrarem para frente.

À Vitoria, minha amiga e companheira, pela parceria e amor nos momentos bons (e mesmo naqueles nem tão bons) deste ano que passamos juntos.

Ao meu orientador Cláudio Valeriano e meu coorientador Humberto Reis pelos ensinamentos e esforço dedicado a esse trabalho.

À Carla, João, Gilberto, Carol e Manuela, técnicos e pesquisadores do LAGIR, por darem suporte a este trabalho e às ideias que surgiram no meio do caminho.

À Gabi, Tiago, Núbia e Luiz, técnicos do LGPA, pelo suporte e paciência.

Aos meus colegas de turma e, especialmente ao Pedro e o Victor pelas boas discussões científicas e sobre qualquer outro tópico aleatório.

À Bianca pela amizade e momentos agradáveis.

Aos membros da banca, por aceitarem fazer parte deste trabalho.

A todos aqueles que de um modo ou de outro contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal.

O apoio financeiro para a realização desta dissertação foi concedido pela FAPERJ (Cientistas do Nosso Estado, Proc. 202.974/2016) e pelo CNPq (Proc. 310754-2017-8).

Muito obrigado!

RESUMO

SOUZA, Gabriel Paravidini de. *Litogeoquímica e isótopos de Sm-Nd-Sr e sua relação com a proveniência sedimentar de rochas do Grupo Bambuí na porção Sul do Craton São Francisco*. 2020. 94f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

O Grupo Bambuí representa associações de rochas carbonáticas e siliciclásticas depositadas em ambiente de ante-país durante a aglutinação do supercontinente Gondwana. Na porção sul do Craton São Francisco, esta bacia de ante-país é margeada por dois orógenos, cujas evoluções das frentes de deformação são diacrônicas: o orógeno Brasília Meridional, a oeste, e o Sistema Orogênico Araçuaí-Ribeira, a leste. Neste contexto, a proveniência sedimentar nos permite avaliar as mudanças geoquímicas das rochas sedimentares em paralelo com a evolução das áreas fontes nas cadeias orogênicas. Neste estudo foram utilizados como métodos a litogeoquímica e a geoquímica isotópica nos sistemas Sm-Nd e Rb-Sr em rocha sedimentares do Grupo Bambuí. A análise conjunta dos isótopos de Sm-Nd com razões elementares (em especial Th/Sc e La/Yb) indicou três mudanças de assinatura geoquímica que podem ser diretamente relacionadas a ciclos transgressivos- regressivos de segunda ordem. Observa-se que os valores de ϵNd_t tendem a ficar menos negativos para o topo, entre a Formação Carrancas (valores de $\epsilon\text{Nd}_{t\text{entre}}$ -18 e -23), Formação Sete Lagoas ($\epsilon\text{Nd}_t = -7.9$), até a Formação Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré ($\epsilon\text{Nd}_t = -6.1$). Estes valores começam a ficar mais negativos novamente nos depósitos da Formação Serra da Saudade e Três Marias ($\epsilon\text{Nd}_t = -7.4$), os quais estão acompanhados com aumento da razão Th/Sc para valores entre 0.7 e 1.3. Estas mudanças geoquímicas foram interpretadas como uma crescente influência de fontes do orógeno Araçuaí na proveniência das rochas sedimentares do Grupo Bambuí a partir do segundo ciclo transgressivo- regressivo. Por outro lado, o par isotópico Nd-Sr foi utilizado como ferramenta de investigação da homogeneidade isotópica do Grupo Bambuí e se esta poderia ser interpretada como mistura de áreas fontes ou transformações composicionais dos reservatórios crustais durante o período Criogeniano- Ediacarano. Os modelos propostos podem ser utilizados na evolução do conhecimento geodinâmico do Grupo Bambuí, tanto quanto na investigação da evolução da crosta brasileira antes e depois do evento orogênico do Neoproterozóico.

Palavras-chave: Bacia São Francisco. Ediacarano- Cambriano. Bacia de ante-país

ABSTRACT

SOUZA, Gabriel Paravidini de. *Lithogeochemistry and Sm-Nd-Sr isotopes of Bambuí Group sediments (SE-Brazil) in the Southern portion of São Francisco Craton: insights for provenance changes*. 2020. 94f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

The Bambuí Group is an association of siliciclastic and carbonatic rocks deposited in a foreland basin developed after West-Gondwana amalgamation during the Neoproterozoic. In the southern portion of the São Francisco craton, this foreland basin is bounded by two diachronic orogenic fronts: the South Brasilia orogen, to the west, and the Araçuaí-Ribeira Orogenic System, to the east. In this context, the sedimentary provenance allows the evaluation of geochemical changes in the sedimentary rocks together with the evolution of the source rocks in the marginal orogens. In order to address this evaluation, we used lithogeochemistry and Sm-Nd-Sr isotopic methods in the sedimentary rocks of the Bambuí Group. The coupled Sm-Nd with Th/Sc and La/Yb elemental ratios showed three major changes in the sedimentary provenance possibly correlated to second order shallowing upward cycles. The ϵNd_t parameter becomes less negative toward the upper successions of the Bambuí Group. The mean ϵNd_t values in the basal Carrancas Formation are between -18 and -23; continuously increasing in the Sete Lagoas Formation ($\epsilon\text{Nd}_t = -7.9$) and in the Serra de Santa Helena and Lagoa do Jacaré formations ($\epsilon\text{Nd}_t = -6.1$). In the upper Serra da Saudade and Três Marias formations, the ϵNd_t becomes, again, more negative ($\epsilon\text{Nd}_t = -7.4$), while it is followed by increase in the Th/Sc ratio to values between 0.7 and 1.3. These geochemical changes are relatable to the increasing influence of sources from the Araçuaí orogen on the sedimentary provenance of Bambuí Group, especially in Serra de Santa Helena formation and the upper successions. In the other hand, the Nd-Sr isotopic pair was used as a resource to the investigation of the Bambuí Group isotopic homogeneity and the influence of source mixing against compositional change of the crustal reservoirs during Gondwana amalgamation in the Criogenian-Ediacaran periods. The proposed models can add to the knowledge of geodynamic models Bambuí basin evolution, and to the investigation of crustal evolution during the Neoproterozoic collisional events.

Keywords: São Francisco Basin. Ediacaran- Cambrian. Foreland Basins.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Mapa geológico da Bacia São Francisco.....	14
Figura 2 –	Carta estratigráfica da Bacia São Francisco.....	16
Figura 3 –	Distribuição de idades U-Pb em zircão detrítico por formação do Grupo Bambuí.....	21
Figura 4 –	Fotos de afloramentos nos pontos de coleta nas Formações Sete Lagoas, Samburá e Serra de Santa Helena.....	26
Figura 5 –	Fotos de afloramentos dos pontos coletados nas Formações Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré.....	27
Figura 6 –	Fotos de afloramentos nos pontos de amostragem das Formações Serra da Saudade e Três Marias.....	29
Figura 7 –	Simplified geological map of the southern São Francisco craton and the surrounding southern Brasília orogen (SB) and Araçuaí-Ribeira Orogenic System (AROS) to the west and east-south, respectively.....	36
Figura 8 –	Geological outline of the Bambuí Group in the southern São Francisco Craton, showing sampling sites.....	40
Figura 9 –	Lithostratigraphic columns of the Bambuí Group in the Brasília Foreland Fold-Thrust belt and in the Undeformed Domain.....	41
Figura 10 –	The $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3$ versus $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram.....	47
Figura 11 –	Sedimentary rock major element provenance discrimination diagram of Roser and Korsch (1988).....	48
Figura 12 –	Stratigraphic variation of HFSE/Al ratios.....	49
Figura 13 –	Tectonic setting discrimination diagrams.....	51
Figura 14 –	PAAS-normalized rare earth element distributions of the studied samples of the Bambuí Group.....	53
Figura 15 –	Stratigraphic variation of $\epsilon\text{Nd}(t)$, TDM ages, Th/Sc and $(\text{La}/\text{Yb})_n$ along the Bambuí Group.....	58
Figura 16 –	The $\epsilon\text{Nd}(0)$ vs $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ diagrams for reference crustal isotopic reservoirs and their relation to the Bambuí Group units.....	60

Figura 17 – Possible mixing trends (arrows) in the Bambuí Group.....	62
Figura 18 – $\epsilon\text{Nd}(t)$ VS. Th/Sc diagram.....	63
Figura 19 – Variação do $\epsilon\text{Nd}_{\text{inicial}}$ em relação ao tempo de deposição.....	70
Figura 20 – Histograma de idade modelo T_{DM}	71
Figura 21 – Variação do $f(\text{Sm}/\text{Nd})$ em relação ao tempo de deposição.....	72
Figura 22 – Razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e sua relação com a proporção de CaO(%).....	73
Figura 23 – Valores $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ calculados em relação a idade modelo T_{DM}	75
Figura 24 – $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ real versus $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$	76
Figura 25 – Diagrama $\epsilon\text{Nd}(0)$ versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Amostras analisadas neste trabalho.....	23
Tabela 2 – New whole-rock Sm-Nd isotopic data for the Bambuí Group.....	55
Tabela 3 – Rb and Sr content and measured $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratios.....	67
Tabela 4 – Whole rock lithogeochemistry for siliciclastic samples from the Bambuí Group.....	92
Tabela 5 – Whole rock lithogeochemistry of carbonate rock samples from the Bambuí Group.....	94

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	11
1	CONTEXTO GEOLÓGICO	13
1.1	O Grupo Bambuí no contexto da Bacia do São Francisco	13
1.2	O Grupo Bambuí: evolução de modelos geodinâmicos e paralelos com a proveniência sedimentar	18
2	MATERIAIS E MÉTODOS	23
2.1	Amostragem	23
2.2	Procedimentos analíticos	29
2.2.1	<u>Litogeoquímica</u>	29
2.2.2	<u>Geoquímica Isotópica</u>	30
3	RESULTADOS	31
3.1	Combined Sm-Nd isotopes and lithogeochemistry in the sedimentary provenance of Foreland Basins: the case of the Ediacaran-Cambrian Bambuí Group, Brazil (Artigo científico)	31
3.1.1	<u>Introduction</u>	33
3.1.2	<u>The southern portion of the São Francisco craton and adjacent orogenic belts: the Bambuí Group and its sedimentary sources</u>	35
3.1.2.1	Brasilia orogenic belt	36
3.1.2.2	The Araçuaí belt	37
3.1.3	<u>The Bambuí Group and the Ediacaran- Cambrian foreland basin system</u>	38
3.1.3.1	Stratigraphy	39
3.1.3.2	Detrital zircon content and Sm-Nd data	42
3.1.4	<u>Sampling and Analytical Procedures</u>	44
3.1.4.1	Sampling	44
3.1.4.2	Lithogeochemistry	44
3.1.4.3	Sm- Nd Isotope Geochemistry	45
3.1.5	<u>Results</u>	45

3.1.5.1	Litho geochemistry	45
3.1.5.2	Sm- Nd isotope geochemistry	53
3.1.6	<u>Discussions</u>	57
3.1.6.1	The combined Sm-Nd isotope and ligochemical signature of Bambuí strata	57
3.1.6.2	Implications for sedimentar provenance and evolution of Bambuí basin	63
3.1.7	<u>Conclusion</u>	65
3.2	Isótopos de Sr	67
4	DISCUSSÕES	69
4.1	Homogeneidade isotópica do Grupo Bambuí: um caso de estudo	69
4.2	Características do par isotópico Nd-Sr nas rochas siliciclásticas do Grupo Bambuí	72
	CONCLUSÕES	78
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE - Tabela de resultados de litogeoquímica	92

INTRODUÇÃO

O Grupo Bambuí representa uma associação de rochas carbonáticas e siliciclásticas depositadas no final do Ediacarano- início do Cambriano (Paula Santos et al., 2015; Moreira et al., 2020). Estes depósitos estão inseridos no contexto de ante-país relativo à aglutinação do supercontinente Gondwana (Alkmim e Martins- Neto, 2012). Sendo associações sedimentares formadas em ambientes sedimentares típicos de eventos colisionais e mantidas preservadas de processos metamórficos posteriores, o Grupo Bambuí pode ser utilizado como um testemunho para avaliar, testar e entender as transformações dos reservatórios isotópicos da crosta durante e após estes processos geológicos.

Um reservatório, como definido em Albarède (2009), “se refere a uma grande porção de rocha, água ou gás, cuja composição é contrastante em relação à composição dos demais reservatórios”. A crosta é, portanto, um reservatório e como tal, pode ser transformada pelos processos geológicos ao longo do tempo. Estes processos podem ser tanto endógenos, como no caso de acreção de rochas do manto e fusões de rocha na própria crosta, ou exógenos, como o intemperismo.

Um grande volume de dados geoquímicos e isotópicos vem sendo produzido no Grupo Bambuí. A distribuição de idades U-Pb em zircão detrítico aponta para cristalização de grande volume de rochas ígneas durante o período Criogeniano até o final do Ediacarano (Paula-Santos et al., 2015; Paula-Santos e Babinski et al., 2018; Moreira et al., 2020; Tavares et al., 2020, Kuchenbecker et al., 2020). Paralelo a esse processo é verificada uma forte homogeneidade na distribuição de idades modelo T_{DM} entre 1750 e 2000 Ma, tanto temporalmente (isto é, entre os estratos do Grupo Bambuí), quanto geograficamente, com trabalhos distribuídos no norte do craton São Francisco adjacente à Faixa Rio Preto (Caxito, et al., 2018), na porção oeste adjacente à Faixa Brasília setentrional (Pimentel et al., 2001; Rodrigues, 2008), e na porção centro-leste, adjacente à Faixa Araçuaí (Paula- Santos et al., 2015; Paula-Santos e Babinski, 2018; e este trabalho).

Esta dissertação de Mestrado tem como objetivo, portanto, i) observar variações temporais da assinatura geoquímica das rochas sedimentares do Grupo Bambuí, avaliando-as dentro de uma perspectiva geodinâmica como mudanças das áreas fontes em relação ao desenvolvimento orogênico; ii) traçar um paralelo entre o estudo de proveniência e as transformações ocorridas nos

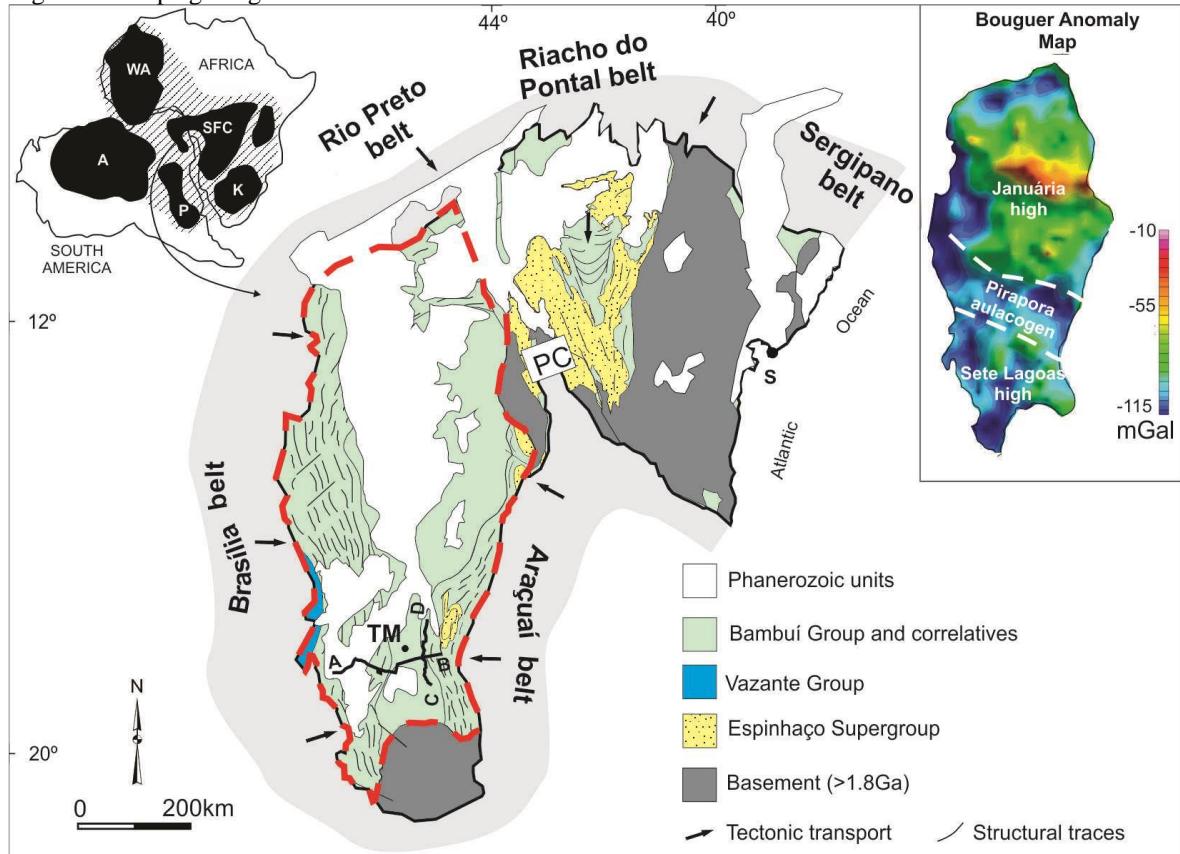
reservatórios crustais durante e após o período colisional que deram origem ao supercontinente Gondwana. Para tanto, nos capítulos iniciais (capt. 1.1 e 1.2) é apresentado o Grupo Bambuí dentro do contexto de formação do craton São Francisco e sua Bacia homônima durante o Neoproterozóico. A perspectiva geodinâmica traçada ao longo de vários anos pela literatura científica é resumida em questões paralelas aos estudos de proveniência e sua importância durante a evolução do conhecimento. Os resultados são apresentados no capítulo 3.1 no formato de artigo, no qual são utilizados dados de litogeoquímica de elementos maiores, traços e terras-raras em rochas siliciclásticas do Grupo Bambuí somados a dados de geoquímica isotópica em rocha total no sistema Sm-Nd. Estes dados são discutidos em conjunto e indicam variações temporais dentro do período de deposição do Grupo Bambuí relacionados à evolução das faixas orogênicas Brasília, a oeste, e Araçuaí- Ribeira, a leste, e como estas representam e influenciam fontes sedimentares do Grupo Bambuí. No entanto, os resultados e discussões do artigo deixam lacunas acerca da representatividade da mistura de fontes como controladora das assinaturas isotópicas do Grupo Bambuí, em detrimento a transformações intrínsecas aos reservatórios crustais. Deste modo, no capítulo 4.1 e 4.2, os dados isotópicos são reapresentados sob uma perspectiva mais regional, comparando depósitos relacionados a riftes intracontinentais e margem passiva do paleocontinente São Francisco, com os depósitos sin a pós colisionais relacionados ao supercontinente Gondwana. Incluem-se nessa ótica uma discussão de razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, as quais são dados ainda inéditos para sedimentos siliciclásticos do Grupo Bambuí, e sua representatividade no estudo da evolução dos reservatórios crustais durante o Neoproterozóico e início do Fanerozóico.

1 CONTEXTO GEOLÓGICO

1.1 O Grupo Bambuí no contexto da Bacia do São Francisco

A Bacia do São Francisco compreende o preenchimento sedimentar de múltiplos ciclos tafrogênicos que se estendem temporalmente desde o início do Mesoproterozóico, a cerca de 1.75 Ga, até o início do Cambriano (c.a. 520 Ma) (Alkmim e Martins- Neto, 2012). Estes ciclos tafrogênicos são relacionados, inicialmente, a depósitos de riftes intra-continentais e evoluem para antigas margens continentais passivas, até o desenvolvimento de depósitos associados a margens acrescionárias e colisionais. A Bacia São Francisco foi parcialmente invertida durante os eventos de orogênese continental que culminaram na formação do supercontinente Gondwana no fim do Neoproterozóico. As inversões dessas estruturas extensionais geraram cinturões de empurrões e dobramentos que limitam e definem o craton do São Francisco, o qual permaneceu relativamente estável durante este ciclo orogênico (Almeida 1981; Alkmim, 1993). A margem cratônica é delimitada a oeste pelo orógeno Brasília, a leste pelo Sistema Orogênico Araçuaí- Ribeira, e a norte pelas faixas Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipano (Heilbron et al., 2017).

Figura 1 - Mapa geológico da Bacia São Francisco.



Legenda: O mapa geológico simplificado mostra as principais unidades litoestratigráficas da Bacia São Francisco expostas no craton homônimo, o qual está limitado pela linha tracejada em vermelho. No canto superior direito, as principais unidades morfo-tectônicas são delimitadas no mapa de anomalia gravimétrica em: Alto de Sete Lagoas, Aulacógeno Pirapóra e Alto de Januária.

Fonte: Reis, 2016.

Estudos utilizando métodos sísmicos indicam que os sedimentos da Bacia São Francisco estão em parte preservados em estruturas extensionais no centro do craton (como o aulacógeno de Pirapora) (Reis et al., 2017). A Bacia São Francisco é dividida em quatro sequências estratigráficas que compreendem ciclos de primeira ordem: a sequência Paranoá/ Espinhaço (inferior e superior) que se estende do Mesoproterozoico ao início do Neoproterozóico; a sequência Macaúbas do início do Neoproterozoico; e a sequência Bambuí que se estende do final do Ediacarano ao início do Cambriano (Alkmim e Martins-Neto, 2012).

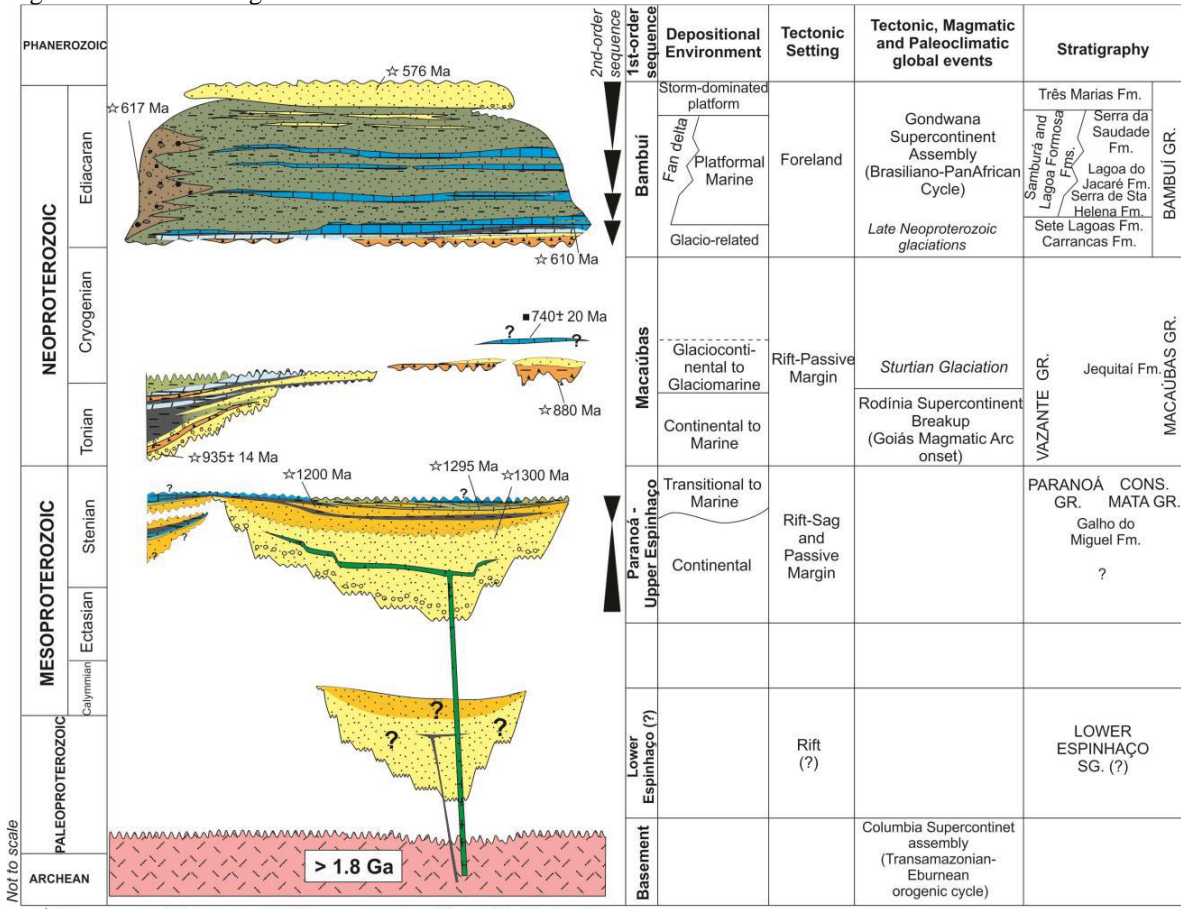
A sequência Paranoá/ Espinhaço, que se divide em superior e inferior, corresponde a depósitos predominantemente silicilásticos de rifte-sag intracontinental. Em sua seção exposta nos orógenos marginais, os correspondentes litoestratigráficos são relacionados a rochas sedimentares

depositadas em ambiente eólico a marinho raso (Martins-Neto, 2009). Dados de U-Pb em zircão detrítico apontam para uma idade de deposição entre 1.75 e 0.9 Ga (Chemale et al., 2012).

A sequência Macaúbas é interpretada como depósitos que evoluem de rifte a margem continental passiva distal que se estende de 900 a 660 Ma (Pedrosa-Soares et al., 2011). A sucessão sedimentar exposta nas faixas orogênicas marginais exhibe depósitos carbonáticos e siliciclásticos, associados a sequências ofiolíticas (Amaral et al., 2020).

A sequência Bambuí compreende depósitos carbonáticos e siliciclásticos associados a um sistema de ante-país desenvolvido durante a orogênese neoproterozoica (Alkmim e Martins-Neto, 2012). Esta sequência corresponde na litoestratigrafia ao Grupo Bambuí, o qual representa a maior exposição da Bacia São Francisco no craton. O Grupo Bambuí é dividido nas formações Carrancas, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias (Dardenne, 2000) (ver figura 9, no capítulo 3.1). Estas formações correspondem a quatro ciclos transgressivos-regressivos de segunda ordem delimitados em escala sísmica (Reis et al., 2017a).

Figura 2 - Carta estratigráfica da Bacia São Francisco.



☆ Younger detrital zircon U-Pb ages ■ Direct Pb-Pb isochron

Metamorphic rock Sandstone Conglomerate Mudstone Black mudstone
Limestone Dolostone Diamictite Igneous mafic rock Igneous rocks

Legenda: A carta estratigráfica demonstra quatro ciclos tafrogênicos de primeira ordem que recobrem as rochas Arqueanas- Paleoproterozóicas do embasamento do craton São Francisco.

Fonte: Reis, 2016.

O primeiro ciclo transgressivo- regressivo compreende as formações Carrancas e Sete Lagoas. A Formação Carrancas corresponde a depósitos de conglomerados, diamictitos e pelitos ora relacionados à glaciação de idade pré-Marinoana (Uhlein et al., 2016), ora interpretados como depósitos fluviais derivados de processos gravitacionais (Delpondor et al., 2020). Estes últimos autores, descrevem a Formação Carrancas como uma sucessão de conglomerados e intercalações de siltitos e rochas carbonáticas que transicionam para camadas de calcários maciços aragoníticos para o topo. A sucessão é interpretada como a parte basal da Formação Sete Lagoas (Delpondor et al., 2020). Na base da Formação Sete Lagoas, outros autores (Vieira et al., 2007; Kuchenbecker et al., 2016) descrevem ocorrências de camadas tabulares e rítmicas de laminitos com pseudomorfos

de aragonitas aciculares. Os laminitos carbonáticos possuem coloração cinza clara a avermelhada e laminações plano-paralelas ou onduladas por vezes trucadas por estilólitos. Essa associação é interpretada como um carbonato de capa depositado após um evento glaciogênico (Uhlein et al., 2016). Datações por isócronas Pb-Pb nos carbonatos de capa indicam idade de 734 ± 22 Ma (Babinski et al. 2007). Para o topo, a Formação Sete Lagoas é composta por uma associação de calcarenitos escuros, calcilitos e folhelhos que transicionam para calcarenitos estromatolíticos (Schöl, 1976; Vieira et al., 2007; Paula-Santos et al., 2015). Essa transição é marcada por uma intercalação de siltitos com calcáreos. Nos siltitos ocorrem grãos de zircão detrítico que apontam para uma idade máxima de 557 Ma para essa seção (Paula Santos et al., 2015). Os carbonatos da porção superior da Formação Sete Lagoas apresentam valores de Sr/Ca e de δC^{13} de 0‰ até $> +5$ ‰, significativamente maiores do que os valores no primeiro ciclo (Martins e Lemos 2007; Caetano-Filho et al. 2019). Essas mudanças são interpretadas como o estabelecimento de um sistema marinho restrito (Paula Santos et al., 2017; Hippertt et al., 2019; Caetano-Filho et al., 2019).

O segundo ciclo transgressivo-regressivo é representado pelas formações Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré. A Formação Serra de Santa Helena é composta por siltitos, folhelhos, arenitos e lentes de rochas carbonáticas. A Formação Lagoa do Jacaré, por sua vez, compreende uma associação de calcarenitos oolíticos, calcarenito escuro, calcilitos e siltitos carbonáticos em arranjo granodecrescente.

As formações Serra da Saudade e Três Marias correspondem aos últimos ciclos transgressivos do Grupo Bambuí. A Formação Serra da Saudade compreende siltitos glauconíticos e arcóseos. Recentemente, datações diretas em grãos de zircão de camadas vulcânicas sin-sedimentares revelam uma idade de deposição de 520 ± 5 Ma para a Formação Serra da Saudade (Moreira et al., 2020). A Formação Três Marias compreende uma associação de siltitos esverdeados (cloríticos) e arenitos feldspáticos a líticos. Os arenitos mostram estratificações cruzadas do tipo hummocky e swaley no topo de pacotes granodecrescentes, e são interpretados como depósitos plataformais (Chiavegatto, 1992).

Lateralmente, são correlatas e estão agrupadas ao Grupo Bambuí associações de conglomerados e pelitos das formações Samburá e Lagoa Formosa, identificadas na porção oeste da bacia (Castro e Dardenne, 2000; Reis et al. 2017b). Estes depósitos e suas correlações laterais serão discutidos no próximo capítulo.

1.2 O Grupo Bambuí: evolução de modelos geodinâmicos e paralelos com a proveniência sedimentar

Os modelos geodinâmicos concebidos para a deposição do Grupo Bambuí sempre estiveram calcados na descrição estratigráfica e sua relação com aspectos estruturais. Como bem recorda Martins-Neto e Pinto (2001) a partir de Allen e Allen (1990) a concepção geodinâmica define a bacia sedimentar pela “atuação de mecanismos de subsidência interligados, relativos ao mesmo regime tectônico ou evento tectono-termal, responsável pelo desenvolvimento de um ciclo de primeira ordem”. Sendo assim, geodinâmica está diretamente relacionado ao tempo de deposição. As raras ocorrências fossilíferas e de camadas vulcânicas sin-sedimentares (Warren et al., 2014; Moreira et al., 2020) não são suficientes, no entanto, para suportar uma interpretação geodinâmica do Grupo Bambuí, a qual, por alternativa, se desenvolveu paralela à evolução dos conceitos tectônicos e dos estudos de proveniência sedimentar. Este capítulo busca traçar o paralelo entre os modelos geodinâmicos e a importância da proveniência sedimentar no caso do Grupo Bambuí. Para tanto, serão descritos os panoramas gerais da estruturação do Grupo Bambuí em relação ao craton e suas faixas marginais, para então indicar os modelos de evolução tectonossedimentar, suas definições e ambiguidades.

Estudos a partir de métodos sísmicos indicam que os estratos do Grupo Bambuí na porção sul do craton São Francisco, possuem geometria em cunha com aumento da espessura das camadas no sentido de leste para oeste, adjacente ao orógeno Brasília (Reis e Suss, 2016; Reis et al., 2017a). A feição responsável por controlar essa geometria é um alto do embasamento chamado Alto de Sete Lagoas (figura 1), identificado por anomalias gravimétricas. Para norte do Alto Sete Lagoas, os estratos do Grupo Bambuí chegam a 1800m de espessura no Aulacógeno Pirapora, limitado a norte pelo Alto de Januária (Reis, 2016).

As rochas sedimentares do Grupo Bambuí foram afetadas pela frente de deformação das orogêneses Neoproterozoicas nas bordas oeste e leste do craton do São Francisco (figura 8, capítulo 3.1). No lado oeste, adjacente ao orógeno Brasília, ocorrem dobras e falhas de empurrão com vergência para leste que estão associados a falhas de descolamento no contato basal do Grupo Bambuí (Reis e Alkmin, 2015; Reis et al., 2017b). A falha de descolamento limita uma zona parcialmente deslocada que define um domínio paraúctone, atualmente estabelecido como o

cinturão de ante-país Brasília (Reis et al. 2017b). Esse cinturão de dobras e falhas é limitado a oeste pelo domínio alóctone da Faixa Brasília (Valeriano et al., 2004) e a leste pelos altos estruturais Sete Lagoas e Januária. Em relação ao alto de Sete Lagoas, as zonas de empurrão se estendem do sudoeste do craton São Francisco, próximo à cidade de Piumhi, até formarem a saliência de Três Marias na cidade de Três Marias (Reis e Alkmim, 2015), e estas estão parcialmente recobertas por sedimentos da Bacia Sanfranciscana do Cretáceo. No Alto de Sete Lagoas, as rochas do Grupo Bambuí são indeformadas e recobrem diretamente o embasamento Arqueano- Paleoproterozóico do craton São Francisco (Reis e Suss, 2016), definindo um domínio autóctone. No lado leste do craton São Francisco, adjacente ao orógeno Araçuaí, ocorrem falhas de empurrão com vergência para oeste e dobras com caimento duplo de larga escala, que expõe estratos de rochas sedimentares mais antigas e definem o cinturão de ante-país Araçuaí (Reis et al., 2017b).

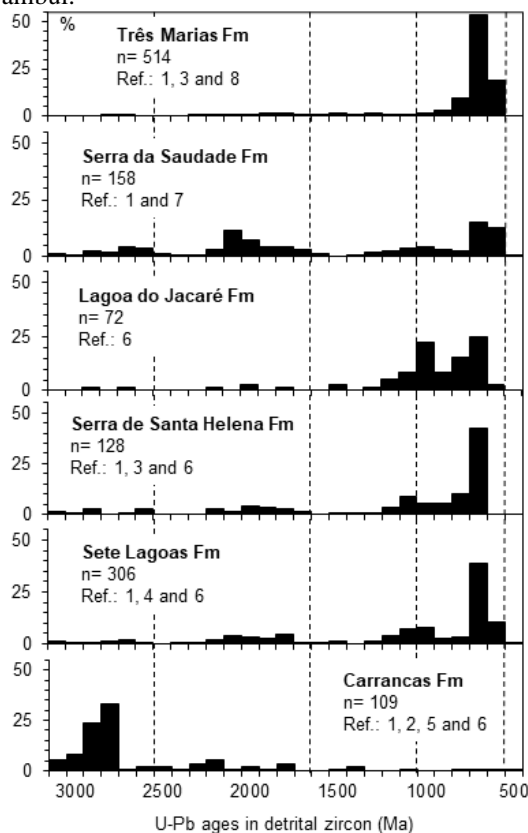
Os eventos que geraram estas frentes deformacionais são diacrônicos entre as faixas orogênicas. No orógeno Brasília meridional, o pico metamórfico datado por idade de cristalização de zircão em granitos sin-colisionais é de ca. 630 Ma e se estende até 605 Ma (U-Pb em monazita), que indica o metamorfismo tardio relacionado a exumações da nappe de Passos (Valeriano et al., 2004; Tedeschi et al., 2018). Eventos de baixa temperatura relacionados à formação de zonas de empurrões tardias foram datados em 600 a 570 Ma pelo método K/Ar em grãos de muscovita e biotita (Valeriano et al., 2000). No lado leste, adjacente ao orógeno Araçuaí, a idade da frente de deformação é restringida entre o pico metamórfico datado em c.a. 575 Ma (Pedrosa-Soares et al., 2001) e a idade de cristalização de granitos pós-colisionais em c.a. 530 Ma (De Campos et al., 2016).

Historicamente, a concepção geodinâmica da Bacia São Francisco foi interpretada como uma série de riftes intracontinentais que evoluem para uma margem continental passiva. As rochas sedimentares do Grupo Bambuí, no seu domínio autóctone (e, portanto, indeformado) foram inicialmente relacionados a correlatos intracontinentais dessa margem passiva (Almeida, 1968; Braun et al., 1990). Nessa concepção, o registro sedimentar da Formação Sete Lagoas corresponde a depósitos marinhos epicontinentais de uma fase geoclinal e que passam, para o topo, até registros de depósitos de plataforma, correspondente às formações Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade (Almeida, 1981). Depósitos predominantemente imaturos de arenitos feldspáticos e líticos formados pelo retrabalhamento de unidades sedimentares antigas

(olitostromas) foram relacionados a uma fase molássica e, portanto, indicativa de componentes compressivos não reconhecidos anteriormente (Chang et al., 1988).

Os depósitos conglomeráticas da Formação Samburá na borda sudoeste do craton São Francisco foram relacionadas a unidades sin-colisionais ligadas a edificação da frente de empurrão no setor meridional do orógeno Brasília (Barbosa et al., 1970; Valeriano, 1992). Estes depósitos rudíticos se estendem a norte ao longo da borda oeste do craton São Francisco e são agrupados na Formação Lagoa Formosa (Seer et al., 1987). Ambas associações de conglomerados, diamictitos e pelitos são interpretados como depósitos fan-deltáicos proximais de ante-país (Castro e Dardenne, 1997). As mesmas associações foram consideradas por Valeriano et al. (2000) como equivalentes proximais da Formação Três Marias. No entanto, múltiplos trabalhos posteriores, baseados em métodos sísmicos e na dispersão sedimentar de oeste para leste propõe que estas cunhas de depósitos conglomeráticos tipicamente sin-orogênicos são lateralmente e, portanto, temporalmente correlatos aos depósitos carbonáticos e pelíticos do Grupo Bambuí (Romeiro-Silva, 1997; Castro e Dardenne, 2000; Alkmim e Martins-Neto, 2012; Reis et al. 2017b). Grãos de zircão detrítico das formações Samburá e Lagoa Formosa apontam idades máximas de deposição entre c.a. 640- 560 Ma (Uhlein et al., 2017) o que admite que estes depósitos estão temporalmente relacionados ao desenvolvimento do orógeno Brasília meridional. Não só isso, mas também o sentido e direção dos imbricamentos que afetam o Grupo Bambuí no domínio parautóctone na porção oeste do craton São Francisco (Valeriano, 1992); e a geometria da bacia que apresenta um grande aprofundamento em direção a porção oeste, adjacente ao orógeno Brasília (Romeiro-Silva, 1997; Coelho et al. 2008). A geometria da bacia leva Reis et al. (2017b) a definirem dois depocentros bem marcados: o depocentro *foredeep*, o qual se insere no cinturão de ante-país Brasília, onde se desenvolveram as cunhas fan-deltáicas; e o depocentro de *forebulge*, relacionado a desenvolvimentos de riftes nos altos do embasamento (Reis e Suss, 2016) e caracterizado por menores espessuras de sedimentos.

Figura 3 - Distribuição de idades U-Pb em zircão detrítico por formação do Grupo Bambuí.



Legenda: É observado o aumento de idades entre 0.9 e 0.5 Ga para o topo do Grupo Bambuí pode ser interpretado como uma clara mudança de áreas fontes. A relação entre grãos de idade 0.6 a 0.5 Ga e rochas fontes no orógeno Araçuai ainda é questão de debate. Referências: 1- Rodrigues (2008); 2- Kuchenbecker et al. (2013); 3- Kuchenbecker et al. (2015); 4- Paula-Santos et al. (2015); 5- Uhlein et al. (2016); 6- Paula-Santos & Babinski (2018); 7- Moreira et al. (2020); 8- Tavares et al. (2020).

Fonte: O autor, 2020.

Estudos de proveniência baseados em litogeoquímica e geoquímica isotópica das rochas do Grupo Bambuí (Guimarães, 1997; Pimentel et al., 2001; Rodrigues, 2008) apontam para tendência de crescimento crustal durante o final do Neoproterozóico e que deve ser relacionada ao processo acrescionário de arcos magmáticos, em especial do Arco Magmático de Goiás. O mesmo processo acrescionário na crosta superior durante a deposição do Grupo Bambuí é observado pela distribuição de idades U-Pb em zircão detrítico. O método vem sendo amplamente utilizado (Kuchenbecker et al. 2020) e indica uma provisão de grãos com idade Criogeniana a Ediacarana nas sucessões basais e médias do Grupo Bambuí (Paula Santos et al., 2015; Paula Santos e Babinski, 2018); e uma tendência cada vez mais jovem, com grãos de idade Cambriana, nas sucessões do topo (Tavares et al., 2020; Moreira et al. 2020). Idade máxima de deposição dada

pelo zircão detrítico na Formação Sete Lagoas indica que a base do Grupo Bambuí é mais jovem do que c.a. 557 Ma (Paula Santos et al., 2015). Essa idade ainda é suportada pela ocorrência de fósseis-índices de *Cloudina sp.* que delimitam a idade da base do Grupo Bambuí entre 560-542 Ma (Warren et al., 2014). A idade de sedimentação máxima do Grupo Bambuí, no entanto, acarreta ambiguidades quanto ao estabelecimento de uma bacia de ante-país relativa ao orógeno Brasília, uma vez que existe um intervalo de tempo irreal e improvável entre o final das edificações das frentes de empurrão orogênicas e o início da sedimentação. Mesmo assim, múltiplos fatores indicam o desenvolvimento da Bacia como uma resposta flexural ao orógeno Brasília, mas também podem indicar que a flexura ocorreu por uma combinação de respostas às cargas isostáticas de ambas as frentes orogênicas Brasília e Araçuaí-Ribeira. Essa hipótese foi já aventada por Chang et al. (1988) que, usando das mudanças das posições das fontes sedimentares do Grupo Macaúbas de oeste para leste, interpretaram que a orogênese do lado leste acarretaria a deposição das rochas sedimentares do Grupo Bambuí em uma tectônica de ante-país. As ocorrências de idades de zircão detrítico vem sendo relacionadas ao plutonismo e acreção dos arcos magmáticos no Sistema Orogrênico Araçuaí- Ribeira (Paula Santos et al., 2015; Kuchenbecker et al. 2020; Tavares et al., 2020). No entanto ainda é uma questão de debate (Kuchenbecker et al. 2015, Paula Santos e Babinski, 2018). Vale salientar que fontes mais novas do que 630 Ma são raras no orógeno Brasília, o que contrasta com a observação de proveniência.

Os grupos Araxá e Ibiá, no orógeno Brasília, e a Formação Salinas, no orógeno Araçuaí, são correlatos sin-orogênicos ao Grupo Bambuí, e foram depositados entre 580- 540 Ma (Santos et al., 2009; Pimentel, 2016; Falci et al., 2018; Kuchenbecker et al., 2020). Estes depósitos podem estar relacionados a fase de formação das frentes de deformação, quando a taxa de crescimento topográfico é superior à taxa de sedimentação na bacia. Os sedimentos são, portanto, novamente erodidos e retrabalhados pela frente de empurrão (Naylor e Sinclair, 2008).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Amostragem

As amostras foram coletadas em afloramentos representativos de todas as formações do Grupo Bambuí (ver mapa na figura 8, capítulo 3.1). Três amostras do testemunho 1-1-MG, perfurado pela Petra Energia S.A., na região de Bom Despacho (MG) também foram agregadas a esta dissertação. Ao todo, 20 amostras foram analisadas para litogeoquímica, 26 para isótopos de Samário e Neodímio e 22 para isótopos de Sr.

Tabela 1 - Amostras analisadas neste trabalho. (Continua)

Amostra	Coordenadas (WGS84)	Altitude (m)	Proc. An*	Descrição da rocha
<i>Formação Três Marias</i>				
Bam- 04	-18.119082 -45.455143	642	L/ N/ S	Arenito fino rico em clorita, laminado com estruturas cruzadas
Bam- 05	-18.193388 -45.243743	572	L/ N/ S	Arenito grosso lítico
Bam- 03	-18.585482 -45.011237	739	L/ N/ S	Arenito fino, feldspático, com estratificação cruzada acanalada
Bam- 01A			L/ N/ S	Arenito grosso maciço
Bam-01B	-18.520645 -45.075410	683	N/ S	Arenito fino
Bam- 01C			L/ N/ S	Siltito com clorita
Bam- 08	-18.144062 -45.564887	711	L/ N/ S	Siltito marrom maciço
<i>Formação Serra da Saudade</i>				
Bam-16	-19.482173 -45.756318	697	L/ N/ S	Arenito fino feldspático com cimentação carbonática
Bam- 13	-19.355745 -45.941536	947	N/ S	Siltito glauconítico
Bam-14	-19.373617 -45.915345	953	L/ N/ S	Siltito glauconítico

Tabela 2 - Amostras analisadas neste trabalho. (Conclusão)

<i>Formação Lagoa do Jacaré</i>				
Bam-28A			N	Calcarenito escuro com veios de calcita
Bam- 28C	-19.080024 -44.538578	741	N	Calcarenito oolítico escuro
Bam-28F			L/ N/ S	Calcilutito impuro
Bam-27	-19.231842 -44.919933	733	L/ N/ S	Siltito maciço
Bam- 35	-19.94212 -45.96855	654	L	Calcarenito escuro altamente recristalizado
<i>Formação Serra de Santa Helena</i>				
Bam- 30	-19.454630 -44.311300	822	L/ N/ S	Siltito finamente laminado com clivagem ardosiana incipiente
Bam- 31	-19.175910 -44.707240	684	L/ N/ S	Ardósia
Bam- 25	-19.482704 -44.848005	671	L/ N/ S	Folhelho escurp com laminações ricas em carbonatos
Bam-26	-19.476990 -44.788746	755	L/ N/ S	Siltito cinza maciço
AC- 340	1-1-MG**		N/ S	Folhelho
<i>Formação Sete Lagoas</i>				
Bam- 29	-19.474170 -44.292180	861	L/ N	Calcário estromatolítico escuro
Bam-34	-20.361350 -45.667080	677	L/ N	Calcarenito escuro recristalizado e com veios de calcita
AC- 655			N/ S	Folhelho
AC- 650	1-1-MG**		N/ S	Folhelho
Bam- 19	-20.378473 -45.500402	898	L/ N/ S	Siltito laminado intercalado com dolomititos
Bam- 18	-20.373100 -45.503490	794	L/ N/ S	Siltito avermelhado
<i>Formação Samburá</i>				
Bam- 22	-20.414963 -45.902666	867	L/ N/ S	Conglomerado polimítico

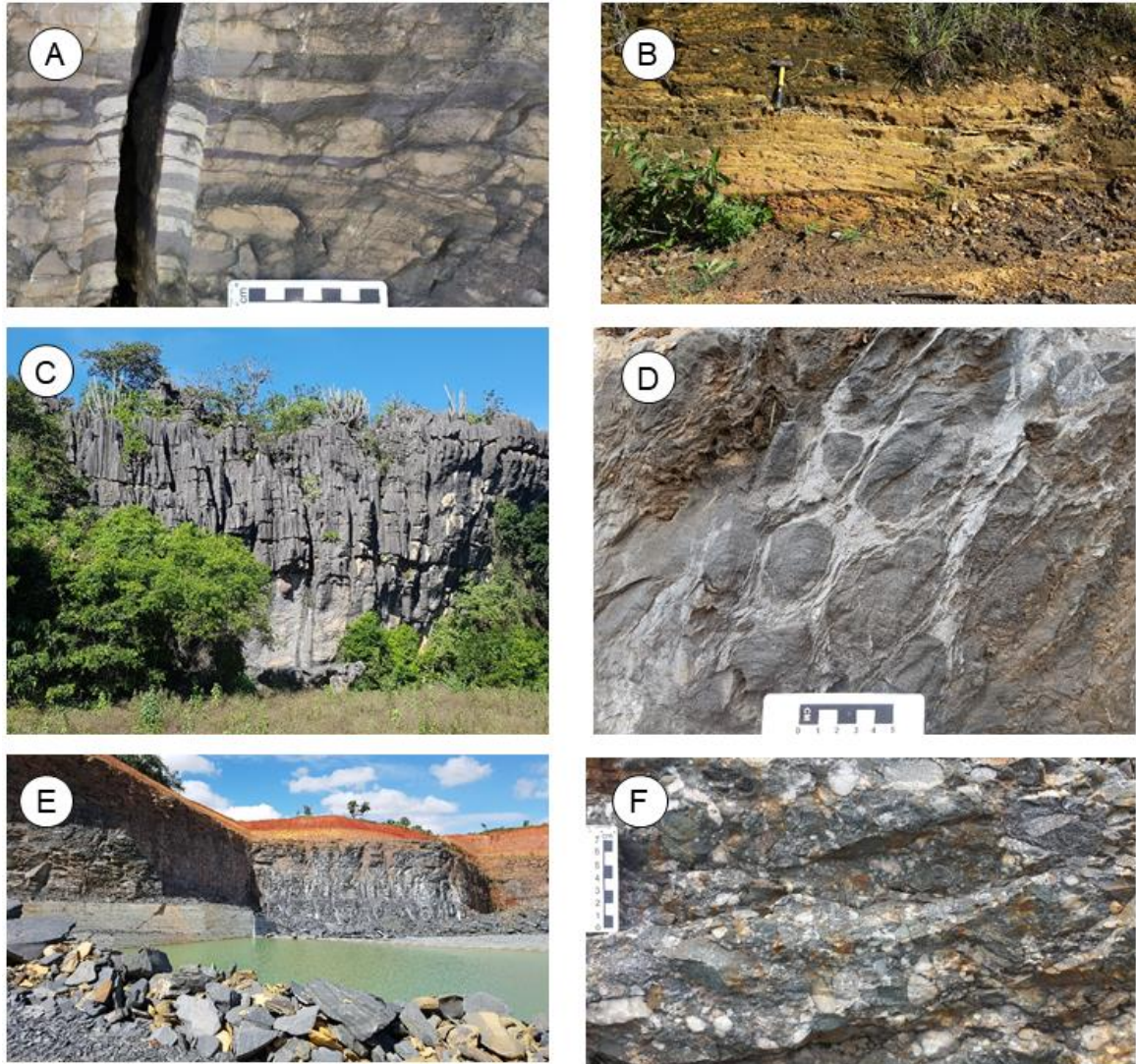
Legenda: * Procedimentos analíticos: L= litogeoquímica de rocha total; N= Medida de isótopos de Sm-Nd; S= Medidas de razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. ** Testemunhos coletados pela empresa do ramo de óleo e gás Petra Energia S.A.

Fonte: O autor, 2020.

Foram coletadas quatro amostras de diferentes fácies da Formação Sete Lagoas, duas delas localizadas no setor oeste (próximo à Arcos e Pains- MG), outras duas na região próxima à Pompeu e uma na cidade de Sete Lagoas próximo à Arcos (MG), ocorrem afloramentos de calcários impuros de coloração marrom-acinzentada em contato discordante com o embasamento gnáissico (figuras 4-A e B). Duas amostras desta fácies foram coletadas em pontos diferentes, a primeira demonstra intensa recristalização (Bam-19), enquanto a segunda não está recristalizada e apresenta grau de intemperismo relativamente mais elevado (Bam-18). Ainda no setor oeste, próximo a Pains (MG), foi amostrado um calcarenito escuro (Bam-34). A associação com calcilutitos cinza claro na base possibilitou a correlação desta amostra com a sequência superior da Formação Sete Lagoas (figura 4-C). No setor leste, foi amostrado um calcarenito escuro associado a calcários estromatolíticos aflorante a frente do posto policial da BR-040 em Sete Lagoas (amostra Bam-29; figura 4-D). Esta associação de calcários estromatolíticos, lentes de siltito e brechas intraformacionais também estão associados ao membro superior da formação em questão.

Somente uma amostra foi coletada da Formação Samburá (Bam-22; figura 4-F) de um ortoconglomerado polimítico nos arredores de Piumhí (MG).

Figura 4 - Fotos de afloramentos nos pontos de coleta nas Formações Sete Lagoas, Samburá e Serra de Santa Helena.



Legenda: A) Calcipelito dolomítico da Formação Sete Lagoas inferior exposto na região de Arcos (Bam-19). B) Calcipelito intemperizado da Formação Sete Lagoas em contato com embasamento gnáissico próximo à Arcos (Bam-18). C) Afloramento de calcarenito escuro associado à calcilitito cinza claro (Formação Sete Lagoas superior) próximo à Pains (Bam-34). D) Calcarenito escuro estromatolítico localizado no posto da polícia rodoviária da BR-040 próximo à Sete Lagoas. E) Mineração de folhelhos escuros piritosos associados à Formação Sete Lagoas próximo à Papagaios. F) Ortoconglomerado polimítico da Formação Samburá próximo à Formiga.

Fonte: O autor, 2020

Na Formação Serra de Santa Helena foram coletadas quatro amostras. As amostras Bam-25 e Bam-26 tratam-se de folhelhos e siltitos associados coletados em minerações nas cidades de Papagaio e Pompéu, respectivamente (figura 4-E). A amostra Bam-30, coletada próxima à Sete Lagoas (MG), representa um metassilito finamente estratificado apresentando clivagem ardosiana incipiente e medianamente intemperizado (figura 5-A). Próximo à região de Pompéu, a associação

parece ter se transformado em ardósia a qual é explorada industrialmente (amostra Bam-31; figura 5-B). A ardósia amostrada estava sobreposta por pelo menos 5 metros de solo avermelhado e 15 metros de um siltito medianamente alterado de cor creme. Na Formação Lagoa do Jacaré foram coletadas cinco amostras representativas dessa unidade em dois perfis diferentes. O primeiro, localizado a norte de São José da Lagoa, onde está exposta uma seqüência granodecrescente de calcilitos na base gradando para calcarenitos escuros, então, calcáreos oolíticos no topo (figura 5-C). No segundo perfil, localizado nos arredores da cidade de Bambuí, foi amostrado um calcarenito grosso escuro com vênulos de calcita. Essa exposição estava associada a uma falha de empurrão com vergência para leste e está relacionada a deformações da Faixa Brasília (figura 5-D).

Figura 5 - Fotos de afloramentos dos pontos coletados nas Formações Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré.



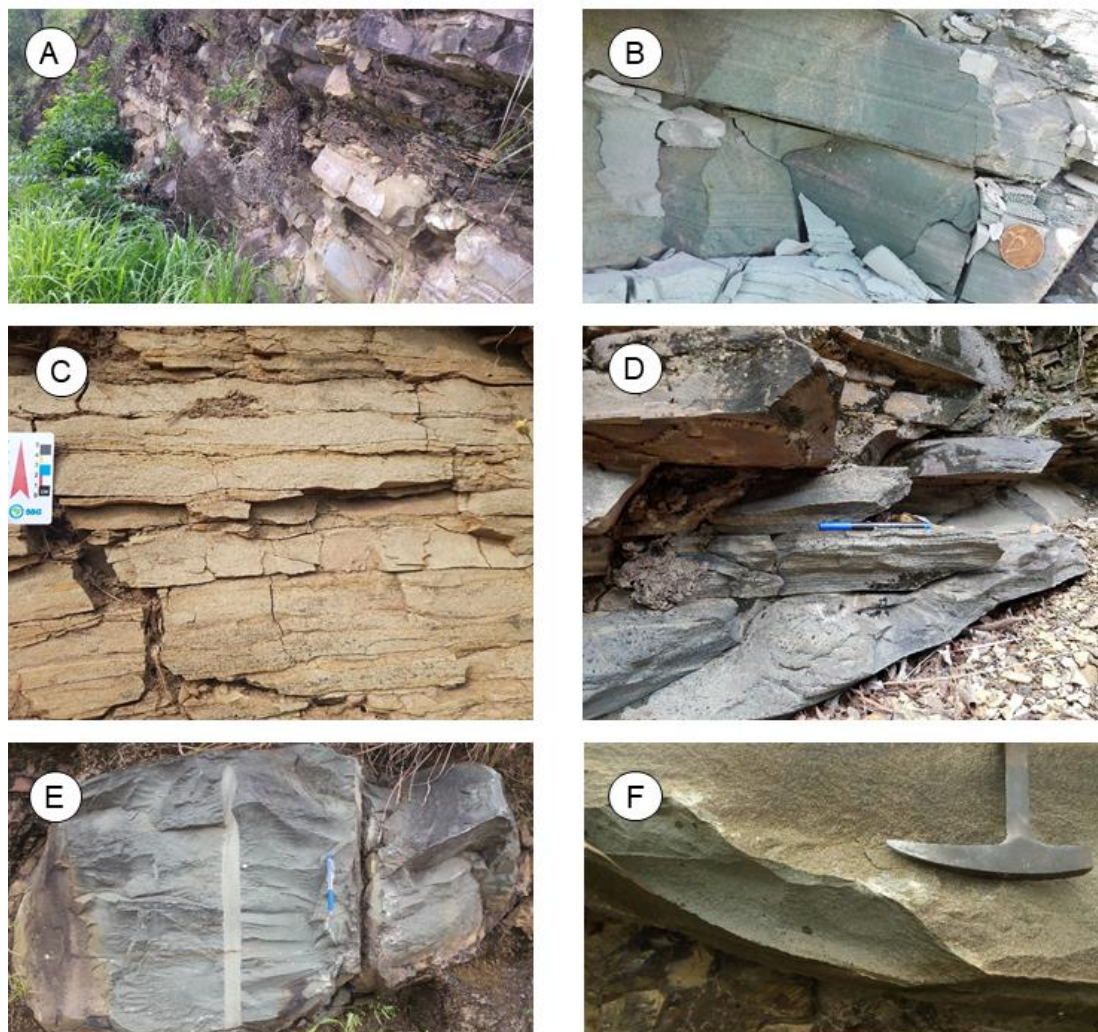
Legenda: A) Siltito bege associado à Formação Serra de Santa Helena mostrando traços de clivagem ardósiana além de uma estratificação paralela centimétrica, exposto em corte da estrada BR-040, próximo à Sete Lagoas (Bam-30). B) Mineração de ardósias associado à formação Serra de Santa Helena próximo à Pompéu (Bam-31). C) Ciclos granocrescentes com calcilitos acinzentados na base gradando para calcarenitos grossos oolíticos no topo associados à Formação Lagoa do Jacaré a leste de Pompéu (Bam-28). D) Calcarenito escuro rico em vênulas de calcita associado à uma zona de empurrão (notar falha na figura) próximo à Bambuí (Bam-35).

Fonte: O autor, 2020

A Formação Serra da Saudade é composta por uma sucessão de pelitos esverdeados (figura 6-B) e arenitos arcóseos e carbonáticos no topo (figura 6-A). Essa sucessão pode ser amostrada na região de Abaeté, onde foram selecionados dos pontos de coleta de verdetes (siltitos glauconíticos- Bam 13 e 14) e, no topo da sucessão, um arenito acinzentado (Bam-16).

A Formação Três Marias foi amostrada em dois pontos diferentes. O primeiro, na BR-040 a cerca de 30Km da cidade de Três Marias, foram coletadas amostras de quatro fácies diferentes, arenitos esverdeados maciços e com estratificação plano-paralela, interestratificados com pacotes finos de siltito também esverdeado (figura 6-F). Para o topo, a sucessão mostrava um arenito grosso com estratificação cruzada acanalada (figura 6-E). O segundo ponto está localizado entre os quilômetros 273 e 251 da BR-040 nos arredores da cidade de Três Marias. A exposição é caracterizada por uma sucessão de pacotes granocrescentes com pacotes de siltitos esverdeados na base, passando transicionalmente para arenitos micáceos interestratificados com camadas e lentes de siltito (amostra Bam-04; figura 6-D) até arenitos grossos puros de coloração cinzenta no topo (amostra Bam-05; figura 6-C). A amostra Bam-08, coletada próxima a região de Três Marias, trata-se de um siltito cor creme pouco alterado. Esta rocha está posicionada próxima a falhas de empurrão com vergência para leste.

Figura 6 - Fotos de afloramentos nos pontos de amostragem das Formações Serra da Saudade e Três Marias.



Legenda: A) Arenito acinzentado da Formação Serra da Saudade próximo à Abaeté (Bam-16). B) Siltitos esverdeados (Verdete) de Cedro do Abaeté (Bam-14). C) Arenito lítico grosso próximo à Três Marias (Bam-05). D) Arenito médio a fino intercalado com finas camadas de siltitos ricos em clorita próximo à Três Marias (Bam-04). E) Arenito médio maciço de cor esverdeada (Bam-03). F) Local de amostragem de um arenito grosso maciço e esverdeado associado a camadas espessas e silito bege (Bam-01).

Fonte: O autor, 2020

2.2 Procedimentos analíticos

2.2.1 Litogeoquímica

As análises litogeoquímicas foram realizadas no *Activation Laboratories* (Ancaster, Canadá). Esse laboratório usa uma combinação de técnicas de *ICPMS* (*Inductively Coupled Plasma*

Mass Spectrometer) e *INAA (Instrumental Neutron Activation Analyses)* (Hoffman, 1992) para determinar composições químicas de elementos maiores e traços.

2.2.2 Geoquímica isotópica

As análises de geoquímica isotópica foram realizadas através de um Espectrômetro de Massa por ionização Térmica (TIMS) no Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR) da UERJ.

Cerca de 25 a 50 mg de pó de rocha britados em moinho-de-bolas de tungstênio e foram misturados com volumes proporcionais de traçadores ^{149}Sm - ^{150}Nd e deixadas em um concentrado de HF, HNO₃ e HCl para digestão a quente por 10 dias. Na primeira etapa, a separação e coleta de Sr e elementos terras-raras foi realizada a partir de colunas preenchidas por resinas de troca catiônica AG50W-X8 Bio-Rad (100-200 mesh). Na segunda etapa, os elementos Nd e Sm foram separados e coletados usando uma coluna preenchida com resina Eichrom LN-spec (150 mesh).

Para análise espectrométrica, Nd, Sm e Sr foram carregados separadamente em filamentos de Rênio em configuração dupla, usando ácido fosfórico com ativador iônico. Razões isotópicas foram medidas em TRITON- TIMS ThermoFinnigan multicoletor em modo estático usando um conjunto de coletores Faraday. As análises químicas reportadas, com erros absolutos menores do que 0.00001, representam a média de pelo menos 160 ciclos para Nd, 80 para Sm e 100 para Sr. As razões medidas foram normalizadas respectivamente por razões naturais constantes: $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$, $^{147}\text{Sm}/^{152}\text{Sm} = 0.5608$ e $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.3752$. Possíveis interferências isobáricas causadas pelo ^{87}Rb foram corrigidas usando a razão natural $^{87}\text{Rb}/^{85}\text{Rb} = 0.3860$. A média da razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ medida no material de referência JNdi-1 (Tanaka et al., 2000) é de 0.512098 ± 0.000006 (n = 381), e a média da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ no material NBS-987 (Wise e Waters, 2007) é 0.710239 ± 0.000008 (n = 158). Análises repetidas dos materiais de referência BCR e AVG do USGS mostraram razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ com reprodutibilidade e erros menores que 1% (Valeriano et al., 2009). Valores de branco para análises Nd e Sm são menores do que 200 pg e 70 pg, respectivamente.

3 RESULTADOS

3.1 Combined Sm-Nd isotopes and lithochemistry in the sedimentary provenance of Foreland Basins: the case of the Ediacaran-Cambrian Bambuí Group, Brazil (Artigo científico)

Gabriel Paravidini^{a, *}; Humberto Luis Siqueira Reis^b; Monica Heilbron^a, Manuela de Oliveira Carvalho^a, Carla Cristine Aguiar-Neto^a, Cláudio de Morisson Valeriano^a

a- Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR), Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rua São Francisco Xavier, 524 - Maracanã, 20943-000 Rio de Janeiro, RJ, Brazil

b- Laboratório de Modelagem Tectônica (LabMod), Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Morro do Cruzeiro, 35.400-000 Ouro Preto, MG, Brazil.

**Artigo submetido à publicação pela Journal of South American Earth Sciences, dia 28/11/2020.*

Abstract

Sedimentary provenance analysis based on lithochemistry and isotope data has been extensively applied in the investigation of ancient sedimentary successions. This approach allows to evaluate the tectonic setting in which these strata were deposited, to estimate their maximum depositional age and to recognize provenance patterns and shifts (i.e., sedimentary dispersal) throughout the evolution of their hosting depocenters. The Ediacaran to early Cambrian Bambuí Group is exposed in the southern São Francisco craton (SE Brazil) and contains the sedimentary record of a foreland basin system developed during the West- Gondwana assembly. Different lines of evidence indicate that this basin system formed and evolved in a confined setting, due to the overloads imposed on the western and eastern margins of the São Francisco paleoplate by the diachronic Brasília and Araçuaí orogen systems, respectively. Although the tectono-sedimentary record of the Bambuí strata indicates an evolution mostly coupled to the western orogenic system, its age, detrital zircon content and aspects related to its geodynamical evolution support important sedimentary sources associated with the eastern orogen. Nevertheless, the geological record of this provenance pattern is still unclear. New whole-rock lithochemistry and Sm-Nd isotopic data

were applied to evaluate the overall sedimentary provenance patterns of the Bambuí Group and identify its possible sources. Coupled (La/Yb)_n and Th/Sc ratios with ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd and εNd isotopes allowed the recognition of three contrasting source patterns associated with different stages of the Bambuí Group strata. The early stage is recorded by carbonate ramp deposits and show highly heterogeneous and more negative εNd ranging from -10.5 to -4.5, as well as Th/Sc and (La/Yb)_n ratios between 0.6 and 0.7 and 0.54 and 0.76, respectively. The provenance patterns point toward intermediate-dominated and isotopically evolved crustal sources, with T_{DM} model ages between 1.5 and 2.0 Ga. The second basin stage is marked by fine-to medium-grained siliciclastics grading upward into platformal oolitic calcarenites and calcilutites. This succession exhibits homogeneous and less negative εNd_(t) values between -6.8 and -5.2, with low Th/Sc (0.6 to 0.8) and (La/Yb)_n (0.60 to 0.84) ratios. The uppermost Bambuí strata, marked by greenish siltstones and arkoses grading upward into storm-bedded arkoses and lithic sandstones, show homogeneous εNd_(t) ranging from -8.5 to -6.1, slightly more negative than the underlying successions, and relatively higher Th/Sc and (La/Yb)_n ratios ranging from 0.7 to 1.3 and 0.85 to 1.28, respectively. The Sm-Nd isotopic signature of the upper deposits indicate felsic-dominated and more isotopically juvenile crustal sources with T_{DM} model ages of 1.5 to 1.7 Ga, characteristics compatible with Ediacaran arc-related rocks and post-tectonic granites exposed in the Araçuaí orogen, to the east. Our data indicate that the Proterozoic cratonic covers, and their correlatives in the surrounding orogens, together with magmatic rocks from the Araçuaí orogen acted as major sedimentary sources during the first evolutionary stages of the Bambuí basin-cycle in the Sete Lagoas forebulge depocenter. Toward the middle to late basin stages, the Araçuaí orogen rocks became increasingly important on sourcing the Ediacaran foreland system in this depocenter. Besides revealing the major provenance patterns through the evolution of an ancient and partially confined foreland basin system, our data also demonstrates that even minor changes in the Sm-Nd system might be useful as reliable elements on the provenance analysis of sedimentary systems elsewhere.

KEYWORDS- Lithogeochemistry, Sm-Nd systematics, Sedimentary provenance, West – Gondwana; Foreland Basin; Ediacaran-Cambrian

3.1.1 Introduction

Provenance studies based on litho-geochemistry and isotopic data have been extensively applied to the analysis of (meta)sedimentary successions deposited in different tectonic settings (McCulloch and Wasserburg, 1978; McLennan et al., 1990, McLennan and Hemming, 1992). By revealing the major geochemical characteristics of the source rocks shedding ancient and modern basin systems, these studies allow i) to recognize patterns and shifts in the sedimentary dispersal throughout the evolution of the hosting depocenters, ii) to estimate maximum depositional ages and iii) to define the tectonic settings in which the sedimentary strata were deposited (e.g., McLennan et al., 1990; McLennan and Taylor, 1991; McLennan et al., 1993; Cawood et al., 2012). Since the evolution of syn-orogenic basins is mostly controlled by orogenic-driven changes in the balance between accommodation rates and sedimentary supply (e.g., Catuneanu, 2006), provenance studies applied to the analysis of their strata may also offer insights on the evolution of the adjacent convergent systems, as well as on the dynamic changes of orogenic sedimentary sources.

The Ediacaran to Cambrian Bambuí Group contains mixed carbonate-siliciclastic rocks that cover much of the southern portion of the São Francisco Craton, Southeast Brazil (Dardenne, 2000; Paula-Santos et al., 2015; Reis et al., 2017a). Earlier interpretations have portrayed the Bambuí strata as the sedimentary record of an intracratonic marine basin that was lately converted into a molasse-type depocenter (e.g., Martins and Lemos, 2007). Nevertheless, more recent studies indicate that the Bambuí Group was entirely deposited within a foreland basin system, which evolved during the West Gondwana assembly (Alkmin and Martins-Neto, 2012; Reis et al., 2017a; Caetano-Filho et al., 2019). This episode was contemporaneous with the uplift of the Brasília orogen and the Araçuaí-Ribeira orogenic system that bound the São Francisco craton to the west and east, respectively (e.g., Valeriano et al., 2000; Pedrosa-Soares et al., 2001; Reis and Alkmin, 2015; Tedeschi et al., 2018).

Although it has evolved under the influence of multiple and partially coeval orogenic systems, the tectonic loads imposed by the Brasília orogenic belt on the western margin of the São Francisco paleocontinent have been considered by many authors as the major controlling factor for the evolution of the Bambuí foreland basin system (Martins-Neto, 1999; Pimentel et al., 2001; Reis

et al., 2017a). These loads apparently overwhelmed the influence of other marginal orogens and controlled the development of the main depocenters recorded by the Ediacaran-Cambrian strata in the southern São Francisco craton, as well as important patterns of their sedimentary dispersal (Reis et al., 2017b). However, local occurrences of ca. 520 Ma volcanoclastic rocks (Moreira et al., 2020), *Cloudina* sp index-fossil (550 to 542 Ma, Warren et al., 2014) and recent provenance studies based on U-Pb detrital zircon ages have been indicating a maximum depositional age of ca. 557 Ma for the entire Bambuí Group and an evolution spanning the Ediacaran and Cambrian periods (Paula-Santos et al., 2015). It implies that most of the Bambuí basin-cycle overlapped the collisional to post-collisional stages of the younger Araçuaí-Ribeira orogenic system (e.g., Paula Santos et al., 2015; Tavares et al. 2020). Although provenance patterns associated with this orogenic system have been documented in a few exposures of the uppermost Bambuí Group in the eastern São Francisco craton (Tavares et al., 2020; Rossi et al., 2020), the contribution of its sedimentary sources for the lower to middle Bambuí strata is still unclear.

Provenance studies based on detrital zircon ages and whole-rock Sm-Nd isotopes have been applied to understand the tectonic relation between the Bambuí Group and the Neoproterozoic orogenic belts surrounding the São Francisco craton (Pimentel et al., 2001; Rodrigues, 2008; Paula Santos et al., 2015; Kuchenbecker et al., 2015; Uhlein et al., 2016; Kuchenbecker et al., 2016; Paula-Santos and Babinski, 2018; Caxito et al., 2018). These studies show the contribution of multiple cratonic and extracratonic Archean to Proterozoic sources and the varying contribution of Ediacaran to Cambrian orogenic sources (Kuchenbecker, 2015; Paula-Santos et al., 2015; Tavares et al., 2020). The contrast between these younger orogenic sources and other sedimentary provenance data available for the Bambuí units (e.g., Chiavegatto, 1992) and the diachronic evolution of the marginal belts make it difficult to distinguish sedimentary sources from the Brasília and Araçuaí-Ribeira orogens.

Aiming to contribute to the investigation of the tectono-stratigraphic evolution of the Bambuí basin and its relationship with the surrounding Brasília and Araçuaí-Ribeira orogens, we present the first systematic and basin wide study of the siliciclastic rocks of the Bambuí Group based on lithochemistry (major, trace and rare earth elements) and whole-rock Sm-Nd isotopes. Together with the available data in the literature, our study demonstrates that the Ediacaran magmatic rocks in the Araçuaí orogen represent important sedimentary sources for most of the Bambuí Group. By revealing the overall provenance trends throughout the analyzed strata and their

relationship with tectonic components of the marginal orogenic belts, our study also offers contributions to better approach ancient to modern foreland basins systems and related orogens, as well as to understand their proper evolution.

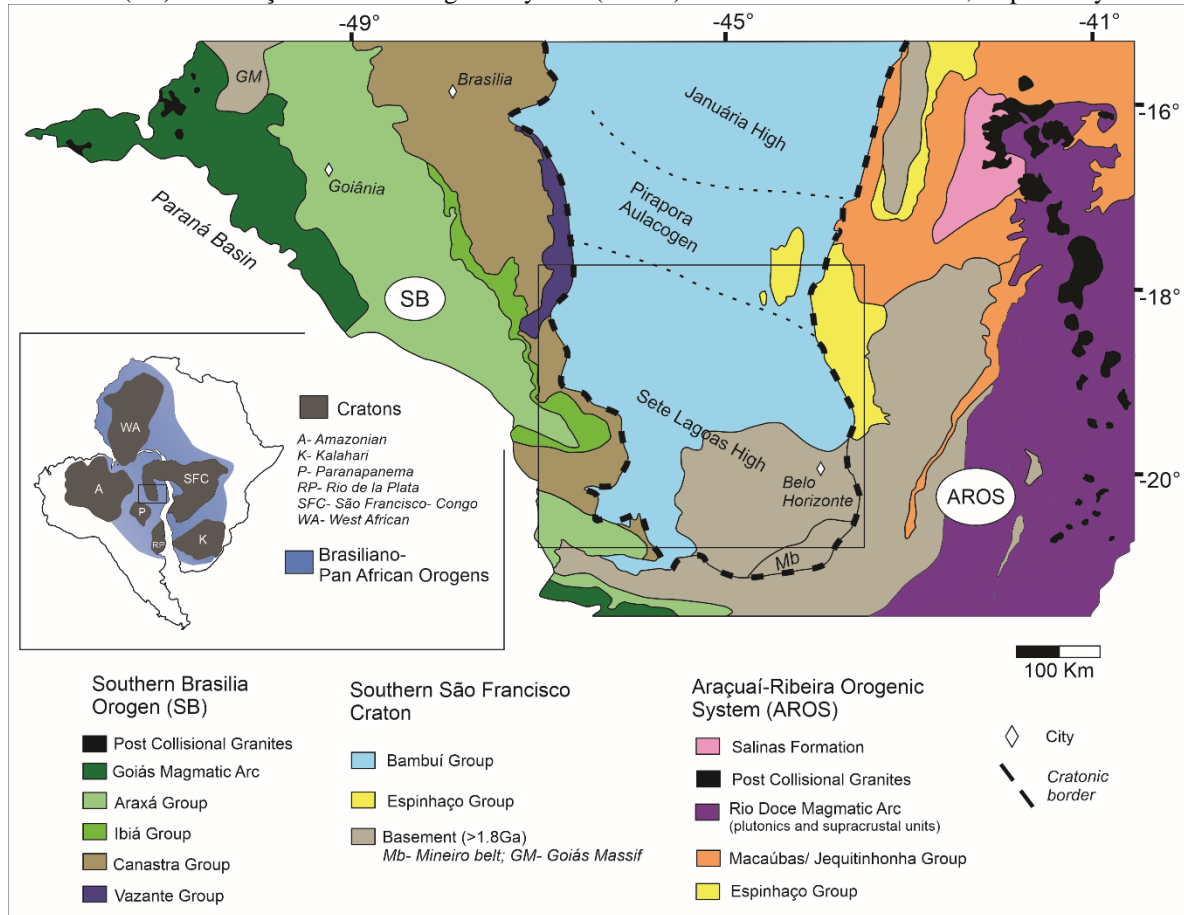
3.1.2 The southern portion of São Francisco craton and adjacent orogenic belts: The Bambuí Group and its sedimentary sources

The São Francisco craton (SFC) represents part of a thick lithospheric domain that remained relatively stable during the Neoproterozoic-early Paleozoic orogenic events leading to the assembly of the West Gondwana supercontinent (Alkmim et al., 2001). At its southern portion, the cratonic margins are defined by emerging thrusts of the Brasília and Araçuaí-Ribeira orogens to the west and east-south, respectively (Fig. 7) (Heilbron et al., 2017).

Within the São Francisco craton, the Bambuí Group unconformably overlies either Archean-Paleoproterozoic basement complex or Meso- to Neoproterozoic successions and is locally overlain by Phanerozoic (mostly Cretaceous) sedimentary rocks (Almeida et al., 1981; Reis et al., 2017a). Overall, the surface and subsurface distribution of the Proterozoic covers in this portion of the craton is controlled three major basement structures: i) a buried and NW-trending graben (i.e., Pirapora aulacogen) that bounds the ii) Sete Lagoas and iii) Januária basement highs to the south and north, respectively (Fig. 7). Most of the cratonic basement exposures are documented in the southern sector of the Sete Lagoas basement high, where they comprise Archean greenstone belts and related granitic-gneissic complexes, as well as Rhyacian magmatic arc granitoid rocks and Paleoproterozoic volcano-sedimentary successions of the Mineiro Belt and Quadrilátero Ferrífero (Marshak et al., 1997; Teixeira et al., 2015).

Meso to Neoproterozoic sandstone-dominated strata are exposed in a few deformed domains in the eastern and western sectors of the southern São Francisco craton (Fig. 7). They have been documented in subsurface through the analysis of deep wells and seismic sections along the entire cratonic domain, showing thickest strata within the Pirapora aulacogen (Reis et al., 2017a). These units are unconformably overlain by glaciogenic diamictites and associated strata of the Jequitá Formation, which are exposed in the eastern deformed cratonic domain (Fig. 8).

Figura 7 - Simplified geological map of the southern São Francisco craton and the surrounding southern Brasília orogen (SB) and Araçuaí-Ribeira Orogenic System (AROS) to the west and east-south, respectively.



Legenda: The rectangle in the figure indicates the Figure 2. Modified from Pedrosa-Soares et al. (2001), Moreira et al. (2008), Pinto and Silva (2014), Valeriano (2017), Reis et al (2017a).

Fonte: O autor, 2020

3.1.2.1. Brasília orogenic belt

To the west of the SFC, the southern Brasília orogen comprises metasedimentary rocks successions related to the Meso to Neoproterozoic passive margin successions (Vazante, Canastra, and part of Ibiá and Araxá groups) and accretionary terranes represented by the Goiás microcontinent and by the Goiás magmatic arc.

The passive margin in the western border of the São Francisco paleocontinent succeeded Paleo to Mesoproterozoic rifting events and evolved between the late Mesoproterozoic-early Tonian and the late Neoproterozoic, when the main collisional episodes recorded in the southern

Brasília orogenic belt occurred (at ca. 630 Ma) (Valeriano et al., 2000; Tedeschi et al. 2018). This stage is recorded by syn-orogenic metapelitic schists of the Ibiá and Araxá groups, which contain zircons as young as ca. 580 Ma (Falci et al., 2018). The Nd model ages (T_{DM}) of the passive margin successions vary from 1.7 to 2.3 Ga (Pimentel et al., 2001; Carvalho et al., 2019).

The Goiás magmatic arc shows two main phases of magmatism (Laux et al., 2005). The older phase started at ca. 830 Ma and was associated with the development of intra-oceanic island arc rocks. These units are referred as the Mara Rosa arc and comprise juvenile tholeiitic to calc-alkaline rocks, showing T_{DM} from 0.8 to 1.1 Ga and $\epsilon Nd(t)$ between +1.9 and +6.0 (Pimentel and Fuck et al., 1992; Viana et al., 1995; Rodrigues et al., 1999; Pimentel et al., 2000; Laux et al., 2005; Navarro and Zanardo, 2007). The second magmatic phase recorded in the Goiás magmatic arc occurred between ca. 670 to 630 Ma and its rock record exhibits signatures more compatible with continental magmatic arcs. These units show T_{DM} from 1.0 to 2.0 Ga and $\epsilon Nd(t)$ between -1.7 and +5.0 (Rodrigues et al., 1999; Laux et al., 2005; Navarro et al., 2007), indicating a remarkable crustal contamination.

The main metamorphic episode recorded in the southern Brasília belt was dated at ca. 650-630 Ma by U-Pb in zircon crystals of syn-collisional granites (Valeriano et al., 2004; Seer et al., 2005). U-Pb monazite ages of 605 Ma mark the exhumation of metamorphic nappes formed in the final orogenic stages and currently exposed in southernmost Brasília orogen (Valeriano et al., 2004; Tedeschi et al., 2018). Low temperature events related to the final development stages of these nappe complexes show minimum ages between ca. 600 and 570 Ma, given by K-Ar dating of white mica and biotite (Valeriano et al., 2000).

3.1.2.2 The Araçuaí belt

To the east of SFC, the Araçuaí- Ribeira Orogenic System (AROS) comprises an external fold-thrust belt that affect the Archean-Paleoproterozoic basement complexes and Statherian to Cryogenian (Ediacaran) sedimentary successions (Alkmim and Martins-Neto, 2012; Chemale et al., 2012). Eastward, the orogen is dominated by medium to high grade metamorphic and igneous

rocks recording accretionary to collisional magmatic episodes (e.g., Pedrosa-Soares et al., 2001; Tedeschi et al., 2016).

The Paleoproterozoic to Mesoproterozoic sandstone-dominated successions of the Espinhaço Group record multiple rift-sag episodes, whose correlatives are locally exposed in the São Francisco craton. These units are unconformably overlain by rift and rift to passive margin successions of the Macaúbas Group, comprising basal sandstone-dominated strata and upper glaciogenic diamictites, sandstones, fine-grained turbidites and pelites (Pedrosa-Soares et al., 2011). These sedimentary rocks show T_{DM} ages varying between 1.5 and 2.5 Ga (Babinski et al., 2012).

The Rio Doce magmatic arc represents calc-alkaline igneous rocks as old as 630 Ma, and associated volcano-sedimentary successions (Gradin et al., 2014; Tedeschi et al., 2016). The Nd model ages from 1.2 to 2.0 Ga and the $\epsilon Nd(t)$ from -14.1 to -6.1 indicate a hybrid signature between the Paleoproterozoic continental basement rocks and mantle derived magmas, which are associated to the development of a continental magmatic arc (Gonçalves et al., 2016; Tedeschi et al., 2016).

The main metamorphism episode registered in the internal orogenic domain is dated around 575 Ma (Pedrosa Soares et al., 2001). This episode is coeval with the sedimentation of syn-orogenic deposits of the Salinas Formation, which comprise fine- to coarse-grained siliciclastics lately metamorphosed under greenschist facies conditions (Costa et al., 2018). The maximum depositional age of these strata has been constrained by U-Pb detrital zircon ages at ca. 580 Ma (Peixoto et al., 2015) to ca. 550 Ma (Kuchenbecker et al., 2020).

Bimodal and inversely zoned granite plutons dated at 530 to 480 Ma mark the post-collisional stage of the Araçuaí- Ribeira Orogenic System in the eastern margin of the São Francisco craton (Pedrosa-Soares et al., 2001; De Campos et al., 2016).

3.1.3 The Bambuí Group and the Ediacaran-Cambrian foreland basin system

The Ediacaran-Cambrian Bambuí Group records a complex foreland basin system developed on the southern São Francisco paleocontinent in response to the overloads imposed mainly by two surrounding Neoproterozoic orogenic belts (Fig. 7): to the west the Brasília orogen

and, to the east, the Araçuaí-Ribeira Orogenic System (e.g., Alkmim and Martins-Neto, 2012; Reis et al., 2017a; Caetano-Filho et al., 2019; Kuchenbecker et al., 2020). The flexural deformation imposed by these tectonic loads culminated with the development of two major depocenters: i) a foredeep in the west and ii) a forebulge in the east (Reis et al., 2017a).

As observed in regional seismic sections (Coelho et al., 2008; Reis et al., 2017b), the Bambuí succession shows a wedge-shaped geometry in the southern SFC with thicknesses varying from a few hundreds of meters in the eastern forebulge up to ca. 3000 m in the western foredeep, adjacent to the Brasília orogen in the west (Fig. 8). The eastern forebulge domain developed mostly on the Sete Lagoas basement high, where Archean-Paleoproterozoic basement structures were reactivated during flexural uplift, forming typical forebulge grabens filled with Bambuí strata (Reis and Suss, 2016; Reis et al., 2017b). To the north, within the NW-SE trending Pirapora Aulacogen (Figure 7), the total preserved thickness of the Bambuí strata reaches up to ca. 1800 m. According to the available subsurface and surface data, the Januária basement high also behaved as a forebulge domain during the development of the Bambuí basin (Reis et al., 2017a).

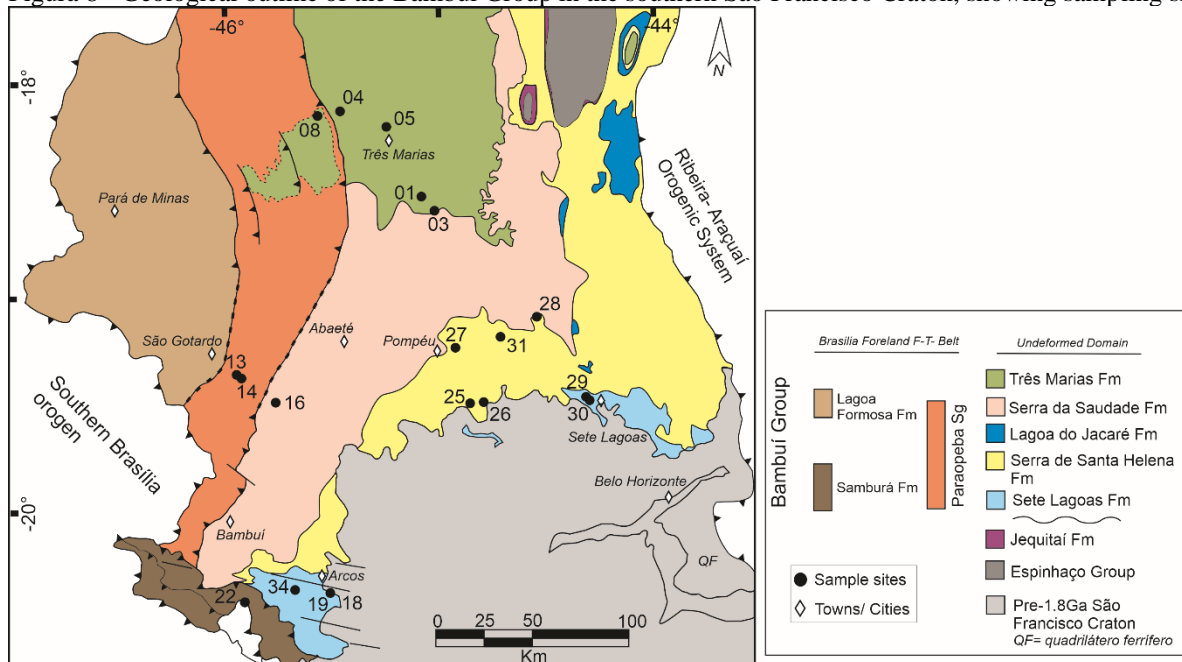
Along the western and eastern portions of the craton, the Bambuí strata were lately affected by two opposite-verging, foreland fold-thrust belts, the Brasília and Araçuaí, respectively (Reis and Alkmim, 2015; Reis et al., 2017a). Representing the most external sectors of the homonymous orogenic systems, these foreland belts exhibit different tectonic architectures. While the Brasília foreland f-t-belt corresponds to an east-verging and thin-skinned system, the Araçuaí foreland fold-thrust belt is a west-verging system showing two thin-skinned sectors separated by a central thick-skinned domain where large scale double-plunging folds mark the partial inversion of the easternmost Pirapora aulacogen (Reis and Suss, 2016; Reis *et al.*, 2017b). In the southern São Francisco craton, these foreland f-t-belts are separated by a NS-trending zone, in which the Bambuí strata overlies the basement assemblages and is undeformed (Reis et al., 2017a). This sector is referred as the Undeformed Domain.

3.1.3.1 Stratigraphy

The Bambuí Group, in the central Undeformed Domain, is divided, from the base to the top, in the Carrancas, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade and

Três Marias formations (Dardenne, 2000) (Fig. 8). These successions correspond to mixed carbonate-siliciclastic marine successions that grade upward into storm-bedded and sand-dominated strata (Fig. 9). They define four second-order shallowing upward sequences, which record stacked carbonate and siliciclastic platforms that presumably evolved under the control of the flexural subsidence imposed by the development of the surrounding orogens (Reis et al., 2017b; Caetano-Filho et al., 2019).

Figura 8 - Geological outline of the Bambuí Group in the southern São Francisco Craton, showing sampling sites.



Legenda: The Parapoeba Subgroup in the western São Francisco craton includes the undivided Carrancas, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré and Serra da Saudade formations that are overlain by the Três Marias Formation deposits (Braun, 1968).

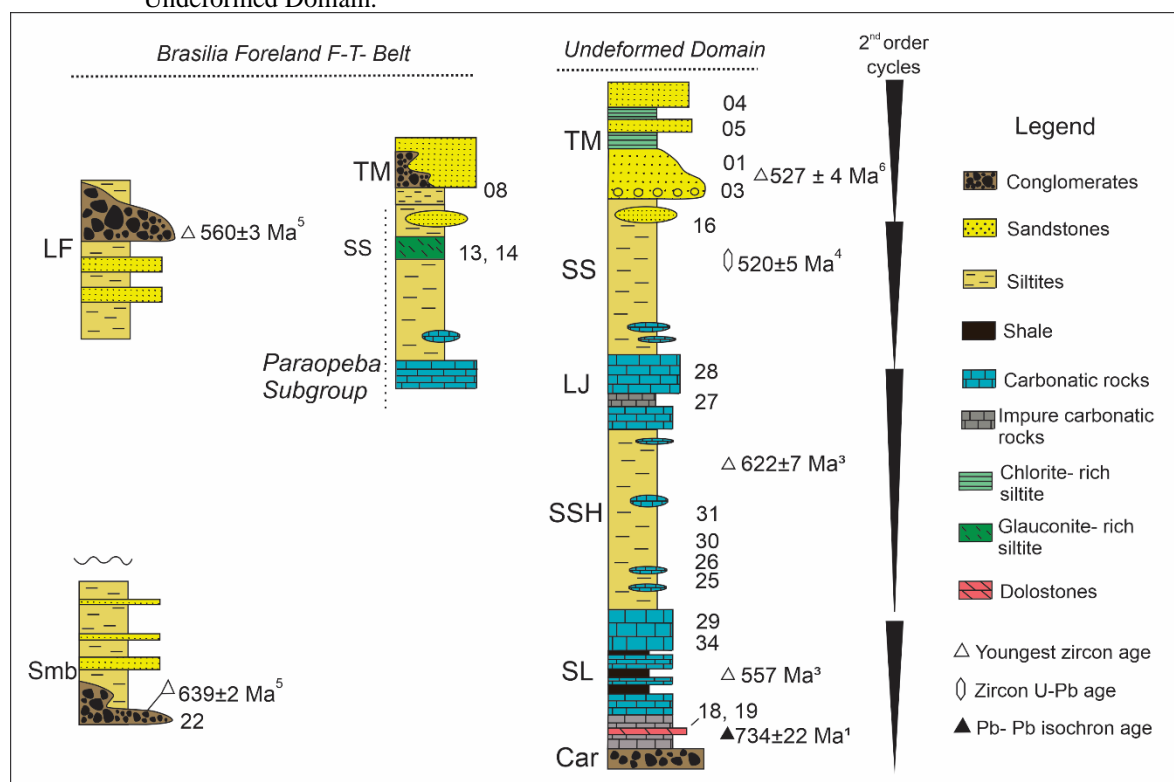
Fonte: O autor, 2020.

The basal second-order sequence of the Bambuí Group is represented by transgressive-related diamictites and pelitic strata of the Carrancas Formation, which grade upward into regressive carbonate ramp successions of the Sete Lagoas Formation (Vieira et al., 2007; Kuchenbecker et al., 2016; Reis and Suss, 2016; Delpondor et al., 2020). The carbonate successions are dominated by lime mudstones, calcarenites, calcilutites and shales with plane-parallel or undulated bedding. These rocks grade upward into carbonate-dominated succession containing stromatolites and which record shallow marine to transitional systems influenced or not by storm waves (Vieira et al., 2007; Kuchenbecker et al., 2016; Reis and Suss, 2016). Detrital zircons from

fine-grained siliciclastic rocks of this sequence yield a maximum depositional age calculated of ca. 557 Ma (Paula-Santos et al., 2015).

The carbonate strata of the basal second-order sequence are marked by an increase in the Sr/Ca ratio and in the δC^{13} signatures, from around 0‰ to >+5‰ in the carbonatic rocks (Martins and Lemos, 2007; Caetano-Filho et al., 2019). These changes become more expressive in the overlying Bambuí rocks and have been interpreted as recording the onset of a long-lived phase of basin restriction driven by the development of the marginal orogenic systems during the Gondwana assembly (Paula-Santos et al., 2017; Hippertt et al., 2019; Caetano-Filho et al., 2019).

Figura 9 - Lithostratigraphic columns of the Bambuí Group in the Brasília Foreland Fold-Thrust belt and in the Undeformed Domain.



Legenda: Modified and compiled from: Seer et al. (1987); Castro and Dardenne (1997); Dardenne (2000); Reis et al. (2017a). Numbers refer to studied samples. Geochronological references: (1) Babinski, 2007; (2) Paula-Santos et al., 2015; (3) Kuchenbecker et al., 2015; (4) Moreira et al., 2020; (5) Uhlein et al., 2017; (6) Tavares et al., 2020. Abbreviations: Smb= Samburá fm; LF= Lagoa Formosa fm; Car = Carrancas fm; SL= Sete Lagoas fm; SSH= Serra de Santa Helena fm; LJ= Lagoa do Jacaré fm; SS= Serra da Saudade fm; TM= Três Marias fm.

Fonte: O autor, 2020.

The upper second-order sequence is composed of transgressive carbonate rocks of the uppermost Sete Lagoas Formation and siliciclastic-dominated units of the lower Serra de Santa

Helena Formation. These successions grade upward into pro-deltaic to delta front siliciclastics that are overlain by shallow marine limestones of the Lagoa do Jacaré Formations.

The second-order sequences of the middle to upper Bambuí Group are represented by the uppermost Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade and Três Marias formations (Fig. 9). Above the Lagoa do Jacaré Formation deposits, zircon crystals from volcanic ashes deposits intercalated with greenish siltites and feldspathic sandstones of the Serra da Saudade Formation were dated at 520 ± 5 Ma (Moreira et al., 2020). In the uppermost regressive systems tract record of the Bambuí basin, detrital zircon grains from storm-bedded sandstones, arkoses and pelites of the Três Marias Formation yield a maximum depositional age of 527 ± 4 Ma (Tavares et al., 2020). This succession seem to mark the last and overfilled evolutionary stage of the basin (Reis et al., 2017a).

Toward the western sector of the craton, the lower to middle Bambuí strata thicken and grade laterally in to the deposits of deltaic to basinal fine- to coarse- grained siliciclastics of the Samburá and Lagoa Formosa formations (Seer et al., 1987; Castro and Dardenne, 1997; Uhlein et al., 2011). The maximum sedimentation age of the Samburá and Lagoa Formosa are given by the youngest concordant detrital zircon U-Pb age of 639 ± 2 Ma and 560 ± 3 Ma, respectively (Uhlein et al., 2017).

3.1.3.2 Detrital zircon content and Sm-Nd data

The Carrancas Formation shows a detrital zircon age spectrum dominated by 3.5 to 2.7 Ga grains and a minor presence of 2.3 to 2.2 Ga-old zircons, which have been generally related to local sedimentary sources (Uhlein et al., 2016; Paula-Santos and Babinski, 2018). The provenance patterns of the Carrancas Formation highly contrasts with the overlying Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré and Serra da Saudade formations. The main concentration of detrital zircon ages in these formations occurs between 0.7 and 0.6 Ga. Minor occurrences are observed in the intervals between 1.2 and 0.9 Ga, 2.1 and 1.8 Ga and, more rarely, 2.9 and 2.6 Ga (Rodrigues, 2008; Kuchenbecker et al., 2013; Kuchenbecker et al., 2015; Paula-Santos et al., 2015, Uhlein et al., 2016; Paula-Santos and Babinski, 2018; Kuchenbecker et al., 2020). The 0.6 and 0.5 Ga zircon grains found in the Sete Lagoas Formation may indicate sources from the Araçuaí- Ribeira

Orogenic System (Paula-Santos et al., 2015; Kuchenbecker et al., 2020), but it still a matter of debate (Kuchenbecker et al., 2015; Paula-Santos and Babinski, 2018). In the Serra da Saudade Formation, detrital zircons with ages between 0.6 to 0.5 Ga are associated with volcanoclastic layers intercalated with glauconitic siltite deposits (Moreira et al., 2020). In the eastern São Francisco craton an almost unimodal distribution of U-Pb detrital zircon ages. between 0.8 and 0.5 Ga have been observed in the Três Marias Formation and correlatives These provenance patterns have been attributed mostly to Araçuaí orogen sources (e.g., Kuchenbecker et al., 2015; Tavares et al., 2020).

Sm-Nd model ages for the Carrancas Formation vary between 1.58 and 2.54 Ga (Uhlein et al. 2016 and Paula-Santos and Babinski 2018). On the other hand, the deposits of the overlying formations of the Bambuí Group show model ages with no significant variations, between 1.45 and 1.89 Ga (Sato, 1998; Rodrigues, 2008; Kuchenbecker et al., 2013; Paula-Santos et al., 2015; Paula-Santos and Babinski, 2018). In spite of that, the model ages found in the Bambuí strata are considerably younger than the model ages of ca. 2.12 Ga documented for the passive margin sedimentary successions of the Brasília orogen (Pimentel et al., 2001). It supports a relative juvenile input into the Bambuí basin during its evolution. This input is generally associated with major contributions from Neoproterozoic magmatic rocks exposed in the Brasília orogen, mixed with older metasedimentary sources either within the orogen or intracratonic (Pimentel et al., 2001). Recent studies, however, consider that juvenile sources from the Araçuaí orogen might have also acted as important inputs in the basin (Paula-Santos et al., 2015; Paula-Santos and Babinski, 2018).

In comparison, the Samburá and Lagoa Formosa Formations detrital zircon age distribution is not similar to the deposits described above. These deposits show a bimodal major concentration of grains of 0.9 to 0.6 Ga and 1.5 to 2.1, and minor components of 1.1- 1.5 Ga and 2.4- 3.0 Ga (Uhlein et al., 2017). The Sm-Nd model ages in the Lagoa Formosa vary between 1.5 and 2.2 Ga and juvenile input is compatible with the trend observed in the Goiás magmatic arc rocks in the Brasília orogenic belt (Uhlein et al., 2017).

3.1.4 Sampling and Analytical procedures

3.1.4.1 Sampling

Samples were collected in key exposures of the Bambuí Group both at the western and eastern portions of the São Francisco craton, distributed along the following formations: 4 from the Sete Lagoas, 1 from Samburá, 4 samples from the Serra de Santa Helena, 5 samples from Lagoa do Jacaré, 3 from Serra da Saudade and 7 samples from Três Marias (Fig. 9). This study presents 23 new Sm/Nd isotope data and 17 analysis of whole-rock lithogeochemistry (Table 1).

Three side well core samples provided by Petra Energia S.A. (Neres, 2014) were also used in this study. This well was drilled in the southern portion of the São Francisco craton, within a forebulge graben (Reis and Suss, 2016) (Fig. 8). Three whole-rock Sm/Nd isotopic data were obtained from these samples, which comprise two organic -rich pelites of the base of the Sete Lagoas Formation (650 and 655 m-depth) and one siltite from Serra de Santa Helena Formation (340 m-depth).

3.1.4.2 Lithogeochemistry

A total of 17 samples were chosen to whole rock lithogeochemical analyses performed by the Activation Laboratories (Ancaster, Canada). This laboratory uses a combination of standard ICPMS - Inductively Coupled Plasma Mass and INAA - Instrumental Neutron Activation Analyses (Hoffman, 1992) techniques for the determination of major and trace element chemical compositions.

3.1.4.3. Sm-Nd Isotope Geochemistry

Thermal ionization mass spectrometry (TIMS) analyses were performed in the LAGIR Geochronology and Radiogenic Isotopes Laboratory of the Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), where separation of Nd and Sm followed standard chemical procedures. Whole rock powder samples weighting from 25 to 50 mg were mixed with proportional volumes of a ^{149}Sm - ^{150}Nd tracer solution and left on hot plate digestion for up to 10 days in concentrated HF, HNO_3 and HCl. In a first step separation of rare-earth elements, columns filled with the AG50W-X8 Bio-Rad (100-200 mesh) cation exchange resin were employed. Nd and Sm were then separated in a secondary column filled with the Eichrom LN-spec (150 mesh) resin.

For mass spectrometric analyses, Nd and Sm were loaded onto separate Rhenium filaments in double filament configuration, using phosphoric acid as ionization activator. Isotope ratios were measured using a TRITON – ThermoFinnigan multi-collector Thermal Ionization Mass Spectrometer (TIMS), in static mode using an array of Faraday collectors. Reported isotope ratios (Table 2), with absolute standard errors (2s) below 0.00001, are the average of at least 160 cycles for Nd, 80 for Sm and 100 for Sr. The measured ratios were normalized respectively to the natural constant ratios of $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ and $^{147}\text{Sm}/^{152}\text{Sm} = 0.5608$. The average $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio measured in the JNdi-1 reference material (Tanaka *et al.* 2000) is 0.512098 ± 0.000006 (n = 381). Repeated analyses of BCR and AVG rock reference materials from the United States Geologic Survey yield $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ratios with reproducibility within 1% errors (Valeriano *et al.* 2009). Values for blank for Nd and Sm analysis are below 200pg and 70pg, respectively.

3.1.5 Results

3.1.5.1. Litho geochemistry

Major elements

The studied samples include one polymict conglomerate sample of the Samburá Formation and siltites, muddy carbonates, and calcarenites from the lower Bambuí Group (divided in the Sete

Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré Formations). In the upper Bambuí Group (Serra da Saudade and Três Marias Formations), samples comprises siltites and sandstones (Apêndice A).

The siliciclastic samples show SiO_2 contents between 59.7% and 81.3% and Al_2O_3 between 8.9% and 16.6%. Compared to Upper Crust (UpC) composition (McLennan, 2001), the studied samples present higher contents of total iron oxide (Fe_2O_3^*), between 3.5% and 7.2% (UpC= 5.0%), MgO between 0.88% and 3.48% (UpC= 2.21%), and TiO_2 , between 0.5% and 1.0% (UpC= 0.7%). The K_2O and Na_2O contents vary between 1.3% to 3.7% and 1.4% to 3.0% respectively. The coarse-grained sandstones are relatively similar to the Upper Crust, differently from the siltites and fine-grained sandstones.

Anomalous values for alkaline elements are reported to two siliciclastic samples. The reddish siltite from Sete Lagoas Formation (sample 18), has a Na_2O content of 0.05% and K_2O of 6.22%. The glauconitic siltite (sample 14) from the Serra da Saudade Formation shows Na_2O of 0.05% and K_2O of 9.54%.

The siliciclastic rocks have very variable CaO content due to either to the presence of carbonate clasts or cement. Siltite samples of the Serra de Santa Helena (samples 30 and 26) and Três Marias formations (samples 01A and 08) have low CaO ranging between 0.07 to 0.33%. Sandstones and some siltite samples (e.g. sample 25) with minor carbonate clasts and/or cementation show intermediate CaO contents that vary between 0.75 and 2.25%. The CaO content of 6.65% and 8.58% in the samples 04 and 16, respectively, can be related to carbonatic cementation and micrite in the matrix.

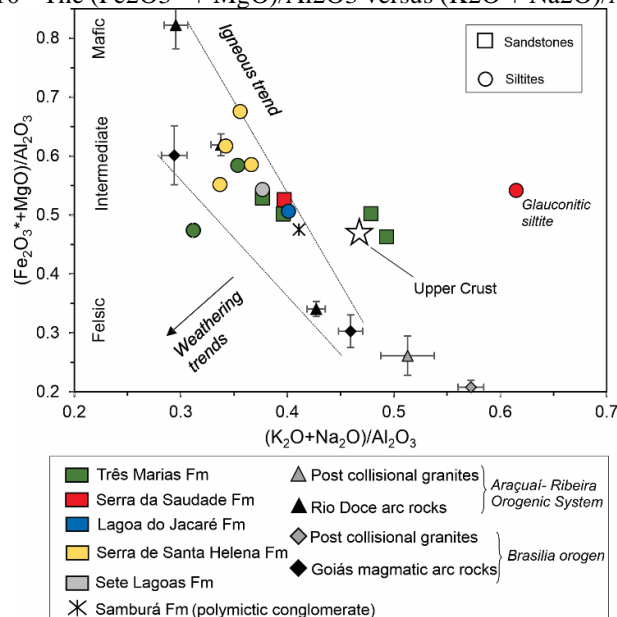
The muddy carbonate rocks, samples 28 (Lagoa do Jacaré) and 19 (Sete Lagoas), have respectively CaO contents of 39.6% and 44.63%, while SiO_2 are 20.8% and 16.7% and Al_2O_3 of 3.7% and 2.1%. Because of the low detrital content in these rocks, the TiO_2 is lower than 0.3%, while Na_2O and K_2O show values lower than 1%.

The diagram of $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ versus $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ (Fig. 10) depicts compositional variation among the analyzed siliciclastic rocks, which overlaps the composition between intermediate and felsic rocks of the magmatic arcs rocks from both Brasília and Araçuaí orogens. The reference igneous values in Fig. 4 are calculated for an average composition of i) felsic (n=135), intermediate (n=56) and mafic (n=34) rocks of the Rio Doce arc (Tedeschi et al., 2016 and references therein); ii) intermediate (n=14) and felsic (n=19) rocks of the Goiás Magmatic arc (Viana et al. 1995 and Navarro and Zanardo 2007); and iii) for the post collisional granites of

the Araçuaí orogen (n=17) (De Campos et al., 2004) and of the Brasília orogen (n=38) (Navarro et al., 2017; Pimentel et al. 1996).

In the Fig. 10, it is possible to observe that the analyzed rocks of the Bambuí Group define compositional trend, marked by an overall upward increasing in alkalis relative to the Fe_2O_3^* and MgO contents. This variation is similar to that observed in the igneous trend of possible source rocks from the Neoproterozoic marginal orogenic belts, with the Serra de Santa Helena siltites overlapping intermediate compositions and the Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade and Três Marias formations varying from intermediate to felsic. The coarse-grained sandstones of the Três Marias Formation show alkali enrichment relative to the siltites, which might be explained by their higher amounts of feldspar grains. Only one sample from the Três Marias Formation (sample 08) plotted in the range expected for the weathering-related chemical trend, where aluminum content is greater than that observed in the igneous rocks. As indicated in Fig. 10, most of the studied samples differ from the reference composition of the Upper Crust based on the Post Archean Australian Shales (PAAS) (McLennan, 2001).

Figura 10 - The $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3$ versus $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ diagram.



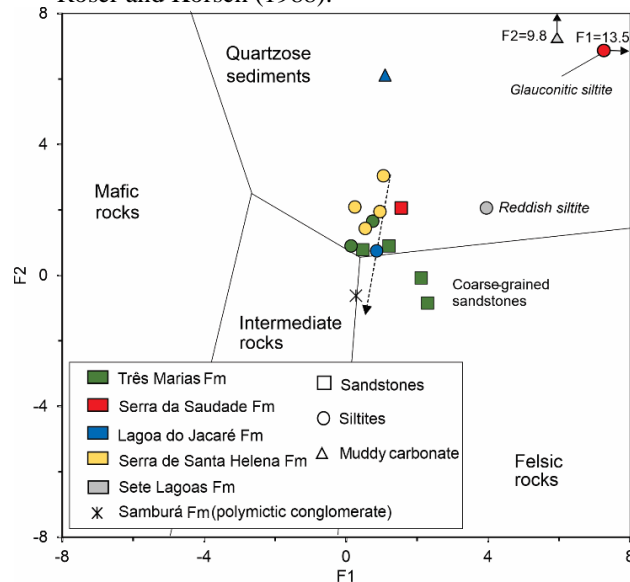
Legenda: The diagram shows compositional variations between lithostratigraphic units of the Bambuí Group. Upper Crust value from McLennan (2001).

Fonte: O autor, 2020.

Since diagram of Fig. 10 cannot be used alone as a provenance index, we have also used the Roser and Korsch (1988) discrimination diagram in order to better evaluate the characteristic

composition of the source rocks of the Bambuí Group (Fig. 11). The diagram is based on the proportion of the major oxides Fe_2O_3^* , TiO_2 , MgO , Na_2O and K_2O , normalized by the Al_2O_3 content. Since it does not consider the CaO and the SiO_2 contents, the discrimination diagram might prevent any bias related to biogenic components. As shown in Fig. 11, the data plots in the field of quartzose sediments, indicating a highly mature continental provenance. Although it has not shown a clear distinction between possible source rocks, the diagram indicated a slight compositional variation from the Serra de Santa Helena Formation siltites toward the intermediate composition of the polymictic conglomerate of the Samburá formation. Samples of muddy carbonates of the Sete Lagoas and Lagoa do Jacaré formation plots outside the trend because of high MgO contents. The glauconitic siltite, reddish siltite and the coarse-grained sandstones plots outside the trend observed possibly due to the relatively high K_2O content.

Figura 11 - Sedimentary rock major element provenance discrimination diagram of Roser and Korsch (1988).



Legenda: F1 and F2 corresponds to the discriminant function analysis using TiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O and Na_2O normalized by Al_2O_3 .

Fonte: O autor, 2020.

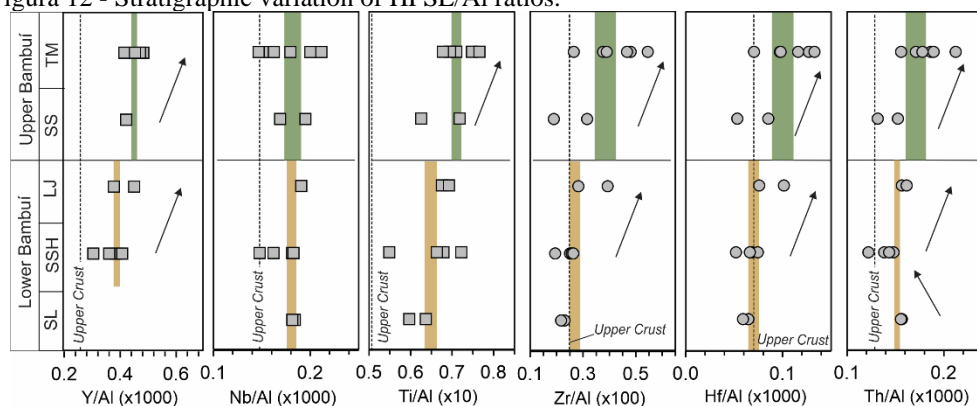
Trace element composition

The high field strength elements (HFSE) have a typical affinity with crustal rocks and are generally used as provenance proxies, due to their immobility during depositional sedimentary processes and diagenesis (McLennan et al., 1993). The HFSE content of samples from the Bambuí

Group were normalized by Al (ppm) and plotted in logs, according to their relative age in Fig. 12. It is observed an overall enrichment in the HFSE content relative to the Upper Crust reference with few exceptions (Zr, Hf and Th concentrations) in the Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations. The results indicate an increasing of the Th/Al, Y/Al, Zr/Al and Hf/Al ratio values toward the upper units, and no significant variation for Ti/Al and Nb/Al. The Zr and Hf ratios show a marked increase in the coarse-grained sandstones and conglomerates, which may be related to the higher contents of heavy minerals such as zircon, apatite and titanite. The coupled increasing and decreasing in the Ti/Al and Th/Al ratios, respectively, observed in the lower Bambuí strata marks the compositional difference between the Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formations. Anomalies in the Y content have been observed in the glauconitic (sample 14) and reddish siltite (sample 18), and muddy carbonate samples.

The polymictic conglomerate of the Samburá formation shows similar Y/Al (0.38), Nb/Al (0.18) and Th/Al (0.15) in comparison to the Sete Lagoas and Serra de Santa Helena formation samples, while it is observed a relative enrichment in the Ti/Al (0.70), Zr/Al (0.48) and Hf/Al (0.12) ratios relative to the same formations.

Figura 12 - Stratigraphic variation of HFSE/Al ratios.



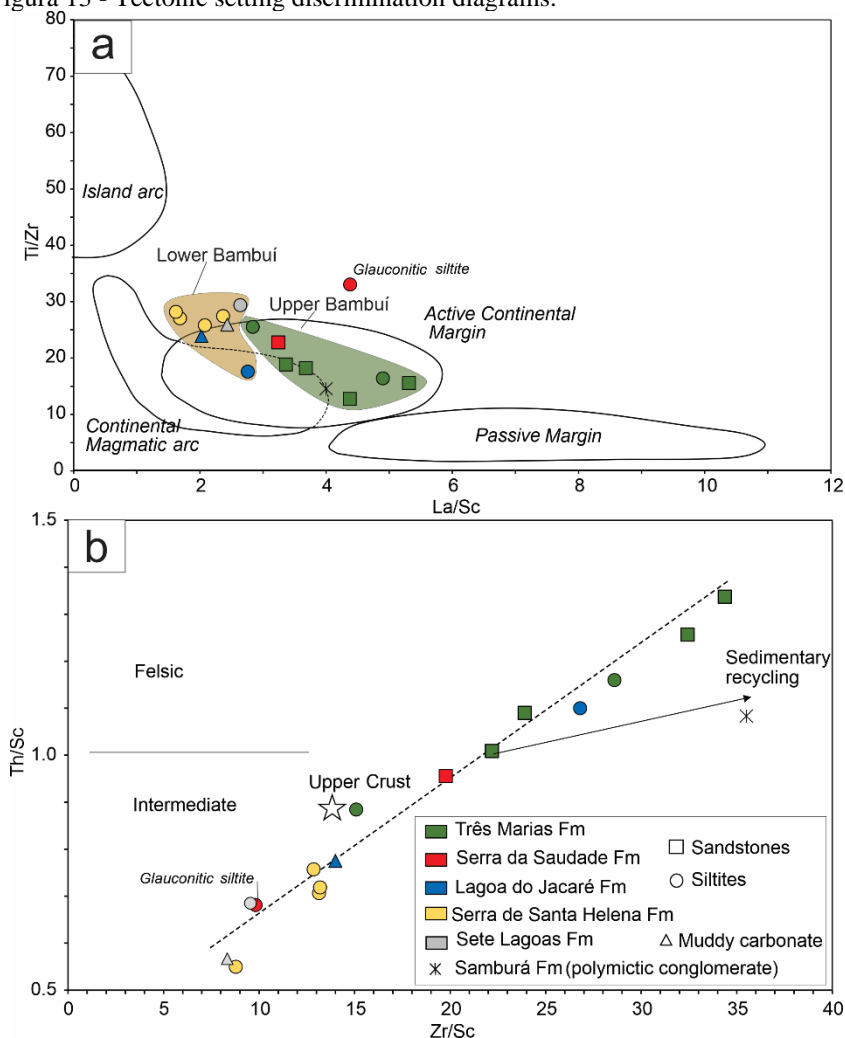
Legenda: The diagrams show relatively felsic more provenance in the upper Bambuí units. Yellow and green vertical bars refer to average ratios respectively for the lower and upper Bambuí units. Upper crust reference (dashed line) from McLennan (2001). Abbreviations: SL= Sete Lagoas; SSH= Serra de Santa Helena; LJ= Lagoa do Jacaré; SS= Serra da Saudade; TM= Três Marias.

Fonte: O autor, 2020.

Trace elements ratios have been applied to discriminate source rocks and tectonic settings (Bathia and Crook, 1986; Condie and Wronkiewicz, 1990; McLennan et al., 1990; McLennan and Taylor, 1991), especially those less soluble and thus not prone to significant fractionation during

sedimentary processes. Following this rationale, the Bambuí rocks were investigated using the Ti/Zr vs La/Sc (Bathia and Crook, 1986) and Th/Sc vs Zr/Sc ratios (McLennan et al., 1990) (Fig. 13a and 13b). The diagram of Fig. 13a indicates an apparent trend from higher Ti/Zr and lower La/Sc ratios in the basal Bambuí Group toward higher La/Sc and lower Ti/Zr toward the uppermost Três Marias Formation. Higher Ti/Zr and lower La/Sc ratios in the lower units indicate sedimentary sources with compositions slightly enriched in Ti/Zr relative to continental magmatic arc and active margin sources. Upward, the Ti/Zr and La/Sc ratios become lower and higher, respectively, fitting the active continental margin field. Similarly, the Th/Sc vs Zr/Sc diagram (Fig. 13a) shows an overall variation from intermediate (Th/Sc between 0.6 and 1.1) to felsic (Th/Sc between 0.9 and 1.3) compositions dominating the basal to upper Bambuí Group samples, respectively. This trend also fits a positive linear correlation, which indicates the increasing contribution of felsic sources during the last evolutionary stages of the Bambuí basin-cycle. Outside of this trend, the polymictic conglomerate of the Samburá Formation shows higher Zr contents relative to Th. Since the conglomerate sample have a felsic composition character (Th/Sc= 1.1), the higher Zr content seems to indicate sedimentary recycling processes.

Figura 13 - Tectonic setting discrimination diagrams.



Legenda: a) Tectonic setting discrimination diagram of Bathia and Crook (1986) showing a compositional trend from the lower to upper Bambuí units. b) Th/Sc vs Zr/Sc diagram (McLennan et al., 1991) discriminating the dominance of intermediate and felsic sources respectively in the lower and upper Bambuí Group.

Fonte: O autor, 2020.

Rare earth elements

The lanthanide elements occur naturally as trivalent cations (with exception of Ce^{+4} and Eu^{+2}) and have similar ionic radii. The rare earth elements are relatively immobile during the sedimentary and post-depositional processes, thus the patterns and concentration of REE in sedimentary rocks are supposed to preserve the same of the respective source rocks. The analyzed siliciclastic samples of the Bambuí Group show variable concentrations of total REE content, ranging from 116.4 to 215.1 ppm (average of 163.6 ppm). Siltites and sandstones have similar REE

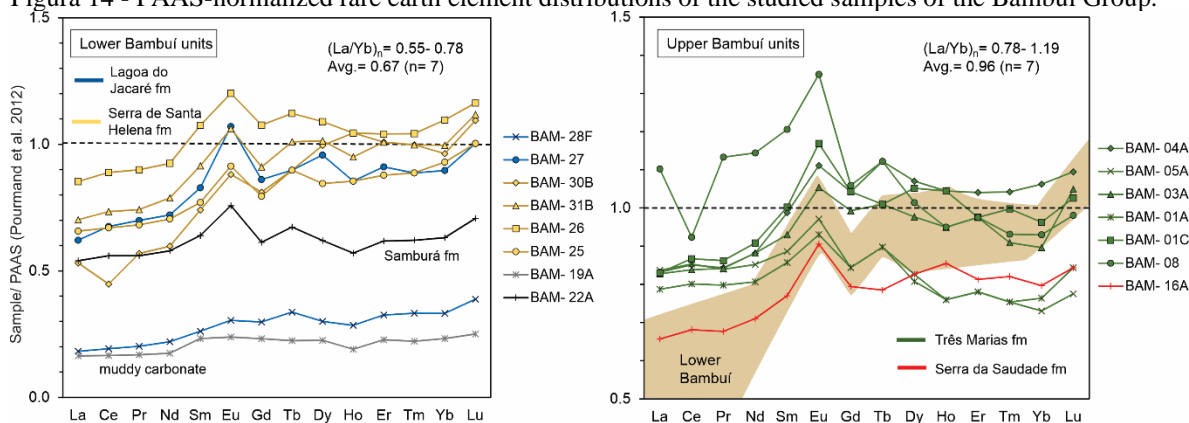
concentrations, between 116.4 and 215.1ppm (mean 163.1ppm), and 167.3 and 183.2ppm (average 176.6ppm), respectively. On the other hand, the conglomerate sample of the Samburá Formation shows a high total REE concentration of 188.6 ppm. No grain size-controlled changes in the rare earth element content have been observed in the studied samples.

The ratio La/Yb ratio is used as an indicator of the proportion between the HREE and LREE content, which is generally normalized by a reference composition. In this study, the sample REE contents were normalized by the post-Archean Australian Shale (PAAS) compositional reference (Pourmand et al., 2012) (Fig. 14). The siltite samples from the lower to middle Bambuí Group show values of normalized $(La/Yb)_n$ of 0.55 to 0.78, revealing a highly variable fractionation between HREE and LREE (ranging from $La_n/Yb_n < 1$ to $La_n/Yb_n > 1$). In the uppermost Serra da Saudade and Três Marias Formations, the analyzed samples display a similar variation, with $(La/Yb)_n$ ratios between 0.78 and 1.19 (average of 0.96, $n=7$). Although a similar pattern has been observed, the $(La/Yb)_n$ ratios indicates a greater fractionation between light and heavy for the lower to middle Bambuí Group (i.e. Sete Lagoas, Serra de Santa Helena and Lagoa do Jacaré Formations) relative to the upper Bambuí strata (i.e., Serra da Saudade and Três Marias Formations). The Samburá Formation conglomerate is less enriched in REE and shows a La_n/Yb_n ratio of 0.86.

Although less enriched in rare earth elements (between 36.6 to 43.8 ppm), muddy carbonate rocks of the Sete Lagoas (Bam-19) and Lagoa do Jacaré Formations (Bam 28F) display $(La/Yb)_n$ ratios relatively similar to those of siliciclastic sedimentary rocks, ranging from 0.76 to 0.59, respectively.

The two anomalous samples, Bam-18 (reddish siltite of the Sete Lagoas Formation) and Bam-14 (glaucconitic siltite of the Serra da Saudade) show higher total REE contents of 307.6ppm and 391.9ppm, respectively. The REE distribution patterns for both samples show a bell-shaped form with anomalous high concentration of the Samarium to Dysprosium, or middle rare earth elements (MREE). The $(La/Yb)_n$ ratios of these samples are, therefore, not considered.

Figura 14 - PAAS-normalized rare earth element distributions of the studied samples of the Bambuí Group.



Legenda: The lower Bambuí units are the Samburá, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena and Lagoa do Jacaré formations, while the upper Bambuí units are the Serra da Saudade and Três Marias formations.

Fonte: O autor, 2020.

3.1.5.2 Sm- Nd isotope geochemistry

Whole-rock Sm-Nd values were measured in 26 samples, which include 20 siliciclastic rocks (14 siltites/ shales, 5 sandstones and 1 conglomerate) and 6 muddy carbonates or calcarenites. From these new data, one was acquired for the Samburá Formation, 6 for the Sete Lagoas Formation, 5 for the Serra de Santa Helena Formation, 4 for the Lagoa do Jacaré Formation, 3 for the Serra da Saudade Formation and 7 for the Três Marias Formation. The Sm-Nd isotopic data are presented as $\epsilon Nd(t)$, in the time of deposition, and $f(Sm/Nd)$, accordingly to definitions in Table 2.

Sandstones and siltite samples show homogeneous isotopic characteristics. In the sandstones (5 samples) the $f(Sm/Nd)$ values vary between -0.44 and -0.38, while $\epsilon Nd(t)$ varies between -8.0 and -6.8. For the Samburá Formation conglomerate these values are -0.40 and -6.7, respectively. Siltites (13 samples) have $f(Sm/Nd)$ between -0.39 and -0.32, and $\epsilon Nd(t)$ between -8.5 and -5.3. One sample of a reddish siltite from the Sete Lagoas Formation (sample 18), on the other hand, shows anomalously low $f(Sm/Nd)$ value of -0.13. The same parameters are similar for carbonate rocks (3 samples of black calcarenites and 2 from muddy carbonates) with $f(Sm/Nd)$ of -0.34 to -0.33, and $\epsilon Nd(t)$ of -6.4 to -4.5. One black calcarenite (sample Bam-34) of the Sete Lagoas Formation exposed in Pains town area (southwestern São Francisco craton) presented anomalous $f(Sm/Nd)$ values of -0.49 and high $\epsilon Nd(t)$ values of -10.5. The $\epsilon Nd(t)$ data show systematic variation

from the lower to upper Bambuí Group. The Sete Lagoas Formation $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ values vary between -10.5 to -4.5 and considerably increases upward, with the Serra de Santa Helena Formation samples exhibiting values between -6.8 and -5.4 and the Lagoa do Jacaré Formation samples values between -5.8 and -5.2. A slight decrease in the $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ values between -8.5 and -6.1 is observed toward the Serra da Saudade and, especially, in the Três Marias Formation. The $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ value of -6.7 in the Samburá conglomerate is within the range observed for the other formations.

As a whole, the Bambuí Group shows depleted mantle model age (T_{DM}) values between 1.87 and 1.49 Ga (mean 1.66, n=25), without significant difference in model age values among formations.

Tabela 3 - New whole-rock Sm-Nd isotopic data for the Bambuí Group. (Continua)

Sample	Lithology	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (Abs 2 σ)	$\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ ¹	$f(\text{Sm}/\text{Nd})$ ²	Tdm (Ga) ³
Três Marias Formation								
Bam-04	Sandstone	6.9	34.4	0.1206	0.511971(4)	-8.0	-0.39	1.71
Bam-05	Sandstone	6.0	32.7	0.1110	0.511997(4)	-6.8	-0.44	1.53
Bam-03	Sandstone	7.1	36.4	0.1170	0.511969(7)	-7.8	-0.41	1.66
Bam-01A	Sandstone	6.5	34.5	0.1136	0.511983(3)	-7.3	-0.42	1.59
Bam-01B	Sandstone	7.2	35.6	0.1217	0.511996(8)	-7.6	-0.38	1.70
Bam-01C	Siltite	7.3	36.6	0.1213	0.512026(11)	-6.9	-0.38	1.64
Bam-08	Siltite	8.6	40.4	0.1294	0.511972(8)	-8.5	-0.34	1.87
Serra da Saudade Formation								
Bam-16	Sandstone	5	24.9	0.1205	0.512031(5)	-6.8	-0.39	1.62
Bam-13	Siltite	10.2	58	0.1061	0.511982(4)	-6.8	-0.46	1.49
Bam-14	Siltite	17.9	86.9	0.1244	0.512080(3)	-6.1	-0.37	1.61
Lagoa do Jacaré Formation								
Bam-28A	Calcarenite	3	14.1	0.1298	0.512111(6)	-5.6	-0.34	1.65
Bam-28C	Calcarenite	0.4	2	0.1318	0.512136(9)	-5.2	-0.33	1.65
Bam-28F	Calcilutite	1.8	8.5	0.1298	0.512125(7)	-5.3	-0.34	1.63
Bam-27	Siltite	5.8	27.9	0.1266	0.512091(5)	-5.8	-0.36	1.63
Serra de Santa Helena Formation								
Bam-30	Sandy Siltite	4.8	22.3	0.1311	0.512067(10)	-6.5	-0.33	1.75
Bam-31	Siltite	6.2	30.6	0.1231	0.512066(6)	-6.0	-0.37	1.61
Bam-25	Slate	4.6	21.4	0.1302	0.512050(10)	-6.8	-0.34	1.76
Bam-26	Siltite	7.6	37.4	0.1221	0.512092(10)	-5.4	-0.38	1.56
AC-340	Slate	3.8	18.6	0.1228	0.512097(5)	-5.4	-0.38	1.56

Tabela 4 - New whole-rock Sm-Nd isotopic data for the Bambuí Group. (Conclusão)

Sete Lagoas Formation

Bam-29	Calcarenites	0.1	0.5	0.1316	0.512074(8)	-6.4	-0.33	1.75
Bam-34	Calcarenites	0.1	0.3	0.1008	0.511754(8)	-10.5	-0.49	1.71
AC-650	Shale	3.5	17.6	0.1212	0.511926(10)	-8.6	-0.38	1.79
AC-655	Shale	1.4	6.3	0.1334	0.512030(8)	-7.4	-0.32	1.86
Bam-19	Impure carbonate	1.3	6.1	0.1314	0.512170(8)	-4.5	-0.33	1.58
Bam-18	Siltite	18	63.4	0.1716	0.511958(3)	-11.5	-0.13	3.47

Samburá Formation

Bam-22	Conglomerate	4.6	23.5	0.1180	0.512010(10)	-6.7	-0.40	1.61
--------	--------------	-----	------	--------	--------------	------	-------	------

Legenda: Values for CHUR (chondritic reservoir) normalization: $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$; $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ (Jacobsen and Wasserburg, 1984). Decay constant $\lambda_{\text{Sm}} = 6.54 \times 10^{-12} \text{ yr}^{-1}$ (after Lugmair and Marti, 1977).

$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{(T)} = ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{measured}} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \cdot (e^{\lambda T} - 1)$; $\epsilon_{\text{Nd}} = 10^4 [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{sample}} / ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}) - 1]$ (De Paolo and Wasserburg, 1976).

$f(\text{Sm}/\text{Nd}) = (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{sample}} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}) / ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}$; Depleted Mantle model age from De Paolo (1981): $\epsilon_{\text{Nd}(t)} = 0.25t^2 - 3t + 8.5$, where t is time.

Depositional time (t) is considered 550 Ma for Samburá, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena and Lagoa do Jacaré fm (Paula-Santos et al., 2015) and 520 Ma for Serra da Saudade and Três Marias fm (Moreira et al., 2020; Tavares et al., 2020).

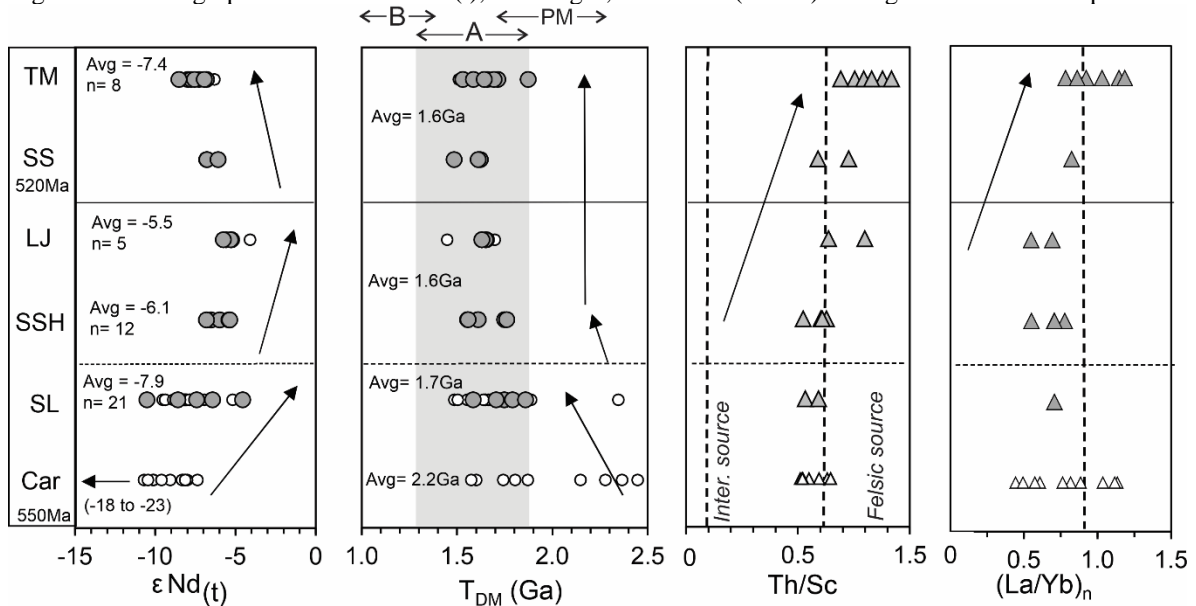
Fonte: O autor, 2020.

3.1.6 Discussions

3.1.6.1 The combined Sm- Nd isotope and lithogeochemical signature of the Bambuí strata

The isotope parameters $\epsilon\text{Nd}(t)$ and the Nd model ages (T_{DM}) of the studied samples were plotted according to the Bambuí stratigraphy together with Th/Sc and $(\text{La}/\text{Yb})_n$ ratios, as well as similar data from Bambuí rocks extracted from the literature (Fig. 15). For comparison, we have indicated the range of T_{DM} model ages of three possible sedimentary sources exposed in the marginal orogens, which may overlap: i) the Goiás magmatic arc and syn to post-orogenic granites of the Brasília orogen (Pimentel and Fuck, 1992; Viana et al., 1995; Rodrigues et al., 1999; Pimentel et al., 2000; Laux et al., 2005; Navarro et al., 2013; Navarro et al., 2017); ii) the Rio Doce magmatic arc and syn to post- collisional granites of the Araçuaí segment of the Araçuaí-Ribeira Orogenic System (Nalini et al., 2000; Martins et al., 2004; Novo et al., 2010; Heilbron et al., 2013; Tedeschi et al., 2016; Gonçalves et al., 2016; De Campos et al., 2016); iii) and the Meso to Neoproterozoic passive margin sedimentary successions of the Canastra, Araxá, Vazante and Macaúbas groups (Seer et al., 2001; Silva et al., 2006; Rodrigues, 2008; Pimentel et al., 2001; Santana, 2011; Babinski et al., 2012; Rodrigues et al., 2012; Carvalho et al., 2019).

Figura 15 - Stratigraphic variation of $\epsilon\text{Nd}(t)$, TDM ages, Th/Sc and $(\text{La}/\text{Yb})_n$ along the Bambuí Group.



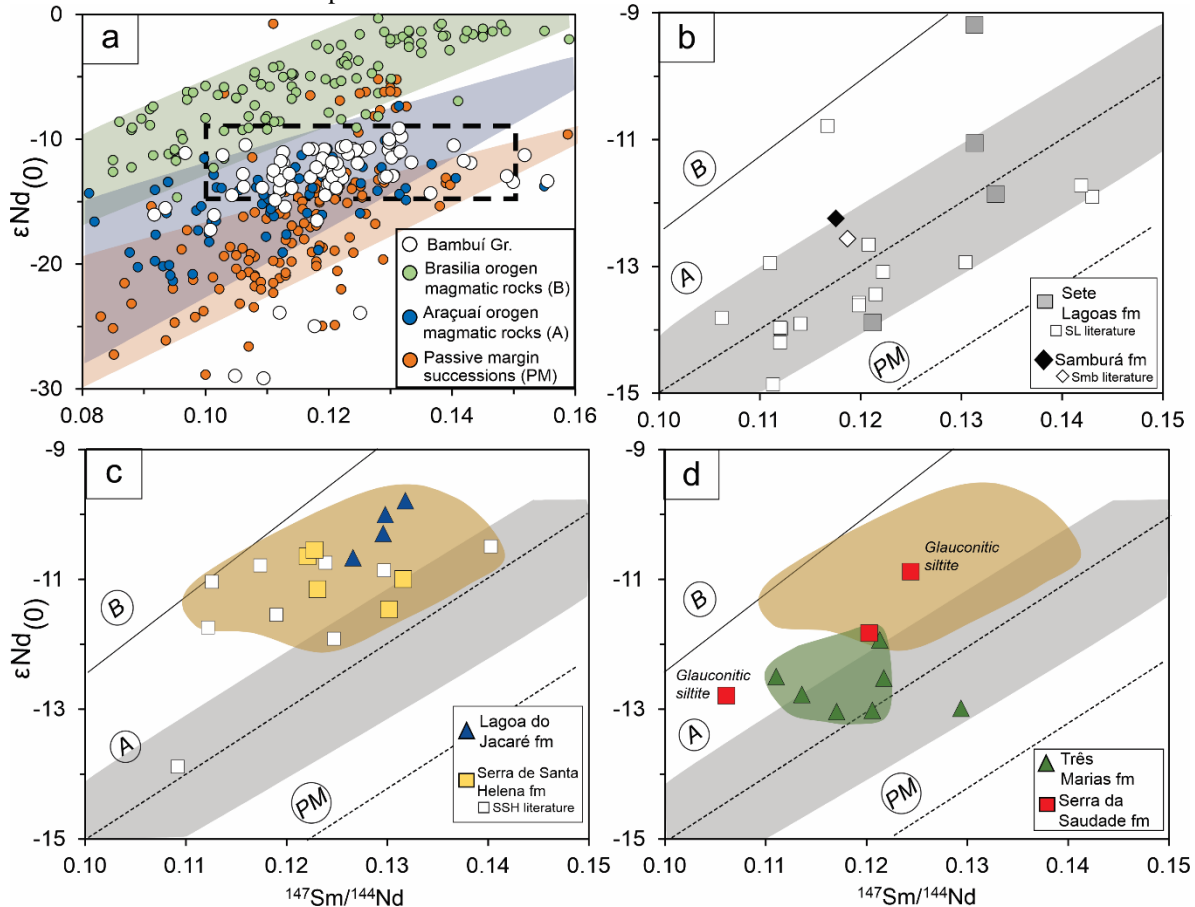
Legenda: Grey circles represent the data acquired in this work and white circles are from the literature. Colored vertical bars indicate the range of T_{DM} for potential source rocks: B= Brasília orogen magmatic rocks; A= Araçuaí orogen magmatic rocks; PM= Passive margin sedimentary successions (see text for references). Literature data from: Sato (1998), Rodrigues (2008), Kuchenbecker et al. (2013), Paula-Santos et al. (2015), Uhlein et al. (2016), Uhlein et al. (2017), Paula-Santos and Babinski (2018). Abbreviations: Car = Carrancas fm; SL= Sete Lagoas fm; SSH= Serra de Santa Helena fm; LJ= Lagoa do Jacaré fm; SS= Serra da Saudade fm; TM= Três Marias fm.

Fonte: O autor, 2020.

Remarkable variations in the $\epsilon\text{Nd}(t)$ values are observed between the Carrancas and the Sete Lagoas formations, and between the Sete Lagoas and the middle to upper Bambuí successions. The isotopic signatures change from highly negative $\epsilon\text{Nd}(t)$ values and T_{DM} between 1.6 to 2.5 Ga in the Carrancas Formation to less negative $\epsilon\text{Nd}(t)$ signals and younger T_{DM} ages in the overlying Sete Lagoas Formation (e.g., Uhlein et al., 2016, Paula Santos and Babinski, 2018). This formation shows relatively less negative $\epsilon\text{Nd}(t)$ values and model ages between 1.5 and 2.0 Ga. These values are highly scattered plot within the expected range for both the passive margin sedimentary successions and the Araçuaí orogen magmatic rocks. The only available data for the Samburá Formation conglomerates show $\epsilon\text{Nd}(t)$ of -6.7 and T_{DM} of 1.61 Ga, values close to the average observed in the Sete Lagoas Formation. Upward, in the Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade and Três Marias formations, the T_{DM} ages assume values around 1.7 Ga with the upper units completely within the range of the Araçuaí orogen magmatic rocks. In these strata, only one sample overlapped the lower range expected for the passive margin successions. No units plotted within the Brasília orogen magmatic rocks field.

The $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ vs $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ diagram (Fig. 16) can be used to detect the alignments within the data, and to compare them with the distribution of potential source rocks. The comparison between the isotopic signature of sedimentary units and reference fields from literature data of potential sources have been viewed as a strong tool in sedimentary provenance analyses (Ball and Farmer, 1998). The alignments of data in the diagram can be firstly associated with mixing lines (Allègre and Dars, 1966; McDaniel et al., 1984), representing different proportions of mixing between two isotopic reservoirs. In this case, the slope of the straight line cannot be a priori related to the time of rock formation, but to both isotope and Sm/Nd ratios of the source rocks. Therefore, we have compared the isotopic data acquired in this study with possible sedimentary sources for the Bambuí Group that are exposed both in the Brasília and Araçuaí orogens, to the west and east, respectively (Fig. 10A).

Figura 16 - The $\epsilon\text{Nd}(0)$ vs $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ diagrams for reference crustal isotopic reservoirs and their relation to the Bambuí Group units.



Legenda: a) Reference fields: B- Brasília orogen magmatic rocks; A- Araçuaí orogenic system magmatic rocks; and PM- Passive margin sedimentary successions. b) The samples of the Sete Lagoas Formation show Sm-Nd isotopes within the passive margin sedimentary succession field overlapping the Araçuaí orogen magmatic rocks range. Samburá Formation plots outside this alignment with a less negative $\epsilon\text{Nd}(0)$ values. c) Serra de Santa Helena and Lagoa do Jacaré formations plot inside the Araçuaí orogen field, showing less negative $\epsilon\text{Nd}(0)$ values than the underlying Sete Lagoas Formation d) The samples from the Serra da Saudade Formation and Três Marias Formation show isotopic characteristics similar to the Serra de Santa Helena and Lagoa do Jacaré formations, but most of the samples from the uppermost formation show more negative ϵNd and lower Sm/Nd ratios.

Fonte: O autor, 2020.

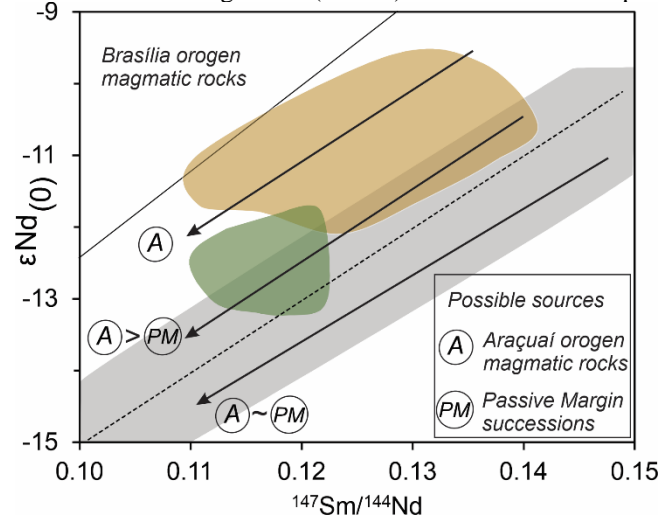
The Bambuí Group yields $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ values varying between 0.0917 and 0.1430 ($f = -0.55$ to -0.33), and relatively homogenous $\epsilon\text{Nd}(0)$ ranging between -17 and -11 . These data correlate with those of the Araçuaí orogen magmatic arc rocks and post-collisional granites, which correspond to a more juvenile source relative to the field of metasedimentary rocks of the passive margin successions (Fig. 16a).

The Sete Lagoas Formation shows an alignment of data in the $\epsilon\text{Nd}(0)$ vs $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ diagram. The plots occur within the superposition of the fields of the passive margin sedimentary

successions and the Araçuaí orogen magmatic rocks, with scattering towards the less negative $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ fields (Fig. 16b). Because of the data following a major trend in the superposition of these fields, it is not possible to differentiate the source compositions. Therefore, the Sete Lagoas Formation can be interpreted as a mixture between both isotope reservoirs (Fig. 17). The scattered less negative $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ samples indicate the occurrence of relatively more juvenile source rocks to the provenance of the Sete Lagoas Formation. This more juvenile signal is correlated to the Araçuaí orogen magmatic rocks isotopic composition. The Samburá Formation sample shows $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ in the same range observed for the Sete Lagoas Formation in the Araçuaí orogen magmatic rocks field. Nevertheless, available paleocurrent data and stratigraphic analysis (Castro and Dardenne, 2000; Uhlein et al., 2017) demonstrate this formation was mostly sourced by units exposed in the Brasília orogen.

A change in the isotope signal is observed in the Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade and Três Marias Formation. These formations show less negative $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ relative to the Sete Lagoas Formation, and are mostly located within the field of the Araçuaí orogen magmatic rocks in the $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ vs $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ diagram (Fig. 16 c and d). The diagram in figure 17 shows at least two different mixing trends in the Bambuí Group marked by the alignment of the Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade and Três Marias formations data. The first mixing trend occurs within the data of the Serra de Santa Helena and Lagoa do Jacaré formations. It defines the major contribution of relatively juvenile sources compatible with the Araçuaí orogen magmatic rocks. The second mixing trend occurs by the alignment of data of the Serra de Santa Helena, Serra da Saudade and Três Marias. This line also overlaps the composition of some of the samples from the Sete Lagoas and Samburá formations. It can be interpreted either as i) variation of composition of the source rocks during the Araçuaí orogen development, i.e. contribution of magmatic arc derived rocks relative to the syn- to post-collisional rocks in the same orogen development; ii) a recycling of the passive margin sedimentary rocks. Both interpretations seem realistic considering the highly dynamic orogenic conditions, which also influence the development of adjacent foreland basin systems (e.g., DeCelles and Giles, 1996; Catuneanu, 2019). Although small variations of these different processes cannot be distinguished by the Sm-Nd isotope method, the mixing trends present a good constraint to the upper crust isotope and geochemical composition through space and time.

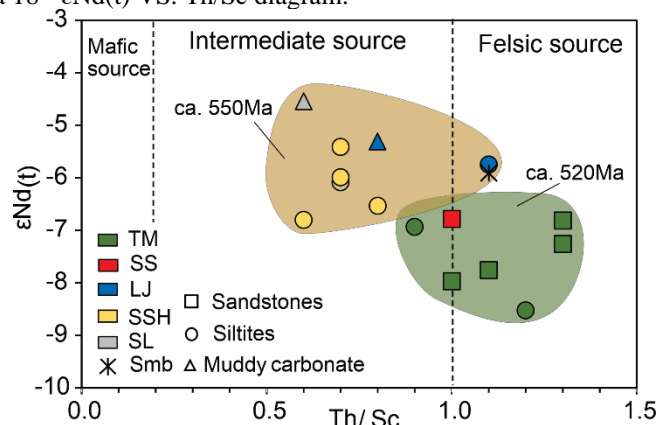
Figura 17 - Possible mixing trends (arrows) in the Bambuí Group.



Legenda: The mixing lines are marked by alignment of the data in the $\epsilon Nd_{(0)}$ vs. $^{147}Sm/^{144}Nd$ diagram and relative contribution of different sources. The colored forms refer to the data plotted in figure 10.

Fonte: O autor, 2020.

Both trace element ratios Th/Sc and $(La/Yb)_n$ support a different composition of the source rocks towards the upper formations of the Bambuí Group (Fig. 15). The Carrancas (Uhlein et al., 2016), Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré and Serra da Saudade formations show Th/Sc ratios concentrated between 0.5 and 0.8 (with one value of 1.1). This range of Th/Sc ratios is interpreted as a major influence of mafic to intermediate sources. For the same formations, $(La/Yb)_n$ ratios between 0.5 and 0.8 indicate enrichment in HREE relative to LREE. On the other hand, the Três Marias Formation shows a major alteration of the Th/Sc and $(La/Yb)_n$ ratios of 0.9 to 1.3 and 0.8 to 1.1, respectively, which is interpreted as reflecting a predominance of felsic sources (Fig. 18). The upward increasing in the Th/Sc ratio is proportional to the Zr/Sc ratio in the upper Bambuí units (Fig. 7b) which indicates a compositional change of the source rocks during the deposition of the upper Bambuí units, prior to the recycling of older sedimentary. The Samburá Formation has Th/Sc and $(La/Yb)_n$ ratios of 1.1 and 0.83, respectively. These values also indicate predominance of a felsic source, but the compositional change may be related to recycling of older sediments (Fig. 13b).

Figura 18 - $\epsilon\text{Nd}(t)$ VS. Th/Sc diagram.

Legenda: The diagram indicates more felsic source input during the deposition of the upper sections of the Bambuí Group.

Fonte: O autor, 2020.

3.1.6.2. Implications for sedimentary provenance and evolution of the Bambuí basin

The isotope and lithogeochemistry data presented in this study addresses three major changes in the provenance pattern during the Bambuí Group deposition.

Sm-Nd isotope and detrital zircon data indicate for the Carrancas Formation mostly local sedimentary sources associated with Archean-Paleoproterozoic basement assemblages and Proterozoic covers of the craton (Uhlein et al., 2016; Paula-Santos and Babinski, 2018). Upward, the Sete Lagoas Formation exhibits the first evidence of orogenic sources shedding the Bambuí basin, as indicated by the less negative values of $\epsilon\text{Nd}(t)$ and the increasing presence of Ediacaran to Cambrian detrital zircons (Rodrigues, 2008; Paula-Santos et al., 2015; Paula-Santos and Babinski, 2018). The mixed source pattern between the passive margin sedimentary successions of the Brasília orogeny and the relatively more juvenile magmatic rocks of the Araçuaí orogen indicates that both orogenic fronts acted as sources in the early stages of the Bambuí basin-cycle. The maximum depositional age of 557 Ma in the middle section of the Sete Lagoas Formation (Paula-Santos et al., 2015) shows that this sedimentation occurred after the late low-temperature deformational episodes of the Brasília orogeny, which took place around 570 Ma (Valeriano et al., 2000).

The Samburá Formation also demonstrates the relation with a more juvenile source input with very similar $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ and T_{DM} to the basal section of the Bambuí Group, but different source rocks compositions ($\text{Th}/\text{Sc}>1$). Available sedimentary provenance and stratigraphic analyses indicate that the major sources for this unit within the foredeep depocenter were located in the Brasília orogen and were specially associated with its metamorphic passive margin strata (e.g., Castro and Dardenne, 2000; Uhlein et al., 2017). In this regard, our data seem to reveal either unknown and relatively more juvenile felsic sources in the Brasília orogen or the input of the Araçuaí orogen sources in this portion of the basin.

The tectono-stratigraphic architecture of the Bambuí Group in the southern São Francisco craton indicates multiple tectonic-related cycles of forebulge uplift and migration (Reis and Suss, 2016). In this view, the Ediacaran edification of the Araçuaí orogen would have converted the Sete Lagoas basement high from an erosional area into a shallow marine depocenter (Reis et al., 2017b). A new orogenically-induced episode of forebulge subsidence might have caused the subsequent deposition of the pelite-dominated Serra de Santa Helena Formation (Reis et al., 2017b). Afterward, the Bambuí basin achieved an isolated configuration showing a restricted configuration disconnected from the global oceans and under the increasing influence of marginal orogenic sources (Caetano-Filho et al., 2019; Paula-Santos et al., 2020). Our new isotopic data support this tectono-sedimentary evolution also corroborating the remarkable contribution of sources from the Araçuaí orogen (Rio Doce arc and post-collisional granites) (e.g., Paula-Santos et al., 2017; Kuchenbecker et al., 2020). It might have contributed with the relative increasing of the ϵNd values and the slight decreasing of the T_{DM} ages from the Sete Lagoas toward the Lagoa do Jacaré formations (Fig. 15).

Due to a faster rate of mechanical erosion, young and high mountain ranges represent major sedimentary sources for the syn-orogenic basins relative to older continental rocks (Allègre and Rousseau, 1984). In foreland basin systems, it is specially observed within foredeep depocenters and/or during overfilled basin stages (e.g., Reis et al., 2017b). During advanced orogenic stages it may induce the rebalance between juvenile sources related to some types of orogenic-related magmatic rocks and evolved sedimentary sources involved in the orogenic front. Therefore, in the southern portion of the São Francisco (and West Congo) craton, the Sm-Nd isotope and geochemical characteristics of the siliciclastic rocks of the Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré,

Serra da Saudade and Três Marias formations suggest a change in the upper crust toward a more isotopic juvenile composition following the evolution of the Araçuaí- Ribeira Orogenic System.

Recent geochronological studies indicate that the sedimentation of the Serra da Saudade and Três Marias formations spanned the Cambrian (Moreira et al., 2020; Tavares et al., 2020) coeval with the 530 to 490 Ma post-collisional granites in the Araçuaí orogen (De Campos et al., 2016 and references therein). The changes observed in the Sm-Nd system of samples from the uppermost Serra da Saudade e Três Marias formations seem to indicate provenance changes associated with the last evolutionary stages of the Bambuí basin system, when it has achieved an overfilled condition (Reis et al., 2017a). The upward decreasing in the ϵNd values and the slight increase on the T_{DM} model ages (Figs. 15, 16 and 17) could reflect both the increasing contribution of syn to post-orogenic granites (Kuchenbecker et al., 2020; Rossi et al., 2020) and of preexisting basin-fill strata deformed in the marginal orogens (Chiavegatto, 1992). On the other hand, the predominance of feldspathic and lithic sandstones and a substantial change in the overall trace element contents toward intermediate to felsic compositions are observed in the Serra da Saudade and Três Marias formations (Figs. 17 and 18), would indicate a predominance of felsic sources, probably those from the syn- to post-collisional granites of the Araçuaí orogen.

3.1.7 Conclusion

The results of our litho-geochemistry and isotopic studies are compatible with the more recent tectono-stratigraphic view of the Bambuí basin (SE Brazil), as revealed by the detrital zircon U-Pb ages, seismic and sedimentological data, building a more solid multi-proxy investigation for the Bambuí foreland basin. Our data record important paleotectonic changes from its early to late evolutionary stages.

The Sete Lagoas Formation indicates the first input of orogenic and relatively more juvenile sources into the Bambuí basin, in comparison with the basal conglomeratic deposits of the Carrancas Formation. The carbonate-dominated sedimentary successions of the Sete Lagoas Formation record an isotopic mixture between relatively juvenile magmatic rocks from the Araçuaí orogen, located eastwards, and the recycled units from passive margin successions of the Brasília

orogen, in the western side. This is indicated by the $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ versus $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ diagram and scattered T_{DM} values between 1.5 and 2.0 Ga. We support, therefore, that the basal sections of the Bambuí Group already had significant contribution from the Araçuaí orogenic front. It seems to reflect the imposed flexural subsidence induced by the eastern orogenic system, which, combined with that driven by the Brasília orogenic belt, culminated with the drowning of the Sete Lagoas forebulge and the installation of the homonymous carbonate ramp.

The transition from the Sete Lagoas Formation carbonate ramp to the siliciclastic-dominated sedimentation marked by the Serra de Santa Helena Formation was accompanied by a major provenance change in the Bambuí Group. The $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ versus $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ diagram points out to relatively more juvenile sources for the Serra de Santa Helena and Lagoa do Jacaré formations, which is compatible with the Rio Doce magmatic arc rocks from the Araçuaí orogeny. This is followed by more restricted T_{DM} model age values of 1.5 to 1.7 Ga, $(\text{La}/\text{Yb})_n$ ratios between 0.55 and 0.78, and Th/Sc ratios (0.5 to 0.8) related to an intermediate composition of the source rocks.

Another major change in provenance signature pattern has been observed in the upper Bambuí units, represented by the Serra da Saudade and Três Marias formations. The development of the shallow marine to transitional systems that led to the deposition of the uppermost unit contrasts with previous pelite-dominated systems. This contrast is well-marked by higher Th/Sc (0.7 to 1.3) and La/Yb (0.8 to 1.1) ratios, and by lower $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ratios (0.111 to 0.1294), indicating more felsic provenance compared with the more mafic to intermediate provenance patterns of the underlying units. Coupled to the more negative $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$, it might represent the increasing contribution of syn- to post-collisional granites of the Araçuaí orogen, as well as recycling of preexisting basin-fill strata deformed within the marginal Neoproterozoic orogens. This rebalance of the provenance patterns seems to have resulted from the reconfiguration of the foreland basin system during its latest and overfilled stage. Besides revealing important elements in the sedimentary evolution of an ancient and partially confined foreland system, our data also demonstrate that even minor changes recorded by the Sm-Nd system might be used as a reliable tool on investigating sedimentary systems as a whole.

3.2 Isótopos de Sr

The isotopic system of the Rb and Sr is based on the decay of the radioactive isotope ^{87}Sr to the radiogenic ^{87}Sr at a rate of $1.42 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ (Aldrich et al., 1953). The ratios are normalized by the stable isotope ^{86}Sr .

Values of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ are very variable. High values are obtained by major fractionation of Rb and Sr. The higher Rb/Sr content, higher is the isotopic ratio measured. This fractionation is not necessarily relate to provenance factor. Actually, Rb tends to be absorbed by clay minerals, while Sr are leachable. Higher values of Rb/Sr occurs in siltites in comparison to same formation sandstones.

Anomalous values of 0.91668 in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of sample Bam-18, must not be considered. Glauconitic siltites show very high isotope ratio. This may be caused by post depositional enrichment in K element.

Tabela 5 - Rb and Sr content and measured $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratios. (Continua)

Sample	Lithology	Formation	Rb (ppm)	Sr (ppm)	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}^*$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (Abs 2σ)
Bam-04A	Sandstone		88	182	1.577(23)	0.727915(6)
Bam-05A	Sandstone		59	111	1.543(34)	0.726872(12)
Bam-08	Siltite		83	57	4.238(29)	0.753669(6)
Bam-03A	Sandstone	Três Marias	85	115	2.147(24)	0.732611(7)
Bam-01A	Sandstone		59	73	2.348(36)	0.734251(9)
Bam-01B	Sandstone		-	-	-	0.761721(10)
Bam-01C	Siltite		123	101	3.542(18)	0.746382(7)
Bam-16A	Arcose		75	263	0.827(27)	0.718786(5)
Bam-13	Siltite	Serra da Saudade	-	-	-	0.766953(24)
Bam-14	Siltite		223	69	9.421(17)	0.770191(7)
Bam-28F	Calcilutite	Lagoa do Jacaré	27	1376	0.057(74)	0.707967(13)
Bam-27	Siltite		75	116	1.877(27)	0.728050(14)
Bam-30	Siltite		116	65	5.192(22)	0.750020(9)
Bam-31	Siltite	Serra de	128	161	2.309(16)	0.732661(11)
Bam-25	Slate	Santa Helena	137	313	1.270(15)	0.720951(21)
Bam-26	Siltite		110	87	3.763(20)	0.745232(14)
AC-340	Slate		-	-	-	0.721995(9)

Tabela 6 - Rb and Sr content and measured $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic ratios. (Conclusão)

AC-650	Shale		-	-	-	0.739835(1)
AC-655	Shale	Sete	-	-	-	0.720460(9)
Bam-19	Siltite	Lagoas	23	194	0.344(87)	0.712802(5)
Bam-18	Siltite		354	45	23.272(52)	0.921668(15)
Bam-22A	Conglomerate	Samburá	55	92	1.736(37)	0.739835(1)

Legenda: * Calculated $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ratio. The absolut error was calculated for a detection limit of 2 ppm in the Sr and Rb content.

Fonte: O autor, 2020.

4 DISCUSSÕES

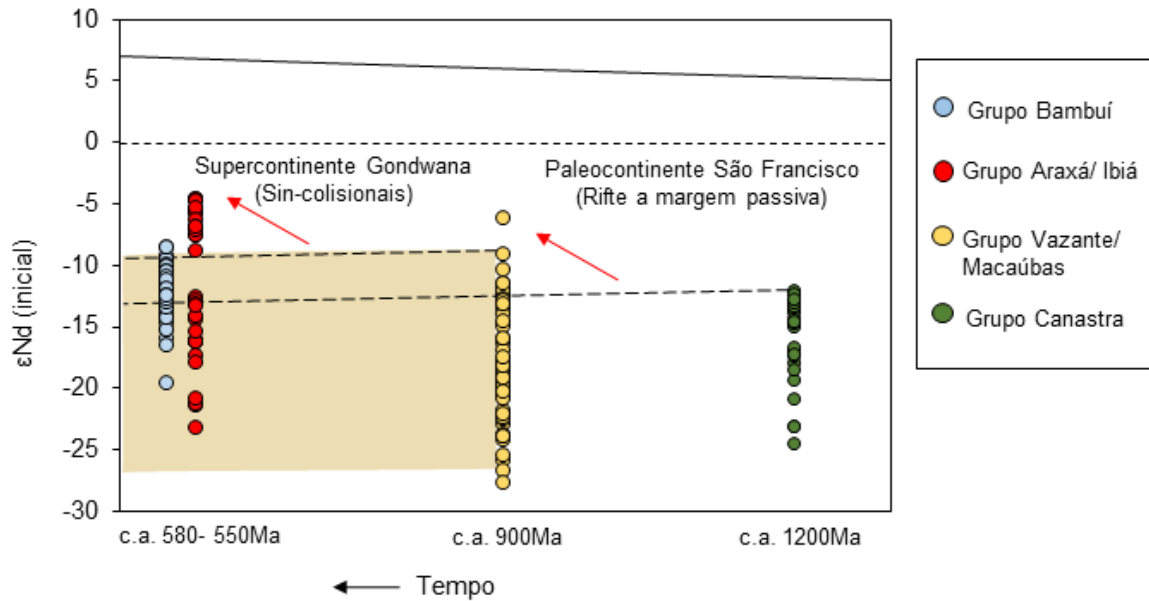
4.1 Homogeneidade isotópica do Grupo Bambuí: um caso de estudo

A quantidade de dados isotópicos medidos nas rochas sedimentares do Grupo Bambuí vem aumentando a cada ano em diversos trabalhos que apontam sua utilidade para a proveniência sedimentar (Paula-Santos et al. 2015; Uhlein et al., 2017; Paula Santos e Babinski, 2018; Caxito et al., 2018; e este trabalho). Comparações apresentadas por Pimentel et al. (2001) entre as assinaturas isotópicas do Grupo Bambuí e depósitos sedimentares e metassedimentares mais antigos já traziam percepções interessantes sobre a homogeneidade isotópica do Grupo Bambuí, e como ela é reprodutível independentemente da localização geográfica ou temporalidade do depósito (ver Rodrigues, 2008; Paula-Santos et al. 2015; Paula Santos e Babinski, 2018; Caxito et al., 2018). No entanto, este trabalho não foi retomado, apesar do crescimento do volume de informações. Este capítulo tem por objetivo introduzir uma retomada de comparações entre reservatórios isotópicos e como estes reservatórios trazem informações sobre a evolução isotópica das rochas em dois contextos tectônicos completamente diferentes: no paleocontinente São Francisco e no supercontinente Gondwana. A partir dessa simplificação do contexto geotectônico temos dois agrupamentos de depósitos sedimentares: i) depósitos de rifte intracontinental a margem Passiva (c.a. 900 a 1200Ma), relacionados aos grupos Canastra, Vazante e Macaúbas (Seer et al., 2001; Silva et al., 2006; Rodrigues, 2008; Pimentel et al., 2001; Santana, 2011; Babinski et al., 2012; Rodrigues et al., 2012; Carvalho et al., 2019); ii) depósitos sin a pós colisionais (em relação a aglutinação do continente Gondwana entre c.a. 630 e 500Ma) relacionados aos grupos Araxá, Ibiá e Bambuí (Sato, 1998; Pimentel et al., 2001; Rodrigues, 2008; Kuchenbecker et al., 2013; Paula-Santos et al., 2015; Paula-Santos e Babinski, 2018; Caxito et al. 2018).

Os dados de $\epsilon\text{Nd}_{\text{inicial}}$, isto é, no tempo de deposição indicam que os depósitos do Grupo Canastra e dos grupos Vazante e Macaúbas, relacionados a riftes intracontinentais e margem passiva do paleocontinente São Francisco possuem alta dispersão com valores de -12 a -25; e -6 a -28, respectivamente. Os depósitos sin- colisionais dos grupos Araxá e Ibiá apresentam tipicamente valores bimodais entre -4.5 e -8.7, e entre -12.7 e -23. O Grupo Bambuí, representativo de depósitos

pós-colisionais (ante-país em relação ao supercontinente Gondwana) apresenta parâmetros $\epsilon Nd_{inicial}$ relativamente homogêneos com valores entre -8.7 e -16.6. Pelo gráfico temporal na figura 19, nota-se que a evolução dos isótopos $^{143}Nd/^{144}Nd$ em relação ao reservatório CHUR ocorre de maneira quase contínua ente os depósitos tipicamente de margem passiva (c.a. 900Ma) e o Grupo Bambuí (c.a. 550Ma) o que indica que não há diferença da composição isotópica entre os reservatórios correspondentes aos dois depósitos. Além disso, mudanças de $\epsilon Nd_{inicial}$ sugestivas de crescimento crustal só são identificadas entre 1200 e 900Ma, que estão relacionadas a magmatismos intracontinentais (Carvalho et al., 2019), e entre 900 e 580 Ma, relacionadas aos eventos acrescionários no orógeno Brasília (Pimentel et al., 2001).

Figura 19 - Variação do $\epsilon Nd_{inicial}$ em relação ao tempo de deposição.



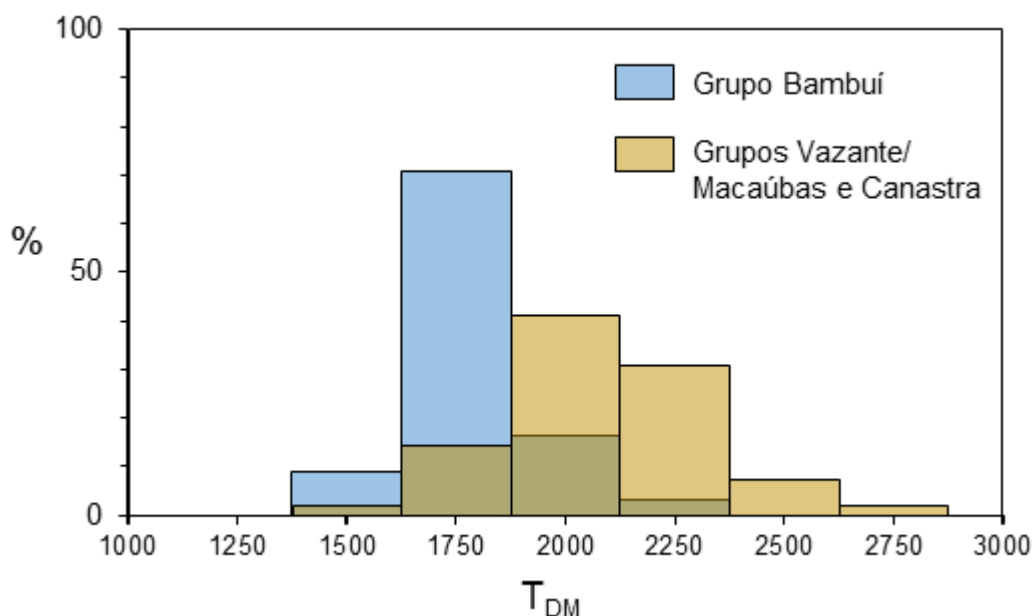
Legenda: O retângulo amarelo mostra a variação dos valores de ϵNd em relação ao tempo do Grupo Vazante/ Macaúbas e como este pode ser usado para explicar os valores aparentes do Grupo Bambuí. As setas vermelhas indicam épocas e variações de $\epsilon Nd_{inicial}$ sugestivas de eventos de crescimento crustal. (Ver referências dos dados no texto).

Fonte: O autor, 2020.

Os valores de T_{DM} (idade modelo em relação ao reservatório do manto depletado) também demonstram uma distribuição de idades que diferenciam o Grupo Bambuí das rochas sedimentares depositadas no contexto do paleocontinente São Francisco (figura 20). Primeiro, pela média de valores no Grupo Bambuí indicar uma idade de fracionamento mais jovem do que as rochas sedimentares mais antigas e, depois, por apresentar uma considerável homogeneidade com cerca

de 80% dos valores entre 1750 e 2000Ma. Apesar de valores T_{DM} ocorrerem dentro do mesmo intervalo para as rochas sedimentares dos grupos Vazante/ Macaúbas e Canastra, eles se mostram mais expressivos entre 2000 e 2250Ma.

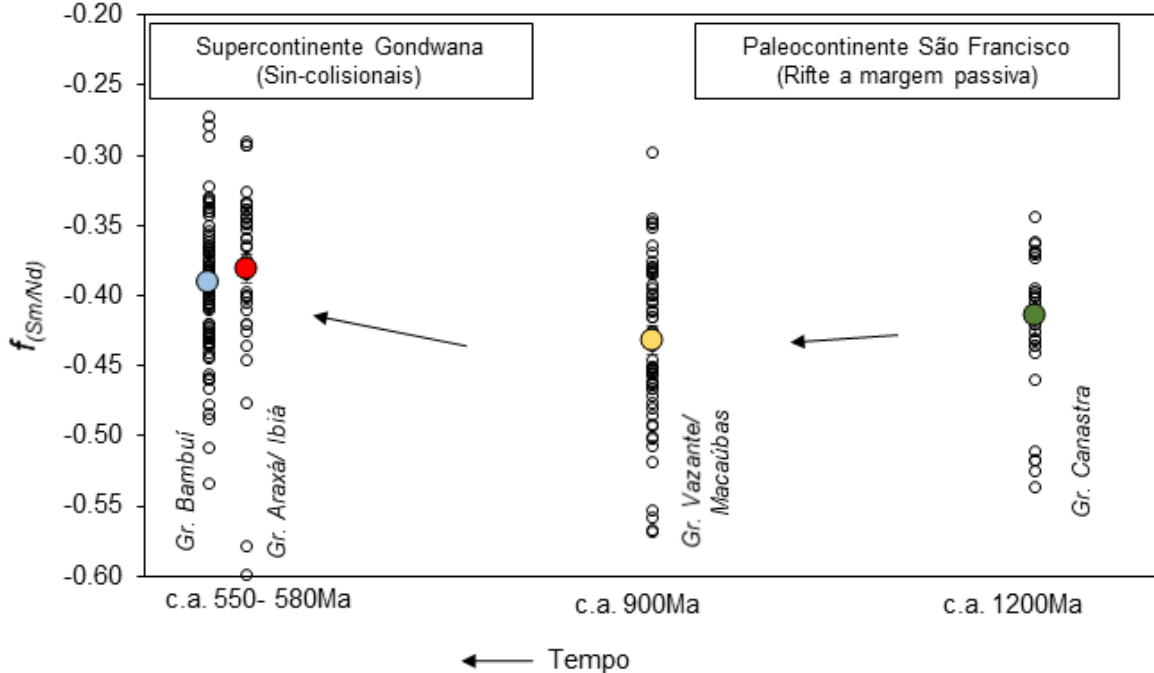
Figura 20 - Histograma de idade modelo T_{DM} .



Legenda: Histograma de valores T_{DM} do Grupo Bambuí (n=99) e rochas sedimentares mais antigas (n=97), demonstrando relativa homogeneidade e idades mais jovens de fracionamento para o Grupo Bambuí.

Fonte: O autor, 2020.

A homogeneidade isotópica observada no Grupo Bambuí foi interpretada como um fator relacionado à orogênese e a misturas bem definidas entre as áreas fontes (Pimentel et al., 2001). É preciso, no entanto, notar que os valores de $f_{(Sm/Nd)}$ apresentam significativa variação entre os depósitos associados ao paleocontinente São Francisco e os depósitos relacionados ao supercontinente Gondwana (figura 21). O Grupo Canastra apresenta média de $f_{(Sm/Nd)}$ igual a -0.41 (n=30); os grupos Vazante e Macaúbas possuem média de -0.43 (n=67); já os grupos Araxá e Ibiá possuem média de -0.38 (n= 40); e o Grupo Bambuí possui média de -0.39 (n=99). Ocorre, portanto um significativo aumento da razão $^{147}Sm/^{144}Nd$ nos depósitos sin a pós colisionais. Essa mudança composicional entre os depósitos de idades distintas pode causar diferenças significativas nos cálculos dos modelos de fracionamento.

Figura 21 - Variação do $f_{(Sm/Nd)}$ em relação ao tempo de deposição.

Legenda: Valores de $f_{(Sm/Nd)}$ sinalizam significativo aumento da razão $^{147}Sm/^{144}Nd$ nos depósitos sin a pós colisionais referentes à aglutinação do supercontinente Gondwana. Os círculos coloridos indicam a média dos valores para cada tempo de deposição.

Fonte: O autor, 2020.

4.2 Características do par isotópico Nd-Sr nas rochas siliciclásticas do Grupo Bambuí

Isótopos radiogênicos de estrôncio foram historicamente utilizados em sedimentos siliciclásticos do Grupo Bambuí como ferramentas para datação direta da idade de deposição (Bonhomme, 1976), mas nunca em relação à proveniência sedimentar. Isso se deve ao fato de os isótopos $^{87}Rb/^{86}Sr$ serem significativamente fracionados durante os processos metamórficos e sedimentares, alterando a razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ da rocha fonte original.

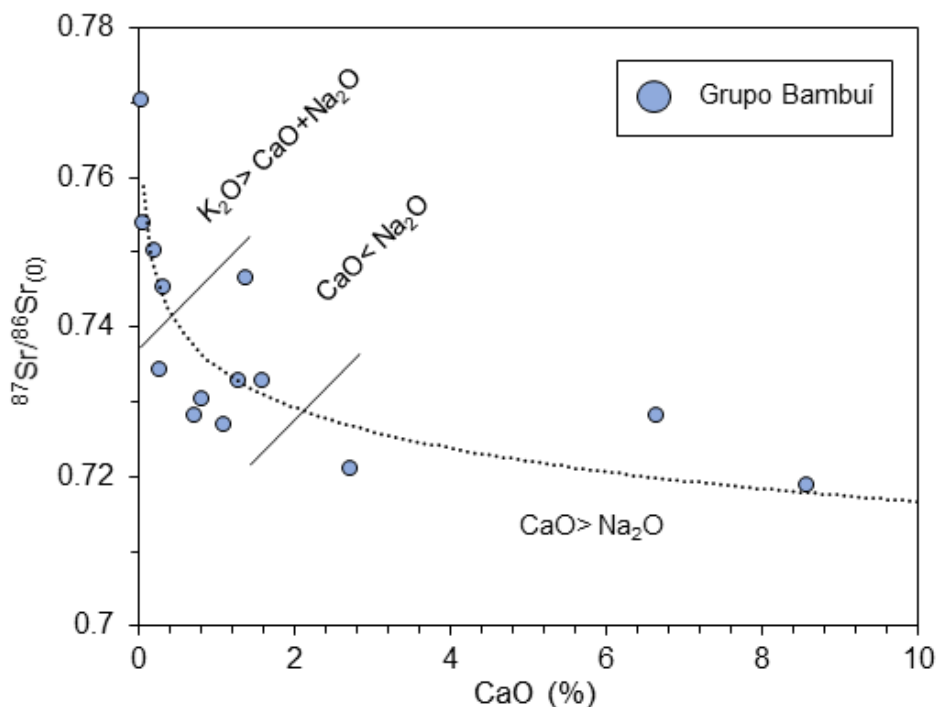
No entanto, as razões radiogênicas de Sr podem ser utilizados como traçadores em conjunto com isótopos de Nd, não diretamente de fontes sedimentares, mas da composição isotópica dos diversos reservatórios que compõe a crosta superior.

De um modo geral, razão isotópica $^{87}Sr/^{86}Sr$ medida do Grupo Bambuí fica entre os valores de 0.7188 e 0.7702, com um valor anômalo de 0.9217 (amostra Bam-18, que representa um siltio avermelhado enriquecido em K_2O). Duas amostras de rochas calcissilicáticas, Bam-27 e Bam-19, forneceram valores de $^{87}Sr/^{86}Sr$ de 0.7080 e 0.7128, respectivamente. As razões observadas em

rochas silicáticas são significativamente menores e mais homogêneos do que os medidos para as rochas sedimentares dos grupos Canastra e Vazante, que ocorrem entre 0.7395 e 0.9176 (Carvalho et al., 2019).

O Grupo Bambuí é composto por estratos de depósitos siliciclásticos e depósitos carbonáticos intercalados entre si. O efeito da interação de rochas carbonáticas nas assinaturas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de rochas siliciclásticas foi medido comparando esta razão com a proporção de CaO (%) nas amostras (figura 22). A disposição das amostras indica que existe uma tendência de diminuição da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ quanto maior a proporção de CaO. Utilizando o gráfico foi possível individualizar pelo menos 3 grupos geoquímicos: i) amostras nas quais $\text{K}_2\text{O} > (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$, baixo valor de CaO (%) e valores de razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.74$; ii) amostras nas quais $\text{K}_2\text{O} < (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ e $\text{CaO} < \text{Na}_2\text{O}$, indicando presença de cálcio provavelmente sob a forma de feldspatos e argilo-minerais detríticos, acompanhado de razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ predominantemente entre 0.72 e 0.74; iii) amostras nas quais $\text{CaO} > \text{Na}_2\text{O}$, indicando presença de cimentos de carbonatos de cálcio (identificados por análise petrográfica), e razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0.70 e 0.72.

Figura 22 - Razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e sua relação com a proporção de CaO(%).



Legenda: As razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ são inversamente proporcionais a concentração de CaO na amostra. De acordo com esse comportamento, foram divididos 3 grupos geoquímicos baseados na relativa concentração de K_2O , CaO e Na_2O na amostra.

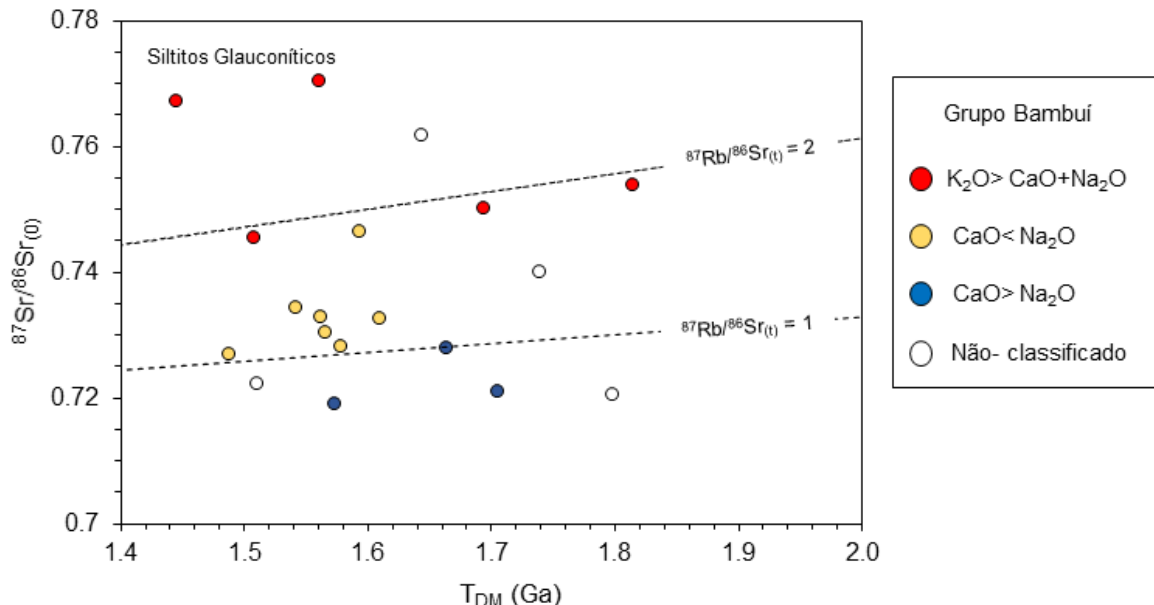
Fonte: O autor, 2020.

As razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ são estudadas em função da variação de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ das amostras no tempo. Para tanto, é sugerida a utilização da razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ tempo-integrada ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$), como proposto por McDermott e Hawkesworth (1990). A razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ leva em conta toda a variação composicional ocorrida na amostra desde a época de seu fracionamento mantélico a partir da medida de sua idade modelo T_{DM} (figura 23). A razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ é calculada a partir da Eq.1. O modelo estabelece como razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial, a razão do CHUR (0.7045, segundo DePaolo e Wasserburg, 1976); e o tempo (t) é igualado à idade modelo T_{DM} calculado pelo sistema isotópico Sm-Nd, considerando que o tempo de fracionamento mantélico é igual entre os dois sistemas isotópicos.

$$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}(\text{medido}) = \frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}(\text{inicial}) + \frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}(t) \cdot (e^{\lambda t} - 1) \quad (1)$$

Para as amostras com maior concentração de K_2O em relação ao CaO e Na_2O , a razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ foi calculada entre 1.8 e 1.9, com valores mais elevados para os siltitos glauconíticos com razões próximas de 3.0. Para amostras com CaO predominantemente de material detrítico e mais baixa concentração de K_2O , os valores de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ ocorrem entre 1.0 e 1.4, com uma amostra (Bam-01C) com valor mais elevado ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t) = 1.85$). As amostras com cimentos carbonáticos, cuja concentração de CaO é mais elevada do que a de Na_2O , os valores de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ são menores que 1, indicando enriquecimento de Sr relativo ao Rb.

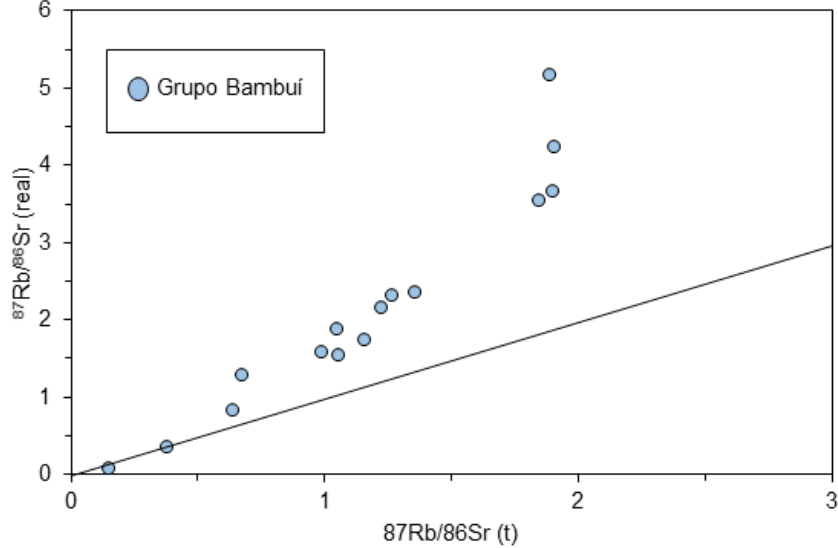
Figura 23 - Valores $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ calculados em relação a idade modelo T_{DM} .



Legenda: O diagrama demonstra linhas de evolução no tempo do isótopo $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ para diferentes razões $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ tempo-integradas. As linhas de evolução isotópica consideram o valor de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ inicial como 0.7045, de acordo com o manto indiferenciado (DePaolo e Wasserburg, 1976).

Fonte: O autor, 2020.

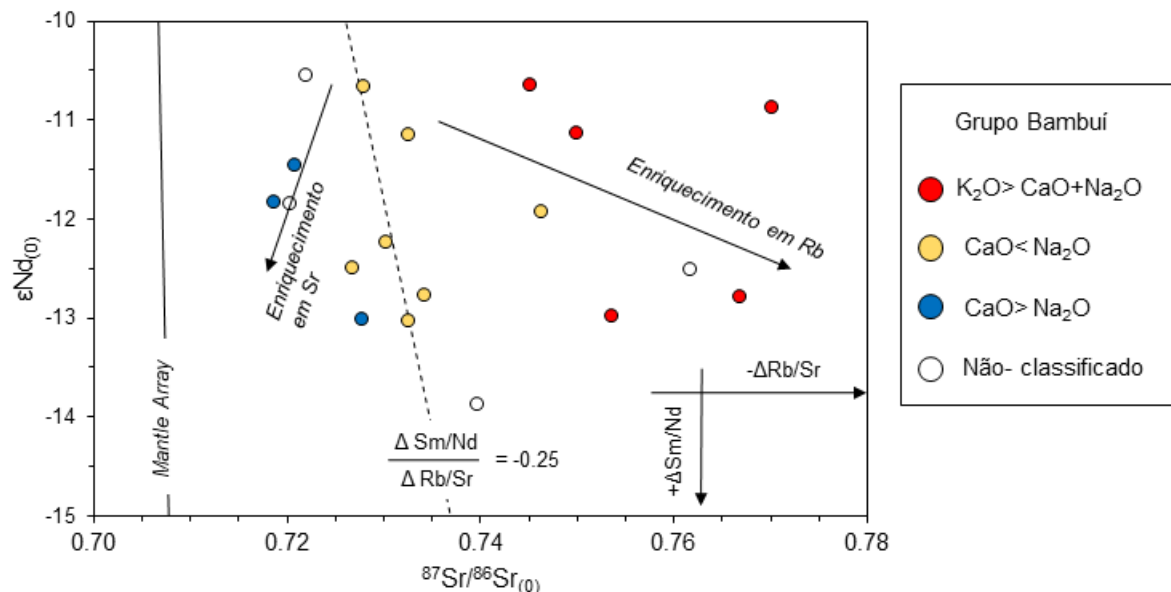
Uma vez que, o valor $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ foi definido como a variação composicional desde o seu fracionamento mantélico e considerando que o Rb tende a se concentrar nos sedimentos durante o processo de alteração da rocha fonte, então o Grupo Bambuí não pode ser considerado somente como o retrabalhamento de depósitos sedimentares mais antigos. O valor $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ calculado é significativamente menor comparado com a razão $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ real (ver tabela 3) medida nas amostras do Grupo Bambuí (figura 24). Os valores subestimados de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$ podem estar associados com a diferença de idade entre o considerado como a extração mantélica da fonte ígnea média (T_{DM}), e a idade de deposição do sedimento, na qual ocorre o enriquecimento em Rb relativo ao Sr nas amostras.

Figura 24 - $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ real versus $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$.

Legenda: As razões reais de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (ver tabela 3) são maiores do que as razões $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ tempo-integrada calculadas. Isso se deve a diferença de tempo entre a idade de deposição e a idade de fracionamento isotópico admitida para estimar o valor de $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}(t)$.

Fonte: O autor, 2020.

Como podemos explicar razões de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ tão baixas para idades de T_{DM} elevadas? Misturas entre metassedimentos e rochas juvenis não parecem ser uma solução viável como apontada pela estabilidade dos valores de $\epsilon\text{Nd}_{\text{inicial}}$. No diagrama ϵNd versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (em valores medidos), as rochas sedimentares do Grupo Bambuí parecem se alinhar em correlações específicas (figura 25). Tendências lineares de mesmo tipo foram observadas por DePaolo e Wasserburg (1976) no diagrama ϵNd versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, e interpretadas como provocadas por variações correlatas dos valores de Sm/Nd e Rb/Sr de um reservatório de mesma composição isotópica inicial e em um mesmo período de tempo. Tomando o reservatório indiferenciado CHUR como modelo inicial, as variações correlatas $\Delta(\text{Sm}/\text{Nd})/\Delta(\text{Rb}/\text{Sr})$ do Grupo Bambuí indicam valor de -0.25. Tendências diferentes são observadas para as amostras com maior concentração de K_2O relativo ao CaO e Na_2O a qual deve estar relacionada a um enriquecimento de Rb relativo ao Sr. Do mesmo modo, amostras com maior concentração de CaO em relação ao Na_2O demonstram alinhamentos indicando enriquecimento em Sr relativo ao Rb. A reta de correlação na qual $\Delta(\text{Sm}/\text{Nd})/\Delta(\text{Rb}/\text{Sr})$ é calculado como -0.25, portanto, indica razões detríticas relativos a proveniência e o fracionamento elementar na crosta superior local. A partir desse modelo é possível interpretar a correlação do fracionamento entre esses elementos da crosta superior e interpretar variações composicionais ocorridas durante e após a deposição.

Figura 25 - Diagrama ϵNd versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$.

Legenda: As rochas sedimentares do Grupo Bambuí indicam uma correlação entre as variações da composição Sm/Nd e Rb/Sr do reservatório crustal de -0.25. Possíveis enriquecimentos em Rb ou Sr deposicionais e pós deposicionais podem influenciar na distribuição isotópica da amostra total.

Fonte: O autor, 2020.

A questão da evolução da razão isotópica atual dos sedimentos siliclásticos do Grupo Bambuí gira em torno da composição geoquímica dos reservatórios isotópicos. Seja por meio de misturas isotópicas ou por processos de diferenciação da crosta, o Grupo Bambuí pode ser um meio para entender como evoluíram e se re-homogeneizaram os reservatórios isotópicos da crosta superior desta porção do continente Gondwana após o evento colisional do Neoproterozóico.

CONCLUSÕES

Os resultados das análises de litogeoquímica e isotópica são compatíveis com os conceitos tectonossedimentares e geodinâmicos atualmente estabelecidos para a Bacia Bambuí, como é revelado por uma gama de análises de U-Pb em zircão detrítico e dados sedimentológicos e estratigráficos. Os dados indicam importantes mudanças nas áreas fontes de sedimentos durante o preenchimento da Bacia Bambuí.

A Formação Sete Lagoas mostra valores de $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ menos negativos (média de -7.9) e valores de T_{DM} (1.5 a 2.0 Ga) consideravelmente menores em relação a Formação Carrancas e aos depósitos de margem passiva (grupos Vazante e Macaúbas) mais antigos. O diagrama $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ versus $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ indica que estas fontes podem estar relacionadas com possíveis misturas entre o retrabalhamento das rochas metassedimentares supracitadas, com rochas relativamente mais juvenis. Estas fontes relativamente mais juvenis são apontadas como rochas relacionadas aos arcos magmáticos que compõe o orógeno Araçuaí. Sendo assim, a Formação Sete Lagoas indica que, já na sua porção basal, esteve sob influência de fontes provenientes da margem leste cratônica, onde é considerado um depocentro de *forebulge* (Reis e Suss, 2016).

A transição da Formação Sete Lagoas para a Formação Serra de Santa Helena, a qual é marcada por mudanças de uma sedimentação predominantemente carbonática para outra predominantemente siliciclástica, é acompanhada também por idades modelo T_{DM} mais jovens (entre 1.5 e 1.7 Ga) e $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ médio de -6.1. Razões La/Yb e Th/Sc entre 0.55 e 0.78, e entre 0.5 e 0.8, respectivamente, apontam para fontes de composição intermediária. O diagrama $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ versus $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ indica que estes parâmetros são suportados por fontes do Arco Magmático do Rio Doce, no orógeno Araçuaí.

As sucessões superiores do Grupo Bambuí, formações Serra da Saudade e Três Marias, indicam uma nova mudança estratigráfica na bacia, na qual os sistemas deposicionais predominantemente pelíticos transicionam para ambientes plataformais e marinhos rasos. Este contraste é bem marcado pelo aumento das razões Th/Sc (entre 0.7 e 1.3) e La/Yb (entre 0.8 e 1.1), além de mais baixas razões $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (entre 0.111 e 0.129), indicando fontes com composição félsica. Pelo diagrama $\epsilon\text{Nd}_{(0)}$ versus $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$, tais fontes podem ser muito bem definidas pela variação isotópica e composicional do Arco Magmático do Rio Doce, assim como as unidades

pelíticas subjacentes. Ao mesmo tempo, o valor médio de $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ de -7.4 nas unidades superiores do Grupo Bambuí indica que contribuições a partir do retrabalhamento de depósitos sedimentares mais antigos podem estar atuando como importante fonte sedimentar para esse momento de preenchimento da bacia.

Alguns comentários podem ser feitos ainda quanto a utilização dos métodos para estudos de proveniência. As análises *multi-proxy*, agregando dados de geoquímica isotópica com dados litogeoquímicos, em especial a composição de elementos traços e terras-raras, viabilizaram a utilização dos mesmos como parâmetros para diferenciar áreas fontes das rochas sedimentares do Grupo Bambuí dentro de um intervalo relativamente curto de tempo dos ciclos transgressivos-regressivos de segunda ordem. Esta diferenciação de áreas fontes foi possível até mesmo dentro de um contexto em que os parâmetros de modelagem isotópica (ϵNd inicial e T_{DM}) são homogêneos em relação a outros depósitos sedimentares. Sendo assim, este tipo de análise pode ser viável para outros depósitos sedimentares relacionados a Gondwana, como por exemplo as Bacias Paleozóicas brasileiras, e para os depósitos sedimentares mais recentes relacionados a plataforma sul-americana.

Por outro lado, a ausência de dados para depósitos ainda mais antigos, principalmente do Arqueano, Paleoproterozóico e Meoproterozóico não permite que sejam traçados panoramas e que sejam gerados modelos da evolução composicional dos reservatórios isotópicos da crosta brasileira ao longo do tempo geológico. A problemática é satisfatoriamente apresentada para o Grupo Bambuí dentro de seu contexto sin a pós colisional e a aglutinação de Gondwana, tanto que, o Grupo Bambuí pode ser utilizado como um modelo para testes e para a construção de conceitos geodinâmicos para este estágio da evolução da crosta brasileira.

REFERÊNCIAS

- Albarède F., 2009. Geoquímica uma introdução. Tradução: Dias, F.R. São Paulo- Oficina de Textos, 2011. 400 pp.
- Aldrich, L.T., Doak, J.B., Davis, G.L., 1953. Use of ion-exchange columns in mineral analysis for age determinations. *American Journal of Science*, 251: 377-387.
- Alkmim F.F.; Brito Neves B.B.; Castro Alves J.A. 1993. Arcabouço tectônico do Cráton do São Francisco - Uma Revisão. In: Dominguez, J.M.L. & Misi, A. (eds) O Cráton do São Francisco. Salvador, SBG/Núcleo BA/SE, SGM/BA. p. 45–62.
- Alkmim, F. F., Marshak, S., Fonseca, M. A., 2001. Assembling West Gondwana in the Neoproterozoic: Clues from the São Francisco craton region, Brazil. *Geology* 29(4), 319-322. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0319:AWGITN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0319:AWGITN>2.0.CO;2)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>
- Allègre, C. J., Dars, R., 1966. Chronologie au rubidium- strontium et granitologie. *Geologische Rundschau* 55, 226- 237.
- Allègre, C.J., Rousseau, D., 1984. The growth of the continents through geological time studied by Nd isotope analysis of shales. *Earth Planetary Science Letters* 67, 19-34. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90035-9)
- Allen, P.A., Allen, J.R., 1990. *Basin Analysis: Principles and Applications*. Blackwell (Oxford). 451pp.
- Amaral, L.; Caxito, F. A.; Pedrosa-Soares, A. C.; Queiroga, G.; Babinski, M.; Trindade, R.; Lana, C.; Chemale, F., 2020. The Ribeirão da Folha ophiolite-bearing accretionary wedge (Araçuaí orogen, SE Brazil): New data for Cryogenian plagiogranite and metasedimentary rocks. *Precambrian Research* 336: 105522.
- Almeida, F.F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Sciences Reviews* 17, 1–29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- Almeida, F.F.M., 1968. Evolução tectônica do centro oeste brasileiro no Proterozoico superior. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 40: 349-364.
- Babinski, M., Pedrosa-Soares, A.C., Trindade, R.I.F., Martins, M., Noce, C.M., Liu, D., 2012. Neoproterozoic glacial deposits from the Araçuaí orogen, Brazil: Age, provenance and

- correlations with São Francisco craton and West Congo belt. *Gondwana Research* 21, 451-465. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.04.008>
- Babinski, M., Vieira, L.C., Trindade, R.I.F., 2007. Direct dating of Sete Lagoas Cap Carbonate (Bambuí Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. *Terra Nova* 19, 401-406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00764.x>
- Ball, T.T., Farmer, G.L., 1998. Infilling history of a Neoproterozoic intracratonic basin: Nd isotope provenance studies of the Uinta Mountain Group, Western United States. *Precambrian Research* 87, 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(97\)00051-X](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(97)00051-X)
- Barbosa, O., Braun, O.P.G., Dyer, R.C., Cunha, C.A.B.M., 1970. Geologia da região do Triângulo Mineiro. *Boletim* 136. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. 140p.
- Bhatia, A.M.R., Crook, K.A.W., 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineral Petrology* 92, 181-193. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>
- Bonhomme M.G. 1976. Mineralogie des fractions fines et datations Rubidium-Strontium dans le Group Bambuí, MG, Brésil. *Revista Brasileira de Geociências*, 6: 211-221.
- Braun, O.P.G., 1968. Contribuição à estratigrafia do Grupo Bambuí. In: *Anais do 22º Congresso Brasileiro de Geologia*, Belo Horizonte, MG, 155-166.
- Braun, O.P.G., Melo, V., Delia Piazza, H., 1990. Bacias proterozóicas brasileiras com perspectivas exploratórias para hidrocarbonetos. In: Raja Gabaglia, G.P.; Milani, E.J. (coords.) *Origem e Evolução de Bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petrobrás, 115-132.
- Caetano-Filho, S., Paula-Santos, G.M., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Peloso, M., Amorim, K., Afonso, J., Kuchenbecker, M., Reis, H.L.S., Trindade, R.I.F., 2019. Sequence stratigraphy and chemostratigraphy of an Ediacaran-Cambrian foreland-related carbonate ramp (Bambuí Group, Brazil). *Precambrian Research* 331, 105365. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105365>
- Carvalho, M.; Valeriano, C.M.; Aguiar-Neto, C.; Oliveira, G.D.; Heilbron, M., 2019. The Canastra and Vazante Groups revisited Sm-Nd and Sr isotopes – evidence for contribution from Tonian intraplate magmatism during passive margin developed along SW São Francisco margin, Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 49(1), 1-16. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201920180081>
- Castro, P.T.A., Dardenne, M.A., 1997. O conglomerado Samburá (Grupo Bambuí, Neoproterozoico) e rochas sedimentares associadas no flanco leste da Serra da Pimenta, SW de Minas Gerais: um sistema de fan-delta. *Geonomos* 3(2), 35-41.
- Castro, P.T.A., Dardenne, M.A., 2000. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southern boundary of the São Francisco craton, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências* 30, 345-437.

- Castro, P.T.A.; Dardenne, M.A., 1997. O conglomerado Samburá (Grupo Bambuí, Neoproterozoico) e rochas sedimentares associadas no flanco leste da Serra da Pimenta, SW de Minas Gerais: um sistema de fan-delta. *Geonomos* 3(2), 35-41.
- Catuneanu, O., 2006. Principles of sequence stratigraphy, first ed. Elsevier Science, Amsterdam, 388 pp.
- Catuneanu, O., 2019. First-order foreland cycles: Interplay of flexural tectonics, dynamic loading, and sedimentation. *Journal of Geodynamics* 129, 290-298.
<https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.03.001>
- Cawood, P.A., Hawkesworth, C.J., Dhuime, B., 2012. Detrital zircon record and tectonic setting. *Geology* 40, 875-878. <https://doi.org/10.1130/G32945.1>
- Caxito, F. A., Frei, R., Uhlein, G. J., Dias, T. G., Ártung, T. B., Uhlein, A., 2018. Multiproxy geochemical and isotope stratigraphy records of a Neoproterozoic Oxygenation Event in the Sete Lagoas cap carbonate, Bambuí Group, Brazil. *Chemical Geology* 481, 119-132.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.007>
- Chang, H.K.; Miranda, F.P.; Magalhães L.; Alkmim F.F., 1988. Considerações sobre evolução tectônica da Bacia do São Francisco. *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Geologia*, Belém, Pará, V. 5: 2076 – 2090.
- Chemale, Jr. F., Dussin, I.A., Alkmim, F.F., Martins, M.S., Queiroga, G., Armstrong, R., Santos, M.N., 2012. Unravelling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: the case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research* 22, 200-206. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.08.016>
- Chiavegatto, J.R.S., 1992. Análise Estratigráfica das Sequências Tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozoico superior), na Porção Meridional da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 216 pp.
- Coelho, J.C., Martins-Neto, M.A., Marinho, M.S., 2008. Estilos estruturais e evolução tectônica da porção mineira da bacia proterozóica do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências* 38(2- suplemento), 149-165.
- Condie, K.C., Wronkiewicz, D.J., 1990. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth and Planetary Science Letters* 97 (3-4), 256-267. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(90\)90046-Z](https://doi.org/10.1016/0012-821X(90)90046-Z)
- Costa, F.G.D., Alkmim, F.F., Magalhães, P.M., 2018. The Ediacaran Salinas turbidites, Araçuaí Orogen, MG: tectonics and sedimentation interplay in a syn-orogenic basin. *Brazilian Journal of Geology* 48(4), 783-804. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201820180020>
- Cruz S.C.P., Alkmim F.F. 2006. The tectonic interaction between the Paramirim aulacogen and the Araçuaí belt, São Francisco craton region, Eastern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 78 (1): 151-173.

- Dardenne, M. A., 2000. The Brasilia fold belt. In: Cordani, U.G., Milani, E. G., Thomaz Filho, A., Campos, D.A., (Eds.), Tectonic evolution of South America. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, pp. 231-263.
- De Campos, C.P., Medeiros, S.R., Mendes, J.C., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I., Ludka, I.P., Dantas, E., 2016. Cambro-Ordovician magmatism in the Araçuaí Belt (SE Brazil): snapshots from a post-collisional event. *Journal of South American Earth Sciences* 68, 248-268. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.016>.
- De Campos, C.P., Mendes, J., Ludka, I.P., Medeiros, S., Costa-de-Moura, J., Wallfuss, C., 2004. A review of the Brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post-collisional magmatism. In: Weinberg, R., Trouw, R., Fuck, R., Hackspacher, P. (Eds.), The 750-550 Ma Brasiliano event of South America. *Journal of the Virtual Explorer*, Eletronic Edition. ISSN 1441-8142, 17: Paper 1.
- De Paolo, D.J., 1981. Trace Element and Isotopic Effects of Combined Wallrock Assimilation and Fractional Crystallization. *Earth and Planetary Science Letters* 53, 189-202. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90153-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90153-9)
- De Paolo, D.J., Wassenburg, G.J., 1976. Nd Isotopic variations and petrogenetic models. *Geophysical research Letters* 3(5), 249-252. <https://doi.org/10.1029/GL003i005p00249>
- DeCelles, P.G., Giles, K.A., 1996. Foreland basin systems. *Basin Research* 8, 105-123.
- Delpomdor, F.R.A., Ilambwetsi, A.M., Caxito, F.A., Pedrosa-Soares, A., 2020. New interpretation of the basal Bambuí Group, Sete Lagoas High (Minas Gerais, E Brazil) by sedimentological studies and regional implications for the aftermath of the Marinoan glaciation: Correlations across Brazil and Central Africa. *Geologica Belgica* 23(1-2). <https://doi.org/10.20341/gb.2019.010>
- Dos Santos, R.F.; Alkmim, F.F.; Pedrosa-Soares, A.C., 2009. A Formação Salinas, Orógeno Araçuaí (MG): história deformacional e significado tectônico. *Revista Brasileira de Geociências* 39(1), 81-100.
- Falci, A., Caxito, F.A., Seer, H.J., Valeriano, C.M., Dias, P.H., Pedrosa-Soares, A.C., 2018. Provenance shift from a continental margin to a syn-orogenic basin in the Neoproterozoic Araxá nappe system, southern Brasília belt, Brazil. *Precambrian Research* 306, 209-219. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.01.004>
- Gonçalves, L., Alkmim, F., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I.A., Valeriano, C.M., Lana, C., Tedeschi, M.F., 2016. Granites of the intracontinental termination of a magmatic arc: an example from the Ediacaran Araçuaí Orogen, Southeastern Brazil *Gondwana Research* 36, 439- 458. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.07.015>
- Gradin, C., Roncato, J., Pedrosa-Soares, A.C., Cordani, U., Dussin, I., Alkmim, F., Queiroga, G., Jacobson, T., Silva, L.C., Babinski, M. 2014. The hot back-arc zone of the Araçuaí orogen,

- Eastern Brazil: from sedimentation to granite generation. *Brazilian Journal of Geology* 44, 155-180.
- Guimarães, E.M., 1997. Estudos de proveniência e diagênese com ênfase na caracterização dos filossilicatos dos grupos Paranoá e Bambuí, na região de Bezerra – Cabeceiras (GO). Inst. De Geociências, Universidade de Brasília. Tese de Doutorado. 269p.
- Heilbron, M., Cordani, U., Alkmim, F., 2017. The São Francisco Craton and its margins. In: Monica Heilbron; Umberto G Cordani; Fernando F Alkmim. (Eds.). *São Francisco Craton, Eastern Brazil Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*, first ed. Springer, pp. 3-14.
- Heilbron, M., Tupinambá, M., Valeriano, C.M., Armstrong, R., Do Eirado Silva, L.G., Melo, R.S., Simonetti, A., Pedrosa-Soares, A.C., Machado, N., 2013. The Serra da Bolívia complex: the record of a new Neoproterozoic arc-related unit at Ribeira belt. *Precambrian Research* 238, 158-175. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.09.014>
- Hippertt, J.P., Caxito, F.A., Uhlein, G.J., Nalini, H.A., Sial, A.N., Abreu, A.T., Nogueira, L.B., 2019. The fate of a Neoproterozoic intracratonic marine basin: trace elements, TOC and IRON speciation geochemistry of the Bambuí Basin. Brazil. *Precambrian Research* 330, 101–120. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.05.001>
- Hoffman, E.L., 1992. Instrumental neutron activation in geoanalysis. *Journal of Geochemical Exploration* 44(1-3), 297-319. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90053-B](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90053-B)
- Jacobsen, S.B., Wasserburg, G.J., 1984. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, II. *Earth Planetary Science Letters* 67, 137-150. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90109-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90109-2)
- Kuchenbecker, M., Babinski, M., Pedrosa-Soares, A.C., Costa, R.D., Lopes-Silva, L., Pimenta, F., 2013. Proveniência e análise sedimentar da porção basal do Grupo Bambuí em Arcos (MG). *Geologia Usp- Série Científica* 13(4), 49-61. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201300040003>
- Kuchenbecker, M., Babinski, M., Pedrosa-Soares, A.C., Lopes-Silva, L., Pimenta, F., 2016. Chemostratigraphy of the lower Bambuí Group, Southwestern São Francisco Craton, Brazil: Insights on Gondwana Paleoenvironments. *Brazilian Journal of Geology* 46(1), 145-162. <https://doi.org/10.1590/2317-488920160030285>
- Kuchenbecker, M., Pedrosa-Soares, A.C., Babinski, M., Fanning, M., 2015. Detrital zircon age patterns and provenance assessment for pre-glacial to post-glacial successions of the Neoproterozoic Macaúbas Group, Araçuaí orogen, Brazil. *Precambrian Research* 266, 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.04.016>
- Kuchenbecker, M., Pedrosa-Soares, A.C., Babinski, M., Reis, H.L.S., Atman, D., Costa, R. D., 2020. Towards an integrated tectonic model for the interaction between the Bambuí basin and the adjoining orogenic belts: Evidences from the detrital zircon record of syn-orogenic

- units. *Journal of South American Earth Sciences* 104, 102831.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102831>
- Laux, J.H., Pimentel, M.M., Dantas, E.L., Armstrong, R., Junges, S.L., 2005. Two Neoproterozoic crustal accretion events in the Brasília belt, central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 18(2), 183-198. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.09.003>
- Lugnair, G.W., Marti K., 1977. Sm-Nd-Pu timepieces in the Angra dos Reis Meteorite. *Earth Planetary Science Letters* 35, 273-284. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90131-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90131-5)
- Marshak, S., Tinkham, D., Alkmim, F.F, Brueckner, H., Bornshorst, T., 1997. Dome and-keel provinces formed during Paleoproterozoic orogenic collapse - core complex, diapirs, or neither?: examples from the Quadrilátero Ferrífero and the penokean orogen. *Geology* 25 (5), 415-418. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0415:DAKPFD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0415:DAKPFD>2.3.CO;2)
- Martins, M., Lemos V.B., 2007. Análise estratigráfica das sequências Neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências* 37 (4), 156–167.
- Martins, V. T. de S., Teixeira, W., Noce, C.M., Pedrosa-Soares, A.C., 2004. Sr e Nd characteristics of Brasiliano/Pan-African granitoid plutons of the Araçuaí orogen, Southeastern Brazil: tectonic implications. *Gondwana Research* 7, 75-89.
[https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70307-5](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70307-5)
- Martins-Neto, M.A, Pinto, C.P., 2001. A Bacia do São Francisco: definição e base de dados. In:Pinto, C.P., Martins-Neto, M.A. *Bacia do São Francisco: Geologia e recursos naturais*. SBG/MG, Belo Horizonte. p. 1- 8.
- Martins-Neto, M.A., 2009. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 26, 163–176.
<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.10.001>
- McCulloch, M.T., Wasserburg, G.J., 1978. Sm-Nd and Rb-Sr chronology of continental crust formation. *Science* 200(4345), 1003- 1011.
- McDaniel, D.K., Hermann, S.R., McLennan, S.M., Hanson, G.N., 1994. Resetting of neodymium isotopes and redistribution of REE during sedimentary processes: the early Proterozoic Chelmsford Formation, Sudbury Basin, Ontario, Canadá. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58(2), 941-951. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90516-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90516-9)
- McDermott, F.; Hawkesworth, C., 1990 The evolution of strontium isotopes in the upper continental crust. *Nature* 344: 850- 853.
- McLennan, S. M., Hemming, S., McDaniel, D. K., Hanson, G. N., 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geological Society of Americana Special Paper* 284, 21-40. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p21>

- McLennan, S. M., Taylor, S. R., 1991. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends. *Journal of Geology* 99, 1-21. <https://doi.org/10.1086/629470>
- McLennan, S.M., 2001. Relationships between the trace elements composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems* 2, 24pp. <https://doi.org/10.1029/2000GC000109>
- McLennan, S.M., Hemming S., 1992. Samarium Neodymium Elemental and Isotopic Systematics in Sedimentary-Rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56(3), 887-898. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90034-G](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90034-G)
- McLennan, S.M., Taylor, S.R., McCulloch, M.T., Maynard, J.B., 1990. Geochemical and Nd–Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54, 2015–2050. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90269-Q](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90269-Q)
- Moreira, D. S., Uhlein, A., Dussin, I. A., Uhlein, G. J., Misuzaki, A. M., 2020. A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcanoclastic bed. *Journal of South America Earth Sciences* 99, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102503>
- Moreira, M.L.O., Moreton, L.C., Araújo, V.A., Lacerda-Filho, J.V., Costa, H.F., 2008. Geologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Escala 1:500.000. Convênio Ministério de Minas e Energia (MME)/ Serviço Geológico do Brasil (CPRM) – Secretaria de Indústria e Comércio (SIC)/Fundo de Fomento a Mineração (FUNMINERAL)/Governo do Estado de Goiás.
- Nalini Jr., H.A., Bilal, E., Paquette, J.L., Pin, C., Machado, R., 2000. Geochronologie U-Pb et géochimie isotopique Sr-Nd des granitoides neoproterozoïques des suites Galileia et Urucum, vallée du Rio Doce, Sud-Est du Brésil. *Comptes Rendus- Académie des Sciences Paris* 331, 459-466.
- Navarro, G.R.B., Zanardo, A., 2007. Geoquímica de Gnaisses do Arco Magmático de Goiás na região sul do estado de Goiás. *Geologia USP- Série Científica* 7(1), 19-28. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874x2007000100002>
- Navarro, G.R.B., Zanardo, A., Conceição, F.T., Montibeller, C.C., 2013. Geoquímica e geocronologia U-Pb e Sm-Nd dos ortognaisses da região de Pontalina (GO), Brasil. *Brazilian Journal of Geology* 43(2), 317-332.
- Navarro, G.R.B., Zanardo, A., Montibeller, C.C., Conceição, F.T., Valeriano, C.M., 2017. Petrografia e geoquímica de gnaisses da região de Indiara, porção central do arco magmático de Goiás. *Geologia USP- Série Científica* 17(3), 189- 207. <https://dx.doi.org/10.5327/Z2317-48892013000200009>
- Naylor, M.; Synclair, H.D., 2008. Pro- vs. Retro-foreland Basins. *Basin Research*, 20: 285-303.

- Neres, A.O., 2014. Interpretação sísmica de seção na área sul da bacia do São Francisco, caracterização petrográfica e diagenética de carbonatos do Grupo Bambuí e proveniência sedimentar de arenitos do Grupo Paranoá. B.Sc. Monografia de Graduação, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 120 pp.
- Novo, T., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Alkmim, F.F., Dussin, I., 2010. Rochas charnockíticas do sudeste de Minas Gerais: a raiz granulítica do arco Magmatico do Orogeno Araçuaí. *Revista Brasileira de Geociências* 40, 573-592.
- Paula-Santos, G.H., Caetano-Filho, S., Enzweiler, J., Navarro, M.S., Babinski, M., Guacaneme, C., Kuchenbecker, M., Reis, H., Trindade, R.I.F., 2020. Rare earth elements in the terminal Ediacaran Bambuí Group carbonate rocks (Brazil): evidence for high seawater alkalinity during rise of early animals. *Precambrian Research* 336, 105506.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105506>
- Paula-Santos, G.M., Babinski, M., 2018. Sedimentary provenance in the Southern sector of São Francisco Basin, SE Brazil. *Brazilian Journal of Geology* 48(1), 51-74.
<https://doi.org/10.1590/2317-4889201820170061>
- Paula-Santos, G.M., Babinski, M., Kuchenbecker, M., Caetano-Filho, S., Trindade, R.I., Pedrosa-Soares, A.C., 2015. New evidence for an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco Craton (eastern Brazil) from zircon U-Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research* 28(2), 702-720.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.012>
- Paula-Santos, G.M., Caetano-Filho, S., Babinski, M., Trindade, R.I., Guacaneme, C., 2017. Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco Basin through isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research* 42, 280-305.
<https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.012>
- Pedrosa-Soares, A.C., Babinski, M., Noce, C., Martins, M., Queiroga, G., Vilela, F., 2011. The Neoproterozoic Macaúbas Group (Araçuaí orogen, SE Brazil) with emphasis on the diamictite formations. In: Arnaud, E., Halverson, G. P. and Shields-Zhou, G. (Eds), *The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations*. Geological Society, London, *Memoirs* 36, 523–534.
- Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M., Pinto, C.P., 2001. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research* 110, 307–323. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00174-7)
- Peixoto, E., Pedrosa-Soares, A.C., Alkmim, F.F., Dussin, I.A., 2015. A suture-related accretionary wedge formed in the Neoproterozoic Araçuaí orogen (SE Brazil), during western Gondwanaland assembly. *Gondwana Research* 27, 878-896.
- Pimentel, M.M., 2016. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil: a geochronological and isotopic approach. *Brazilian Journal of Geology*, 46(Supl. 1):67-82.

- Pimentel, M.M., Dardenne, M.A., Fuck, R.A., Viana, M.G., Junges, S.L., Fischel, D.P., Seer, H.J., Dantas, E.L., 2001. Nd isotopes and the provenance of detrital sediments of the Neoproterozoic Brasília Belt, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 14(6), 571-585. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00041-4)
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., 1992. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology* 20(4), 375-379. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1992\)020<0375:NCAICB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1992)020<0375:NCAICB>2.3.CO;2)
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Alvarenga, C.J.S., 1996. Post-Brasiliano (Pan-African) high-K granitic magmatism in Central Brazil: the role of Late Precambrian-early Palaeozoic extension. *Precambrian Research* 80, 217- 238. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(96\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(96)00016-2)
- Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Gioia, D.M.C.L., 2000. The Neoproterozoic Goiás Magmatic Arc, Central Brazil: a review and new Sm-Nd isotopic data. *Revista Brasileira de Geociências* 30(1), 35-39.
- Pinto, C.P., Silva M.A., 2014. Mapa geológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000. CPRM-CODEMIG, Belo Horizonte, MG.
- Pourmand, A., Dauphas, N., Ireland, T.J., 2012. A novel extraction chromatography and MC-ICP-MS technique for rapid analysis of REE, Sc, and Y: revising Cl-chondrite and Post-Archean Australian Shale (PAAS) abundances. *Chemical Geology* 291, 38-54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.08.011>
- Reis, H.L.S., Alkmim F.F., 2015. Anatomy of a basin-controlled foreland fold-thrust belt curve: The Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology* 66, 711–731. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.013>
- Reis, H.L.S., 2016. Neoproterozoic evolution of the São Francisco Basin SE-Brazil: effects of tectonic inheritance on foreland sedimentation and deformation. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto (MG). 191 pp.
- Reis, H.L.S., Suss J.F., 2016. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in forebulge grabens: an example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco Basin, Brazil. *Sedimentary Geology* 339, 83-103. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.04.004>
- Reis, H.L.S., Suss, J.F., Fonseca, R.C.S., Alkmim, F.F., 2017b. Ediacaran forebulge grabens of the southern São Francisco basin, SE Brazil: Craton interior dynamics during West Gondwana assembly. *Precambrian Research* 302, 150-170. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.023>
- Reis, H.S., Alkmim, F.F., Fonseca, R.C.S., Nascimento, T.C., Suss, J.F., Prevatti, L.D., 2017a. The São Francisco Basin. In: Monica Heilbron; Umberto G Cordani; Fernando F Alkmim. (Eds.). *São Francisco Craton, Eastern Brazil Tectonic Genealogy of a Miniature Continent*, first ed: Springer, pp. 189-203.

- Rodrigues, J.B. 2008. Proveniência de Sedimentos dos Grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí – Um estudo de Zircões Detríticos e Idades Modelo Sm-Nd. Phd Thesis, Universidade de Brasília, 128pp.
- Rodrigues, J.B., Gioia, S.M.L.C., Pimentel, M.M., 1999. Geocronologia e geoquímica de ortognaisses da região entre Iporá e Firminópolis: implicações para a evolução do Arco Magmático de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências* 29(2), 207-216.
- Rodrigues, J.B., Pimentel, M.M., Bühn, B., Matteini, M., Dardenne, M.A., Alvarenga, C.J.S., Armstrong, R.A., 2012. Provenance of the Vazante Group: new U-Pb, Sm-Nd, Lu-Hf isotopic data and implications for the tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt. *Gondwana Research* 21(2-3), 439-450. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.07.017>
- Romeiro-Silva, P.C., 1997. A passagem do Mesoproterozóico para o Neoproterozóico no centro-leste do Brasil: o estilo estrutural envolvido. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia-núcleo Minas Gerais*, 14: 9.
- Roser, B.P., Korsch, R.J., 1988. Provenance signatures of sandstone- mudstone suites determined using discriminant function analysis of major element data. *Chemical Geology* 67, 119-139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Rossi, A.V.A., Danderfer-Filho, A., Bersan, S.M., Kelmera, L.R., Tavares, T.D., Lana, C.C., 2020. Stratigraphic, isotopic, and geochronological record of a superposed proforeland basin in the eastern São Francisco craton during west Gondwana amalgamation. *Journal of South American Earth Sciences* 97, 102406. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102406>
- Santana, A.V.A., 2011. Estratigrafia, sedimentologia e proveniência das unidades superiores do Grupo Vazante na região da fazenda Fagundes, Paracatu, MG. M.S. Dissertation, Universidade de Brasília, Brasília. 160 pp.
- Sato, K., 1998. Evolução crustal da Plataforma Sul Americana, com base na geoquímica isotópica Sm-Nd. Phd Thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo. 325 pp.
- Schöll, W.U., 1976. Sedimentologia e geoquímica do Grupo Bambuí na parte sudeste da Bacia do São Francisco. In Congresso Brasileiro de Geologia, 29, Ouro Preto, *Anais*, p. 207-231.
- Seer, H.J., Brod, J.A., Fuck, R.A., Pimentel, M.M., Boaventura, G.R., Dardenne, M.A., 2001. Grupo Araxá em sua área tipo: um fragmento de crosta oceânica Neoproterozóica na faixa de dobramentos Brasília. *Revista Brasileira de Geociências* 31(3), 385-396.
- Seer, H.J., Brod, J.A., Valeriano, C.M., Fuck, R.A., 2005. Leucogranitos intrusivos no Grupo Araxá: registro de um evento magmático durante colisão Neoproterozóica na porção meridional da Faixa Brasília. *Revista Brasileira de Geociências* 35, 33–42.
- Seer, H.J., Moraes, L.C., Fogaça, A.C.C., 1987. Faciologia e Estruturação Tectônica dos Metassedimentos com Diamictitos e Jaspilitos da região de Lagoa Formosa, MG (Grupo Bambuí?). In.: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 4, Atas, Belo Horizonte, p. 199-213.

- Silva, C.H., Simões, L.S.A, Krymsky, R., Macambira, M.J.B., 2006. Proveniência e Idade do Metamorfismo das Rochas da Faixa Brasília, na Região de Tapira (SW de Minas Gerais). *Revista do Instituto de Geociências* 6(1), 53-66. <https://doi.org/10.5327/S1519-874X2006000200005>
- Tanaka, T., Togashi, S., Kamioka, H., Amakawa, H., Kagami, H., Hamamoto, T., Yuhara, M., Orihashi, Y., Yoneda, S., Shimizu, H., Kunimaru, T., Takahashi, K., Yanagi, T., Nakano, T., Fujimaki, H., Shinjo, R., Asahara, Y., Tanimizu, M., Dragusanu, C., 2000. JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with Lajolla neodymium. *Chemical Geology* 168, 279-281. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00198-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00198-4)
- Tavares, T.D., Martins, M.S., Alkmim, F.F., Lana, C., 2020. Detrital zircons from the Upper Três Marias Formation, São Francisco Basin, SE Brazil: Record of a foreland deposition during the Cambrian? *Journal of South American Earth Sciences* 97, 102395. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102395>
- Tedeschi, M., Novo, T., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I. Tassinari, C., Silva, L.C., Gonçalves, L., Alkmim, F.F., Lana, C., Figueiredo, C., Dantas, E., Medeiros, S., De Campos, C., Corrales, F., Heilbron, M., 2016. The Ediacaran Rio Doce magmatic arc revisited (Araçuaí-Ribeira orogenic system, SE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences* 68, 167-186. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.011>
- Tedeschi, M., Pedrosa-Soares, A., Dussin, I., Lanari, P., Novo, T., Pinheiro, M.A.P., Lana, C., Peters, D., 2018. Protracted zircon geochronological record of UHT garnet-free granulites in the Southern Brasília orogen (SE Brazil): Petrochronological constraints on magmatism and metamorphism. *Precambrian Research* 316, 103-126. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.07.023>
- Teixeira, W., Ávila, C.A., Dussin, I.A., Neto, A.C., Bongioiolo, E.M., Santos, J.O., Barbosa, N.S., 2015. A juvenile accretion episode (2.35–2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: Zircon U–Pb–Hf and geochemical evidences. *Precambrian Research* 256, 148–169. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.11.009>
- Uhlein, A., Baptista, M.C., Seer, H.J., Caxito, F.A., Uhlein, G.J., Dardenne, M.A., 2011. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): Sistema Depositional de Leque Submarino em Bacia de Ante-País. *Geonomos* 19(2), 163-172.
- Uhlein, G.J., Uhlein, A., Halverson, G. P., Stevenson, R., Caxito, F. A., Cox, G. M., Carvalho, J.F.M.G., 2016. The Carrancas Formation, Bambuí Group: A record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco Craton, Brazil. *Journal of South America Earth Sciences* 71, 1- 16. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.009>
- Uhlein, G.J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G.P., Caxito, F.A., Cox G.M., 2017. Early to late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the Southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research* 299,101-116. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.020>

- Valeriano C.M. 1992. Evolução tectônica da extremidade meridional da Faixa Brasília, região da represa de Furnas, Sudoeste de Minas Gerais. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo- Instituto de Geociências, 192 pp.
- Valeriano, C. M.; Medeiros, S.R.; Vaz, G.S.; Neto, C.C.A., 2009. Sm-Nd isotope dilution TIMS analyses of BCR-1, AGV-1 and G-2 USGS rock reference materials: first results from the LAGIR Laboratory at UERJ, Rio de Janeiro. In: Simpósio - 45 Anos de Geocronologia no Brasil, São Paulo. Simpósio 45 Anos de Geocronologia no Brasil - Boletim de Resumos Expandidos. São Paulo: USP - IGC v. I: 146-148.
- Valeriano, C.M., 2017. The Southern Brasilia Belt. In: Monica Heilbron; Umberto G Cordani; Fernando F Alkmim. (Eds.). São Francisco Craton, Eastern Brazil Tectonic Genealogy of a Miniature Continent, first ed: Springer, pp. 189-203.
- Valeriano, C.M., Machado, N., Simonetti, A., Valladares, C.S., Seer, H.J., Simões, L.S.A., 2004. U-Pb geochronology of the southern Brasilia belt (SE-Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West-Gondwana. *Precambrian Research* 130, 27–55. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.10.014>
- Valeriano, C.M., Simões, L.S.A.; Teixeira, W.; Heilbron, M., 2000. Southern Brasilia belt (SE Brazil): tectonic discontinuities, K-Ar data and evolution during the Neoproterozoic Brasiliano orogeny. *Revista Brasileira de Geociências* 30, 195-199. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000301195199>
- Viana, M. G., Pimentel, M. M., Whitehouse, M. J., Fuck, R. A., Machado, N., 1995. O Arco Magmático de Mara Rosa, Goiás: geoquímica e geocronologia e suas implicações regionais. *Revista Brasileira de Geociências* 25(2), 111-123.
- Vieira, L.C.; Tindade, R.I.F.; Nogueira, A.; Ader, M., 2007. Identification of a Sturtian cap carbonate in the Neoproterozoic Sete Lagoas carbonate plataform, Bambuí Group, Brazil. *Comptes Rendus Geosciences* 339, 240-258. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.003>
- Warren, L.V., Quaglio, F., Riccomini, C., Simões, M.G., Poiré, D.G., Strikis, N.M, Anelli, L.E., Strikis, P.C., 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology* 42(5), 391-394. <https://doi.org/10.1130/G35304.1>
- Wise, S.A., Waters, R.L., 2007. Certificate of Analysis Standard Reference Material® 987 Strontium Carbonate (Isotopic Standard). NIST- National Institute of Standards & Technology, pp. 2. <https://www-s.nist.gov/srmors/certificates/987.pdf>.

APÊNDICE – Tabela de resultados de litogeoquímica.

Tabela 7 - Whole rock lithogeochemistry for siliciclastic samples from the Bambuí Group. Major elements values are in %, while trace and rare earth elements values are in ppm. (Continua)

	04A	05A	08	01A	03A	01C	16A	14	28F	27	30B	31B	26	25	19A	18	22A
	TM	TM	TM	TM	TM	TM	SS	SS	LJ	LJ	SSH	SSH	SSH	SSH	SL	SL	SB
SiO₂	62.28	78.7	75.53	78.07	71.75	66.29	61.75	60.57	20.84	70.89	67.68	64.76	65.93	59.72	16.68	61.67	81.31
Al₂O₃	12.26	8.92	11.57	9.53	11.58	13.94	10.65	15.64	3.74	12.86	13.54	14.47	15.14	15.32	2.05	16.64	8.37
Fe₂O₃	4.73	3.46	4.18	3.53	4.24	5.87	3.79	5.89	1.6	4.66	5.45	5.92	6.57	6.87	0.67	7.23	3.05
MnO	0.281	0.072	0.029	0.044	0.07	0.151	0.077	0.036	0.039	0.03	0.048	0.126	0.071	0.092	0.03	0.009	0.058
MgO	1.75	1.02	1.3	0.88	1.57	2.27	1.81	2.58	1.24	1.85	2.02	2.55	2.77	3.48	0.74	1.81	0.93
CaO	6.65	1.1	0.07	0.29	1.3	1.39	8.58	0.05	39.6	0.73	0.22	1.59	0.33	2.74	44.63	0.06	0.82
Na₂O	2.42	2.46	1.43	2.73	2.36	1.87	2.21	0.08	0.67	2.94	1.67	2.22	2.16	1.76	0.17	0.05	2.16
K₂O	2.2	1.81	2.18	1.97	2.23	3.06	2.02	9.54	0.68	2.22	2.89	3.08	3.02	3.69	0.65	6.22	1.28
TiO₂	0.767	0.589	0.782	0.585	0.726	0.834	0.675	0.864	0.223	0.786	0.812	0.847	0.965	0.742	0.108	0.935	0.518
P₂O₅	0.21	0.12	0.13	0.14	0.19	0.19	0.17	0.09	0.07	0.23	0.17	0.19	0.22	0.17	0.04	0.22	0.14
LOI	7.29	2.12	3.52	1.4	2.86	3.81	8.74	4.35	31.9	3.03	5.51	3.71	3.44	5.7	35.06	4.74	1.74
Total	100.9	100.4	100.7	99.16	98.86	99.68	100.5	99.68	100.6	100.2	100	99.46	100.6	100.3	100.8	99.58	100.4
Sc	11	7	10	8	10	13	9	16	4	10	14	15	16	18	3	20	6
Be	2	2	2	1	2	3	2	3	<1	2	3	3	3	3	<1	5	1
V	81	54	75	55	75	104	76	565	30	80	110	108	117	129	17	232	53
Ba	320	2172	388	356	386	503	237	737	196	392	374	376	389	408	74	2666	266
Sr	162	111	57	73	115	101	263	69	1376	116	65	161	87	313	194	45	92
Y	31	23	28	24	29	31	24	44	9	26	28	28	33	25	7	101	17
Zr	244	227	286	275	239	196	178	157	56	268	180	197	211	158	25	191	213
Cr	60	40	60	40	60	70	60	90	20	80	80	80	90	80	<20	150	50
Co	16	16	10	20	17	18	15	17	3	8	14	18	14	16	2	36	19
Ni	40	20	30	30	30	40	30	50	20	40	40	40	60	50	<20	40	20
Cu	20	<10	10	<10	20	<10	<10	20	10	20	20	40	30	20	<10	10	10
Zn	70	450	60	40	80	90	60	100	<30	60	90	80	100	90	<30	90	40

Ga	15	10	14	11	13	17	13	22	4	14	18	19	19	21	3	23	9
Ge	2	1	2	1	2	2	2	2	<1	2	2	2	2	2	<1	3	1
As	5	<5	6	<5	<5	<5	<5	<5	<5	6	7	8	<5	8	<5	<5	7
Rb	88	59	83	59	85	123	75	223	27	75	116	128	110	137	23	354	55
Nb	13	10	11	8	9	12	11	14	5	13	13	14	13	12	2	16	8
Ag	0.7	0.7	0.9	0.9	0.7	0.6	0.5	0.8	<0.5	0.8	0.6	0.8	0.6	0.5	<0.5	0.6	0.6
Sn	3	2	2	2	2	3	2	3	1	2	3	3	3	3	<1	4	4
Sb	0.8	0.6	0.6	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	<0.5	0.7	0.8	0.6	0.5	1.2	<0.5	0.9	0.6
Cs	4.2	1.8	2.8	1.8	3.7	5.5	3.6	6.4	2.6	3.5	6.3	6.9	5.1	9.6	1.4	16.7	2.3
Hf	6.3	6	7.1	6.7	6	5.2	4.8	4.4	1.5	6.9	4.9	5.7	5.3	4.2	0.7	5.2	5.1
Ta	1	0.9	1	0.9	1	1.1	0.9	1.2	0.3	1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.2	1.2	0.8
Tl	0.5	0.3	0.4	0.3	0.4	0.6	0.4	0.6	0.2	0.4	0.6	0.6	0.5	0.6	0.1	2.2	0.3
Pb	13	12	14	9	15	15	9	24	9	14	14	91	10	7	<5	7	11
Bi	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	<0.4	0.5	<0.4	<0.4	0.4	1.5	<0.4	<0.4	<0.4	0.5	<0.4
Th	11.1	8.8	11.6	10.7	10.9	11.5	8.6	10.9	3.1	11	10.6	10.6	11.5	9.9	1.7	13.7	6.5
U	2.6	1.4	2.6	2.1	2.4	2.4	2	3.6	2.2	2.3	2.6	2.8	2.7	2.4	0.4	3.7	1.7
La	37	37.2	49	35	36.8	36.9	29.2	70.1	8.1	27.6	23.6	31.2	37.9	29.2	7.3	52.8	24
Ce	75.1	75.3	81.5	70.7	74	76.5	60.1	162	17	59.6	39.5	64.8	78.4	59.1	14.6	96.7	49.4
Pr	8.56	8.52	11.5	8.1	8.54	8.75	6.87	20.5	2.05	7.1	5.77	7.53	9.13	6.92	1.71	12.8	5.68
Nd	32.9	31.8	42.7	30.1	32.9	33.9	26.5	81.5	8.2	26.9	22.3	29.4	34.5	26.3	6.5	56.7	21.6
Sm	6.8	6.1	8.3	5.9	6.4	6.9	5.3	17.3	1.8	5.7	5.1	6.3	7.4	5.3	1.6	16.7	4.4
Eu	1.35	1.18	1.64	1.13	1.28	1.42	1.1	3.66	0.37	1.3	1.07	1.29	1.46	1.11	0.29	3.97	0.92
Gd	6.3	5.1	6.4	5.1	6	6.3	4.8	13.5	1.8	5.2	4.9	5.5	6.5	4.8	1.4	20.5	3.7
Tb	1	0.8	1	0.8	0.9	0.9	0.7	1.9	0.3	0.8	0.8	0.9	1	0.8	0.2	3.5	0.6
Dy	5.7	4.4	5.4	4.3	5.2	5.6	4.4	9.6	1.6	5.1	5.3	5.4	5.8	4.5	1.2	21.3	3.3
Ho	1.1	0.8	1	0.8	1	1.1	0.9	1.7	0.3	0.9	1.1	1	1.1	0.9	0.2	3.8	0.6
Er	3.2	2.4	3	2.4	3	3	2.5	4.5	1	2.8	3.1	3.1	3.2	2.7	0.7	9.3	1.9
Tm	0.47	0.34	0.42	0.34	0.41	0.45	0.37	0.65	0.15	0.4	0.45	0.45	0.47	0.4	0.1	1.23	0.28
Yb	3.2	2.2	2.8	2.3	2.7	2.9	2.4	4.3	1	2.7	2.9	3	3.3	2.8	0.7	7.2	1.9
Lu	0.48	0.34	0.43	0.37	0.46	0.45	0.37	0.65	0.17	0.44	0.48	0.49	0.51	0.44	0.11	1.05	0.31

Fonte: O autor, 2020.

Tabela 8 - Whole rock lithogeochemistry of carbonate rock samples from the Bambuí Group. Major elements values are in %, while trace and rare earth elements values are in ppm.

	35B	29A	34B
	LJ	SL	SL
SiO ₂	0.26	0.38	0.16
Al ₂ O ₃	0.05	0.04	0.06
Fe ₂ O ₃ (T)	0.04	0.08	0.03
MnO	0.006	0.025	0.014
MgO	0.31	0.39	0.43
CaO	56.38	55.89	56.96
Na ₂ O	0.01	0.01	< 0.01
K ₂ O	0.01	< 0.01	0.01
TiO ₂	0.002	0.002	0.004
P ₂ O ₅	0.08	0.06	0.01
LOI	43.38	43.42	40.32
Total	100.5	100.3	98.82
Ba	194	67	7
Sr	1756	2086	185
Y	1	1	< 1
Zr	4	2	3
Co	< 1	5	< 1
Th	1.5	< 0.1	< 0.1
U	0.9	0.7	0.3
La	0.1	0.6	0.3
Ce	0.3	0.9	0.5
Pr	< 0.05	0.09	0.06
Nd	0.1	0.4	0.2
Sm	< 0.1	0.1	< 0.1
Eu	< 0.05	0.09	< 0.05
Gd	< 0.1	0.1	< 0.1
Dy	< 0.1	0.1	< 0.1
Er	0.1	< 0.1	< 0.1
Yb	0.1	< 0.1	< 0.1
Lu	0.01	< 0.01	< 0.01

Fonte: O autor, 2020.