

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DAS ROCHAS
CARBONÁTICAS DA ZONA CENTRAL DO EMBASAMENTO DO RIO GRANDE
DO SUL**

ROSSANA GOULART

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcus Vinícius Dorneles Remus

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Léo Afrâneo Hartmann – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Nelson Amoretti Lisboa – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dra. Renata da Silva Schmitt – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dissertação de Mestrado apresentada como
requisito parcial para a obtenção do Título
de Mestre em Geociências.

Porto Alegre - 2012.

À Milton Rodrigues Vicente, meu avô, trabalhador da mineração de calcário do Rio Grande do Sul nas décadas de 1960 a 1980.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família, pai e mãe, especialmente, pelo apoio às minhas escolhas e pelo incentivo constante, de perto ou de longe. Com vocês aprendi o valor da educação e do conhecimento e presenciei o quão transformadores eles podem ser na vida de todos. Em vocês tenho certeza de que tenho apoio sempre, onde quer que eu esteja ou onde a vida ainda vá me levar. Faço também um agradecimento especial aos meus tios, avós e primos, pelo apoio e pela presença na minha vida, mesmo que distante.

Agradeço ao meu querido, Vinícius, pelo apoio sempre, pela presença, pela paciência, carinho, compreensão e madrugadas passadas acordado junto comigo, me apoiando. Saber que tu estás por perto me tranquiliza e me traz serenidade.

Agradeço também ao Prof. Marcus Remus pelo apoio, paciência e bom humor com que conduziu esse trabalho.

Agradeço aos amigos Mariana Dias Martil, Luiz Vedana e Leonardo Gruber pelas palavras de incentivo ao longo desses anos.

Agradeço ao CNPq pelo apoio através da bolsa de mestrado (processo: 132464/2009-8), ao Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências e ao Laboratório de Sedimentologia do Centro de Estudos Costeiros e Oceânicos do Instituto de Geociências da UFRGS pelo apoio concedido para preparação de amostras, ao Laboratório de Geoquímica Isotópica do Instituto de Geociências da UFRGS, especialmente ao Professor Dr. Rommulo V. Conceição pelo apoio no desenvolvimento da metodologia de abertura das amostras para análise isotópica de Sr, a toda equipe do laboratório pela presteza durante todo o período em que foram realizados os procedimentos analíticos, e ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da UFPR pela presteza na realização das análises isotópicas de C e O.

RESUMO

O Bloco São Gabriel, localizado na zona central do embasamento cristalino do Rio Grande Sul, apresenta extensos registros do Neoproterozóico do Ciclo Brasileiro, contidos em complexos ígneos e metamórficos. Esses complexos também guardam registros sedimentares, com sequências carbonáticas metamorfas, cuja evolução tectônica é pouco conhecida. Essas sequências são observadas na Formação Passo Feio (Caçapava do Sul), no Complexo Cambaí (Vila Nova do Sul) e no Complexo Metavulcano-sedimentar Coxilha do Batovi (São Gabriel). As rochas carbonáticas da Formação Passo Feio compreendem dolomita mármores impuros. As amostras do Complexo Cambaí são classificadas como calcita mármores impuros. Os mármores do Complexo Coxilha do Batovi compreendem litotipos calcíticos e cálcio-silicáticos, cuja assembleia mineral é composta predominantemente por calcita em alguns exemplares e por grafita em outros, com percentuais de até 10% de quartzo, demonstrando contribuição siliciclástica no protólito. Idades de zircões de rochas associadas com os mármores, de trabalhos anteriores, indicam um intervalo entre 770 – 700 Ma para a deposição dos carbonatos do Bloco São Gabriel. Os carbonatos da Formação Passo Feio sofreram dolomitização durante ou logo após a deposição, enquanto os carbonatos do Complexo Cambaí não foram afetados pela dolomitização. A geoquímica dos elementos traços e terras raras indica que os mármores analisados preservaram as assinaturas originais do protólito nos diferentes graus metamórficos: Coxilha do Batovi (grau baixo), Formação Passo Feio e Complexo Cambaí (grau médio). A análise integrada dos isotópicos de Sr, ^{13}C e ^{18}O da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí revelou a preservação de assinaturas isotópicas primárias. Na Formação Passo Feio essas assinaturas são: 0,7074 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), -0,26‰ e 2,44‰ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) e -5,68‰ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$). No Complexo Cambaí, as assinaturas primárias são: 0,7069 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), 5,75‰ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) e -11,64‰ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$). Quando comparadas com a variação desses isótopos na água do mar ao longo do Neoproterozóico, verifica-se que os mármores da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí estão situados no intervalo entre 740 e 730 Ma. O período sugerido para a deposição das rochas carbonáticas da Formação Passo Feio é de 770 a 730 Ma, e entre 740-730 para o Complexo Cambaí.

Palavras-chave: Mármore, Bloco São Gabriel, isótopos de Sr, ^{13}C e ^{18}O ; assinaturas isotópicas primárias, Neoproterozóico, evento deposicional

ABSTRACT

The São Gabriel Block, located in the central zone of the crystalline basement of Rio Grande do Sul has extensive Neoproterozoic records of the Brasiliano Cycle, contained in igneous and metamorphic complexes. These complexes also keep sedimentary records with metamorphosed carbonate sequences whose tectonic evolution is poorly understood. These sequences are found in Passo Feio Formation, located in Caçapava do Sul region, in Complex Cambaí, at Vila Nova do Sul region and in Coxilha do Batovi metavolcano-sedimentary Complex, in the São Gabriel region. The Passo Feio Formation carbonate rocks consist of impure dolomite marbles. The Cambaí Complex samples are classified as impure calcite marbles. Coxilha do Batovi Complex samples include calcite and calc-silicate marbles whose mineral assemblage are composed predominantly of calcite in some samples and graphite in others, with quartz rates up to 10% showing the siliciclastic contribution to the protolith. Zircon ages of associated rocks from previous works indicate an interval between 770-700 Ma for carbonate deposition in S. Gabriel Block. The carbonates from Passo Feio Formation were affected by dolomitization process during or early after its deposition, while the carbonates from Cambaí Complex were not affected by dolomitization. Trace elements and REE geochemistry of marbles indicate preservation of original signature of carbonate protoliths along different metamorphic grades; Coxilha do Batovi (low grade), Passo Feio Formation and Cambaí Complex (medium grade). The integrated analysis of Sr isotope, ^{13}C and ^{18}O from Passo Feio Formation and Cambaí Complex revealed the preservation of primary isotopic signatures. The Passo Feio Formation signatures are: 0,7074 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), -0,26‰ and 2,44‰ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) and -5,68 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$). In Cambaí Complex, the primary signatures are: 0,7069 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), 5,75 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) and -11,64 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$). When compared with the variation of these isotopes in seawater along the Neoproterozoic it appears that Passo Feio Formation and Cambaí Complex are situated in the range between 740 and 730 Ma. Based on these data it is suggested that the São Gabriel Block depositional event occurred between 770-700 Ma. The period suggested for the carbonate rocks depositional event of Passo Feio Formation is between 770-730 Ma, and specifically between 740-730 for Cambaí Complex.

Keywords: Marble, São Gabriel Block, Sr, ^{13}C e ^{18}O isotopes; primary isotopic signatures, Neoproterozoic, depositional event

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| RESUMO | 4 |
| ABSTRACT | 5 |
| SUMÁRIO | 6 |
| LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO 1 | 8 |
| LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO 3 | 8 |
| LISTA DE TABELAS | 10 |
| PREÂMBULO | 11 |
| 1. INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1. Abordagem do Problema..... | 13 |
| 1.2. Objetivos | 14 |
| 1.3. Estado da Arte dos Mármorees do Bloco São Gabriel..... | 15 |
| 1.4. O Bloco São Gabriel | 17 |
| 1.4.1. Formação Passo Feio..... | 18 |
| 1.4.2. Complexo Cambaí..... | 19 |
| 1.4.3. Complexo Metavulcano-Sedimentar Coxilha do Batovi | 19 |
| 1.4.4. Referências Bibliográficas | 20 |
| 2. METODOLOGIA | 27 |
| 2.1. Abordagem metodológica | 27 |
| 2.2. Amostragem | 27 |
| 2.3. Preparação das amostras..... | 27 |
| 2.4. Análise de elementos maiores, menores e traços | 28 |
| 2.5. Isótopos de Sr | 28 |
| 2.6. Isótopos de C e O | 29 |
| 3. ARTIGO..... | 31 |
| Composição isotópica de Sr, C e O e geoquímica de ETR das rochas carbonáticas do Bloco São Gabriel, Rio Grande do Sul..... | 31 |
| Sr, C e O isotopic compositions and REE geochemistry of São Gabriel Block carbonate rocks, Rio Grande do Sul | 31 |
| Resumo..... | 31 |
| Abstract | 32 |
| 1. Introdução | 33 |
| 2. Área, materiais e métodos..... | 34 |
| 2.1. O Bloco São Gabriel | 34 |
| 2.1.1. Formação Passo Feio..... | 36 |

| | |
|--|----|
| 2.1.2. Complexo Cambaí..... | 36 |
| 2.1.3. Complexo Coxilha do Batovi..... | 36 |
| 2.2. Metodologia e técnicas analíticas..... | 39 |
| 3. Resultados..... | 40 |
| 3.1. Amostragem e análise petrográfica..... | 40 |
| 3.2. Elementos maiores..... | 45 |
| 3.3. Comportamento dos elementos maiores nas fases sólidas..... | 46 |
| 3.4. Elementos terras raras..... | 50 |
| 3.5. Abundância e distribuição do Sr..... | 52 |
| 3.6. Razões isotópicas $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ | 53 |
| 3.7. Isótopos de C e O..... | 57 |
| 3.8. Identificação de assinaturas isotópicas primárias..... | 58 |
| 4. Discussão dos resultados..... | 61 |
| 4.1. Geoquímica elemental..... | 62 |
| 4.2. Processo de dolomitização nos mármore..... | 64 |
| 4.3. Comportamento dos ETRs..... | 65 |
| 4.4. Assinaturas isotópicas de Sr, ^{13}C e ^{18}O da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí e suas implicações regionais..... | 66 |
| 5. Conclusões..... | 71 |
| Agradecimentos..... | 73 |
| Referências bibliográficas..... | 73 |
| ANEXO 1 – CARTA DE RECEBIMENTO DO ARTIGO PELO PERIÓDICO..... | 78 |

LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO 1

Figura 1. Mapa geológico regional do Bloco São Gabriel. a) Mapa geotectônico esquemático mostrando o contexto regional do Bloco São Gabriel no Escudo Sul-Riograndense (modificado de Remus et. al. (2000)). b) Mapa geológico das regiões de Caçapava do Sul, Vila Nova do Sul e São Gabriel inseridas no Bloco São Gabriel, compilado a partir das Folhas de Uruguaina (SH 21) e Porto Alegre (SH 22) disponibilizadas online pela CPRM. Os pontos marcados sobre o Complexo Coxilha do Batovi, Complexo Cambaí e Formação Passo Feio correspondem às amostras analisadas nesse estudo.....25

LISTA DE FIGURAS – CAPÍTULO 3

Fig. 1. Mapa geológico regional do Bloco São Gabriel. a) Mapa geotectônico esquemático mostrando o contexto regional do Bloco São Gabriel no Escudo Sul-Riograndense (modificado de Remus et. al. (2000)). b) Mapa geológico das regiões de Caçapava do Sul, Vila Nova do Sul e São Gabriel inseridas no Bloco São Gabriel, compilado a partir das Folhas de Uruguaina (SH 21) e Porto Alegre (SH 22) disponibilizadas online pela CPRM. Os pontos marcados sobre o Complexo Coxilha do Batovi, Complexo Cambaí e Formação Passo Feio correspondem às amostras analisadas nesse estudo.....39

Fig. 2. Afloramentos e fotomicrografias dos mármore da Formação Passo Feio: (a) Mármore maciço, com baixo percentual de sílica; (b) Fotomicrografia da amostra BSG 01 com textura granoblástica poligonal formada pelos grãos de dolomita (c) Mármore esverdeado rico em talco e tremolita; (d) Fotomicrografia da amostra BSG 02 com textura granoblástica e presença de tremolita e dolomita; (e) Mármore bandado; (f) Fotomicrografia da amostra BSG 05 com bandas escuras compostas por tremolita e talco e bandas félsicas compostas por carbonatos.43

Fig. 3. Afloramentos e fotomicrografias dos mármore do Complexo Cambaí e do Complexo Coxilha do Batovi. Todas as fotomicrografias foram feitas em luz polarizada e com aumento de 25 x. Complexo Cambaí: (a) Lentes de mármore em meio à rocha granítica; (b) Fotomicrografia da amostra BSG 11 mostrando textura granoblástica, carbonatos com granulação grossa e deformação plástica das maclas, silicatos sob a forma de agregados. (c) Mármore branco, maciço, com baixo percentual de silicatos; (d) Fotomicrografia da amostra BSG 15 com carbonatos com granulação grossa (8 mm de diâmetro) e textura granoblástica. Complexo Coxilha do Batovi: (e) Afloramento de mármore preto, rico em grafita em

pedreira desativada; (f) Fotomicrografia da amostra BSG 16 com foliação marcada pela grafita e presença de agregados de carbonatos e quartzo em meio à grafita; (g) Afloramento de mármore preto, bandado, rico em grafita ao lado de mármore branco, rico em calcita; (h) Fotomicrografia da amostra BSG 18, com textura granoblástica muito fina e agregados de quartzo e carbonatos de granulação grossa.45

Fig. 4. a) Diagrama $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ (Bucher & Frey 1994). Campos 1a, 1b e 1c: mármore dolomíticos a calcítico-dolomíticos. Campos 2a e 2b: mármore cálcio-silicáticos. b) Diagrama triangular calcita-dolomita-outros (demais fases sólidas) gerado a partir da quantificação modal dos minerais. c) Diagrama quantitativo das fases sólidas dos mármore analisados. O eixo x apresenta os percentuais de cada fase mineral.49

Fig. 5. a) Diagrama MgO-CaO ; b) Diagrama $\text{SiO}_2\text{-CaO}$; c) Diagrama $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ dos mármore analisados e d) Diagrama $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ dos mármore estudados.50

Fig. 6. Padrão dos ETRs dos mármore normalizado em relação ao folhelho NASC (Haskin et al., 1968).52

Fig. 7. a) Diagrama $\text{Mg/Ca} \times \text{Sr}$ (ppm) dos mármore analisados; b) Histograma de frequência das razões isotópicas $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$; c) Diagrama $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} \times \text{Sr}$ dos dolomita mármore do Complexo Cambaí; d) Diagrama $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} \times \text{Sr}$ dos calcita mármore da Formação Passo Feio; e) Histograma de frequência dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos mármore analisados e f) Histograma de frequência dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ dos mármore analisados.56

Fig. 8. a) Diagrama $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} \times \text{Mn/Sr}$; b) $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} \times \delta^{18}\text{O}$; c) $\delta^{13}\text{C} \times \text{Mn/Sr}$ e d) $\delta^{13}\text{C} \times \delta^{18}\text{O}$. As setas representam as trajetórias das rochas carbonáticas entre suas composições primárias e diagenéticas (Jacobsen & Kaufman, 1999).61

Fig. 9. a) Diagrama de variação temporal da razão $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ nos carbonatos neoproterozóicos de vários continentes. As linhas pontilhadas e os campos verticais representam idades estimadas e os limites chave dos eventos tectônicos descritos no Bloco São Gabriel, conforme descrito no texto. As siglas no eixo superior do diagrama são: C-PC – Cambriano-Pré-Cambriano; EMPF – Evento de Metamorfismo da Formação Passo Feio; EMCb – Evento de Metamorfismo do Complexo Cambaí; MCb – Magmatismo do Complexo Cambaí e ZrPF – Idades dos zircões detríticos parcialmente apagados da Formação Passo Feio. Modificado a partir de Jacobsen & Kaufmann (1999). b) Diagrama de variação temporal do $\delta^{13}\text{C}$ dos carbonatos. Modificado de Jacobsen & Kaufmann (1999).70

Fig. 10. Diagrama de variação temporal do $\delta^{18}\text{O}$, relativo ao padrão PDB, dos carbonatos. Modificado de Jacobsen & Kaufmann (1999). 71

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Concentrações dos principais óxidos e elementos maiores e menores. | 48 |
| Tabela 2: Concentrações dos ETRs dos mármore estudados. | 51 |
| Tabela 3: Razões Sr/Sr das amostras de mármore estudadas. | 55 |
| Tabela 4: Resultados $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ | 57 |

PREÂMBULO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo “**Composição isotópica de Sr, C e O e geoquímica de ETR das rochas carbonáticas do Bloco São Gabriel, Rio Grande do Sul**” submetido ao periódico Pesquisas em Geociências. Por essa razão sua organização compreende os seguintes capítulos:

a) Introdução: Esse capítulo compreende a apresentação do tema abordado na dissertação, bem como o objetivo central do estudo. Nesse capítulo também é apresentada uma breve revisão do estado da arte do tema da pesquisa, bem como o contexto geológico da área de estudos.

b) Metodologia: Esse capítulo trata da abordagem metodológica aplicada ao estudo, bem como dos diversos procedimentos empregados durante a pesquisa, desde o trabalho de campo até as análises químicas.

c) Artigo científico submetido ao periódico: Esse capítulo consiste no corpo principal da dissertação e está estruturado em Introdução, Área, materiais e métodos, Resultados, Discussão dos resultados e Conclusões. No item Introdução é apresentado o tema do estudo, no item Área, materiais e métodos é apresentada uma breve descrição do Bloco São Gabriel, seguido de uma explanação sobre a metodologia e as técnicas analíticas empregadas no estudo. Em seguida, o item Resultados traz os dados obtidos por meio da análise petrográfica, geoquímica de elementos maiores, comportamento desses elementos nas fases sólidas, geoquímica de ETRs, abundância e distribuição do Sr, razões isotópicas Sr^{87}/Sr^{86} , análise de isótopos de C e O e identificação de assinaturas isotópicas primárias. O item Discussão dos resultados está dividido em geoquímica elemental, processo de dolomitização nos mármore, comportamento dos ETRs e assinaturas isotópicas de Sr, C e O da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí e suas implicações regionais. Por fim, no item Conclusão é feita uma análise integrada dos resultados obtidos.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Abordagem do Problema

O embasamento cristalino pré-cambriano do Rio Grande do Sul tem sido amplamente estudado ao longo das últimas décadas, e os trabalhos realizados têm proporcionado dados esclarecedores a respeito dos aspectos geoquímicos, geocronológicos e estruturais relativos à evolução tectônica dessas rochas. No entanto, não há dados definitivos a respeito das rochas carbonáticas do arcabouço litológico de diversas unidades do embasamento.

Dentre os blocos tectônicos que compõem o embasamento cristalino do estado, o Bloco São Gabriel tem sua evolução tectonometamórfica atribuída a um ambiente de arco magmático cujos registros têm idade Neoproterozóica e estão associados ao ciclo orogênico Brasileiro. O Bloco São Gabriel é composto pela Formação Passo Feio, Grupo Palma, Complexo Cambaí, bem como pelas rochas graníticas intrusivas pós-tectônicas e tardi a pós-tectônicas em relação ao Ciclo Brasileiro.

As rochas carbonáticas que compõem as unidades do Bloco São Gabriel são metamórficas e contêm um extenso registro de eventos desde sua cristalização e diagênese até metamorfismo regional e hidrotermalismo. No entanto, mesmo com as constantes pesquisas realizadas em diversas áreas desse compartimento tectônico, a evolução do mesmo ainda é controversa e descrita através de diferentes modelos geológicos, os quais contam com poucos dados de rochas carbonáticas. Esses estudos servirão como arcabouço de referência para o entendimento das características geoquímicas encontradas.

Diversas pesquisas a nível global têm sido realizadas, especialmente nas duas últimas décadas, com o objetivo de extrair dessas rochas toda a riqueza de informações nelas contida. Trabalhos de referência como a criação de uma curva padrão de composição da água dos oceanos no Neoproterozóico através da análise de assinaturas dos isótopos de Sr, C e O de mármore de diferentes localidades desenvolvido por Jacobsen & Kaufman (1999), demonstram algumas das informações mais importantes obtidas por meio da caracterização

geoquímica e isotópica de rochas carbonáticas. Também merecem destaque os estudos clássicos de Knoll et al. (1986) e Knoll & Walter (1992) sobre isótopos de carbono e a estratigrafia do Proterozóico, os diversos trabalhos de Veizer, como Veizer et al. (1997) sobre estratigrafia química e o potencial de detecção de eventos através de isótopos de Sr, os trabalhos de Kaufmann et al. (1991) e (1995), sobre a variação do C no Neoproterozóico e sobre a composição dos carbonatos em sequências proterozóicas da Namíbia, bem como o estudo de Halverson et al. (2007), o qual aprimorou a curva de composição da razão Sr^{87}/Sr^{86} no Neoproterozóico.

Tendo em vista a carência de dados a respeito das rochas carbonáticas do embasamento do Rio Grande do Sul e a crescente disponibilidade e aplicabilidade de técnicas de microanálise e espectrometria de massa, buscou-se por meio da caracterização geoquímica de elementos maiores, menores, traços e isótopos, investigar a origem e a evolução das rochas carbonáticas distribuídas ao longo do Bloco São Gabriel. O estudo desses litotipos pode gerar respostas para questões como a determinação das idades de deposição e diagênese dessas rochas e contribuir dessa forma para o aprimoramento da discussão dos modelos evolutivos do bloco tectônico no qual estão inseridas.

1.2. Objetivos

O tema da pesquisa tem como objetivo a investigação geoquímica aprofundada das rochas carbonáticas do embasamento cristalino do Rio Grande do Sul, especificamente do Bloco São Gabriel. Por essa razão, os estudos foram desenvolvidos nos mármorees da Formação Passo Feio, na região de Caçapava do Sul, do Complexo Cambaí, na região de Vila Nova do Sul e do Complexo Metavulcano-sedimentar Coxilha do Batovi, na localidade de Cerro do Batovi, município de São Gabriel.

A pesquisa inclui inicialmente a análise petrográfica dos litotipos seguida de análise geoquímica de elementos maiores, menores e traços, os quais permitirão a classificação das rochas representativas dos mármorees do Bloco São Gabriel. A interpretação desses dados permitirá a identificação de afinidades geoquímicas, as quais podem ser indicativas dos processos tectono-metamórficos sofridos por essas rochas, tais como metamorfismo, intrusões magmáticas e hidrotermalismo. Posteriormente, e de forma integrada com os demais resultados obtidos, será realizada a análise das assinaturas isotópicas de Sr, C e O e a

correlação das mesmas com os eventos tectono-metamórficos que ocorreram no Bloco São Gabriel a partir do período Neoproterozóico.

1.3. Estado da Arte dos Mármore do Bloco São Gabriel

As rochas carbonáticas inseridas no Bloco São Gabriel foram abordadas em dissertações de mestrado e artigos de forma parcial, sem que essas fossem o tema principal dos trabalhos apresentados. Por esta razão há menção desses litotipos em diversos artigos sobre geoquímica e evolução tectônica do embasamento cristalino do Rio Grande do Sul, mas há poucos dados geoquímicos dos mesmos. De acordo com o exposto, serão apresentadas a seguir as referências utilizadas nesse trabalho, sem o objetivo de realização de uma revisão integral de todos os estudos em que essas rochas foram mencionadas sem apresentação de dados geoquímicos.

Ao longo da pesquisa bibliográfica realizada nos bancos de dados da Biblioteca de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), bem como no banco de dados online Periódicos, associado à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), foram verificadas três dissertações de mestrado cujos temas mais se aproximavam do estudo proposto na presente dissertação: “Estudo Geológico da Feição de Pedra Branca, Bajé, Rio Grande do Sul, com enfoque especial a ocorrências de mármore” de Lisboa (1977), “Evolução tectono-metamórfica do Complexo Metavulcano-sedimentar Coxilha do Batovi, São Gabriel (RS)” de Schmitt (1995). Além dessas dissertações também foi verificado o trabalho de Bortolotto (1987), o qual sintetiza em artigo científico os dados levantados em sua dissertação focalizando a petrografia dos mármore de Caçapava do Sul (RS). Além disso o assunto mármore também foi abordado no trabalho de conclusão de Carolina P. Gazzoni, 2010, o qual trata da mineralogia de depósitos de minério de Cu em escarnitos e mármore da região de Caçapava do Sul.

O trabalho mais antigo que tem como tema as ocorrências de mármore no Rio Grande do Sul é de autoria de Lisboa (1977) e trata fundamentalmente do mapeamento das jazidas de mármore na localidade de Pedra Branca, próxima ao município de Bagé, atribuídas ao Grupo Cambaí. Na sua dissertação, Lisboa define dois tipos distintos de ocorrências posicionadas nos flancos nordeste e sudeste de uma dobra anticlinal mapeada na região. Após a definição dos aspectos geológicos e tectônicos que controlam as jazidas de mármore, o autor realizou a cubagem da jazida da Chácara do Cotovelo, localizada na

localidade de Pedra Branca, na qual, dentre os outros parâmetros, verificou que o teor médio de CaO e de MgO são de 33,04% e 14,92%, respectivamente, fato que indica o caráter calcítico predominante entre os mármore da região.

Já na dissertação de Schmitt (1995) a autora propõe, através de estudos de análise estrutural e geocronologia, um modelo de evolução tectônica do Complexo Metavulcano-sedimentar Coxilha do Batovi, também inserido no Bloco São Gabriel. A autora identifica três associações de fácies distintas, as quais formam as sequências vulcano-sedimentares identificadas na área de estudos. A primeira associação de fácies sugere um ambiente de mar aberto no qual são identificados, dentre outros, depósitos de grafita-mármore calcítico; a segunda associação indica uma reativação tectônica, a qual teria proporcionado a deposição de sequências turbidíticas prográdantes, nas quais são observados, dentre outras fácies, mármore dolomíticos silicáticos; por fim foi identificada uma terceira associação de fácies indicativa de um ambiente marinho raso, a qual é composta por metapsamitos quartzíticos.

Essas associações sedimentares foram posteriormente submetidas a duas fases de deformação, a primeira de empurrão e a segunda de transcorrência e dobramento. A primeira fase de deformação também corresponde ao pico térmico, o qual indica um metamorfismo regional de baixo grau, fácies xisto-verde inferior. Esse pico metamórfico, segundo a autora, foi responsável pela homogeneização isotópica do sistema Rb/Sr, para a qual foi obtida a idade de 669 Ma.

Nesse trabalho também foram realizadas análises isotópicas de Sr^{87}/Sr^{86} de 16 amostras de mármore descritos como grafita mármore calcíticos, grafita filitos, mármore dolomíticos silicáticos, metapsamitos e veios carbonáticos. No entanto, as razões obtidas dessas amostras representam valores alterados pela diagênese e pelos eventos tectono-metamórficos identificados nas rochas do Complexo Coxilha do Batovi.

Por fim, Bortolotto (1987) classifica os mármore coletados ao longo de um corpo de rochas carbonatadas de aspecto lenticular inserido no Grupo Porongos, o qual circunda o Granito Caçapava, conforme descrito pelo autor. Através dos estudos apresentados no referido artigo, o autor classifica os mármore analisados como mármore dolomíticos silicosos. Essa classificação foi realizada através da análise petrográfica de 25 amostras, das quais 9 foram selecionadas para análises químicas de rocha total. O autor também utilizou a técnica de microsonda eletrônica para análise da composição dos minerais silicáticos.

1.4. O Bloco São Gabriel

O Bloco São Gabriel foi definido inicialmente por Jost e Hartmann (1984) como um domínio geotectônico, o qual apresenta importantes registros do Ciclo Brasileiro no Escudo Sul-Rio-Grandense (Figura 1). O referido domínio é limitado a norte e a oeste pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná, a leste pelo Cinturão Porongos e a sul pelo Bloco Taquarembó, o qual contém rochas granulíticas arqueanas e paleoproterozóicas. Os blocos tectônicos mencionados são separados por uma faixa de lineamentos paralelos e subparalelos de direção NW-SE com extensão de cerca de 70 km, denominada Lineamento de Ibaré.

Ao longo da década de 90 foram propostos alguns modelos de evolução do embasamento pré-cambriano do Rio Grande do Sul. Entre os trabalhos publicados nessa década destacam-se Chemale et al. (1995), o qual trata da estratigrafia e do contexto tectônico na região sul do Brasil durante o Ciclo Brasileiro, Fernandes et al. (1992) sobre os padrões de deformação do Cinturão Dom Feliciano do sul do Brasil, Babinski et al. (1996) sobre o evento orogênico do Bloco São Gabriel datado de 700-750 Ma, Leite et al. (1998), o qual apresentou idades U/Pb obtidas de zircões através de SHRIMP (*Sensitive High Resolution Ion Micro Probe*) e proporcionou um refinamento da geocronologia do Neoproterozóico no sul do Brasil. Posteriormente, nos anos 2000 destaca-se o trabalho de Hartmann et al. (2000), na qual é realizada uma revisão da geocronologia realizada por meio do método U/Pb em zircões através de SHRIMP e apresentado um modelo de evolução geotectônica do sul do Brasil do Arqueano ao Neoproterozóico, bem como o trabalho de Remus et al. (2000) o qual traz novas idades obtidas por meio de rochas metassedimentares e diques dacíticos da Formação Passo Feio, bem como do Granito Caçapava.

Uma das pesquisas mais recentes a respeito do Bloco São Gabriel foi publicada por Saalman et al. (2006), onde os autores abordam a evolução tectônica do Bloco São Gabriel no período Neoproterozóico e fazem complementações aos modelos tectônicos propostos. Os referidos autores sugerem que a evolução tectônica dessa área teria começado com a formação de um arco intra-oceânico há cerca de 880 Ma, ocasionado por uma subducção ocorrente a leste, seguida pela acreção desse arco à margem leste do Cráton Rio de La Plata. A seguir, ocorre uma subducção subsequente a oeste, datada de 850 a 700 Ma sob o bloco formado pelo Cráton Rio de la Plata e pelas rochas inseridas no arco intra-cratônico. Essa subducção proporciona o desenvolvimento de uma margem continental ativa. Nesse

contexto, os litotipos correspondentes à base do Grupo Palma, no qual está inserido o Complexo Coxilha do Batovi, foram depositados provavelmente nas regiões de ante arco (*fore arc*) e de retro-arco (*back arc*), embora com menor abundância de sedimentos provenientes do cráton e predomínio de sedimentos do arco de ilha. Por essa razão, na cunha acrecionária é verificada a justaposição de rochas vulcânicas de arco de ilha, rochas sedimentares de ante arco e rochas ultramáficas metavulcânicas. O estágio final da evolução tectônica do Bloco São Gabriel tem idade de 700 Ma e consiste na colisão oblíqua do Cráton Rio de la Plata com a margem passiva atribuída ao Cinturão Metamórfico Porongos e ao gnaiss Encantadas. No entanto, a autora ressalta que a referida colisão pode ter ocorrido também durante o evento Dom Feliciano, entre 630 e 600 Ma. Em as ambas as hipóteses o Bloco São Gabriel representa uma zona de colisão entre dois crátons: Rio de la Plata e Encantadas.

Apesar dos diversos estudos desenvolvidos nesse bloco, o mesmo ainda não conta com uma divisão estratigráfica e uma nomenclatura definida. Considerando esse aspecto do Bloco São Gabriel, a seguir será apresentada uma breve revisão das unidades litoestratigráficas investigadas nesse estudo.

1.4.1. Formação Passo Feio

A Formação Passo Feio, também agrupada na Sequência Metamórfica Vacacaí por alguns autores, está localizada no entorno do Granito Caçapava e trata-se de uma sequência vulcano-sedimentar metamorfisada, composta por xistos pelíticos, mármore, filitos, folhelhos, quartzitos, metaconglomerados, rochas cálcio-silicáticas, anfibolitos e, de forma subordinada, metabasaltos e xistos magnesianos (Remus et al., 2000). O referido autor atribui as unidades sedimentares dessa formação a uma sequência composta por sedimentos arenosos, pelíticos e carbonáticos. Já as rochas metabásicas apresentam composição geoquímica indicativa de derivação de séries toleíticas e alcalinas (Bitencourt & Hartmann, 1984 a, b).

Quanto à geocronologia dessa formação, os primeiros dados foram publicados por Soliani (1986) e mostraram idades K/Ar entre 556 e 666 Ma, obtidos de muscovitas e microdioritos, respectivamente. Posteriormente, Remus et al. (2000) apresenta dados obtidos por meio do método U/Pb através de SHRIMP em zircões oriundos de rochas metassedimentares, os quais revelam idades Pb^{207}/Pb^{206} de 2053 ± 46 Ma, cuja área fonte sugerida é o Complexo Granulítico Santa Maria Chico. Nesse trabalho também foi

apresentado um diagrama concórdia com idades Pb^{206}/U^{238} entre 908 e 774 Ma, as quais são atribuídas ao apagamento parcial dos registros dos zircões durante o evento metamórfico de 700 Ma. Nesse trabalho os autores apresentam também idades Pb^{207}/Pb^{206} de 3.222 ± 13 Ma e 947 a 190 Ma obtidas de zircões oriundos de diques dacíticos, cujas fontes mais prováveis, segundo os autores, são as rochas vulcânicas e plutônicas do Bloco São Gabriel, descritas como associações TTG constituintes da região de Cerro Mantiqueiras (Leite et al., 1998). A partir desses dados, o autor sugere que a sequência sedimentar da Formação Passo Feio foi afetada por um metamorfismo regional há *ca.* 700 Ma, com zircões de proveniência arqueana, paleoproterozóica e neoproterozóica.

1.4.2. Complexo Cambaí

O Complexo Cambaí é constituído por metadioritos, metatonalitos e metatondhjemitos situados nas zonas central e oeste do Bloco São Gabriel, intrusivos no Grupo Palma. As rochas plutônicas apresentam assinaturas geoquímicas cálcio-alcálicas e são interpretadas como oriundas de um arco magmático (Chemale et al., 1995 e Babiski et al., 1996). Quanto à geocronologia dessa unidade, Leite et al. (1998) apresentou idades U/Pb em zircão obtidas por meio de SHRIMP de 750 – 700 Ma, entre as quais uma datação de 704 ± 13 obtida em dioritos da região de Vila Nova do Sul.

Sequências metassedimentares são descritas no Complexo Cambaizinho, localizado na região de Arroio Cambaizinho, no município de São Gabriel. Esse complexo é constituído por gnaisses quartzo-feldspáticos, anfíbolitos e quartzitos, derivados de sedimentos areno-pelítico-carbonatados (Remus, 1991). Nesse complexo também são verificadas intercalações de serpentinitos, xistos magnesianos e anfíbolitos sob a forma de camadas e/ou lentes interestratificadas, as quais indicam derivações a partir de derrames e intrusões de composição básica-ultrabásica.

1.4.3. Complexo Metavulcano-Sedimentar Coxilha do Batovi

O Complexo Coxilha do Batovi é constituído por metapsamitos calcíferos, arcoseanos e quartzíticos, metapelitos, mármores calcíticos, mármores dolomíticos silicáticos, brechas dolomíticas, metavulcânicas e metavulcanoclásticas, e está localizado na extremidade oeste do Bloco São Gabriel, ao longo de uma faixa de 10 km x 2 km (Schmitt, 1995). Esses litotipos estão reunidos em três associações de fácies distintas, as quais formam as sequências vulcano-sedimentares identificadas no complexo.

Quanto à geocronologia e evolução tectônica dessas rochas, a referida autora identificou duas fases de deformação sobre esses litotipos: a primeira de empurrão e a segunda de transcorrência e dobramento. A primeira fase de deformação corresponde ao pico térmico indicativo de um metamorfismo regional de baixo grau, fácies xisto-verde inferior. O pico metamórfico desse evento, segundo a autora, foi responsável pela homogeneização isotópica do sistema Rb/Sr para a qual foi obtida a idade de 669 Ma.

1.4.4. Referências Bibliográficas

Almeida, F.F.M., Hasui, Y., de Brito Neves, B.B. & Fuck, R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. *Earth-Science Reviews*, 17: 1-29.

Almeida, F.F.M., de Brito Neves, B.B. & Carneiro, C.D.R. 2000. The origin and evolution of the South American Plataform. *Earth-Science Reviews*, 50: 77-111.

Bailey, T.R., McArthur, J.M., Prince, H. & Thirlwall, M.F. 2000. Dissolution methods for strontium isotope stratigraphy: whole rock analysis. *Chemical Geology*, 167 (3-4): 313-319.

Babinski, M., Chemale Jr., F., Hartmann, L.A. van Schmus, W.R. & Silva, L.C. 1996. Juvenile accretion at 750-700 Ma in Southern Brazil. *Geology*, 24: 439-442.

Bitencourt, M.F. & Hartmann, L.A. 1984 a. Reconhecimento geoquímico dos xistos magnesianos da região do Passo Feio, Caçapava do Sul, RS. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia* (Rio de Janeiro, Brasil) 6: 2607-2614.

Bitencourt, M.F. & Hartmann, L.A. 1984 b. Geoquímica das rochas anfíbolíticas da região de Caçapava do Sul, RS. Parte I: Caracterização geológica e petrográfica, elementos maiores e menores. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia* (Rio de Janeiro, Brasil) 9: 4253-4265.

Bortolotto, O.J., 1987. Petrografia dos mármore de Caçapava do Sul, RS. *Ciência e Natura*, 9: 37-65.

Bucher, K.; Frey, M. 1994. *Petrogenesis of Metomorphic Rocks*. Berlin-Germany, Springer-Verlag. 318p.

Chemale Jr., F., Hartmann, L.A. & da Silva, L.C. 1995. Stratigraphy and tectonismo of the Brasiliano Cycle in Southern Brazil. In: McNiall M. Ed. *Proceedings Volume on Proterozoic Crust and Metallogenic Evolution*, p. 151-166. Communications Geological Society of Namibia (10).

Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. 1965. *An introduction to the rock forming minerals*. London, Longman. 528 p.

Fernandes, L.A.D., Tommasi, A. & Porcher, C.C. Deformation patterns in the Southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt: A reappraisal. *Journal of South American Earth Sciences*, 5 (1): 77-96.

Ferry, J.M. 1976. Metamorphism of calcareous sediments in the Waterville-Vassalobro area, South-Central Maine: mineral reactions and graphical analysis. *American Journal of Science*, 276: 841-882.

Fletcher, I.R., Santos, J.O.S. & Vasconcellos, M.A.Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of Southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 829-844.

Gazzoni, C.P. 2010. *Padrão mineralógico de ocorrência dos depósitos de minério de cobre em escarnitos e mármores da região de Caçapava do Sul*. Porto Alegre. 54 p. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Halverson, G.P., Dudás, F., Maloof, A.C. & Bowring, S.A. 2007. Evolution of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ composition of the Neoproterozoic seawater. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 256: 103-129.

Hartmann, L.A., Leite, J.A.D., da Silva, L.C., Remus, M.V.D., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Santos, J.O.S. & Vasconcellos, M.A.Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of Southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 829-844.

Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frey, F.A. & Wildman, T.R. 1968. *Origin and distribution of the elements*. Pergamon. 1: 889-911.

Henderson, P. 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*. Oxford, Elsevier. 510p.

Hoffman, P.F., Kaufman, J.A., Halverson, G.P. & Schrag, D.P. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. *Science* (281): 1342-1346.

Jacobsen, S.B., Kaufman, A.J. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology*, 161: 37-57.

Jost, H. & Hartmann, L.A. 1984. *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blucher Ltda. 378 p.

Kaufman, A.J., Hayes, J.M., Knoll, A.H. & Germs, G.J.B. 1991. Isotopic compositions of carbonates and organic carbon from upper Proterozoic successions in Namibia: stratigraphic variation and the effects of diagenesis and metamorphism. *Precambrian Research*, 49: 301-327.

Kaufman, A.J. & Knoll, A.H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Research*, 73: 27-49.

Kaufman, A.J., Jacobsen, S.B. & Knoll, A.H. 1993. The Vendian record of Sr- and C-isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate. *Earth and Planetary Science Letters*, 120: 409-430.

Kaufman, A.J., Knoll, A.H., Semikhatov, M.A., Grotzinger, J.P., Jacobsen, S.B. & Adams, W. 1996. Integrated chronostratigraphy of Proterozoic-Cambrian boundary beds in the western Anabar region, northern Siberia. *Geology Magazine*, 133: 509-533.

Kaufman, A.J., Knoll, A.H. & Narbonne, G.M. 1997. Isotopes, ice ages and terminal Proterozoic Earth history. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94: 6600-6605.

Knoll, A.H. & Walter, M.R. 1992. Latest Proterozoic stratigraphy and Earth history. *Nature*, 356: 673-678.

Knoll, A.H., Hayes, J.M., Kaufman, A.J., Swett, K. & Lambert, I.B. 1986. Secular variations in carbon isotope ratios from Upper Proterozoic successions of Svalbard and East Greenland. *Nature*, 321: 832–838.

Knoll, A.H., Kaufman, A.J. & Semikhatov, M.A. 1995. The carbon-isotopic composition of proterozoic carbonates: Riphean successions from northwestern Siberia, Anabar Massif, Turukhansk Uplift. *American Journal of Science*, 295: 823–850.

Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J. & Chemale Jr, F. 1998. SHRIMP U/Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost Brazil. *International Geology Reviews*, 40: 688-705.

Lisboa, N.A. 1977. *Estudo geológico da região de Pedra Branca, Bagé, Rio Grande do Sul, com enfoque especial nas ocorrências de mármore*. Porto Alegre. 53 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

McArthur, J.M. 1994. *Recent trends in strontium isotope and sequence stratigraphy*. Terra Review: 331-358.

Melezhik, V.A., Roberts, D., Fallick, A.E., Gorokhov, I.M. & Kusnetzov, A.B. 2005. Geochemical preservation potencial of high-grade calcite marble versus dolomite marble: implication for isotope chemostratigraphy. *Chemical Geology*, 216: 203-224.

Melezhik, V.A., Huhma, H., Fallick, A.E. & Whitehouse, M.J. 2007. Temporal constraints on the Paleoproterozoic Lomagundi-Jatuli carbon isotope event. *Geology*, 35: 655-658.

Oliveira, A.S., Pulz, G.M., Bongioiolo, E.M. & Calarge, M. 2003. Isótopos de Carbono em filitos carbonosos da Sequência Metavulcano-sedimentar Marmeleiro, Sul de Ibaré, Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 30(1): 41-52.

Remus, M.V.D. 1991. *Geologia e geoquímica do Complexo Cambaizinho, São Gabriel-RS*. Porto Alegre. 181 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Remus, M.V.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J., Groves, D.I. & Fletcher, I.R. 2000. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava Granite of the Brasiliano Cycle in Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 191-216.

Saalmann, K.; Hartmann, L.A.; Remus, M.V.D.; Koester, E. & Conceição, R.V. 2005. Sm-Nd isotope geochemistry of metamorphic volcano-sedimentary successions in the São Gabriel Block, southernmost Brazil: evidence for the existence of juvenile Neoproterozoic oceanic crust to the east of the Rio de La Plata craton. *Precambrian Research*, 136: 159-175.

Saalmann, K., Remus, M.V.D. & Hartmann, L.A. 2006. Tectonic evolution of the Neoproterozoic São Gabriel Block, Southern Brazil: Constraints on Brasiliano orogenic evolution of the Rio de la Plata cratonic margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 21: 59-88.

Saalmann, K., Gerdes, A., Lahaye, Y., Hartmann, L.A., Remus, M.V.D. & Laüfer, A. 2010. Multiple accretion at the eastern margin of the Rio de la Plata craton: the

prolonged Brasiliano orogeny in southernmost Brazil. *International Journal of Earth Sciences*.

Safronov, V.T. & Rosen, O.M. 2004. Metacarbonate rocks (calciphyres) of the Lapland-Kolvitsa Granulite Belt, Baltic Shield. *Lithology and Mineral Resources*, 39: 425-436.

Schmitt, R.S. 1995. *Evolução Tectono-metamórfica do Complexo Metavulcano-sedimentar Coxilha do Batovi, São Gabriel (RS)*. Porto Alegre. 159 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Silva, J.C., Sial, A.N., Ferreira, V.P. & Pimentel, M.M. 2005. C- and Sr-isotope stratigraphy of the São Caetano complex, Northeastern Brazil: a contribution to the study of the Meso-Neoproterozoic seawater geochemistry. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77 (1): 137-155.

Soliani Jr. E. 1986. *Os dados geocronológicos do Escudo-sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica*. São Paulo. 425 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.

Torres, P.F.M., Parente, C.V., Sial, A.N., Dantas, E.L., Fuck, R.A., Veríssimo, C.U.V. & Arthaud, M.H. 2006. Aspectos Geoquímicos, petrográficos e geoquímicos dos mármores dolomíticos com nódulos de quartzo da sequência metavulcano-sedimentar de Aracape-CE. *Revista Brasileira de Geociências*, 36 (4): 748-760.

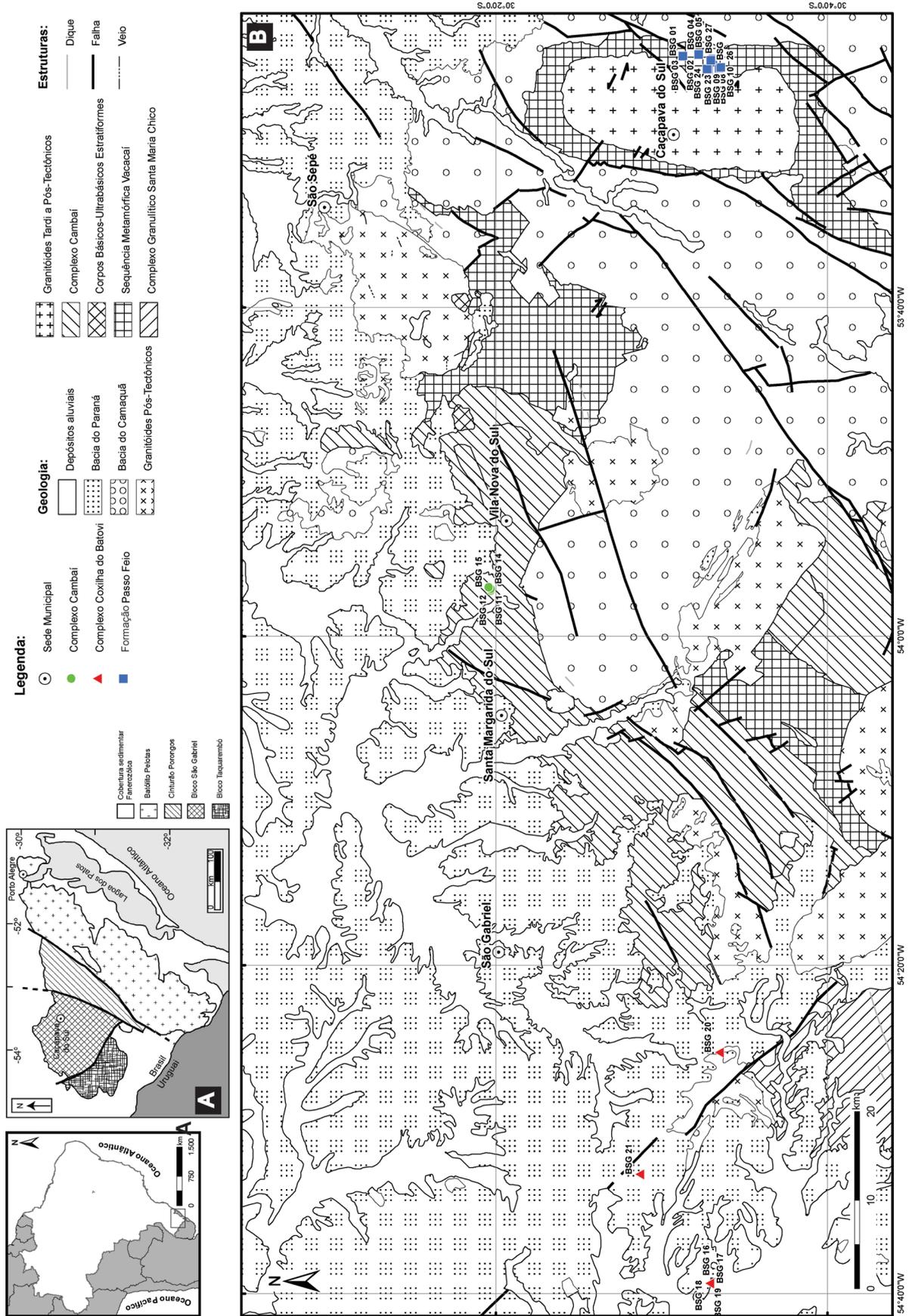
Veizer, J. & Compston, W. 1976. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Precambrian carbonates as an index of crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 905–914.

Veizer, J. 1983. Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates. *Carbonates: Mineralogy and Chemistry, Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America*, 11: 265–299.

Veizer, J., Compston, W., Clauer, N. & Schidlowski, M. 1983. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Late Proterozoic carbonates: Evidence for a “mantle event” at 900 Ma ago. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 295–302.

Veizer, J., D. Buhl, A. Diener, S. Ebner, O.G. Podlaha, P. Bruckschen, T. Jasper, Ch. Korte, M. Schaaf, D. Ala & K. Azmy. 1997. Strontium isotope stratigraphy: potential resolution and event correlation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 132: 65-77.

Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D., Bruhn, F., Carden, G.A.F., Diener, A., Ebner S., Godderis, Y., Jasper, T., Korte, C., Pawellek, F., Podlaha, O. & Strauss, H. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161: 37-57.



Goulart, R. V. (2012) Caracterização geoquímica e isotópica das rochas carbonáticas da zona central do embasamento do Rio Grande do Sul.

Figura 1. Mapa geológico regional do Bloco São Gabriel. a) Mapa geotectônico esquemático mostrando o contexto regional do Bloco São Gabriel no Escudo Sul-Riograndense (modificado de Remus et. al. (2000)). b) Mapa geológico das regiões de Caçapava do Sul, Vila Nova do Sul e São Gabriel inseridas no Bloco São Gabriel, compilado a partir das Folhas de Uruguaina (SH 21) e Porto Alegre (SH 22) disponibilizadas online pela CPRM. Os pontos marcados sobre o Complexo Coxilha do Batovi, Complexo Cambaí e Formação Passo Feio correspondem às amostras analisadas nesse estudo.

CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA

2. METODOLOGIA

2.1. Abordagem metodológica

A abordagem metodológica empregada nesse trabalho compreende a investigação geoquímica de rochas carbonáticas de unidades litoestratigráficas já mapeadas e descritas no Bloco São Gabriel. Os estudos geoquímicos foram realizados por meio de análises em rocha total de elementos maiores, menores e traços, enquanto os estudos isotópicos foram realizados por meio da análise da razão $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ e dos parâmetros $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$.

2.2. Amostragem

A amostragem dos mármorees foi realizada nas unidades litoestratigráficas Formação Passo Feio, Complexo Cambaí e Complexo Coxilha do Batovi, ao longo de pedreiras ativas e já desativadas, bem como de algumas drenagens especificamente para amostragem do Complexo Coxilha do Batovi. De forma geral, optou-se pela amostragem em localidades já conhecidas e mapeadas, tendo em vista que se trata de uma pesquisa de detalhe, a qual não busca o mapeamento de novas ocorrências. O trabalho de campo foi desenvolvido nos municípios de Caçapava do Sul, Vila Nova do Sul e São Gabriel entre os meses de junho e julho de 2009. Nesse período foi realizado um mapeamento de reconhecimento das unidades geológicas, bem como a coleta de 27 amostras para posterior análise geoquímica.

2.3. Preparação das amostras

As amostras coletadas foram selecionadas para petrografia e análises de química de elementos maiores, menores e traços, bem como para as análises isotópicas. A preparação das amostras inclui o fracionamento, a moagem e o quarteamento das mesmas nas cotas a serem analisadas. Algumas dessas etapas foram realizadas no Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências da UFRGS. O fracionamento das amostras foi realizado com prensa mecânica e a moagem, em graal de porcelana. Posteriormente, o quarteamento foi realizado no Laboratório de Sedimentologia.

Já a preparação para corte das lâminas petrográficas consistiu no corte de um fração das amostras, representativo das características gerais das mesmas, em pequenos fragmentos de aproximadamente 7 cm de largura, 2 cm de altura e 5 cm de comprimento. Esses fragmentos foram enviados ao laboratório Spectrum Petrographics, em WA/USA, onde foram confeccionadas 27 lâminas petrográficas, correspondentes à cada uma das amostras coletadas.

2.4. Análise de elementos maiores, menores e traços

As amostras preparadas foram enviadas ao laboratório Acme Labs, no qual foram realizadas as análises dos elementos maiores, menores e traços. As mesmas foram obtidas por meio de ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*).

As análises foram realizadas a partir de digestão ácida e compreenderam 43 elementos maiores e menores, bem como os elementos terras raras. Quanto aos óxidos, os mesmos foram analisados por meio de ICP-ES (*Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry*), através de digestão com ácido nítrico e fusão com tetraborato de lítio.

2.5. Isótopos de Sr

As análises dos isótopos de Sr foram realizadas no Laboratório de Geoquímica Isotópica do Instituto de Geociências da UFRGS. Os procedimentos incluíram a diluição isotópica das amostras e a posterior análise em espectrômetro de massa de ionização termal (TIMS) VG Sector 54 multi-coletor. A diluição isotópica foi realizada a partir dos pós de rocha total, os quais foram inicialmente pesados em balança de precisão. A digestão ácida compreendeu um primeiro ataque com 2 ml água bidestilada, para dissolução do Sr solúvel em água. Posteriormente foram realizados outros 2 ataques ácidos, a frio, com ácido acético, 5 ml a 20%, para dissolução do Sr presente nos carbonatos. O material dissolvido nos lixiviados foi devidamente pesado e realizada a extração do Sr dos mesmos em colunas com ácido clorídrico a 2,5 N. Em seguida foram obtidas as razões dos isótopos de Sr de todas as soluções obtidas, a fim de verificar o fracionamento dos mesmos nos minerais que compõem a rocha total.

2.6. Isótopos de C e O

As análises isotópicas de C e O foram realizadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da UFPR. Os resultados foram obtidos por espectrometria de massa de razões isotópicas (IRMS) de amostras de rocha total em Espectrômetro Thermo Delta V Advantage/GasBench II. No mesmo laboratório também foi realizada a quantificação do percentual de calcita e dolomita das rochas por meio de análise termogravimétrica e térmica-diferencial simultâneas (TGA-DTA) em equipamento Mettler-Toledo TGA/SDTA851e. O procedimento foi realizado com 150 μ l de Al₂O₃ em rampa de 300°-1000° com taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de CO₂ - (100ml/min).

CAPÍTULO 3 - ARTIGO

3. ARTIGO

Composição isotópica de Sr, C e O e geoquímica de ETR das rochas carbonáticas do Bloco São Gabriel, Rio Grande do Sul

Sr, C e O isotopic compositions and REE geochemistry of São Gabriel Block carbonate rocks, Rio Grande do Sul

Rossana Vicente GOULART*1, Marcus Vinícius Dorneles REMUS 2, Rafael Souza dos REIS 3

1 Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, nº 9.500, Bairro Agronomia, Caixa Postal 15.001, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: rossana.goulart@gmail.com

2 Centro de Estudos em Petrologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, nº 9.500, Bairro Agronomia, Caixa Postal 15.001, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: marcus.remus@ufrgs.br

3 Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, nº 9.500, Bairro Agronomia, Caixa Postal 15.001, CEP 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil. E-mail: sdosreis.rafael@gmail.com

Resumo

O Bloco São Gabriel, localizado na zona central do embasamento cristalino do Rio Grande Sul, apresenta extensos registros do Neoproterozóico do Ciclo Brasileiro, contidos em complexos ígneos e metamórficos. Esses complexos também guardam registros sedimentares, com sequências carbonáticas metamorfisadas cuja evolução tectônica é pouco conhecida. Essas sequências são observadas na Formação Passo Feio (Caçapava do Sul), no Complexo Cambaí (Vila Nova do Sul) e no Complexo Metavulcano-sedimentar Coxilha do Batovi (São Gabriel). As rochas carbonáticas da Formação Passo Feio compreendem dolomita mármores impuros. As amostras do Complexo Cambaí são classificadas como calcita mármores impuros. Os mármores do Complexo Coxilha do Batovi compreendem litotipos calcíticos e cálcio-silicáticos, cuja assembleia mineral é composta predominantemente por

calcita em alguns exemplares e por grafita em outros, com percentuais de até 10% de quartzo, demonstrando contribuição siliciclástica no protólito. Idades de zircões de rochas associadas com os mármore, de trabalhos anteriores, indicam um intervalo entre 770 – 700 Ma para a deposição dos carbonatos do Bloco São Gabriel. Os carbonatos da Formação Passo Feio sofreram dolomitização durante ou logo após a deposição enquanto que os carbonatos do Complexo Cambaí não foram afetados pela dolomitização. A geoquímica dos elementos traços e terras raras indica que os mármore analisados preservaram as assinaturas originais do protólito nos diferentes graus metamórficos: Coxilha do Batovi (grau baixo), Formação Passo Feio e Complexo Cambaí (grau médio). A análise integrada dos isotópicos de Sr, ^{13}C e ^{18}O da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí revelou a preservação de assinaturas isotópicas primárias. Na Formação Passo Feio essas assinaturas são: 0,7074 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), -0,26‰ e 2,44‰ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) e -5,68‰ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$). No Complexo Cambaí, as assinaturas primárias são: 0,7069 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), 5,75‰ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) e -11,64‰ ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$). Quando comparadas com a variação desses isótopos na água do mar ao longo do Neoproterozóico, verifica-se que os mármore da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí estão situados no intervalo entre 740 e 730 Ma. O período sugerido para a deposição das rochas carbonáticas da Formação Passo Feio é de 770 a 730 Ma, e entre 740-730 para o Complexo Cambaí.

Palavras-chave: Mármore, Bloco São Gabriel, isótopos de Sr, ^{13}C e ^{18}O ; assinaturas isotópicas primárias, Neoproterozóico, evento deposicional

Abstract

The São Gabriel Block, located in the central zone of the crystalline basement of Rio Grande do Sul has extensive Neoproterozoic records of the Brasiliano Cycle, contained in igneous and metamorphic complexes. These complexes also keep sedimentary records with metamorphosed carbonate sequences whose tectonic evolution is poorly understood. These sequences are found in Passo Feio Formation, located in Caçapava do Sul region, in Complex Cambaí, at Vila Nova do Sul region and in Coxilha do Batovi metavolcano-sedimentary Complex, in the São Gabriel region. The Passo Feio Formation carbonate rocks consist of impure dolomite marbles. The Cambaí Complex samples are classified as impure calcite marbles. Coxilha do Batovi Complex samples include calcite and calc-silicate marbles whose mineral assemblage are composed predominantly of calcite in some samples and graphite in others, with quartz rates up to 10% showing the siliciclastic contribution to the protolith. Zircon ages of associated rocks from previous works indicate an interval between 770-700 Ma

for carbonate deposition in S. Gabriel Block. The carbonates from Passo Feio Formation were affected by dolomitization process during or early after its deposition while the carbonates from Cambaí Complex were not affected by dolomitization. Trace elements and REE geochemistry of marbles indicate preservation of original signature of carbonate protoliths along different metamorphic grades; Coxilha do Batovi (low grade), Passo Feio Formation and Cambaí Complex (medium grade). The integrated analysis of Sr isotope, ^{13}C and ^{18}O from Passo Feio Formation and Cambaí Complex revealed the preservation of primary isotopic signatures. The Passo Feio Formation signatures are: 0,7074 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), -0,26‰ and 2,44‰ ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) and -5,68 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$). In Cambaí Complex, the primary signatures are: 0,7069 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), 5,75 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$) and -11,64 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$). When compared with the variation of these isotopes in seawater along the Neoproterozoic it appears that Passo Feio Formation and Cambaí Complex are situated in the range between 740 and 730 Ma. Based on these data it is suggested that the São Gabriel Block depositional event occurred between 770-700 Ma. The period suggested for the carbonate rocks depositional event of Passo Feio Formation is between 770-730 Ma, and specifically between 740-730 for Cambaí Complex.

Keywords: Marble, São Gabriel Block, Sr, ^{13}C e ^{18}O isotopes; primary isotopic signatures, Neoproterozoic, depositional event

1. Introdução

O embasamento cristalino pré-cambriano do Rio Grande do Sul tem sido amplamente estudado ao longo das últimas décadas, e os trabalhos realizados têm proporcionado avanços na compreensão da evolução do Escudo Sul-Rio-Grandense. Contudo, não há dados definitivos a respeito das rochas carbonáticas do arcabouço litológico de diversas unidades do embasamento.

Dentre os blocos tectônicos que compõem o embasamento cristalino do estado, o Bloco São Gabriel tem sua evolução tectonometamórfica atribuída a um ambiente de arco magmático cujos registros têm idade Neoproterozóica e estão associados ao ciclo orogênico Brasileiro. O Bloco São Gabriel é composto pela Formação Passo Feio, Grupo Palma, Complexo Cambaí, bem como pelas rochas graníticas intrusivas pós-tectônicas e tardi a pós-tectônicas. As rochas carbonáticas que compõem as unidades do Bloco São Gabriel são metamórficas e contêm um extenso registro de eventos desde sua cristalização e diagênese até metamorfismo regional e hidrotermalismo.

Diversas pesquisas a nível global têm sido realizadas, especialmente nas duas últimas décadas, com o objetivo de extrair dessas rochas toda a riqueza de informações nelas contida. Trabalhos de referência como a criação de uma curva padrão de composição da água dos oceanos no Neoproterozóico através da análise de assinaturas dos isótopos de Sr, C e O de mármores de diferentes localidades desenvolvido por Jacobsen & Kaufman (1999), demonstram algumas das informações mais importantes obtidas por meio da caracterização geoquímica e isotópica de rochas carbonáticas. Também merecem destaque os estudos de Knoll et al. (1986) e Knoll & Walter (1992) sobre isótopos de carbono e a estratigrafia do Proterozóico, os trabalhos de Veizer et al. (1997) sobre estratigrafia química e o potencial de detecção de eventos através de isótopos de Sr, os trabalhos de Kaufmann et al. (1991) e (1995), sobre a variação do C no Neoproterozóico e sobre a composição dos carbonatos em sequências proterozóicas da Namíbia, bem como o estudo de Halverson et al. (2007), o qual aprimorou a curva de composição da razão Sr^{87}/Sr^{86} no Neoproterozóico.

Tendo em vista a carência de dados a respeito das rochas carbonáticas do embasamento do Rio Grande do Sul e a crescente disponibilidade e aplicabilidade de técnicas de microanálise e espectrometria de massa, buscou-se por meio da caracterização geoquímica de elementos maiores, menores, traços e isótopos, investigar a origem e a evolução das rochas carbonáticas distribuídas ao longo da Formação Passo Feio, do Complexo Cambaí e Complexo Metavulcano-Sedimentar Coxilha do Batovi situadas no Bloco São Gabriel.

2. Área, materiais e métodos

As rochas carbonáticas inseridas no Bloco São Gabriel foram abordadas em dissertações de mestrado e artigos de forma parcial, sem que essas fossem o tema principal dos trabalhos apresentados. Por esta razão há menção das mesmas em diversos artigos sobre geoquímica e evolução tectônica do embasamento cristalino do Rio Grande do Sul, mas existem poucos dados geoquímicos de rocha total destes litotipos. Os trabalhos mais completos sobre rochas carbonáticas no RS consistem de três dissertações de mestrado cujos temas mais se aproximavam do estudo proposto: Lisboa (1977), Schmitt (1995), além do artigo de Bortolotto (1987), o qual sintetiza dados levantados em sua dissertação focalizando a petrografia dos mármores de Caçapava do Sul (RS).

2.1. O Bloco São Gabriel

O Bloco São Gabriel foi definido inicialmente por Jost e Hartmann (1984) como um domínio geotectônico, o qual apresenta importantes registros do Ciclo Brasileiro no Escudo Sul-Rio-Grandense (Fig. 1). O referido domínio é limitado a norte e a oeste pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná, a leste pelo Cinturão Porongos e a sul pelo Bloco Taquarembó, o qual contém rochas granulíticas arqueanas e paleoproterozóicas. Os blocos tectônicos mencionados são separados por uma faixa de lineamentos paralelos e subparalelos de direção NW-SE com extensão de cerca de 70 km, denominada Lineamento de Ibaré.

Ao longo da década de 90 foram propostos alguns modelos de evolução do embasamento pré-cambriano do Rio Grande do Sul. Entre os trabalhos publicados nessa década destacam-se Chemale et al. (1995), Fernandes et al. (1992), Babinski et al. (1996) e Leite et al. (1998). Posteriormente, nos anos 2000 destaca-se o trabalho de Hartmann et al. (2000), no qual é realizada uma revisão da geocronologia realizada por meio do método U/Pb em zircões através de SHRIMP e é apresentado um modelo de evolução geotectônica do sul do Brasil do Arqueano ao Neoproterozóico, bem como o trabalho de Remus et al. (2000).

Uma das pesquisas mais recentes a respeito do Bloco São Gabriel foi publicada por Saalman et al. (2006) onde os autores abordam a evolução tectônica do Bloco São Gabriel no período Neoproterozóico e fazem complementações aos modelos tectônicos propostos para o referido bloco.

Os referidos autores sugerem que a evolução tectônica dessa área teria iniciado com a formação de um arco intra-oceânico correspondente à Formação Passinho (880 Ma) ocasionado por uma subducção ocorrente a leste, seguida pela acreção desse arco à margem leste do Cráton Rio de La Plata. A seguir, ocorre uma subducção subsequente a oeste, datada de 850 a 700 Ma sob o bloco formado pelo Cráton Rio de la Plata e pela Formação Passinho. Essa subducção proporciona o desenvolvimento de uma margem continental ativa. Nesse contexto, os litotipos correspondentes à base do Grupo Palma foram depositados provavelmente nas regiões de ante arco (*forearc*) e de retro-arco (*backarc*), embora com menor abundância de sedimentos provenientes do cráton e predomínio de sedimentos do arco de ilha, correspondente à Formação Passinho. Por essa razão, na cunha acrecionária é verificada a justaposição de rochas vulcânicas de arco de ilha, rochas sedimentares de ante arco e rochas ultramáficas metavulcânicas. O estágio final da evolução tectônica do Bloco São Gabriel tem idade de 700 Ma e consiste na colisão oblíqua do Cráton Rio de la Plata com a margem passiva atribuída ao Cinturão Metamórfico Porongos e ao gnaiss Encantadas. No entanto, os autores ressaltam que a referida colisão pode ter ocorrido também durante o

evento Dom Feliciano entre 630 e 600 Ma. Em ambas as hipóteses o Bloco São Gabriel representa uma zona de colisão entre dois crátons: Rio de La Plata e Encantadas.

2.1.1. Formação Passo Feio

A Formação Passo Feio, também agrupada na Sequência Metamórfica Vacacaí por alguns autores, está localizada no entorno do Granito Caçapava e trata-se de uma sequência vulcano-sedimentar metamorfisada, composta por xistos pelíticos, mármore, filitos, folhelhos, quartzitos, metaconglomerados, rochas cálcio-silicáticas, anfibolitos e, de forma subordinada, metabasaltos e xistos magnesianos (Remus et al., 2000).

Quanto à geocronologia dessa formação, os primeiros dados foram publicados por Soliani (1986) e mostraram idades K/Ar entre 556 e 666 Ma, obtidos de muscovitas e microdioritos, respectivamente. Posteriormente, Remus et al. (2000) apresenta dados obtidos por meio do método U/Pb através de SHRIMP em zircões oriundos de rochas metassedimentares, os quais revelam idades Pb^{207}/Pb^{206} de 2053 ± 46 Ma, cuja área fonte sugerida é o Complexo Granulítico Santa Maria Chico. Nesse trabalho também foi apresentado um diagrama concórdia com idades Pb^{206}/U^{238} entre 908 e 774 Ma, as quais são atribuídas ao apagamento parcial dos registros dos zircões durante o evento metamórfico de 700 Ma.

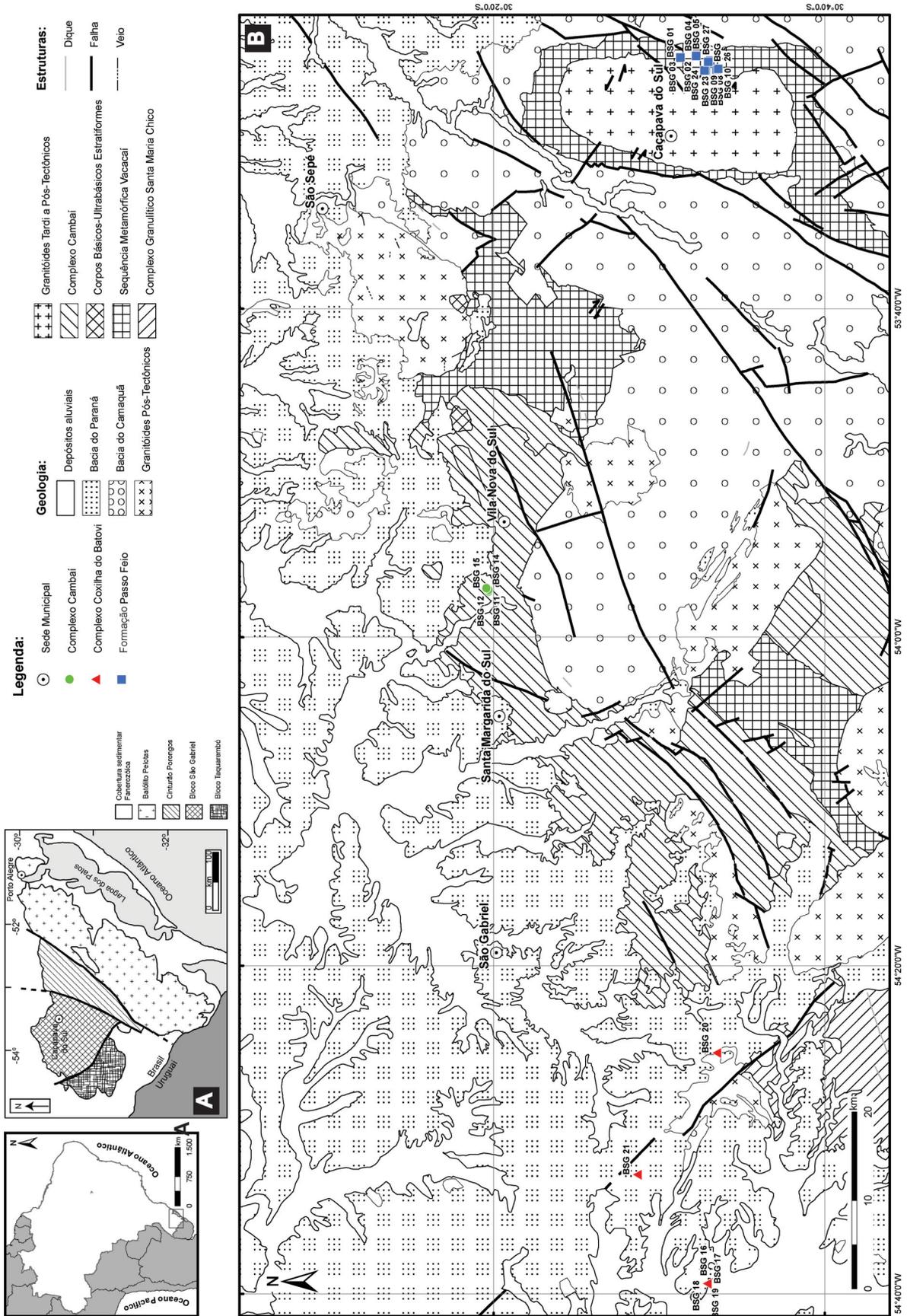
2.1.2. Complexo Cambaí

O Complexo Cambaí é constituído por metadioritos, metatonalitos e metatondhjemitos situados nas zonas central e oeste do Bloco São Gabriel, intrusivos no Grupo Palma. As rochas plutônicas apresentam assinaturas geoquímicas cálcio-alcálicas e são interpretadas como oriundas de um arco magmático (Chemale et al., 1995 e Babiski et al., 1996). Quanto à geocronologia dessa unidade, Leite et al. (1998) apresentou idades U/Pb em zircão obtidas por meio de SHRIMP de 750 – 700 Ma, entre as quais uma datação de 704 ± 13 obtida em dioritos da região de Vila Nova do Sul.

2.1.3. Complexo Coxilha do Batovi

O Complexo Coxilha do Batovi é constituído por metapsamitos calcíferos, arcoseanos e quartzíticos, metapelitos, mármore calcítico, mármore dolomítico silicático, brechas dolomíticas, metavulcânicas e metavulcanoclásticas, e está localizado na extremidade oeste do Bloco São Gabriel, ao longo de uma faixa de 10 km x 2 km (Schmitt, 1995). Esses litotipos estão reunidos em três associações de fácies distintas, as quais formam as sequências vulcano-sedimentares identificadas no complexo. Quanto à geocronologia e evolução tectônica dessas rochas, a referida autora identificou duas fases de deformação sobre esses

litotipos: a primeira de empurrão e a segunda de transcorrência e dobramento. A primeira fase de deformação corresponde ao pico térmico indicativo de um metamorfismo regional de baixo grau, fácies xisto-verde inferior. O pico metamórfico desse evento, segundo a autora, foi responsável pela homogeneização isotópica do sistema Rb/Sr, para a qual foi obtida a idade de 669 Ma.



Goulart, R. V. (2012) Caracterização geoquímica e isotópica das rochas carbonáticas da zona central do embasamento do Rio Grande do Sul.

Fig. 1. Mapa geológico regional do Bloco São Gabriel. a) Mapa geotectônico esquemático mostrando o contexto regional do Bloco São Gabriel no Escudo Sul-Riograndense (modificado de Remus et. al. (2000)). b) Mapa geológico das regiões de Caçapava do Sul, Vila Nova do Sul e São Gabriel inseridas no Bloco São Gabriel, compilado a partir das Folhas de Uruguaina (SH 21) e Porto Alegre (SH 22) disponibilizadas online pela CPRM. Os pontos marcados sobre o Complexo Coxilha do Batovi, Complexo Cambaí e Formação Passo Feio correspondem às amostras analisadas nesse estudo.

2.2. Metodologia e técnicas analíticas

A abordagem metodológica empregada nesse trabalho compreende a investigação geoquímica de rochas carbonáticas de unidades litoestratigráficas já mapeadas e descritas no Bloco São Gabriel. Os estudos geoquímicos foram realizados por meio de análises de rocha total de elementos maiores, menores e traços, enquanto os estudos isotópicos foram realizados por meio da análise da razão Sr^{87}/Sr^{86} , e dos parâmetros $\delta^{18}O$ e $\delta^{13}C$.

Os elementos maiores, menores e traços foram analisados por meio de ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) no laboratório Acme Labs, Vancouver. As análises foram realizadas a partir de digestão ácida e compreenderam 43 elementos maiores e menores, bem como os elementos terras raras. Os limites de detecção variam entre 0,02%, para os elementos maiores e entre 0,02 e 0,1 ppm, para os elementos traços. Os limites de detecção para o Fe, Mg, Ca, Mn e Sr são, respectivamente, 0,02% para os três primeiros, 2 ppm (Mn) e 1ppm (Sr). Quanto aos óxidos, os mesmos foram analisados por meio de ICP-ES (Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry), através de digestão com ácido nítrico e fusão com tetraborato de lítio. O limite de detecção médio dos óxidos é de 0,01%. O carbono total e o S foram analisados por meio de um forno de indução LECO.

Os isótopos de Sr foram analisados no Laboratório de Geoquímica Isotópica (LGI) do Instituto de Geociências da UFRGS. As análises foram desenvolvidas por meio de diluição isotópica das amostras, segundo os métodos de dissolução para análises de rocha total propostos por Bailey et.al. (2000), e os lixiviados obtidos foram analisados em espectrômetro de massa de ionização termal (TIMS) VG Sector 54 multi-coletor.

A diluição isotópica das amostras foi realizada a partir do pó de rocha total, inicialmente pesadas em balança de precisão. A digestão ácida compreendeu um primeiro ataque com 2 ml água bidestilada, para dissolução do Sr solúvel em água. Posteriormente, foram realizados outros 2 ataques ácidos, a frio, com ácido acético, 5 ml a 20%, para dissolução do Sr presente nos carbonatos. O material dissolvido nos lixiviados foi devidamente pesado e realizada a extração do Sr dos mesmos em colunas com ácido clorídrico a 2,5N. Em seguida foram obtidas as razões dos isótopos de Sr de todas as soluções

obtidas a fim de verificar o fracionamento dos mesmos nos minerais que compõem a rocha total. O resíduo final não foi analisado por se considerar que trata-se do Sr contido nos silicatos e demais minerais cujo equilíbrio químico ocorreu durante o metamorfismo ou fases posteriores ao mesmo.

As análises isotópicas de C e O foram realizadas no Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da UFPR. Os resultados foram obtidos por espectrometria de massa de razões isotópicas (IRMS) de amostras de rocha total em Espectrômetro Thermo Delta V Advantage/GasBench II. No mesmo laboratório também foi realizada a quantificação do percentual de calcita e dolomita das rochas por meio de análise termogravimétrica e térmica-diferencial simultâneas (TGA-DTA) em equipamento Mettler-Toledo TGA/SDTA851e. O procedimento foi realizado com 150 μ l de Al₂O₃ em rampa de 300°-1000° com taxa de aquecimento de 10°C/min em atmosfera de CO₂ - (100ml/min).

3. Resultados

3.1. Amostragem e análise petrográfica

Os mármores da Formação Passo Feio e dos Complexos Cambaí e Coxilha do Batovi ocorrem sob a forma de estratos acamadados e lentes, com diferentes controles estruturais. Os litotipos da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí foram amostrados em pedreiras, a primeira ao longo de patamares com controle composicional determinado pelas intrusões e o segundo ao longo de lentes associadas a intrusões. As amostras do Complexo Coxilha do Batovi foram obtidas ao longo de um patamar em uma pedreira desativada e em lajeados expostos em drenagem. A amostragem evitou setores que mostravam sinais visíveis da influência de fluidos derivados de intrusões granitóides.

Os mármores da Formação Passo Feio são representados por 16 amostras, coletadas na região de Caçapava do Sul, nas localidades de Coronel Linhares (amostras BSG 01, BSG 02 e BSG 03), pedreira Vigor (amostras BSG 04, 05 e 06), pedreira Dagoberto Barcelos (amostras BSG 07, 08, 09, 10, 22, 23 e 24) e pedreira Razera (amostras BSG 25, 26 e 27) na região sudeste do município de Caçapava do Sul. Esses mármores ocorrem frequentemente associados a diques e sills, contemporâneos ao Granito Caçapava. Ainda que amostrados os litotipos mais distais em relação às intrusões, são verificados desde mármores maciços, de cor branca, mármores maciços de cor esverdeada em razão da presença de talco, serpentina e/ou

tremolita, litotipos com acamadamento ligeiramente preservado em razão da substituição por minerais metamórficos silicáticos, até mármore bandados (Fig. 2a, Fig. 2c e Fig. 2e).

Quanto à composição mineral, essas amostras apresentam paragêneses com dolomita, calcita, talco, tremolita, diopsídio, olivina, serpentina e clorita. Nos mármore brancos, maciços, a composição chega a 100% de dolomita e a textura dos mesmos é granoblástica poligonal (Fig. 2b). Os litotipos com maior percentual de silicatos apresentam textura granoblástica com contatos interdigitados. Nessas amostras são comuns as bordas de reação associadas à dissolução e substituição dos carbonatos como a do talco nos grãos de dolomita, ao longo das suas maclas. São comuns também os agregados de subgrãos de carbonatos característicos de recristalização (Fig. 2d). Já nos litotipos bandados ou com acamadamento ligeiramente preservado, as bandas mais escuras são compostas predominantemente por tremolita e talco, enquanto as bandas félsicas são compostas por grãos e subgrãos de dolomita e calcita, com frequentes bordas de reação (Fig. 2 f).

Os litotipos representativos do Complexo Cambaí compreendem 4 amostras (BSG 11, 13, 14 e 15) coletadas na pedreira Mônimo, localizada na região noroeste do município de Vila Nova do Sul. Nessa localidade os mármore ocorrem associados a intrusões de rochas graníticas, sob a forma de lentes (Fig. 3 a). As amostras coletadas nesse local variam desde mármore maciços e brancos, predominantes na jazida (Fig. 3 c), até mármore bandados de cor acinzentada.

Quanto à composição mineral dessas rochas, a calcita predomina amplamente sobre a dolomita e os minerais silicáticos e ocorre com granulação média e grossa (Fig. 3 b). Entre os silicatos ocorrem talco, tremolita, serpentina, granada e quartzo. A textura dessas rochas é granoblástica, formada por grãos subédricos a anédricos de calcita, com contatos interdigitados, e por vezes granoblástica poligonal, com grãos subédricos a euédricos e contatos retos (Fig. 3 d). Outra textura marcante é o aspecto ondulado das maclas da calcita evidenciando deformação plástica dos carbonatos. Os minerais silicáticos, em especial o quartzo, ocorrem sob a forma de agregados, de granulação média e fina, ao longo dos contatos intergranulares, indicando que se trata de uma cristalização posterior ao evento metamórfico.

O Complexo Coxilha do Batovi foi representado por 5 amostras, 1 coletada em uma pedreira desativada e 4 ao longo de drenagens, localizadas na região sudoeste do município de São Gabriel. Os mármore desse complexo são conhecidos por sua composição rica em grafita. Trata-se de litotipos de cor preta, bandados, os quais foram amostrados na pedreira desativada e ao longo de uma drenagem (Fig. 3 e), na qual o mesmo ocorre justaposto a outro

corpo de mármore, esse igualmente deformado mas de cor branca, com maior percentual de carbonatos (Fig. 3g).

Quanto à composição mineral, essas amostras apresentam paragêneses com grafita, calcita, quartzo e minerais opacos. Nos mármorees pretos, a composição chega a 70% de grafita e observa-se uma foliação marcada pela orientação da grafita com agregados de quartzo e carbonatos de granulação fina (Fig. 3 f). Os litotipos de cor branca possuem paragêneses com calcita, quartzo, dolomita, talco, plagioclásio, biotita e minerais opacos. Nessas amostras predomina uma textura granoblástica muito fina com agregados de quartzo e carbonatos de granulação grossa (Fig. 3 h).

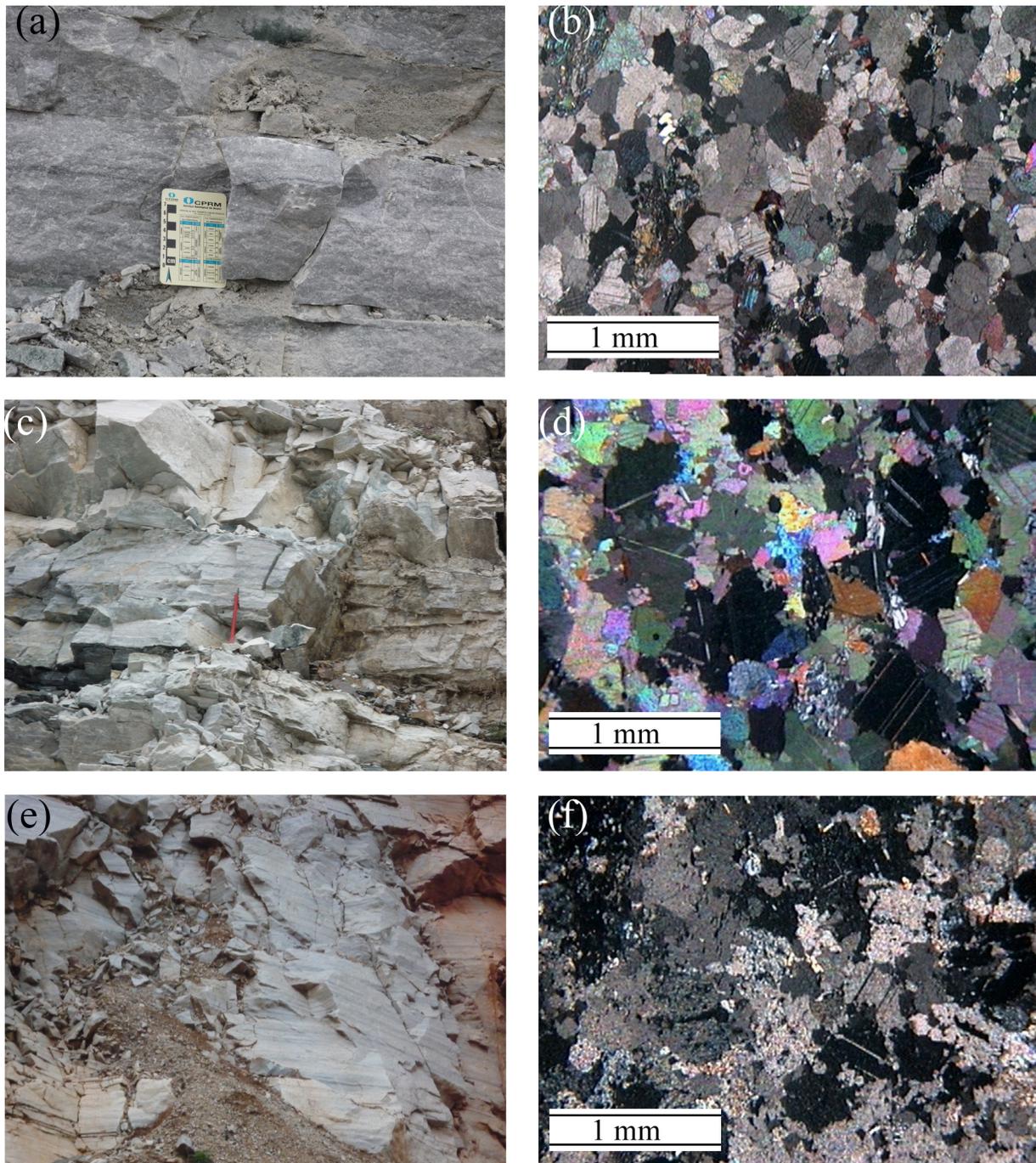


Fig. 2. Afloramentos e fotomicrografias dos mármore da Formação Passo Feio: (a) Mármore maciço, com baixo percentual de sílica; (b) Fotomicrografia da amostra BSG 01 com textura granoblástica poligonal formada pelos grãos de dolomita (c) Mármore esverdeado rico em talco e tremolita; (d) Fotomicrografia da amostra BSG 02 com textura granoblástica e presença de tremolita e dolomita; (e) Mármore bandado; (f) Fotomicrografia da amostra BSG 05 com bandas escuras compostas por tremolita e talco e bandas fêlsicas compostas por carbonatos.

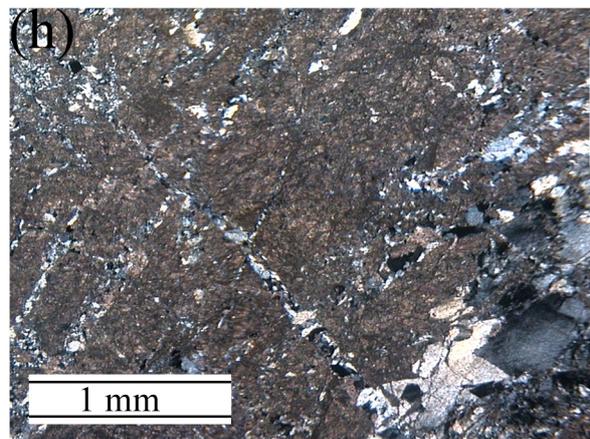
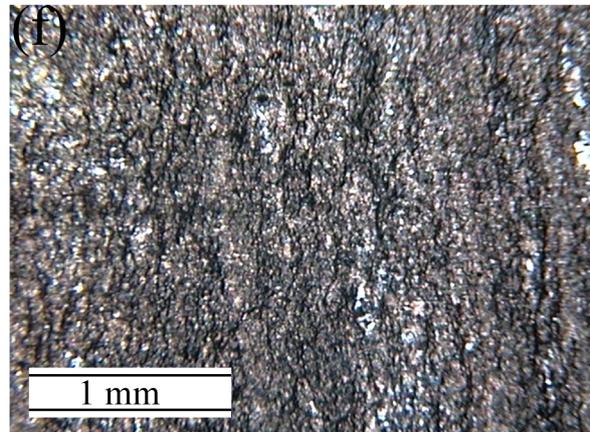
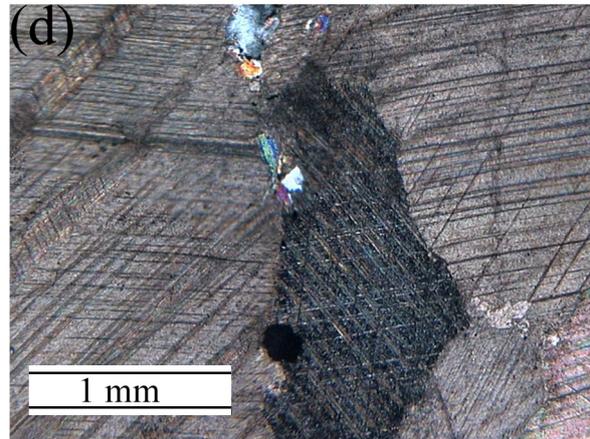
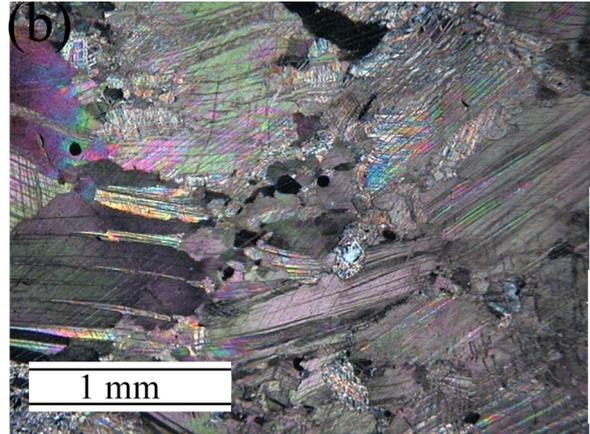


Fig. 3. Afloramentos e fotomicrografias dos mármore do Complexo Cambaí e do Complexo Coxilha do Batovi. Todas as fotomicrografias foram feitas em luz polarizada e com aumento de 25 x. Complexo Cambaí: (a) Lentes de mármore em meio à rocha granítica; (b) Fotomicrografia da amostra BSG 11 mostrando textura granoblástica, carbonatos com granulação grossa e deformação plástica das maclas, silicatos sob a forma de agregados. (c) Mármore branco, maciço, com baixo percentual de silicatos; (d) Fotomicrografia da amostra BSG 15 com carbonatos com granulação grossa (8 mm de diâmetro) e textura granoblástica. Complexo Coxilha do Batovi: (e) Afloramento de mármore preto, rico em grafita em pedra desativada; (f) Fotomicrografia da amostra BSG 16 com foliação marcada pela grafita e presença de agregados de carbonatos e quartzo em meio à grafita; (g) Afloramento de mármore preto, bandado, rico em grafita ao lado de mármore branco, rico em calcita; (h) Fotomicrografia da amostra BSG 18, com textura granoblástica muito fina e agregados de quartzo e carbonatos de granulação grossa.

3.2. Elementos maiores

A geoquímica dos elementos maiores é baseada em análises de 25 amostras de mármore, 16 da Formação Passo Feio, 4 do Complexo Cambaí e 5 do Complexo Coxilha do Batovi (Tabela 1). De acordo com o sistema $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ (Bucher&Frey, 1994), os litotipos da Formação Passo Feio são classificados como dolomita mármore, as amostras do Complexo Cambaí como calcita mármore e os exemplares do Complexo Coxilha do Batovi, como mármore cálcio-silicáticos, correspondentes às amostras BSG 16 e 18, e calcita mármore, representados pelas amostras BSG 17, 19 e 20 (Fig. 4 a).

Os teores de CaO dos dolomita mármore (média de 31,78%), são inferiores aos dos calcita mármore (média de 51,80%). Nos mármore cálcio-silicáticos o valor médio, 25,90%, é ainda mais baixo. Os teores de MgO nos dolomita mármore (média de 20,64%), e nos calcita mármore (média de 1,78%) são completamente distintos. Nos mármore cálcio-silicáticos o valor médio é de 9,88%.

As razões de Mg/Ca nos calcita mármore variam entre 0,01 e 0,12 (média de 0,03), enquanto nos dolomita mármore essa razão varia entre 0,49 e 0,58 (média de 0,56). Nos mármore cálcio-silicáticos, essa razão encontra-se entre 0,16 e 0,55 com média de 0,35. O valor Mg/Ca encontrado nos dolomita mármore é inferior à razão da dolomita estequiométrica (0,62) indicando que se trata de recristalização a partir da calcita.

Quanto aos teores de SiO_2 , nos dolomita mármore os mesmos variam entre 0,79 e 10,11%, (média de 3,36%), nos calcita mármore, situam-se entre 2,53 e 6,68% (média de 2,35%), enquanto nos mármore silicosos os teores são de 23,20 e 31,34% (média de 27,27%). Já os teores de Na_2O e K_2O são inferiores a 1% em todas as amostras analisadas, com exceção da amostra BSG 16, de composição cálcio-silicática, na qual o teor de K_2O de é 1,74%. Os teores de Al_2O_3 também são inferiores a 1% na maior parte dos litotipos.

Em relação aos conteúdos de Fe_2O_3 e MnO , os mármore calcio-silicáticos apresentam teores médios de Fe_2O_3 de 1,36%, enquanto os litotipos calcíticos têm teor médio de 0,41%. Nos dolomita mármore o teor médio de Fe_2O_3 é de 0,155%. Quanto aos teores de MnO , os mármore calcio-silicáticos apresentam um valor médio de 0,03%, os calcita mármore, teor médio de 0,02%, e os dolomita mármore, valor médio de 0,017%.

Quanto às concentrações de Fe e Mn, nos mármore calcio-silicáticos o teor médio do Fe é de 9.350 ppm (mín. 7.100 e máx. 11.600 ppm), enquanto nos calcita mármore esse valor cai para 4.400 ppm (mín. 1.200 e máx. 6.500 ppm). Já nos dolomita mármore o teor médio de Fe é de 683 ppm (mín. 200 e máx. 1.500 ppm). Quanto ao teores de Mn, os mármore calcio-silicáticos apresentam teor médio de 208 ppm (mín. 145 e máx. 272 ppm), os calcita mármore, teor médio de 110 ppm (mín. 31 e máx. 299 ppm), e os dolomita mármore, teor médio de 108 ppm (mín. 56 e máx. 243 ppm).

3.3. Comportamento dos elementos maiores nas fases sólidas

Para a caracterização geoquímica dos litotipos estudados, além da investigação das concentrações dos elementos nas rochas, é necessária a avaliação da distribuição desses componentes sob a forma de óxidos nas assembleias minerais. Entre os mármore estudados as relações entre os óxidos CaO , MgO , SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 e a sua distribuição nos minerais fornecem informações importantes a respeito dos processos registrados nesses litotipos.

A relação entre CaO e MgO nos dolomita mármore é bastante homogênea, com valores próximos de 30%, para o CaO e de 20% para o MgO (Fig. 5 a). Esses óxidos compõem predominantemente a dolomita, mineral que constitui entre 76 e 98% desses litotipos, enquanto a calcita compõe no máximo 9% do volume de algumas dessas amostras (Fig. 4 c). Nos calcita mármore os teores de CaO são próximos de 55%, com menos de 5% de MgO (Fig. 5 a), proporção essa que é corroborada pelos percentuais de calcita, os quais variam entre 90 e 100%, com dolomita inferior a 3%, (Fig. 4 c). Nesses exemplares o MgO também compõe o talco e a tremolita. A exceção observada é a amostra BSG 17, com cerca de 6% de MgO e 40% de CaO , cuja composição mineral contém 80% de grafita (Fig. 4 b e Fig. 4c). Nessa amostra o MgO compõe a dolomita e o talco, os quais somam 6,5% da sua composição mineral. Entre os litotipos calcio-silicáticos, a amostra BSG 16 é composta por 6% de MgO e 30% de CaO distribuídos na calcita (4,5% do volume da amostra) e nos minerais opacos (3% do volume); o volume restante da amostra é constituído por 70% de grafita e 22,5% de quartzo (Fig. 4 c). A amostra BSG 18, com 20% de CaO e 14% de MgO ,

apresenta distribuição semelhante à da amostra BSG 16: o CaO compõe a calcita (70% do volume da amostra), e o MgO está associado aos minerais opacos (1% da amostra); os 29% restantes são constituídos por quartzo.

A relação entre SiO₂ e CaO também é bastante homogênea entre os diferentes grupos químicos estudados (Fig. 5 b). Os dolomita mármores têm teores de CaO em torno de 30%, distribuídos na dolomita, e de SiO₂, inferiores a 5% de modo geral, associados aos minerais silicáticos (talco, tremolita, serpentina, clorita, diopsídio e olivina), os quais somam de 1 a 16% do conteúdo total das amostras (Fig. 4 c). Nos calcita mármores são identificados comportamentos distintos entre o Complexo Cambaí e o Complexo Coxilha do Batovi. Os teores de CaO variam em torno de 55% no Complexo Cambaí, e entre 41 e 51% no Complexo Coxilha do Batovi (Fig. 5 b) compondo a calcita e a dolomita. Já os teores de SiO₂ variam de acordo com a origem das amostras: no Complexo Cambaí são inferiores a 1% e compõem o quartzo (2 a 3% do volume de algumas amostras), e alguns minerais silicáticos como tremolita, talco e serpentina (1,5% do volume). No Complexo Coxilha do Batovi, a distribuição de SiO₂ está associada diretamente ao quartzo que constitui 4,5 e 10% do volume total das amostras. Nos mármores cálcio-silicáticos o CaO, 20% na amostra BSG 18 e 30% na BSG 16, e a SiO₂, 31% na BSG 18 e 23% na BSG 16, são distribuídos entre calcita, único carbonato presente, e quartzo, o qual compõe cerca de 25% das amostras (Fig. 4 b e Fig. 4 c).

Quanto à correlação entre SiO₂ e Al₂O₃, a mesma é bastante homogênea no grupo dos dolomita mármores e apresenta maior dispersão nos calcita mármores e nos litotipos cálcio-silicáticos. Nos dolomita mármores os teores de Al₂O₃ encontram-se abaixo de 1% em todas as amostras analisadas (Fig. 5 c) e os teores de SiO₂, são, em geral, < 5%. Nessas amostras a SiO₂ e o Al₂O₃ compõem fundamentalmente a clorita e a serpentina. Entre os calcita mármores, nas amostras do Complexo Cambaí os teores de Al₂O₃ e SiO₂ são < 1% e compõem a clorita, a serpentina e o quartzo, enquanto nos litotipos do Complexo Coxilha do Batovi, os teores de SiO₂ variam de 3 a 7%, e compõem o quartzo fundamentalmente, enquanto os teores de Al₂O₃ permanecem < 1% e compõem a biotita e o plagioclásio (Fig. 4 c). Nos mármores cálcio-silicáticos a SiO₂, cujos teores são de 23% na amostra BSG 16 e 30% na BSG 18, compõe o quartzo, enquanto o Al₂O₃ ocorre com teores de 5% na amostra BSG 16 e 0,70% na BSG 18 (Fig. 4 c).

A relação entre Fe₂O₃ e Al₂O₃ também demonstra uma clara distinção entre os três grupos químicos. Nos dolomita mármores os teores de Fe₂O₃ e Al₂O₃ são <1% (Fig. 5 d) e compõem a clorita, a serpentina e o diopsídio em algumas amostras (Fig. 4 c). Nos calcita

mármore e nos litotipos cálcio-silicáticos, os teores de Al_2O_3 variam entre 1 e 5%, e os de Fe_2O_3 , entre 0,5 e 1,7%.

Tabela 1: Concentrações dos principais óxidos e elementos maiores e menores.

| Amostra | CaO | MgO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | Sr | TOT/S | Mg/ Ca | |
|--|----------------------------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------------------|-------------------|-------------------------------|-------|-------|-----------|------|
| | % | % | % | | % | % | % | % | % | PPM | % | | |
| | 0,01 | 0,01 | 0,01 | | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 2 | 0,02 | | |
| Dolomita mármore | | | | | | | | | | | | | |
| Complexo Metamórfico Passo Feio | BSG 01 | 31,56 | 21,10 | 2,93 | 0,13 | 0,13 | 0,01 | 0,02 | 0,02 | <0,01 | 76 | <0,02 | 0,59 |
| | BSG 02 | 31,45 | 20,63 | 3,91 | 0,31 | 0,30 | 0,02 | 0,09 | 0,02 | 0,01 | 60 | <0,02 | 0,58 |
| | BSG 03 | 30,98 | 19,44 | 10,11 | 0,71 | 0,29 | 0,02 | 0,23 | 0,04 | 0,02 | 83 | <0,02 | 0,55 |
| | BSG 04 | 30,64 | 19,95 | 9,64 | 0,06 | 0,23 | 0,02 | 0,01 | 0,02 | <0,01 | 66 | <0,02 | 0,57 |
| | BSG 05 | 32,04 | 21,14 | 0,91 | 0,16 | 0,09 | 0,01 | 0,06 | <0,01 | <0,01 | 47 | <0,02 | 0,58 |
| | BSG 06 | 31,30 | 20,77 | 3,85 | 0,08 | 0,19 | 0,02 | 0,03 | 0,01 | <0,01 | 50 | <0,02 | 0,58 |
| | BSG 07 | 32,07 | 20,62 | 3,94 | 0,04 | 0,07 | 0,01 | 0,02 | 0,01 | <0,01 | 44 | <0,02 | 0,58 |
| | BSG 08 | 32,08 | 20,78 | 3,00 | 0,07 | 0,09 | <0,01 | 0,04 | 0,01 | <0,01 | 47 | <0,02 | 0,57 |
| | BSG 09 | 31,89 | 21,12 | 4,14 | 0,07 | 0,11 | <0,01 | 0,03 | <0,01 | <0,01 | 42 | <0,02 | 0,57 |
| | BSG 10 | 31,85 | 21,16 | 1,10 | 0,04 | 0,13 | <0,01 | 0,01 | <0,01 | <0,01 | 32 | <0,02 | 0,57 |
| | BSG 22 | 33,38 | 19,20 | 1,87 | 0,17 | 0,21 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | <0,01 | 73 | <0,02 | 0,49 |
| | BSG 23 | 31,83 | 21,14 | 0,79 | 0,07 | 0,09 | <0,01 | 0,04 | <0,01 | <0,01 | 45 | <0,02 | 0,57 |
| | BSG 24 | 31,73 | 20,92 | 1,09 | 0,07 | 0,16 | 0,02 | 0,03 | <0,01 | <0,01 | 33 | <0,02 | 0,57 |
| | BSG 25 | 31,83 | 20,51 | 4,08 | 0,10 | 0,16 | 0,02 | 0,06 | 0,02 | <0,01 | 46 | <0,02 | 0,54 |
| BSG 26 | 31,94 | 20,73 | 2,32 | 0,06 | 0,12 | 0,01 | 0,03 | <0,01 | <0,01 | 40 | <0,02 | 0,55 | |
| BSG 27 | 31,92 | 21,07 | 1,70 | 0,06 | 0,11 | <0,01 | 0,03 | <0,01 | <0,01 | 38 | <0,02 | 0,55 | |
| Calcita mármore | | | | | | | | | | | | | |
| Complexo Metamórfico Cambai | BSG 11 | 55,07 | 0,38 | 0,65 | 0,18 | 0,11 | <0,01 | 0,06 | <0,01 | 0,03 | 1920 | 0,03 | 0,00 |
| | BSG 13 | 55,53 | 0,60 | 0,53 | 0,18 | 0,07 | <0,01 | 0,02 | 0,01 | 0,05 | 1082 | <0,02 | 0,01 |
| | BSG 14 | 52,39 | 0,83 | 3,32 | 1,15 | 0,94 | 0,04 | 0,15 | 0,04 | 0,09 | 1342 | 0,08 | 0,01 |
| | BSG 15 | 55,41 | 0,38 | 0,63 | 0,11 | 0,12 | <0,01 | 0,02 | <0,01 | 0,05 | 1682 | <0,02 | 0,00 |
| | BSG 17 | 41,36 | 6,59 | 6,78 | 1,38 | 0,88 | 0,02 | 0,54 | 0,01 | <0,01 | 190 | 0,04 | 0,12 |
| Complexo Metavulcano- imantar Coxilha do Batovi | BSG 19 | 46,85 | 2,52 | 7,25 | 1,33 | 0,48 | 0,03 | 0,39 | 0,10 | <0,03 | 631 | 0,02 | 0,04 |
| | BSG 20 | 51,01 | 1,90 | 3,40 | 0,61 | 0,36 | 0,01 | 0,18 | 0,08 | 0,01 | 153 | 0,03 | 0,03 |
| | Mármore cálcio-silicáticos | | | | | | | | | | | | |
| BSG 16 | 31,36 | 5,87 | 23,20 | 4,53 | 1,69 | 0,02 | 1,74 | 0,02 | 0,03 | 81 | 0,42 | 0,16 | |
| BSG 18 | 20,45 | 13,89 | 31,34 | 0,70 | 1,03 | 0,04 | 0,16 | 0,03 | <0,01 | 98 | 0,10 | 0,55 | |

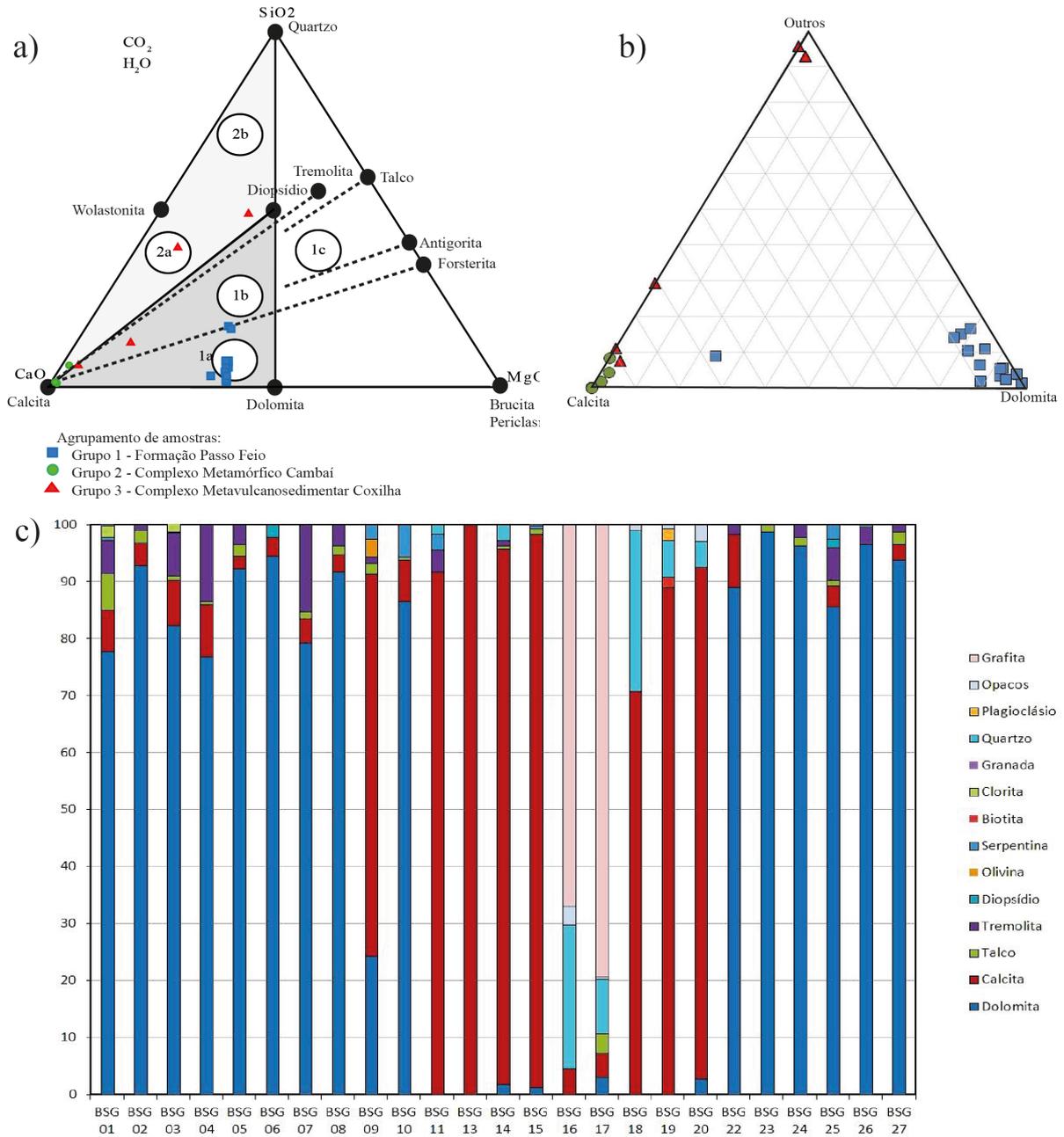


Fig. 4. a) Diagrama SiO₂-CaO-MgO (Bucher & Frey 1994). Campos 1a, 1b e 1c: mármore dolomítico a calcítico-dolomítico. Campos 2a e 2b: mármore cálcio-silicático. b) Diagrama triangular calcita-dolomita-outros (demais fases sólidas) gerado a partir da quantificação modal dos minerais. c) Diagrama quantitativo das fases sólidas dos mármore analisados. O eixo x apresenta os percentuais de cada fase mineral.

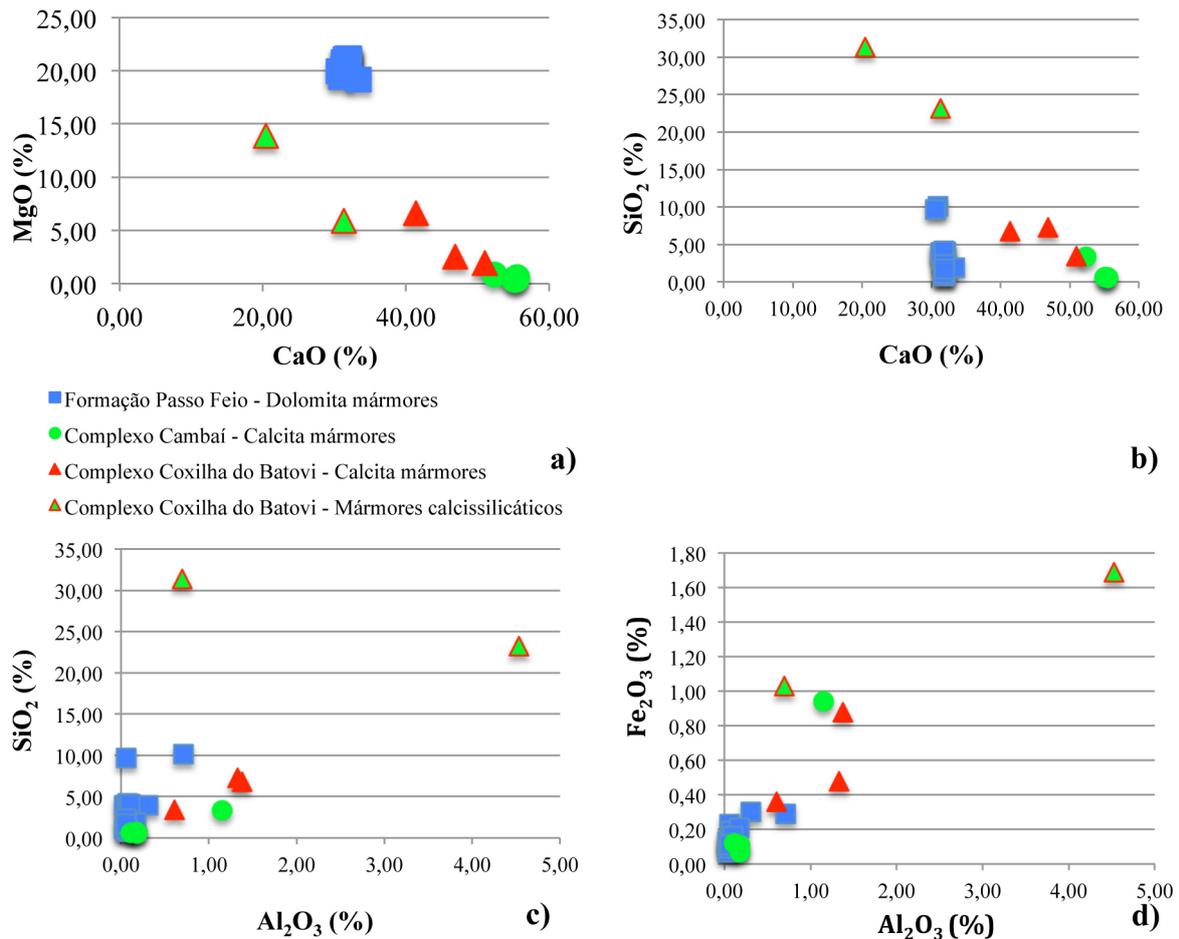


Fig. 5. a) Diagrama MgO-CaO; b) Diagrama SiO₂-CaO; c) Diagrama SiO₂-Al₂O₃ dos mármores analisados e d) Diagrama Fe₂O₃-Al₂O₃ dos mármores estudados.

3.4. Elementos terras raras

A análise dos elementos terras raras foi realizada nas mesmas 25 amostras da Formação Passo Feio, Complexo Cambaí e Complexo Coxilha do Batovi (Tabela 2). Ao se verificar a distribuição dos ETRs nessas amostras é possível identificar 2 grupos, cujos valores totais desses elementos são bastante distintos.

O primeiro grupo inclui os dolomita mármores da Formação Passo Feio e os calcita mármores do Complexo Cambaí (Fig. 6). Nesses mármores a soma dos ETRs varia de 1,4 a 12,4 ppm nos dolomita mármores, e de 2,3 a 20,2 ppm nos litotipos calcíticos. Ao normalizar essas amostras de acordo com os valores do folhelho NASC (Haskin et al. 1968) observa-se uma série contínua entre o La e o Sm, de forma que a partir do Eu a ocorrência dos ETRs pesados é pouco frequente. Nessas amostras todas as concentrações têm a mesma ordem de grandeza sem que sejam observadas anomalias nas concentrações dos ETRs leves. A exceção desse grupo é a amostra BSG 14, calcita mármore do Complexo Cambaí, a qual apresenta

concentrações mais elevadas de ETRs. Em relação aos demais calcita mármores do Complexo Cambaí, essa amostra apresenta teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 mais elevados.

O segundo grupo é formado pelos mármores do Complexo Coxilha do Batovi, com destaque para os litotipos ricos em grafita. Nos calcita mármores desse grupo a soma dos ETRs varia entre 37,8 e 47,8 ppm, com ênfase para a amostra BSG 17, rica em grafita, cuja soma alcança valor de 44,6 ppm. Já nos mármores cálcio-silicáticos os valores das somas dos ETRs são de 10,5 (amostra BSG 18) e 69,9 ppm (amostra BSG 16). A disparidade verificada entre essas duas amostras se deve ao fato de que a amostra BSG 16, cuja soma de ETRs é a mais elevada entre as 25 amostras analisadas, é rica em grafita, e, tal qual a amostra BSG 17, apresenta enriquecimento em ETRs. Quando normalizados de acordo com os valores do folhelho NASC, essas amostras apresentam valores uma ordem de grandeza superiores aos do primeiro grupo, e ao contrário desse, formam séries contínuas do La ao Lu, mostrando enriquecimento em ETRs pesados (Fig. 6). Ao se analisar as séries geradas pelos litotipos do Complexo Coxilha do Batovi, verifica-se que essas são bastante homogêneas. A exceção nesse grupo é a amostra BSG 19, cuja série apresenta um comportamento descendente, com concentrações cada vez mais empobrecidas dos ETRs pesados. Outro comportamento anômalo verificado nesse grupo está relacionado à amostra BSG 18, litotipo cálcio-silicático, cujas concentrações de La, Ce, Pr e Nd são semelhantes às dos dolomita mármores, mas apresenta a série dos ETRs descontínua a partir do Er. Essa amostra é composta unicamente por calcita e quartzo, com 1% de minerais opacos, nos quais concentraram-se os ETRs pesados.

Tabela 2: Concentrações dos ETRs dos mármores estudados.

| Amostras | La | Ce | Pr | Nd | Sm | Eu | Gd | Tb | Dy | Ho | Er | Tm | Yb | Lu |
|----------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
| BSG 01 | 0,8 | 1,26 | 0,2 | 0,6 | | | 0,1 | | 0,1 | | | | | |
| BSG 02 | 1,3 | 2,31 | 0,3 | 1,1 | 0,3 | | 0,3 | | 0,2 | | | | 0,1 | |
| BSG 03 | 1,9 | 4,04 | 0,5 | 1,9 | 0,4 | | 0,2 | | 0,2 | | 0,1 | | 0,2 | |
| BSG 04 | 0,6 | 0,96 | 0,2 | 0,6 | 0,1 | | | | | | | | | |
| BSG 05 | 0,9 | 1,30 | 0,1 | 0,5 | 0,1 | | | | | | | | | |
| BSG 06 | 0,6 | 0,71 | 0,2 | 0,3 | | | | | | | | | | |
| BSG 07 | 0,5 | 0,65 | | 0,2 | | | | | | | | | | |
| BSG 08 | 0,6 | 0,97 | 0,2 | 0,4 | | | | | | | | | | |
| BSG 09 | 0,6 | 0,71 | 0,1 | 0,5 | | | | | | | | | | |
| BSG 10 | 0,5 | 0,85 | 0,1 | 0,4 | | | 0,1 | | | | | | | |
| BSG 11 | 0,6 | 1,23 | 0,1 | 0,7 | 0,2 | | 0,2 | | 0,1 | | | | | |
| BSG 13 | 0,5 | 0,79 | 0,2 | 0,4 | 0,2 | | 0,1 | | 0,2 | | | | 0,1 | |
| BSG 14 | 3,3 | 7,62 | 0,9 | 4,7 | 1,0 | 0,2 | 1,1 | 0,1 | 0,8 | 0,2 | 0,5 | | 0,6 | |
| BSG 15 | 0,7 | 1,44 | 0,2 | 0,7 | 0,1 | | 0,1 | | 0,2 | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|------|-------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| BSG 16 | 14,9 | 21,45 | 3,7 | 17,4 | 2,9 | 0,5 | 3,4 | 0,5 | 3,5 | 0,7 | 1,9 | 0,3 | 1,9 | 0,3 |
| BSG 17 | 10,4 | 11,57 | 2,3 | 11,7 | 1,9 | 0,4 | 2,7 | 0,3 | 2,7 | 0,5 | 1,4 | 0,2 | 1,1 | 0,1 |
| BSG 18 | 1,8 | 2,62 | 0,5 | 2,7 | 0,6 | 0,2 | 1,0 | 0,1 | 0,8 | 0,2 | 0,4 | | 0,4 | |
| BSG 19 | 9,4 | 13,07 | 1,9 | 9,1 | 1,2 | 0,3 | 1,4 | 0,1 | 1,1 | 0,2 | 0,6 | | 0,5 | |
| BSG 20 | 11,7 | 13,25 | 2,6 | 11,1 | 1,9 | 0,3 | 2,4 | 0,3 | 2,5 | 0,6 | 1,7 | 0,2 | 1,5 | 0,2 |
| BSG 22 | 1,6 | 2,96 | 0,3 | 1,2 | 0,2 | | 0,1 | | 0,1 | | | | | |
| BSG 23 | 1,2 | 1,51 | 0,2 | 0,7 | 0,1 | | | | | 0,1 | | | | |
| BSG 24 | 0,6 | 0,83 | 0,2 | 0,5 | | | | 0,1 | | | | | | |
| BSG 25 | 2,5 | 5,45 | 0,6 | 2,2 | 0,4 | | | 0,5 | | 0,6 | | 0,3 | | 0,4 |
| BSG 26 | 1,0 | 1,66 | 0,2 | 0,8 | 0,2 | | | 0,1 | | | | | | |
| BSG 27 | 0,5 | 0,58 | | 0,3 | | | | | | | | | | |

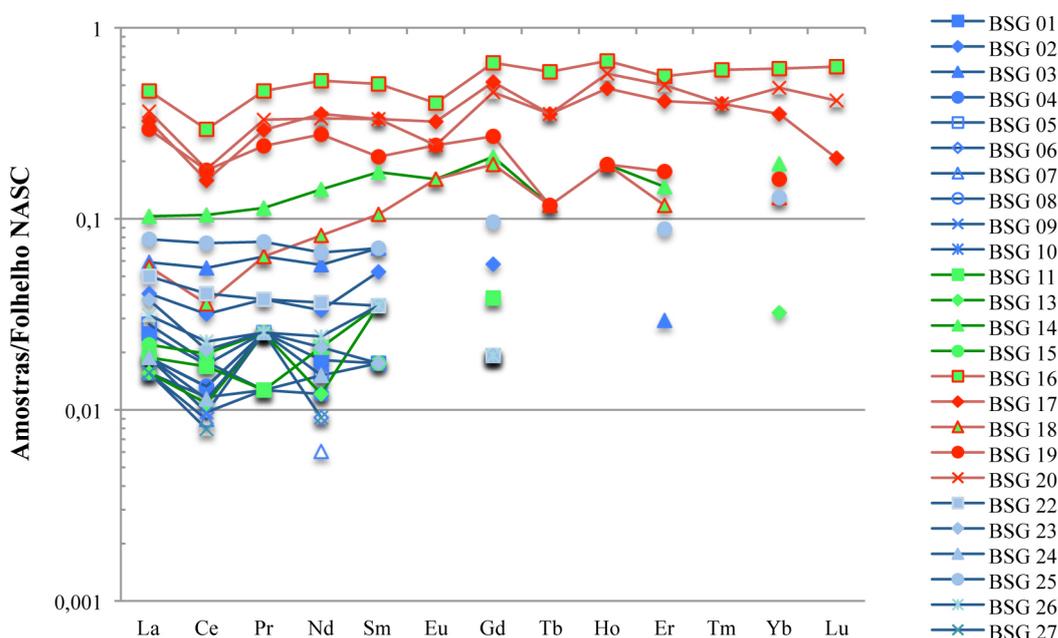


Fig. 6. Padrão dos ETRs dos mármore normalizado em relação ao folhelho NASC (Haskin et al., 1968).

3.5. Abundância e distribuição do Sr

As concentrações de Sr apresentam uma ampla distribuição e abrangem valores entre 30 e 1.900 ppm (Tabela 1). Contudo, de forma semelhante às análises de elementos maiores e ETRs, observa-se comportamentos bastante distintos entre os litotipos. Os dolomita mármore têm valores de Sr entre 32 e 76 ppm, cuja média é de 46,6 ppm. Essa concentração é inferior à verificada nos dolomita mármore Neoproterozóicos não metamorfisados, a qual tem valor de 54 ppm, média obtida a partir de 344 amostras (Melezhik et al., 2005).

Os calcita mármore apresentam um comportamento distinto entre os litotipos do Complexo Cambaí e os do Complexo Coxilha do Batovi. Os mármore do Complexo Cambaí apresentam as maiores concentrações de Sr, com valores entre 1.082 e 1.920 ppm, e média de

1.506 ppm. Já os litotipos do Complexo Coxilha do Batovi têm valores entre 153 e 631 ppm, com concentração média de 307 ppm. Quanto às concentrações elevadas dos litotipos do Complexo Cambaí, de acordo com Melezhik et. al. (2005), os calcita mármores quando em contato com xistos ou intrusões têm concentrações médias de 635 ppm e tendem a ser depletados em Sr em relação a outros mármores, cujas concentrações médias são próximas de 800 ppm. Logo, os calcita mármores do Complexo Cambaí não apresentam concentrações indicativas de contaminação em razão do metamorfismo de contato associado às intrusões.

Nos mármores cálcio-silicáticos as concentrações são de 81 e 98 ppm, com média de 89,5 ppm. Esses valores são inferiores aos dos calcita mármores da mesma unidade (Complexo Coxilha do Batovi), e superiores às dos dolomita mármores da Formação Passo Feio. As amostras ricas em grafita não apresentaram valores díspares em relação aos grupos químicos nos quais estão inseridas.

Quanto à distribuição nas fases sólidas, ao analisar a razão Mg/Ca x Sr (ppm) verifica-se que os dolomita mármores apresentam um comportamento bastante homogêneo, com as maiores razões Mg/Ca e as menores concentrações de Sr (Fig. 7 a). Há apenas uma amostra levemente deslocada, a qual apresenta menor razão Mg/Ca e maior concentração de Sr. Ao se analisar todos os grupos químicos verifica-se que as maiores concentrações de Sr estão associadas às menores razões Mg/Ca indicando que o Sr tende a se concentrar na calcita, em detrimento da dolomita.

3.6. Razões isotópicas Sr^{87}/Sr^{86}

As razões isotópicas de Sr foram obtidas a partir da análise de 15 das 25 amostras estudadas até então, 12 dolomita mármores da Formação Passo Feio e 3 calcita mármores do Complexo Cambaí (Tabela 3). Nessa etapa não foram inclusas amostras do Complexo Coxilha do Batovi em razão da influência dos componentes siliciclásticos nas análises de elementos maiores e ETRs. Schmitt (1995) também verificou em trabalhos realizados na mesma unidade que o pico metamórfico dessa unidade, corresponde à fácies xisto verde, teria sido responsável por uma nova homogeneização do sistema isotópico Rb/Sr, datada de 669 Ma.

As razões Sr^{87}/Sr^{86} apresentam uma distribuição bastante distinta entre os dolomita e os calcita mármores. O histograma apresentado na Fig. 7 b baseia-se nos dados de 21 análises de dolomita mármores, entre as quais não é possível determinar padrões distintos entre os dois lixiviados. Nesses litotipos o valor máximo encontrado para o lixiviado 1 foi 0,71032 e o

valor mínimo, 0,707282, enquanto para o lixiviado 2, o valor máximo é de 0,71087 e o mínimo, 0,706680, sendo assim as frequências estão distribuídas entre 0,706 e 0,710. O lixiviado 1 tem maior frequência de razões em intervalos entre 0,707 e 0,708, embora as mesmas também estejam distribuídas em outros 3 intervalos. No lixiviado 2, os intervalos mais frequentes são entre 0,707 e 0,708 e entre 0,710 e 0,711, mas as razões também estão distribuídas em outros 3 intervalos. Nos calcita mármores observa-se o predomínio, em ambos os lixiviados, de razões com valores entre 0,706 e 0,707 (mín. 0,70690 e máx. 0,70698).

As razões isotópicas de Sr dos calcita mármores, quando comparadas com as concentrações de Sr, apresentam uma discreta elevação, demonstrada principalmente pelas análises do lixiviado 2, a medida que essas concentrações aumentam (Fig. 7 c). Logo, o enriquecimento de Sr^{87} acompanha o aumento das concentrações de Sr nessas amostras. Nos dolomita mármores observa-se a formação de dois padrões: o primeiro inclui amostras cujas razões Sr^{87}/Sr^{86} encontram-se entre 0,7065 e 0,7080 e nas quais as concentrações de Sr variam entre 30 e 80 ppm e o segundo é formado por litotipos que apresentam um enriquecimento de Sr^{87} , com razões Sr^{87}/Sr^{86} superiores a 0,7080, acompanhado de uma leve elevação do conteúdo de Sr, o qual varia entre 50 e 80 ppm (Fig. 7d).

Tabela 3: Razões Sr/Sr das amostras de mármore estudadas.

| Amostras | Razões Sr/Sr | | | | |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| | $^{84}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | $^{84}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | $^{85}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ | |
| Lixiviado 1 | Padrão NBS 987 | 0,0067532+-0,0227 | 0,7102605+-0,0021 | 0,0565597+-0,0227 | 0,000082+-20,9552 |
| | BSG 01 | 0,0067788+-0,0068 | 0,7103213+-0,0010 | 0,0565227+-0,0068 | 0,0001946+-4,1047 |
| | BSG 02 | 0,0067525+-0,0110 | 0,7094465+-0,0110 | 0,056554+-0,1005 | 0,0021554+-6,469 |
| | BSG 03 | 0,0067514+-0,0092 | 0,7092429+-0,0012 | 0,0565443+-0,0092 | 0,0000906+-10,1651 |
| | BSG 04 | 0,0067478+-0,0081 | 0,7097783+-0,0011 | 0,0565139+-0,0081 | 0,0001254+-5,1902 |
| | BSG 05 | 0,0067537+-0,0079 | 0,7080493+-0,0011 | 0,0565634+-0,0079 | 0,0001299+-4,6849 |
| | BSG 06 | 0,0067492+-0,0081 | 0,7079826+-0,0021 | 0,0565261+-0,0081 | 0,0003016+-3,5993 |
| | BSG 08 | 0,0067479+-0,0066 | 0,7080990+-0,0011 | 0,0565149+-0,0066 | 0,0002932+-3,2326 |
| | BSG 10 | SEM RESULTADO | | | |
| | BSG 11 | 0,0067499+-0,0066 | 0,7069544+-0,0010 | 0,0565320+-0,0066 | 0,0000688+-9,3517 |
| | BSG 13 | 0,0067471+-0,0079 | 0,706903+-0,0012 | 0,0565081+-0,0079 | 0,0000555+-10,1594 |
| | BSG 15 | 0,0067485+-0,0059 | 0,7070046+-0,0012 | 0,056519+-0,0059 | 0,0001255+-3,4844 |
| | BSG 22 | 0,0067517+-0,0047 | 0,7072823+-0,0012 | 0,0565472+-0,0047 | 0,0002963+-2,9796 |
| | BSG 23 | 0,0068097+-0,0060 | 0,7074307+-0,0013 | 0,0570327+-0,0060 | 0,0003635+-4,4117 |
| | BSG 25 | 0,0067483+-0,0058 | 0,7072889+-0,0015 | 0,0565183+-0,0058 | 0,0004098+-3,1866 |
| | BSG 26 | SEM RESULTADO | | | |
| Lixiviado 2 | BSG 01 | 0,0069470+-0,0185 | 0,7108291+-0,0034 | 0,0581826+-0,0185 | 0,00005070+-5,4370 |
| | BSG 02 | 0,0067497+-0,0129 | 0,7091044+-0,0018 | 0,0565304+-0,0129 | 0,0002525+-7,5416 |
| | BSG 03 | 0,0067492+-0,0050 | 0,7108771+-0,0010 | 0,0565257+-0,0050 | 0,0007692+-1,0415 |
| | BSG 04 | 0,0067499+-0,0045 | 0,7103449+-0,0009 | 0,0565314+-0,0045 | 0,0000650+-5,7215 |
| | Padrão NBS 987 | SEM RESULTADO | | | |
| | BSG 05 | 0,0067510+-0,0092 | 0,7080377+-0,0018 | 0,0565410+-0,0092 | 0,0002041+-7,8253 |
| | BSG 06 | 0,0067479+-0,0064 | 0,7077591+-0,0012 | 0,0565153+-0,0064 | 0,0001565+-3,9369 |
| | BSG 08 | 0,0067498+-0,0057 | 0,7082429+-0,0015 | 0,0565308+-0,0057 | 0,0007654+-1,3399 |
| | BSG 10 | 0,0067481+-0,0055 | 0,7073648+-0,0037 | 0,0565166+-0,0055 | 0,0006000+-3,9647 |
| | BSG 11 | 0,0067577+-0,0162 | 0,7069811+-0,0020 | 0,0565970+-0,0162 | 0,0002162+-13,7372 |
| | BSG 13 | 0,0067500+-0,0123 | 0,7069025+-0,0015 | 0,0565329+-0,0123 | 0,0000598+-14,2310 |
| | BSG 15 | 0,0067471+-0,0074 | 0,7069692+-0,0009 | 0,0565080+-0,0074 | 0,0000597+-5,7756 |
| | BSG 22 | 0,0067522+-0,0063 | 0,7067305+-0,0020 | 0,0565511+-0,0063 | 0,0002974+-4,2502 |
| | BSG 23 | 0,0067476+-0,0076 | 0,7074974+-0,0023 | 0,0565122+-0,0076 | 0,0002647+-6,2665 |
| | BSG 25 | 0,0067725+-0,0526 | 0,7068070+-0,0063 | 0,0567215+-0,0526 | 0,0003455+-31,0297 |
| | BSG 26 | SEM RESULTADO | | | |

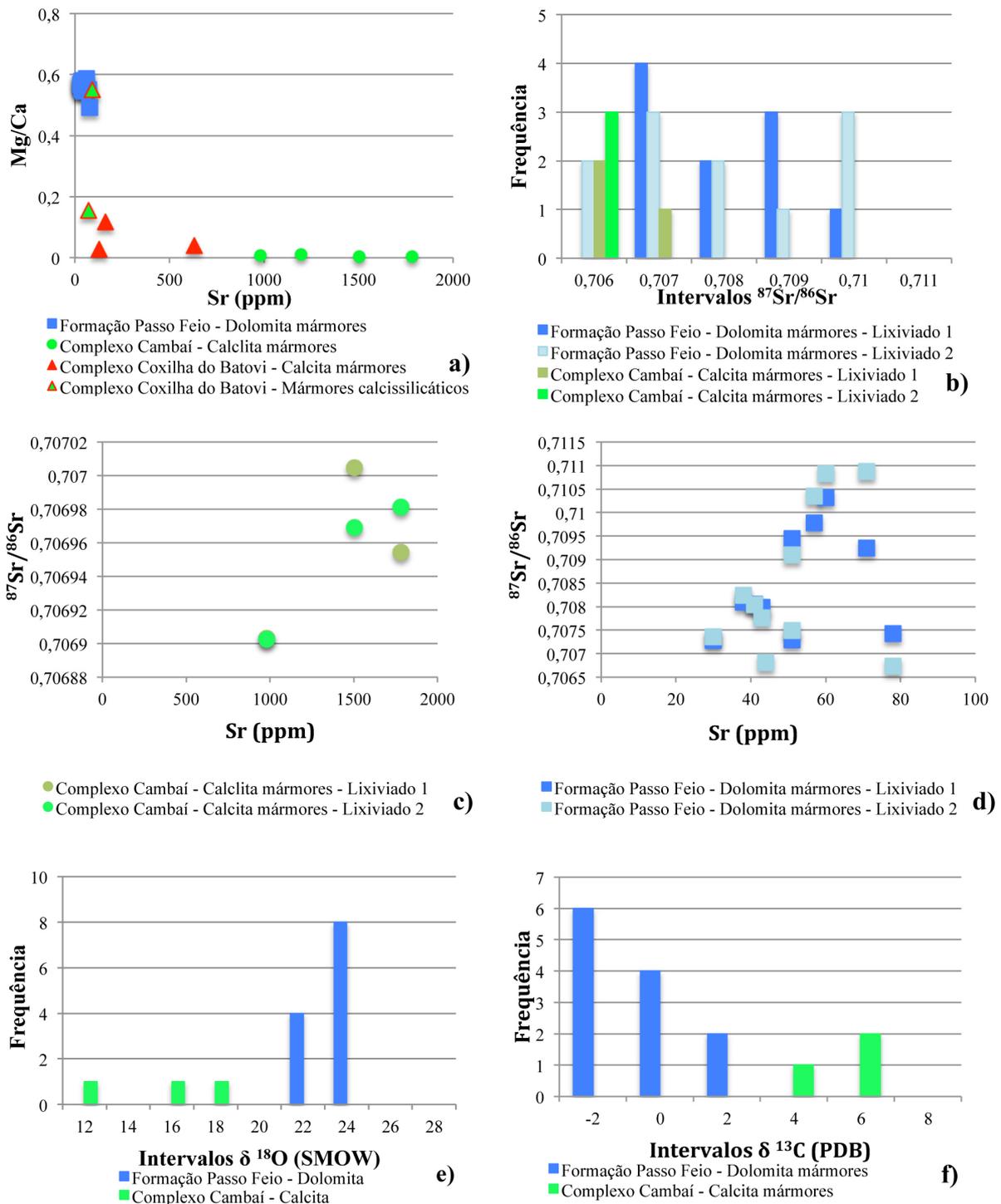


Fig. 7. a) Diagrama Mg/Ca x Sr (ppm) dos mármore analisados; b) Histograma de frequência das razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; c) Diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ x Sr dos dolomita mármore do Complexo Cambaí; d) Diagrama $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ x Sr dos calcilita mármore da Formação Passo Feio; e) Histograma de frequência dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos mármore analisados e f) Histograma de frequência dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ dos mármore analisados.

3.7. Isótopos de C e O

Os dados dos isótopos de C e O compreendem 30 análises realizadas nas mesmas 15 amostras utilizadas para caracterização das razões isotópicas de Sr, entre as quais não estão inclusos os exemplares ricos em grafita (Tabela 4). Nos calcita mármores, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ relativos ao padrão V-SMOW (*Standard Mean Ocean Water*), variam entre 12,7 e 18,81‰ (média de 16,43‰), com igual frequência entre os intervalos (Fig. 7e). Quando comparados aos valores médios dos calcários calcíticos neoproterozóicos (25‰), verifica-se que esses resultados são pouco frequentes entre os mesmos, conforme apresentado por Melezhik et al. (2005). Já nos litotipos dolomíticos, esses valores variam entre 23,00 e 25,66‰, com média de 24,51‰ correspondente ao valor de maior frequência entre as análises (Fig. 7e), e semelhante ao valor médio dos calcários dolomíticos neoproterozóicos (23‰), (Melezhik et al. 2005).

Os valores de $\delta^{13}\text{C}$, relativos ao padrão PDB (*Belemnitella americana* da formação Cretácea PeeDee, Carolina do Sul), variam entre 5,75 e 7,79‰ nos calcita mármores (média de 6,74‰), enquanto nos dolomita mármores os mesmos variam entre -0,67 e +2,44‰ (média de +0,31‰). Quanto à frequência desses valores, entre os calcita mármores, predominam resultados entre 6 e 8‰, enquanto nos dolomita mármores, os valores mais frequentes correspondem ao intervalo entre -2 e 0‰ (Fig. 7f).

Tabela 4: Resultados $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$.

| Amostra | Resultados PDB | | Resultados SMOW | Desvio | |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | $\delta^{13}\text{C}$ | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^{18}\text{O}$ | $\delta^{13}\text{C}$ | $\delta^{18}\text{O}$ |
| BSG 01 | -0,27 | -6,78 | 23,864902 | 0,05 | 0,03 |
| BSG 02 | -0,23 | -6,14 | 24,529926 | 0,03 | 0,03 |
| BSG 03 | -0,67 | -6,78 | 23,864902 | 0,02 | 0,05 |
| BSG 04 | 0,46 | -7,61 | 23,002449 | 0,03 | 0,02 |
| BSG 05 | -0,16 | -5,66 | 25,028694 | 0,03 | 0,02 |
| BSG 06 | 0,36 | -5,99 | 24,685791 | 0,03 | 0,03 |
| BSG 08 | 2,44 | -5,94 | 24,737746 | 0,03 | 0,04 |
| BSG 10 | 2,12 | -6,02 | 24,654618 | 0,02 | 0,03 |
| BSG 11 | 6,69 | -17,47 | 12,756923 | 0,04 | 0,06 |
| BSG 13 | 5,75 | -11,64 | 18,814876 | 0,05 | 0,06 |
| BSG 15 | 7,79 | -12,67 | 17,744603 | 0,04 | 0,04 |
| BSG 22 | -0,32 | -6,85 | 23,792165 | 0,03 | 0,03 |
| BSG 23 | -0,26 | -5,68 | 25,007912 | 0,01 | 0,02 |
| BSG 25 | 0,21 | -5,05 | 25,662545 | 0,01 | 0,03 |
| BSG 26 | 0,03 | -5,31 | 25,392379 | 0,02 | 0,03 |

3.8. Identificação de assinaturas isotópicas primárias

As amostras do Bloco São Gabriel analisadas nesse estudo estão associadas a sequências siliciclásticas datadas do Neoproterozóico. Considerando que muitas rochas carbonáticas dessa Era apresentam algum grau de alteração, não é possível assumir que todas as razões isotópicas $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, bem como os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ sejam representativos dos padrões da água do mar. Portanto é necessária a adoção de critérios de identificação de assinaturas isotópicas primárias.

Jacobsen & Kaufman (1999) ao apresentarem a curva de evolução dos isótopos de Sr, C e O para a água do mar do Neoproterozóico utilizaram como um dos critérios para identificação das composições primárias, as relações entre $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, Mn/Sr , $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$, bem como as trajetórias de evolução dessas relações baseadas em modelos de interação entre rocha e fluidos. Essas trajetórias têm como membros iniciais os litotipos de composição primária e como membros finais os de composição diagenética (e/ou metamórficas). Esse mesmo critério foi empregado na avaliação das amostras dos mármore do Bloco São Gabriel e resultou nas distribuições verificadas na Fig. 8.

Nos diagramas apresentados, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ foram calculados de acordo com o padrão PDB, da mesma forma que no trabalho de Jacobsen & Kaufman (1999). Quanto às razões $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, as mesmas não foram discriminadas segundo os dois lixiviados obtidos em razão da inexistência de um padrão individual de comportamento para cada lixiviado, tanto nos dolomita, quanto nos calcita mármore. Ainda que os erros analíticos dos resultados do lixiviado 1 sejam inferiores aos do lixiviado 2, optou-se por avaliar conjuntamente todos os dados obtidos, sem tratamento estatístico, considerando que a análise das assinaturas primárias constitui nesse estudo uma análise de valores absolutos, na qual um dado com erro analítico maior pode ser mais representativo do que outro com erro analítico inferior.

A relação entre $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ e as razões Mn/Sr permite a identificação de comportamentos bastante distintos entre os calcita mármore e os litotipos dolomíticos (Fig. 8a). Os calcita mármore têm dispersão de pontos bastante reduzida, com razões $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ entre 0,7069 e 0,7070 e razões Mn/Sr em torno de 0,03. Ainda que a quantidade de amostras analisadas seja inferior à dos dolomita mármore, a baixa dispersão dos dados indica a acurácia dos mesmos. De acordo com esses parâmetros, os calcita mármore representam as composições mais próximas dos valores primários entre os litotipos analisados. Os dolomita mármore, apresentam uma dispersão maior, mas ainda assim encontram-se próximos da extremidade relativa às composições primárias. Entre as amostras analisadas, as mais próximas dessa

composição são a BSG 23, com valores de 1,17 (Mn/Sr) e 0,7074 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$), e a amostra BSG 08, com valores de 1,926 (Mn/Sr) e 0,7080 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$).

Os calcita mármores do Complexo Cambaí e as amostras BSG 23 e BSG 08 (dolomita mármores da Formação Passo Feio), cujas assinaturas isotópicas são indicadas como as mais primárias, também estão de acordo com o critério associado às razões Mn/Sr, no qual valores <2 correspondem às amostras cujas composições primárias se mantêm preservadas (Jacobsen & Kaufman, 1999). Esses autores também optaram por considerar como representativas de suas composições primárias somente amostras com concentrações de Sr entre 150 e 2.500 ppm, bem como amostras cujas razões Rb/Sr fossem inferiores a 0,005. Entre os calcita mármores do Complexo Cambaí, todas as amostras estão de acordo com ambos os critérios. Contudo, nas amostras dos dolomita mármores da Formação Passo Feio foram aplicados esses critérios e nenhuma das amostras contém concentrações de Sr superiores a 83 ppm. Já em relação às razões Rb/Sr, essas são inferiores a 0,005 somente nas amostras BSG 01 e BSG 04, as quais não atendem a outros critérios considerados de maior relevância, como as razões Mn/Sr.

A relação $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} \times \delta^{18}\text{O}$ mostra uma distribuição dos litotipos calcíticos e dolomíticos bastante semelhante à verificada na relação $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} \times \text{Mn}/\text{Sr}$, porém com localização diferente em relação às trajetórias composicionais. Nesse diagrama (Fig. 8b) os calcita mármores estão mais afastados da extremidade das composições primárias, mas ainda assim encontram-se sobre a linha da trajetória em um trecho intermediário entre as extremidades primária e diagenética. Entre os dolomita mármores, apesar da dispersão dos dados e da maior parte das amostras estar posicionada fora da trajetória, 3 amostras estão situadas próximo aos valores primários. Essas amostras são: BSG 22 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} = 0,7072$ e $\delta^{18}\text{O} = -6,85\text{‰}$); BSG 25 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} = 0,7072$ e $\delta^{18}\text{O} = -5,05\text{‰}$) e BSG 23 ($\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} = 0,7074$ e $\delta^{18}\text{O} = -5,68\text{‰}$). Contudo ao se verificar as razões Mn/Sr das mesmas, somente a BSG 23 apresenta razão inferior a 2.

As relações entre $\delta^{13}\text{C} \times \text{Mn}/\text{Sr}$ apresentam distribuições semelhantes às verificadas entre as razões $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ e Mn/Sr, com litotipos calcíticos e dolomíticos próximos da extremidade das composições primárias (Fig. 8c). Entre os calcita mármores os valores de $\delta^{13}\text{C}$ encontram-se entre 6 e 8‰, com razões Mn/Sr próximas de 0,03, os quais colocam esses litotipos entre as composições mais primárias entre todas as amostras analisadas. Os dolomita mármores, mesmo apresentando maior dispersão de seus dados, contam com 3 amostras posicionadas próximas à extremidade primária e de acordo a trajetória composicional. Essas

amostras são: BSG 23 ($\delta^{13}\text{C} = -0,26\%$ e $\text{Mn}/\text{Sr} = 1,17$); BSG 01 ($\delta^{13}\text{C} = -0,27\%$ e $\text{Mn}/\text{Sr} = 1,5$) e BSG 05 ($\delta^{13}\text{C} = -0,16\%$ e $\text{Mn}/\text{Sr} = 1,92$).

Por fim, a análise entre as relações entre $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ mostram uma dispersão semelhante entre os calcita e os dolomita mármores (Fig. 8d). Ambos os grupos químicos estão situados fora da trajetória composicional, em posições intermediárias entre as composições primárias e diagenéticas. Quanto aos calcita mármores, mais afastados da trajetória, verifica-se que esse posicionamento, semelhante ao verificado no diagrama $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86} \times \delta^{18}\text{O}$, é atribuído aos valores de $\delta^{18}\text{O}$, os quais são próximos de -12. Ao se observar o diagrama $\delta^{13}\text{C} \times \text{Mn}/\text{Sr}$ verifica-se que os valores de $\delta^{13}\text{C}$ desses litotipos, entre 6 e 8‰, estão posicionados na extremidade primária de uma das trajetórias composicionais. Ainda assim, é possível destacar entre os calcita mármores, a amostra BSG 13 ($\delta^{13}\text{C} = 5,75\%$ e $\delta^{18}\text{O} = -11,64\%$), cuja composição é a mais primária de acordo com essa trajetória composicional. Já os dolomita mármores, embora tenham apresentado amostras próximas às composições primárias nas demais relações analisadas, mostraram no diagrama $\delta^{13}\text{C} \times \delta^{18}\text{O}$ um posicionamento mais distante dessas composições. Esse comportamento é semelhante ao apresentado por Jacobsen & Kaufman (1999) no mesmo diagrama contendo dados de amostras de rochas carbonáticas da Namíbia, Austrália, Noruega e Groelândia. Todavia, entre os dolomita mármores, as amostras de composição mais próximas às primárias são: BSG 08 ($\delta^{13}\text{C} = 2,44\%$ e $\delta^{18}\text{O} = -5,94\%$) e BSG 10 ($\delta^{13}\text{C} = 2,12\%$ e $\delta^{18}\text{O} = -6,02\%$).

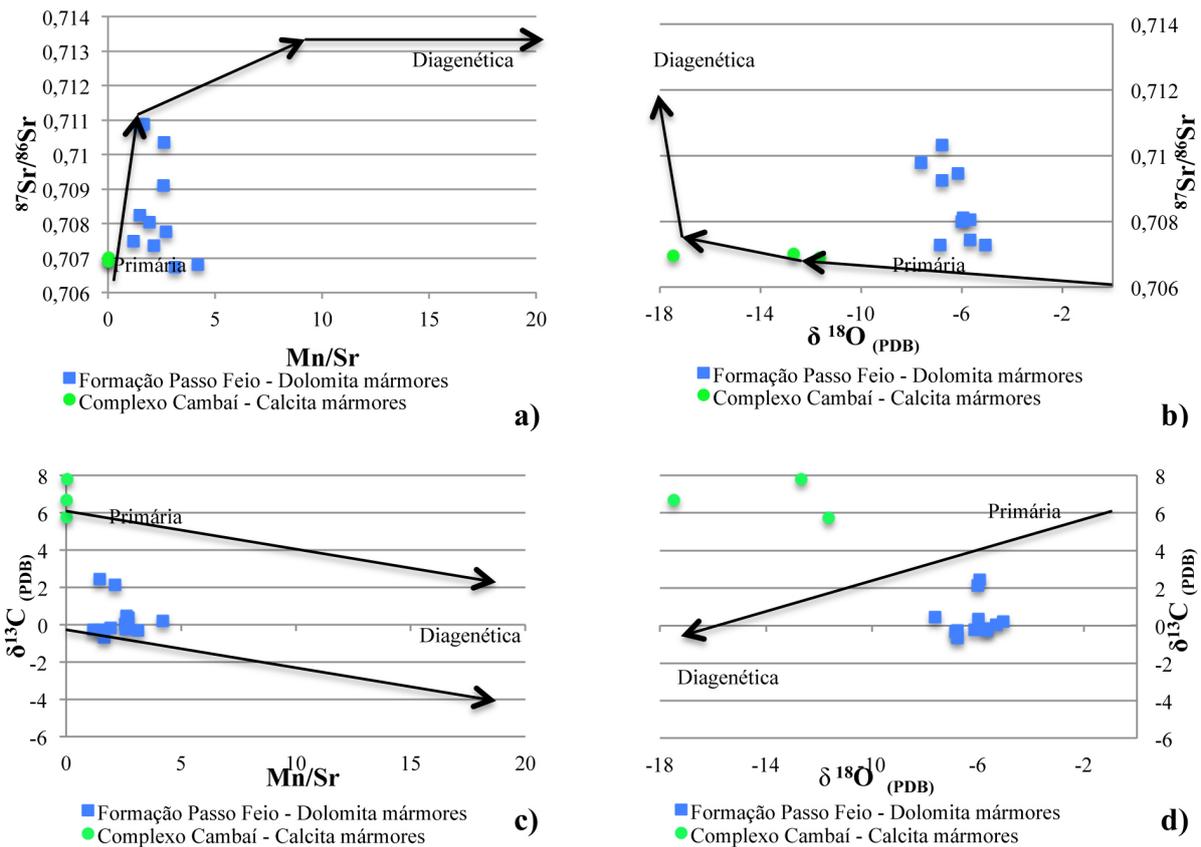


Fig. 8. a) Diagrama $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ x Mn/Sr; b) $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ x $\delta^{18}\text{O}$; c) $\delta^{13}\text{C}$ x Mn/Sr e d) $\delta^{13}\text{C}$ x $\delta^{18}\text{O}$. As setas representam as trajetórias das rochas carbonáticas entre suas composições primárias e diagenéticas (Jacobsen & Kaufman, 1999).

4. Discussão dos resultados

As composições isotópicas de Sr, C e O de rochas carbonáticas têm sido amplamente utilizadas em estudos de correlação de sequências carbonáticas marinhas, conhecidos como estudos de estratigrafia química, se mostrando bastante eficientes e permitindo até mesmo a determinação de idades deposicionais dessas sequências quando preservadas as suas composições primárias. A correlação entre assinaturas isotópicas tem sido aplicada com sucesso não somente em calcários calcíticos e dolomíticos como também em sequências de mármore com ausência de arcabouço fossilífero ou de registros geocronológicos em minerais silicáticos, fatores que inviabilizam a aplicação de bioestratigrafia, bem como de metodologias tradicionais de geocronologia de isótopos radiogênicos e tornam as datações menos acessíveis (Kaufman et al., 1991); (Silva et al., 2005).

Em geral os estudos isotópicos de Sr, C e O são aplicados em sequências cujo controle estratigráfico, bem como características geoquímicas, tanto dos seus componentes carbonáticos quanto dos siliciclásticos, já são bem conhecidos. A partir dessas informações se

torna possível identificar os litotipos cujas composições químicas foram menos modificadas por processos diagenéticos e metamórficos. Contudo, em razão da pouca disponibilidade de dados a respeito, principalmente, dos mármorees da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí, foi realizada, em um primeiro momento, a caracterização da geoquímica de elementos maiores, menores e ETRs, e a partir da mesma foram desenvolvidos os estudos isotópicos.

4.1. Geoquímica elemental

Por meio das análises da geoquímica elemental associadas à petrografia foi possível corroborar a classificação química dos mármorees estudados e verificar algumas características dos seus protólitos. Observando-se os teores de CaO, MgO e SiO₂, verificou-se uma clara distinção entre mármorees dolomíticos da Formação Passo Feio, calcíticos do Complexo Cambaí e cálcio-silicáticos e calcíticos do Complexo Coxilha do Batovi.

A distribuição das concentrações de CaO e MgO entre as fases minerais dos dolomita mármorees da Formação Passo Feio e dos calcita mármorees do Complexo Cambaí apresenta um comportamento uniforme sem ocorrência de anomalias sistemáticas entre esses litotipos. Contudo, entre as amostras do Complexo Coxilha do Batovi, principalmente nos calcita mármorees, as concentrações de MgO diferem sobremaneira das amostras do Complexo Cambaí. Enquanto no Complexo Cambaí as concentrações de MgO são <1%, nos calcita mármorees do Complexo Coxilha do Batovi essas concentrações são >1%, chegando até 6,5%. Ao se verificar o percentual de dolomita desses calcita mármorees constata-se que esse mineral compõe no máximo 3% da assembleia dessas amostras, sendo que em algumas, com teores >1% de MgO, não há dolomita em suas composições. Logo, considerando que as razões elevadas de MgO não advêm de dolomita primária, já que mesmo sendo recristalizada e parcialmente consumida durante os processos diagenéticos e metamórficos a mesma continuaria compondo a assembleia mineral dessas rochas, bem como a associação desses litotipos com os mármorees cálcio-silicáticos, verificada em campo, constata-se que esses teores elevados de MgO nos calcita mármorees do Complexo Coxilha do Batovi são oriundos de contribuição silicática dos protólitos através de minerais como biotita e clorita, por exemplo.

Quanto aos teores de SiO₂, esses se mostraram determinantes nas composições dos diferentes litotipos investigados, bem como na identificação das composições primárias remanescentes entre os mesmos. Os teores médios de SiO₂ de 2% nos calcita mármorees do

Complexo Cambaí e 3% nos litotipos dolomíticos da Formação Passo Feio, bem como a presença de minerais silicáticos entre os dolomita e os calcita mármores, implicam na classificação dos mesmos como mármores impuros (Bortolotto, 1987).

Esses litotipos contêm associações minerais compostas por calcita, dolomita e alguns silicatos, entre esses clorita, talco e tremolita e em algumas amostras, serpentina, biotita, diopsídio e olivina, em maiores quantidades nos dolomita mármores. Texturalmente, em ambos os grupos químicos, esses minerais ocorrem disseminados entre os carbonatos formando uma textura granoblástica, sendo que nos dolomita mármores os silicatos também ocorrem sob a forma de bandas em meio aos carbonatos. Tanto nos litotipos calcíticos quanto nos dolomíticos, os silicatos, com exceção do quartzo, não apresentam texturas de dissolução, subgrãos ou cristalização restrita aos contatos com os carbonatos, indicativas de recristalização sob condições predominantemente hidrotermais, sobrepostas ao metamorfismo. Ainda que seja verificada recristalização de quartzo, o fato dos demais silicatos serem minerais metamórficos e não originários de hidrotermalismo é importante para a manutenção das composições primárias dos mármores, tendo em vista as intrusões de rochas graníticas verificadas nas pedreiras ao longo das exposições da Formação Passo Feio. Já entre os calcita mármores e os litotipos cálcio-silicáticos do Complexo Coxilha do Batovi os teores de SiO_2 variam entre 3 e 31%, mas, de forma diferente dos exemplares da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí, nos quais há uma diversidade de silicatos, as amostras da Coxilha do Batovi são ricas em quartzo (com ou sem feldspato) em detrimento dos demais silicatos.

Embora os conteúdos de SiO_2 estejam distribuídos de forma diferente entre os mármores da Formação Passo Feio e do Complexo Cambaí e os litotipos do Complexo Coxilha do Batovi, sendo os primeiros mais pobres em SiO_2 e mais diversificados em silicatos e o segundo mais rico em SiO_2 e composto majoritariamente por quartzo, os teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 revelam novos aspectos dessas diferenças composicionais. Nos calcita e dolomita mármores do Complexo Cambaí e da Formação Passo Feio as concentrações de Al_2O_3 são < 1% e as de Fe_2O_3 , < 0,5%. Esses elementos compõem silicatos como clorita e eventualmente serpentina. Já entre os exemplares do Complexo Coxilha do Batovi os teores médios de Al_2O_3 e Fe_2O_3 são 1,71% e 0,9%, respectivamente, superiores aos dos calcita e dolomita mármores das demais unidades. Logo, considerando que os mármores do Complexo Coxilha do Batovi não possuem conteúdos de clorita e serpentina que justifiquem esses teores elevados de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , conclui-se que os mesmos estão concentrados junto aos feldspatos e minerais opacos,

respectivamente, e que esses teores mais uma vez são oriundos de um protólito rico em minerais siliciclásticos.

Considerando esses dados constata-se que a contribuição siliciclástica é maior nos litotipos do Complexo Coxilha do Batovi, reduzida nos dolomita mármores da Formação Passo Feio, corroborada pelos teores de SiO_2 e pela diversidade mineralógica, e ainda inferior nos calcita mármores do Complexo Cambaí, nos quais os teores de SiO_2 são os menores entre todos os exemplares. Sendo assim, os litotipos do Complexo Cambaí se mostraram os mais puros entre os mármores do Bloco São Gabriel analisados nesse estudo, enquanto as amostras do Complexo Coxilha do Batovi se revelaram as menos preservadas em relação aos seus componentes carbonáticos.

Entre os mármores do Complexo Coxilha do Batovi também ocorrem exemplares ricos em grafita, com conteúdos que constituem entre 70 e 80% dessas amostras compondo assembleias minerais pouco variadas, com mais de 90% de grafita + quartzo. Esses dados, além de demonstrarem protólitos e composições primárias diversas, também apontam paleoambientes bastante distintos, mais ricos em matéria orgânica e em material siliciclástico, indicativos de ambientes mais continentais no Complexo Coxilha do Batovi em relação às demais unidades estudadas, as quais apresentam composições indicativas de ambiente marinho.

4.2. Processo de dolomitização nos mármores

O processo de dolomitização nos mármores e a fase evolutiva das rochas carbonáticas em que esse processo ocorre contribuem sobremaneira para o entendimento da capacidade de preservação das composições primárias dessas rochas. A dolomitização dos carbonatos pode ser primária, ocorrer durante o metamorfismo ou após o mesmo, provocada por um evento hidrotermal.

Entre os mármores da Formação Passo Feio a dolomita é preponderante entre os carbonatos e ocorre como grãos subédricos e euédricos formando uma textura granoblástica. Nessas amostras não foram verificadas evidências de destruição parcial ou total dessa textura ou de percolação de fluidos pós-metamórficos hidrotermais ou meteóricos, os quais poderiam ter causado a dolomitização.

Já a dolomitização ocorrida durante o metamorfismo implica na cristalização de dolomita a partir da dissolução da calcita e de demais minerais silicáticos, os quais contenham Mg. Contudo, ao verificar as principais reações metamórficas em mármores (Bucher & Frey,

1994), constata-se que as poucas reações que produzem dolomita são todas acompanhadas de silicatos (talco, tremolita ou diopsídio) e, dessa forma, não corroboram a abundância de dolomita nos mármore investigados, tendo em vista que todos possuem volume de dolomita superior a 75 %.

Logo, a alternativa mais adequada às características verificadas nos mármore estudados indica que o processo de dolomitização está associado ao processo de deposição. Essa possibilidade requer um tempo de residência do oceano relativamente grande o suficiente para permitir a transferência de Mg da água do mar para os carbonatos primários. O processo e o momento exato desta transferência do Mg da água do mar para os carbonatos (sin-deposicional ou diagenético) não pode ser avaliado com maior precisão devido à superposição dos eventos metamórficos e deformacionais nas rochas estudadas.

4.3. Comportamento dos ETRs

O comportamento dos ETRs das três unidades investigadas corroboraram as interpretações realizadas até então com os elementos maiores e menores. Mais uma vez os calcita mármore do Complexo Cambaí e os dolomita mármore da Formação Passo Feio apresentaram características indicativas de preservação de suas composições primárias. Quando normalizados de acordo com os valores do folhelho NASC, esses litotipos apresentam valores inferiores a 0,1, com séries contínuas entre o La e o Sm e ocorrências de pontos isolados a partir do mesmo. Esse comportamento demonstra a preservação dos elementos terras raras leves e médios, representados pelos elementos que compõem a série entre La e Sm (Henderson, 1984), e o registro esparso de elementos terras raras pesados, representados pela série de elementos existentes entre o Gd e o Lu.

A única exceção é verificada em uma amostra com teores elevados de Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Ao longo dessas séries também não é verificada nenhuma anomalia indicativa de enriquecimento ou depleção de terras raras leves.

Já as amostras do Complexo Coxilha do Batovi apresentam séries contínuas entre o La e o Lu demonstrando enriquecimento em elementos terras pesados em relação aos demais mármore analisados no estudo. Tal fato se deve à maior contribuição siliciclástica dos seus protólitos considerando que silicatos, de forma geral, apresentam composição química mais complexa e arranjos cristalográficos mais favoráveis à incorporação de elementos terras pesados em relação aos carbonatos.

4.4. Assinaturas isotópicas de Sr, ^{13}C e ^{18}O da Formação Passo Feio e do Complexo

Cambaí e suas implicações regionais

A partir das análises isotópicas foi possível avaliar as assinaturas de Sr, $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ de cada região focalizada neste estudo e compará-las com o modelo de interação entre fluido e rocha, gerado a partir do estudo de calcários, sugerido por Jacobsen & Kaufman (1999). A análise integrada dos parâmetros isotópicos $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ e $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, bem como da razão Mn/Sr, permitiu selecionar as amostras cujas assinaturas se mostraram equivalentes às primárias ou mais próximas das mesmas.

Nessa análise foi considerada a frequência das amostras entre os campos das composições primárias dos diferentes parâmetros, da seguinte forma: os exemplares que encontram-se nas extremidades primárias das trajetórias composicionais de mais de um parâmetro isotópico, como $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ e $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ por exemplo, e que atendem ao critério das razões Mn/Sr <2, demonstram de forma mais consolidada a preservação das composições químicas primárias em detrimento das amostras que apresentam preservação de apenas um parâmetro isotópico. Contudo, é necessário fazer uma ressalva quanto à preservação das composições primárias de $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$, o qual, dentre os demais parâmetros, é o mais suscetível a alterações de suas composições, como já demonstrado por Jacobsen & Kaufman (1999).

Entre os calcita mármores do Complexo Cambaí, as assinaturas isotópicas primárias das razões $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ apresentam valores muito próximos, todos em torno de 0,7069, com variação apenas na quinta casa decimal. Logo, essa razão é considerada a assinatura isotópica primária da razão $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ dessas rochas. Já as assinaturas primárias de $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ desses litotipos foram encontradas na amostra BSG 13, cujos valores desses parâmetros são 5,75‰ e -11,64‰, respectivamente.

Nos dolomita mármores da Formação Passo Feio foram identificadas duas assinaturas isotópicas primárias de $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ e duas de $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$. Com relação às razões $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ foi verificada uma assinatura primária na amostra BSG 08, cujo valor é 0,7081, e outra assinatura na amostra BSG 23, cujo valor é 0,7074. Ambas igualmente consistentes em relação aos parâmetros de identificação das assinaturas primárias aplicados nesse estudo. O mesmo foi verificado na análise do $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$, cujas assinaturas isotópicas primárias foram identificadas também nas amostras BSG 08, com valor 2,12‰, BSG 23, com valor -0,26‰, e na amostra BSG 10, cujo valor é 2,44‰. Por fim, a assinatura primária de $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ foi identificada somente na amostra BSG 23, cujo valor é -5,68‰.

As amostras com assinaturas isotópicas correspondentes às composições primárias foram posicionadas nos diagramas de variação temporal da razão $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ e de $\delta^{18}\text{O}$ das rochas carbonáticas neoproterozóicas apresentados por Jacobsen & Kaufman (1999), bem como na curva de variação temporal do $\delta^{13}\text{C}$, referida pelos mesmos autores. O posicionamento das amostras dos mármores do Bloco São Gabriel nesses diagramas foi realizado por meio da comparação dessas assinaturas com a distribuição das amostras de rochas carbonáticas do Canadá, Rússia, Namíbia, Noruega e Groelândia, conforme apresentado pelos autores. Os eventos tectônicos considerados na contextualização temporal das assinaturas isotópicas primárias obtidas para o Bloco São Gabriel contam com registros geocronológicos consistentes, obtidos através do método convencional de datação U/Pb em zircão, bem como de SHRIMP. Esses eventos são: metamorfismo da Formação Passo Feio (EMPF), há ca. 700 Ma (Remus et al., 2000, Saalman et al., 2010), o evento de metamorfismo do Complexo Cambaí (EMCb), entre 720 e 730 Ma e o evento de magmatismo do Complexo Cambaí (MCb), situado entre 733 ± 10 e 879 ± 14 Ma (Leite et al., 1998), e por fim, as idades registradas em zircões detriticos da Formação Passo Feio parcialmente apagados (ZrPF), as quais abrangem um período de 908 a 774 Ma (Remus et al., 2000).

Ao observar-se a variação temporal das razões $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ na água do mar (Fig. 9a) verifica-se que as assinaturas encontradas nos mármores do Complexo Cambaí permitem o seu posicionamento no período entre 730 e 740 Ma, no qual são preservados registros de deposição de rochas carbonáticas encontradas na Namíbia e no Canadá. Ao se comparar essas idades com os eventos verificados no Bloco São Gabriel, observa-se que a mesma encontra-se entre o magmatismo e o metamorfismo do Complexo Cambaí. Considerando que o registro mais antigo do metamorfismo desse complexo é datado de 730 Ma existe um período de 10 Ma, entre 740 e 730 Ma, no qual os calcários podem ter sido depositados.

Essa possibilidade é corroborada pelo registro de $\delta^{13}\text{C}$ desse complexo, o qual encontra-se posicionado sobre a curva de variação desse parâmetro, também no mesmo período entre 730 e 740 Ma, com um valor positivo equivalente a 5,75‰ (Fig. 9b). Valores enriquecidos de $\delta^{13}\text{C}$ são atribuídos comumente a períodos de alta atividade tectônica durante os quais diminui a disponibilidade de C orgânico nos oceanos em razão de eventos de ampla subducção e fechamento de oceanos. Quanto ao posicionamento dos mármores do Complexo Cambaí no diagrama de variação temporal do $\delta^{18}\text{O}$ na água do oceano, a amostra de composição primária situa-se no intervalo entre 730 e 720 Ma (Fig. 10), período no qual são registradas assinaturas semelhantes de $\delta^{18}\text{O}$ em rochas carbonáticas da Namíbia. Embora esse

período corresponda já ao evento de metamorfismo do Complexo Cambaí, a assinatura de $\delta^{18}\text{O}$ posiciona os mármore, ainda que de forma imprecisa, dentro do contexto tectônico regional.

Já as razões $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ da Formação Passo Feio indicam um evento marcado por uma assinatura de valor em torno de 0,7074, encontrada em um período entre 740 e 730 Ma, no qual também estão posicionadas amostras da Noruega e da Namíbia. Também foi verificada uma outra assinatura de valor 0,7081, oriunda da amostra BSG 08, a qual não tem correspondentes entre as amostras dos demais continentes. Considerando que o evento de metamorfismo da Formação Passo Feio é datado de 700 Ma e que os zircões detríticos dessa formação guardam registros entre 908 e 774 Ma, há um período de pelo menos de 70 Ma. (~ 700 a 770 Ma), ao longo do qual os calcários podem ter sido depositados na bacia sedimentar que originou a Formação Passo Feio.

Esse evento deposicional também é evidenciado nos registros de $\delta^{13}\text{C}$, através de duas assinaturas isotópicas distintas. Ambas as assinaturas estão posicionadas na curva de variação temporal do $\delta^{13}\text{C}$ no período entre 740 e 730 Ma. A assinatura correspondente à idade mais antiga tem valor de -0,26‰ e a mais recente, apresenta um valor de +2,44‰. Ocorre também uma terceira assinatura, proveniente da amostra BSG 08, a qual não tem correspondentes entre as amostras dos demais continentes. Contudo, a variação entre -0,26‰ e +2,44‰ pode indicar uma excursão positiva do $\delta^{13}\text{C}$ no período de 10 Ma associada ao aumento da atividade tectônica. Quanto aos registros de $\delta^{18}\text{O}$, a assinatura de -5,68‰ correspondente aos mármore da Formação Passo Feio, também é encontrada em amostras da Noruega e da Namíbia no mesmo período de 740 e 730 Ma. Dessa forma a assinatura de $\delta^{18}\text{O}$ corrobora os registros $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$ e $\delta^{13}\text{C}$ e está de acordo com o intervalo de 70 Ma ao longo do qual estima-se que tenha ocorrido a deposição dos calcários.

Assim, pode-se sugerir que o evento de deposição dos mármore do Bloco São Gabriel tenha ocorrido entre 770 – 700 Ma, enquanto o período sugerido para as rochas carbonáticas da Formação Passo Feio é de 770-730 Ma e entre 740-730 para o Complexo Cambaí.

Por fim, a partir do enquadramento das assinaturas isotópicas dos mármore nos eventos tectônicos já descritos no Bloco São Gabriel, bem como dos demais dados contidos em vasta literatura sobre os litotipos ígneos e metamórficos desse bloco, é possível sugerir, no âmbito especulativo, alguns cenários nos quais esses mármore estariam inseridos ao longo da evolução do bloco tectônico:

Cenário 1 – Deposição dos calcários do Complexo Cambaí e da Formação Passo Feio ao longo do mesmo período, entre 740 e 730 Ma, no mesmo mar mas em ambientes distintos. Os calcários do Complexo Cambaí se depositaram em ambiente de mar aberto, durante um período curto, no qual o processo deposicional não foi seguido por dolomitização dos calcários. Considerando que a dolomitização não ocorreu nem mesmo durante a diagênese, pode-se atribuir a esses litotipos uma evolução rápida entre os processos de deposição e metamorfismo. Já os calcários da Formação Passo Feio passaram por uma dolomitização, possivelmente concomitante com a deposição, indicando ambiente marinho mais restrito, no qual os processos subsequentes, de diagênese e metamorfismo se desenvolveram ao longo de um período maior, de pelo menos 30 Ma (~ 730 a 700 Ma).

Cenário 2 – Deposição dos calcários da Formação Passo Feio no intervalo entre 770 e 730 Ma, e deposição posterior dos litotipos do Complexo Cambaí, entre 740 e 730 Ma, em mares diferentes. A Formação Passo Feio teria sido depositada em um ambiente mais restrito, associada à margas, as quais originariam os xistos pelíticos verificados no setor norte dessa formação. O Complexo Cambaí teria sido depositado em um ambiente de mar aberto com rápido fechamento e sobreposição do evento metamórfico.

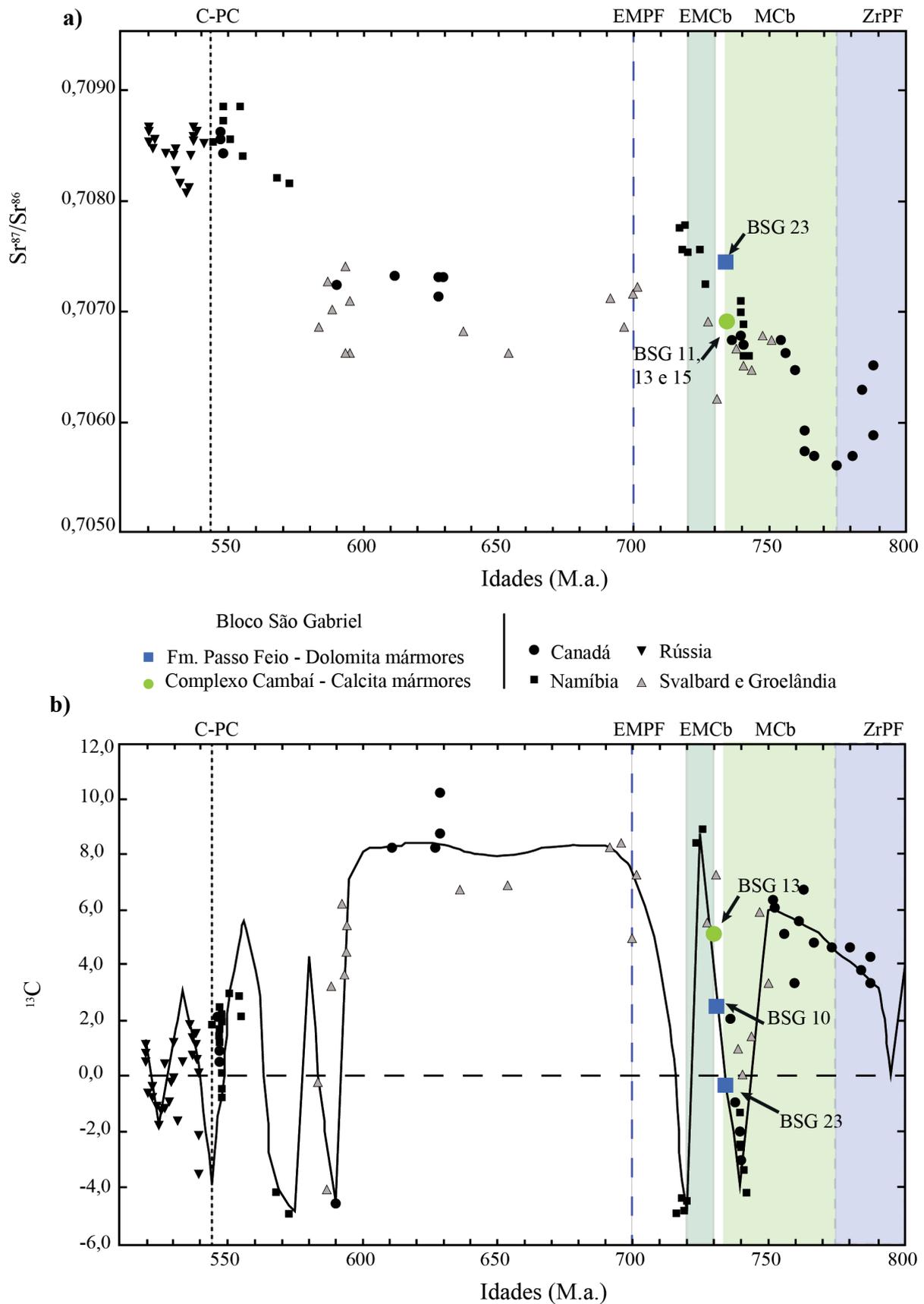


Fig. 9. a) Diagrama de variação temporal da razão Sr^{87}/Sr^{86} nos carbonatos neoproterozóicos de vários continentes. As linhas pontilhadas e os campos verticais representam idades estimadas e os limites chave dos

eventos tectônicos descritos no Bloco São Gabriel, conforme descrito no texto. As siglas no eixo superior do diagrama são: C-PC – Cambriano-Pré-Cambriano; EMPF – Evento de Metamorfismo da Formação Passo Feio; EMCb – Evento de Metamorfismo do Complexo Cambaí; MCb – Magmatismo do Complexo Cambaí e ZrPF – Idades dos zircões detriticos parcialmente apagados da Formação Passo Feio. Modificado a partir de Jacobsen & Kaufmann (1999). b) Diagrama de variação temporal do $\delta^{13}\text{C}$ dos carbonatos. Modificado de Jacobsen & Kaufmann (1999).

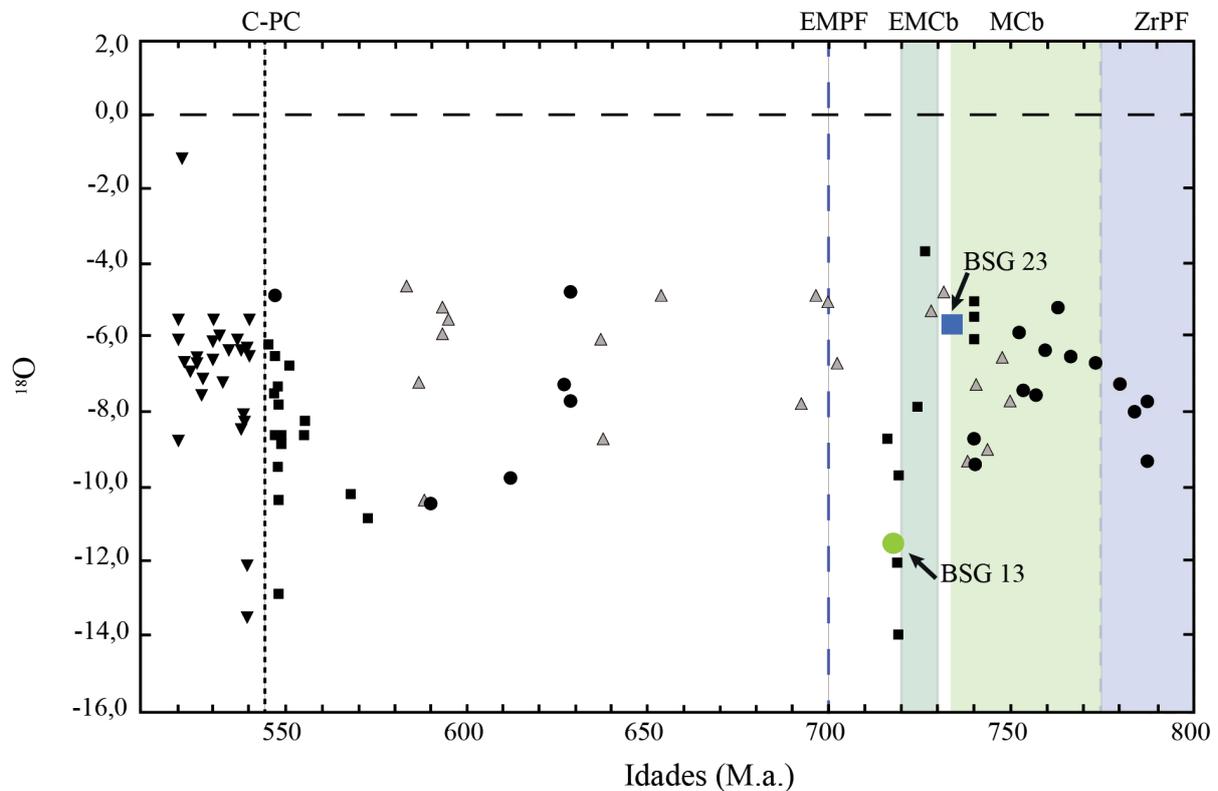


Fig. 10. Diagrama de variação temporal do $\delta^{18}\text{O}$, relativo ao padrão PDB, dos carbonatos. Modificado de Jacobsen & Kaufmann (1999).

5. Conclusões

Os mármore do Bloco São Gabriel, mesmo apresentando componentes silicatados e metamorfisados nas fácies xisto verde e anfibolito, contêm um amplo e rico registro dos eventos tectônicos ocorridos durante o Neoproterozóico do Ciclo Brasileiro. Ao longo das etapas analíticas desse estudo verificou-se que os mesmos são passíveis de investigação não somente por meio de geoquímica elemental, mas também por geoquímica de isótopos radiogênicos e estáveis.

Inicialmente foram corroboradas as classificações dos mármore, já definidos em trabalhos anteriores como dolomita mármore (Formação Passo Feio), calcita mármore (Complexo Cambaí) e associações de mármore cálcio-silicáticos com litotipos calcíticos enriquecidos em grafita (Complexo Coxilha do Batovi). Os mármore do Complexo Cambaí são os menos silicatados e não apresentam anomalias no comportamento dos ETRs. Já os

litotipos da Formação Passo Feio, apesar de apresentarem uma ampla dolomitização e de serem mais enriquecidos em minerais silicáticos, não mostraram enriquecimento em ETRs pesados ou demais indícios de contaminação por fluidos hidrotermais. Quanto aos mármore Complexo Coxilha do Batovi, os mesmos apresentaram assembleia mineral bastante peculiar, com enriquecimento em quartzo, teores mais elevados de Al_2O_3 e Fe_2O_3 , bem como séries contínuas de ETRs não verificadas nos demais litotipos, fatores os quais indicaram uma acentuada contribuição siliciclástica entre esses litotipos.

A partir dessas informações foram analisados os registros isotópicos das amostras do Complexo Cambaí e da Formação Passo Feio. Os resultados das análises da razão $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, do $\delta^{13}\text{C}$ e do $\delta^{18}\text{O}$ foram submetidos com sucesso ao modelo de interação fluido-rocha para identificação das assinaturas isotópicas primárias de Jacobsen & Kaufmann (1999). A aplicação dos critérios apresentados nesse modelo revelou que as assinaturas isotópicas primárias do Sr foram preservadas nos mármore do Complexo Cambaí. Já o $\delta^{13}\text{C}$ e do $\delta^{18}\text{O}$ não apresentaram a mesma consolidação das assinaturas primárias, mas foi possível identificar composições mais próximas, as quais se ajustaram bem às variações temporais desses parâmetros na água do mar. Os mármore da Formação Passo Feio mostraram uma dispersão de dados maior em relação aos do Complexo Cambaí, mas ainda assim foram identificadas entre essas amostras, assinaturas isotópicas primárias. O parâmetro cujas assinaturas se mostraram menos preservadas foi o $\delta^{18}\text{O}$, corroborando as constatações já apresentadas no estudo em que os autores propuseram o modelo de interação fluido-rocha.

A comparação entre as assinaturas isotópicas primárias dos mármore do Bloco São Gabriel obtidas nesse estudo com as apresentadas pelos autores do referido modelo mostrou que os mármore estudados são correlacionáveis com assinaturas de amostras neoproterozóicas de outros continentes e permitem a datação relativa dos eventos deposicionais. A partir dessa comparação, bem como da contextualização das assinaturas isotópicas de acordo com a cronologia dos eventos tectônicos descritos no Bloco São Gabriel foram estimados períodos de deposição dos calcários que deram origem aos mármore. O período de deposição dos calcários do Bloco São Gabriel situa-se entre 770 e 700 Ma, sendo atribuído o período de 770-730 Ma para deposição dos calcários da Formação Passo Feio, enquanto o do protólito do Complexo Cambaí, está posicionado entre 740 e 730 Ma.

A primeira aproximação da aplicação de isótopos estáveis como C e O aos mármore do Bloco São Gabriel demonstra que essa abordagem metodológica é adequada ao estudo da história pré-metamórfica dessas rochas. Considerando esse fato, a investigação das mesmas a

partir de um controle estratigráfico preciso apresenta-se como um refinamento necessário à investigação de sequências de mármores, permitindo o estudo mais detalhado da sua evolução geoquímica, aumentando a precisão das idades relativas dos eventos e contribuindo de forma mais aprimorada para a discussão dos modelos evolutivos.

Agradecimentos

Esse artigo faz parte da dissertação de mestrado da autora Rossana Goulart apoiado pelo CNPq através da bolsa de mestrado (processo: 132464/2009-8). Os autores agradecem ao CNPq pela ajuda financeira concedida por meio do Projeto de Pesquisa “Exploração Mineral e Evolução Crustal da Província Cuprífera do RS” (processo: 475634/2009-8). Os autores também agradecem ao Laboratório de Geoquímica do Instituto de Geociências e ao Laboratório de Sedimentologia do Centro de Estudos Costeiros e Oceânicos do Instituto de Geociências da UFRGS pelo apoio concedido para preparação de amostras, ao Laboratório de Geoquímica Isotópica do Instituto de Geociências da UFRGS, especialmente ao Professor Dr. Rommulo V. Conceição pelo apoio no desenvolvimento da metodologia de abertura das amostras para análise isotópica de Sr, a toda equipe do laboratório pela presteza durante todo o período em que foram realizados os procedimentos analíticos, e ao Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da UFPR pela presteza na realização das análises isotópicas de C e O.

Referências bibliográficas

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., de Brito Neves, B.B. & Fuck, R.A. 1981. Brazilian Structural Provinces: An Introduction. *Earth-Science Reviews*, 17: 1-29.
- Almeida, F.F.M., de Brito Neves, B.B. & Carneiro, C.D.R. 2000. The origin and evolution of the South American Plataform. *Earth-Science Reviews*, 50: 77-111.
- Bailey, T.R., McArthur, J.M., Prince, H. & Thirlwall, M.F. 2000. Dissolution methods for strontium isotope stratigraphy: whole rock analysis. *Chemical Geology*, 167 (3-4): 313-319.
- Babinski, M., Chemale Jr., F., Hartmann, L.A. van Schmus, W.R. & Silva, L.C. 1996. Juvenile accretion at 750-700 Ma in Southern Brazil. *Geology*, 24: 439-442.
- Bitencourt, M.F. & Hartmann, L.A. 1984 a. Reconhecimento geoquímico dos xistos magnesianos da região do Passo Feio, Caçapava do Sul, RS. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia* (Rio de Janeiro, Brasil) 6: 2607-2614.
- Bitencourt, M.F. & Hartmann, L.A. 1984 b. Geoquímica das rochas anfíbolíticas da região de Caçapava do Sul, RS. Parte I: Caracterização geológica e petrográfica, elementos maiores e menores. *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia* (Rio de Janeiro, Brasil) 9: 4253-4265.

- Bortolotto, O.J., 1987. Petrografia dos mármore de Caçapava do Sul, RS. *Ciência e Natura*, 9: 37–65.
- Bucher, K.; Frey, M. 1994. *Petrogenesis of Metomorphic Rocks*. Berlin-Germany, Springer-Verlag. 318p.
- Chemale Jr., F., Hartmann, L.A. & da Silva, L.C. 1995. Stratigraphy and tectonismo of the Brasiliano Cycle in Southern Brazil. In: McNiall M. Ed. *Proceedings Volume on Proterozoic Crust and Metallogenetic Evolution*, p. 151-166. Communications Geological Society of Namibia (10).
- Deer, W.A., Howie, R.A. & Zussman, J. 1965. *An introduction to the rock forming minerals*. London, Longman. 528 p.
- Fernandes, L.A.D., Tommasi, A. & Porcher, C.C. Deformation patterns in the Southern Brazilian branch of the Dom Feliciano Belt: A reapraisal. *Journal of South American Earth Sciences*, 5 (1): 77-96.
- Ferry, J.M. 1976. Metamorphism of calcareous sediments in the Waterville-Vassalobro area, South-Central Maine: mineral reactions and graphical analysis. *American Journal of Science*, 276: 841-882.
- Fletcher, I.R., Santos, J.O.S. & Vasconcellos, M.A.Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of Southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 829-844.
- Gazzoni, C.P. 2010. Padrão mineralógico de ocorrência dos depósitos de minério de cobre em escarnitos e mármore da região de Caçapava do Sul. Porto Alegre. 54 p. Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Halverson, G.P., Dudás, F., Maloof, A.C. & Bowring, S.A. 2007. Evolution of the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ composition of the Neoproterozoic seawater. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 256: 103-129.
- Hartmann, L.A., Leite, J.A.D., da Silva, L.C., Remus, M.V.D., McNaughton, N.J., Groves, D.I., Fletcher, I.R., Santos, J.O.S. & Vasconcellos, M.A.Z. 2000. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of Southern Brazil. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 829-844.
- Haskin, L.A., Haskin, M.A., Frey, F.A. & Wildman, T.R. 1968. *Origin and distribution of the elements*. Pergamon. 1: 889-911.
- Henderson, P. 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*. Oxford, Elsevier. 510p.
- Hoffman, P.F., Kaufman, J.A., Halverson, G.P. & Schrag, D.P. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. *Science* (281): 1342-1346.
- Jacobsen, S.B., Kaufman, A.J. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology*, 161: 37–57.
- Jost, H. & Hartmann, L.A. 1984. *O Pré-Cambriano do Brasil*. São Paulo, Edgard Blucher Ltda. 378 p.
- Kaufman, A.J., Hayes, J.M., Knoll, A.H. & Germs, G.J.B. 1991. Isotopic compositions of carbonates and organic carbon from upper Proterozoic successions in Namibia: stratigraphic variation and the effects of diagenesis and metamorphism. *Precambrian Research*, 49: 301–327.

Kaufman, A.J. & Knoll, A.H. 1995. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Research*, 73: 27–49.

Kaufman, A.J., Jacobsen, S.B. & Knoll, A.H. 1993. The Vendian record of Sr- and C-isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate. *Earth and Planetary Science Letters*, 120: 409–430.

Kaufman, A.J., Knoll, A.H., Semikhatov, M.A., Grotzinger, J.P., Jacobsen, S.B. & Adams, W. 1996. Integrated chronostratigraphy of Proterozoic–Cambrian boundary beds in the western Anabar region, northern Siberia. *Geology Magazine*, 133: 509–533.

Kaufman, A.J., Knoll, A.H. & Narbonne, G.M. 1997. Isotopes, ice ages and terminal Proterozoic Earth history. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94: 6600–6605.

Knoll, A.H. & Walter, M.R. 1992. Latest Proterozoic stratigraphy and Earth history. *Nature*, 356: 673–678.

Knoll, A.H., Hayes, J.M., Kaufman, A.J., Swett, K. & Lambert, I.B. 1986. Secular variations in carbon isotope ratios from Upper Proterozoic successions of Svalbard and East Greenland. *Nature*, 321: 832–838.

Knoll, A.H., Kaufman, A.J. & Semikhatov, M.A. 1995. The carbon-isotopic composition of proterozoic carbonates: Riphean successions from northwestern Siberia, Anabar Massif, Turukhansk Uplift. *American Journal of Science*, 295: 823–850.

Leite, J.A.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J. & Chemale Jr, F. 1998. SHRIMP U/Pb zircon geochronology of Neoproterozoic juvenile and crustal-reworked terranes in southernmost Brazil. *International Geology Reviews*, 40: 688-705.

Lisboa, N.A. 1977. *Estudo geológico da região de Pedra Branca, Bagé, Rio Grande do Sul, com enfoque especial nas ocorrências de mármore*. Porto Alegre. 53 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

McArthur, J.M. 1994. *Recent trends in strontium isotope and sequence stratigraphy*. Terra Review: 331-358.

Melezhik, V.A., Roberts, D., Fallick, A.E., Gorokhov, I.M. & Kusnetzov, A.B. 2005. Geochemical preservation potential of high-grade calcite marble versus dolomite marble: implication for isotope chemostratigraphy. *Chemical Geology*, 216: 203-224.

Melezhik, V.A., Huhma, H., Fallick, A.E. & Whitehouse, M.J. 2007. Temporal constraints on the Paleoproterozoic Lomagundi-Jatuli carbon isotope event. *Geology*, 35: 655-658.

Oliveira, A.S., Pulz, G.M., Bongiolo, E.M. & Calarge, M. 2003. Isótopos de Carbono em filitos carbonosos da Sequência Metavulcano-sedimentar Marmeleiro, Sul de Ibaré, Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, 30(1): 41-52.

Remus, M.V.D. 1991. *Geologia e geoquímica do Complexo Cambaizinho, São Gabriel-RS*. Porto Alegre. 181 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Remus, M.V.D., Hartmann, L.A., McNaughton, N.J., Groves, D.I. & Fletcher, I.R. 2000. The link between hydrothermal epigenetic copper mineralization and the Caçapava

Granite of the Brasiliano Cycle in Southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 13: 191-216.

Saalmann, K.; Hartmann, L.A.; Remus, M.V.D.; Koester, E. & Conceição, R.V. 2005. Sm-Nd isotope geochemistry of metamorphic volcano-sedimentary successions in the São Gabriel Block, southernmost Brazil: evidence for the existence of juvenile Neoproterozoic oceanic crust to the east of the Rio de La Plata craton. *Precambrian Research*, 136: 159-175.

Saalmann, K., Remus, M.V.D. & Hartmann, L.A. 2006. Tectonic evolution of the Neoproterozoic São Gabriel Block, Southern Brazil: Constraints on Brasiliano orogenic evolution of the Rio de la Plata cratonic margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 21: 59-88.

Saalmann, K., Gerdes, A., Lahaye, Y., Hartmann, L.A., Remus, M.V.D. & Laüfer, A. 2010. Multiple accretion at the eastern margin of the Rio de la Plata craton: the prolonged Brasiliano orogeny in southernmost Brazil. *International Journal of Earth Sciences*.

Safronov, V.T. & Rosen, O.M. 2004. Metacarbonate rocks (calciphyres) of the Lapland-Kolvitsa Granulite Belt, Baltic Shield. *Lithology and Mineral Resources*, 39: 425-436.

Schmitt, R.S. 1995. *Evolução Tectono-metamórfica do Complexo Metavulcano-sedimentar Coxilha do Batovi, São Gabriel (RS)*. Porto Alegre. 159 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Silva, J.C., Sial, A.N., Ferreira, V.P. & Pimentel, M.M. 2005. C- and Sr-isotope stratigraphy of the São Caetano complex, Northeastern Brazil: a contribution to the study of the Meso-Neoproterozoic seawater geochemistry. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 77 (1): 137-155.

Soliani Jr. E. 1986. *Os dados geocronológicos do Escudo-sul-rio-grandense e suas implicações de ordem geotectônica*. São Paulo. 425 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.

Torres, P.F.M., Parente, C.V., Sial, A.N., Dantas, E.L., Fuck, R.A., Veríssimo, C.U.V. & Arthaud, M.H. 2006. Aspectos Geoquímicos, petrográficos e geoquímicos dos mármore dolomíticos com nódulos de quartzo da sequência metavulcano-sedimentar de Aracape-CE. *Revista Brasileira de Geociências*, 36 (4): 748-760.

Veizer, J. & Compston, W. 1976. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Precambrian carbonates as an index of crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40: 905–914.

Veizer, J. 1983. Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates. *Carbonates: Mineralogy and Chemistry, Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America*, 11: 265–299.

Veizer, J., Compston, W., Clauer, N. & Schidlowski, M. 1983. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in Late Proterozoic carbonates: Evidence for a “mantle event” at 900 Ma ago. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47: 295–302.

Veizer, J., D. Buhl, A. Diener, S. Ebner, O.G. Podlaha, P. Bruckschen, T. Jasper, Ch. Korte, M. Schaaf, D. Ala & K. Azmy. 1997. Strontium isotope stratigraphy: potential resolution and event correlation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 132: 65-77.

Veizer, J., Ala, D., Azmy, K., Bruckschen, P., Buhl, D., Bruhn, F., Carden, G.A.F., Diener, A., Ebner, S., Godderis, Y., Jasper, T., Korte, C., Pawellek, F., Podlaha, O. & Strauss, H. 1999. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161: 37-57.

**ANEXO 1 – CARTA DE RECEBIMENTO DO ARTIGO PELO
PERIÓDICO**

Porto Alegre, 22 de fevereiro de 2012.

À Rossana Vicente Goulart

Venho comunicar o recebimento do manuscrito abaixo listado, submetido para publicação em *Pesquisas em Geociências*, órgão de divulgação científica editado pelo Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Agradeço a seleção de *Pesquisas em Geociências* para a publicação de sua contribuição. O manuscrito será analisado quanto ao conteúdo e enquadramento nas normas de preparação, para que seja iniciado o processo de análise por pares.

Título: *Composição isotópica do Sr, C e O e geoquímica de ETR das rochas carbonáticas do Bloco São Gabriel, RS.*

Autor(es): Rossana Vicente Goulart, Marcus Vinícius Dorneles Remus, Rafael Santos dos Reis.

Atenciosamente,



Prof. Dr. Cesar L. Schultz
Editor Adjunto

Pesquisas em Geociências

Instituto de Geociências – Departamento de Paleontologia e Estratigrafia
Av. Bento Gonçalves, nº 9500
CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.
Tel.: +55.51.3308.6285 - Email: cesar.schultz@ufrgs.br