

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**GEOCRONOLOGIA E GEOTERMOMETRIA DAS UNIDADES
INTERMEDIÁRIAS DA NAPPE DE PASSOS (MG) E SUAS
IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS**

George William Clemence Junior

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Rio Claro/SP - 2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro (SP)

GEORGE WILLIAM CLEMENCE JUNIOR

**GEOCRONOLOGIA E GEOTERMOMETRIA DAS UNIDADES
INTERMEDIÁRIAS DA NAPPE DE PASSOS (MG) E SUAS
IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
da Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Câmpus de Rio Claro,
como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Mestre em Geociências e Meio
Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. George Luiz Luvizotto

Rio Claro – SP

2023

C625g Clemence Junior, George William
Geocronologia e geotermometria das unidades intermediárias da
Nappe de Passos (MG) e suas implicações tectônicas / George
William Clemence Junior. -- Rio Claro, 2023
92 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: George Luiz Luvizotto

1. Petrocronologia. 2. Orógeno Brasília Meridional. 3. Datação em
monazita. 4. Datação em rutilo. 5. Termometria Zr em rutilo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto Potencial dessa Pesquisa

Estudos geológicos relacionados ao conhecimento sobre evolução dos continentes são de grande importância para diversas áreas do desenvolvimento, seja ela científica, econômica ou social. Ao investigar as condições de temperatura e a idade da formação das rochas na região de São Sebastião do Paraíso (MG), o trabalho contribui principalmente para avanço do conhecimento científico sobre o contexto da colisão entre dois blocos continentais. Em ambientes colisionais podem ocorrer diversos tipos de depósitos minerais, como, por exemplo, ouro, chumbo e zinco. Dessa maneira, essas informações têm a capacidade de auxiliar setores industriais, como a mineração, no entendimento de jazidas relacionadas ao ambiente da área pesquisada, podendo gerar empregos e desenvolvimento da sociedade.

Assim, essa pesquisa pode auxiliar não apenas o conhecimento científico local, mas também beneficiar setores econômicos e sociais da região.

Potential Impact of this Research

Geological studies related to the understanding of continental evolution are of great importance for various areas of development, be it scientific, economic, or social. By investigating the temperature conditions and age of rock formation in the São Sebastião do Paraíso (MG) region, this work contributes primarily to the advancement of scientific knowledge regarding the context of collision between two continental blocks. In collisional environments, various types of mineral deposits can occur, such as gold, lead, and zinc. Therefore, this information has the potential to assist industrial sectors, such as mining, in understanding deposits related to the research area, potentially generating employment and societal development.

Thus, this research can not only contribute to local scientific knowledge but also benefit economic and social sectors in the region.

GEORGE WILLIAM CLEMENCE JUNIOR

**GEOCRONOLOGIA E GEOTERMOMETRIA DAS UNIDADES
INTERMEDIÁRIAS DA *NAPPE* DE PASSOS (MG) E SUAS
IMPLICAÇÕES TECTÔNICAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas do
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”,
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Geociências e Meio
Ambiente

Comissão Examinadora

Prof. Dr. George Luiz Luvizotto (orientador)
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Profa. Dra. Regiane Andrade Fumes
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)

Prof. Dr. Otávio Augusto Ruiz Paccóla Vieira
UFU/Monte Carmelo (MG)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 07 de junho de 2023

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Rio Claro, pelo apoio institucional e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente (PPGGMA).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado e ao PROAP pelo financiamento das atividades do PPGGMA.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pela minha formação em Geologia, e aos docentes que tive durante a graduação, por todo o ensinamento.

Ao meu orientador, Prof. Dr. George Luiz Luvizotto, pelo acolhimento, ensinamentos, paciência e acreditar no meu potencial e em minhas ideias.

Ao Prof. Dr. Luiz Sérgio Amarantes Simões pelas contribuições na qualificação, e na interpretação dos dados geocronológicos, termométricos e petrográficos. Ao Prof. Dr. Cláudio de Morisson Valeriano pela contribuição e comentários na qualificação e pelas dicas sobre geocronologia. A Profa. Dra. Regiane Andrade Fumes pelas contribuições na defesa e dicas sobre como publicar os dados. Ao Prof. Dr. Otávio Augusto Ruiz Paccóla Vieira pelas contribuições na defesa. Ao Prof. Dr. Renato de Moraes por auxiliar na interpretação dos dados geocronológicos e petrográficos.

Ao corpo técnico do PPGGMA, em especial a Rosângela e Lauren, e do Departamento de Geologia, em especial ao Dr. Daniel Godoy.

A minha companheira de todos os momentos e a que me inspira em ser uma pessoa melhor, Nayara Santos, que, desde 2016, está ao meu lado em todos os momentos, sejam felizes ou tristes, e que não me deixa desistir dos meus sonhos e me dá forças para lutar.

Aos meus pais, Maria de Lourdes Santos e George William Clemence, que sempre fizeram de tudo para que eu obtivesse êxito nas minhas caminhadas, sempre me apoiando e aconselhando sobre a vida. A minha irmã, Gabriela Clemence, pelo apoio durante a minha jornada. Aos companheiros dos meus pais, Edécio e Adriana, e minha família, por sempre acreditarem em mim.

As minhas filhas-pet Pandora, Athena e Gaia, por nos alegrarem e deixarem o dia mais leve, além da companhia durante a escrita. A Mocinha (*in memoriam*) e Margarida (*in memoriam*) que, apesar de não estarem mais conosco, estiveram ao meu lado durante meu crescimento como pessoa.

Aos colegas que fiz durante toda a minha caminhada, desde o fundamental até a pós-graduação, sejam eles virtuais ou não, e que, certamente, me auxiliaram a chegar até a conclusão dessa dissertação.

RESUMO

O Orógeno Brasília, formado durante a colisão continental que consolidou o supercontinente Gondwana no Neoproterozoico, exhibe atualmente as raízes de um antigo orógeno de grandes proporções, comparáveis aos Himalaias. Na sua porção meridional, onde está localizada a *Nappe* de Passos, há um sistema de nappes que possui vergência para leste. Historicamente, as rochas dessa *nappe* foram interpretadas como pertencentes ao Grupo Araxá, representando uma sequência plataformar depositada na margem oeste do Cráton São Francisco. A *Nappe* de Passos é composta por metassedimentos de baixo a alto grau metamórfico com intercalação de rochas máficas e quartzito. Essas rochas são divididas em nove unidades litoestratigráficas, da base ao topo, em Unidade A à Unidade I. O pico metamórfico para essas rochas ocorreu entre 640 e 630 Ma, evidenciado pela cristalização de monazita em leucossoma. O retrometamorfismo ocorreu em torno de 600 Ma, com uma segunda fase de crescimento de monazita, que foi seguido por resfriamento final entre 570 e 580 Ma, representado por datação em mica branca e rutilo. A sequência da *Nappe* de Passos é interpretada como contínua, mas ocorrências de eclogito associados granulito de alta pressão podem indicar descontinuidades. Com o objetivo de estudar a possibilidade de descontinuidades ao longo da *Nappe* de Passos, foram utilizados métodos geocronológicos e termométricos em rochas posicionadas tectonoestratigraficamente acima e abaixo das ocorrências de retroeclogito, localizadas na interface entre as Unidades E, F e G. As idades médias U-Th-Pb_T das unidades intermediárias da *Nappe* de Passos indicam o crescimento de monazita entre 640 e 604 Ma para a Unidade E, 628 a 621 Ma para a Unidade F, e 658 a 608 Ma para a Unidade G. As idades U-Pb em rutilo variam de acordo com a textura: cristais da matriz possuem idade de 602 Ma, relacionados à exumação e resfriamento, enquanto os inclusos em granada possuem idade de 627 Ma, relacionados à cristalização do rutilo. O geotermômetro Zr-em-rutilo indica temperaturas entre 638 e 667°C para a Unidade E, 665°C para a Unidade F e 673 a 709°C para a Unidade G. O aumento gradual da temperatura, da base para o topo das unidades, evidencia a inversão do gradiente metamórfico. Devido à ampla variação das idades em monazita, tanto na matriz (682 a 567 Ma) quanto nos inclusos (670 a 557 Ma), foram criados gráficos de Estimativa de Densidade por Kernel (KDE), que indicam picos em 625 Ma e 605 Ma. Essas idades são semelhantes às obtidas para o pico metamórfico e o retrometamorfismo, respectivamente. Com base nas idades de monazita e rutilo, foi possível subdividir os dados geocronológicos em três estágios metamórficos: inicial (acima de 640 Ma), pico metamórfico (entre 640 e 625 Ma) e exumação/transporte (idades abaixo de 625 Ma). A

associação dos dados geocronológicos e de temperatura indica que descontinuidades metamórficas são improváveis na *Nappe* de Passos, pois não há saltos significativos de idade ou temperatura ao longo da sequência estudada.

Palavras-chave: Petrocronologia; Orógeno Brasília Meridional; Datação em monazita; Datação em rutilo; Termometria Zr em rutilo.

ABSTRACT

The Brasília Orogen, formed during the continental collision that consolidated the Gondwana supercontinent in the Neoproterozoic, currently exhibits the roots of an ancient orogen of large proportions, comparable to the Himalayas. In its southern portion, where the Passos Nappe is located, there is a system of nappes that verges to the east. Historically, the rocks of this nappe have been interpreted as belonging to the Araxá Group, representing a platform sequence deposited on the western margin of the São Francisco Craton. The Passos Nappe is composed of low- to high-grade metamorphic metasediments with intercalations of mafic rocks and quartzite. These rocks are divided into nine lithostratigraphic units, from bottom to top, Unit A to Unit I. The metamorphic peak for these rocks occurred between 640 and 630 Ma, evidenced by the crystallization of monazite in leucosome. Retrometamorphism occurred around 600 Ma, with a second phase of monazite growth, followed by final cooling stage between 570 and 580 Ma, as indicated by white mica and rutile dating. The sequence of the Passos Nappe is interpreted as continuous, but occurrences of eclogite associated with high-pressure granulite may indicate discontinuities. To study the possibility of discontinuities along the Passos Nappe, geochronological and thermometric methods were used on rocks positioned tectono-stratigraphically above and below the occurrences of retroeclogite, located at the interface between Units E, F, and G. The average U-Th-Pb_T ages of the intermediate units of the Passos Nappe indicate monazite growth between 640 and 604 Ma for Unit E, 628 to 621 Ma for Unit F, and 658 to 608 Ma for Unit G. U-Pb ages in rutile vary according to texture: matrix grains have an age of 602 Ma, related to exhumation and cooling, while inclusions in garnet have an age of 627 Ma, related to rutile crystallization. The Zr-in-rutile geothermometer indicates temperatures between 638 and 667°C for Unit E, 665°C for Unit F, and 673 to 709°C for Unit G. The gradual increase in temperature from the base to the top of the units highlights the inversion of the metamorphic gradient. Due to the wide variation in monazite ages, both in the matrix (682 to 567 Ma) and in the inclusions (670 to 557 Ma), Kernel Density Estimation (KDE) graphs were created, indicating peaks at 625 Ma and 605 Ma. These ages are like those obtained for the metamorphic peak and retrometamorphism, respectively. Based on the ages of monazite and rutile, the geochronological data were subdivided into three metamorphic stages: initial (above 640 Ma), metamorphic peak (between 640 and 625 Ma), and exhumation/transport (ages below 625 Ma). The association of geochronological and temperature data indicates that metamorphic discontinuities are unlikely in the Passos Nappe, as there are no significant jumps in age or temperature along the studied sequence.

Keywords: Petrochronology; Southern Brasília Orogen; Monazite dating; Rutile dating; Zr-in-rutile thermometry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA REGIÃO DE PESQUISA COM AS PRINCIPAIS VIAS DE ACESSO E ZONAS URBANAS. RETÂNGULO VERMELHO INDICA A ÁREA DE ESTUDO.	3
FIGURA 2: MAPA TECTÔNICO DO ORÓGENO BRASÍLIA SUL E MARGEM SUDOESTE DO CRÁTON SÃO FRANCISCO..	9
FIGURA 3: COLUNA LITOESTRATIGRÁFICA DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS, DE ACORDO COM SIMÕES (1995). MODIFICADO DE VALERIANO <i>ET AL.</i> (2004).	11
FIGURA 4: MAPA GEOLÓGICO E SEÇÃO GEOLÓGICA DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS EM (A), DE ACORDO COM HARTUNG (2018). ÁREA DE ESTUDO EM (B). MODIFICADO DE LUVIZOTTO (2003).	12
FIGURA 5: MAPA GEOLÓGICO DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS NA REGIÃO DE SÃO SEBASTIÃO DO PARAÍSO (MG), COM A LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS. MODIFICADO DE LUVIZOTTO (2003).	15
FIGURA 6: FOTOMICROGRAFIAS DAS AMOSTRAS DA UNIDADE E, GL09 (A), MG175 (B, G E H), RR2A1 (C E D) E MG173 (E E F).....	17
FIGURA 7: FOTOMICROGRAFIA DA AMOSTRA RR2A1 (A-B), FOTOMICROGRAFIA DA AMOSTRA MG173 (C) E REPRESENTAÇÃO COMPARATIVA ENTRE S_i E S_e (D).	18
FIGURA 8: FOTOMICROGRAFIA DAS AMOSTRAS RR4B (A-B, E-F) E MG182 (C-D).....	19
FIGURA 9: FOTOMICROGRAFIA DA AMOSTRA RR4B, MOSTRANDO POSSÍVEL PRODUTO ANATÉTICO MARCADO POR CRISTAIS DE GRANULAÇÃO MUITO GROSSA DE QUARTZO E FELDSPATOS.	20
FIGURA 10: FOTOMICROGRAFIA DAS AMOSTRAS RR4A (A, C, D) E MG176 (B, E, F).	21
FIGURA 11: FOTOMICROGRAFIAS DA AMOSTRA SF3-41. EM (A-B) CRISTAL DE CIANITA COM EXTINÇÃO ONDULANTE, ENQUANTO A CIANITA PRESENTE EM (C-D) NÃO APRESENTA ESSA PROPRIEDADE ÓPTICA.	22
FIGURA 12: FOTOMICROGRAFIA DE PORFIROBLASTO SIN-TECTÔNICO DE GRANADA DA AMOSTRA MG176. OS CRISTAIS DE QUARTZO DEFINEM S_i , O QUAL APRESENTA FORMATO SIGMOIDAL. EM (A) OS POLARIZADORES ESTÃO PARALELOS E EM (B) ESTÃO CRUZADOS.....	23
FIGURA 13: FOTOMICROGRAFIA DE PORFIROBLASTO SIN-TECTÔNICO DE GRANADA DA AMOSTRA MG176. CRISTAIS DE ILMENITA E MAGNETITA DEFINEM A S_i , QUE APRESENTA PADRÃO SIGMOIDAL.....	23
FIGURA 14: MAPAS COMPOSICIONAIS DE Y, U E TH EM MONAZITAS DA AMOSTRA GL09.	25
FIGURA 15: MÉDIA PONDERADA DAS IDADES U-TH-PB _T EM MONAZITAS, NA MATRIZ OU INCLUSAS EM GRANADA, DA AMOSTRA GL09. LINHAS NA HORIZONTAL INDICAM OS VALORES MÉDIOS. OS ERROS ESTÃO EM 2σ	26
FIGURA 16: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y_2O_3 X IDADE PARA AS MONAZITAS DA AMOSTRA GL09.	26
FIGURA 17: MAPAS COMPOSICIONAIS DE TH, U E Y EM MONAZITAS DA AMOSTRA MG173. EM (A), (B) E (C) MAPAS DAS MONAZITAS MNZ1, MAIOR, E MNZ2, MENOR.	27
FIGURA 18: MAPAS COMPOSICIONAIS DE TH, U E Y EM MONAZITAS DA AMOSTRA MG173. EM (A), (B) E (C) MAPAS DAS MONAZITAS MNZ8.1.	27
FIGURA 19: MÉDIA PONDERADA DAS IDADES U-TH-PB _T EM MONAZITAS, NA MATRIZ OU INCLUSAS EM GRANADA, DA AMOSTRA MG173.	28
FIGURA 20: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y_2O_3 X IDADE PARA AS MONAZITAS DA AMOSTRA MG173.....	28

FIGURA 21: DIAGRAMA DE DISPERSÃO DAS MONAZITAS INCLUSAS EM GRANADAS DA AMOSTRA MG173, UNIDADE E	29
FIGURA 22: MAPAS COMPOSICIONAIS DE TH, U E Y EM MONAZITAS DA AMOSTRA RR2A1.....	30
FIGURA 23: MÉDIA PONDERADA DAS IDADES U-TH-PB _T EM MONAZITAS DA AMOSTRA RR2A1 (A) E IDADE DETERMINADA PELO MÉTODO DA ISÓCRONA QUÍMICA THO ₂ *-PBO (CHIME) (B). LINHAS NA HORIZONTAL INDICAM OS VALORES MÉDIOS. OS ERROS ESTÃO EM 2Σ.....	30
FIGURA 24: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y ₂ O ₃ X IDADE PARA AS MONAZITAS DA AMOSTRA RR2A1.....	31
FIGURA 25: EXEMPLOS DE MAPAS COMPOSICIONAIS DE TH, U E Y EM MONAZITAS DA AMOSTRA MG175.....	32
FIGURA 26: MÉDIA PONDERADA DAS IDADES U-TH-PB _T EM MONAZITAS DA AMOSTRA MG175.....	32
FIGURA 27: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y ₂ O ₃ X IDADE PARA AS MONAZITAS DA AMOSTRA MG175.....	33
FIGURA 28: MAPAS COMPOSICIONAIS DE TH, U E Y EM MONAZITAS DA AMOSTRA RR4B.....	34
FIGURA 29: MÉDIA PONDERADA DAS IDADES U-TH-PB _T EM MONAZITAS, NA MATRIZ E INCLUSAS EM GRANADA, DA AMOSTRA RR4B.....	34
FIGURA 30: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y ₂ O ₃ X IDADE PARA AS MONAZITAS DA AMOSTRA RR4B.....	35
FIGURA 31: MAPAS COMPOSICIONAIS DE TH, U E Y EM MONAZITAS DA AMOSTRA RR4B.....	36
FIGURA 32: MÉDIA PONDERADA DAS IDADES U-TH-PB _T EM MONAZITAS, NA MATRIZ E INCLUSAS EM GRANADA, DA AMOSTRA RR4A.....	36
FIGURA 33: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y ₂ O ₃ X IDADE PARA AS MONAZITAS DA AMOSTRA RR4A.....	36
FIGURA 34: MAPAS COMPOSICIONAIS DE TH, U E Y EM MONAZITAS DA AMOSTRA MG176.....	38
FIGURA 35: MÉDIA PONDERADA DAS IDADES U-TH-PB _T EM MONAZITAS, NA MATRIZ OU INCLUSOS EM GRANADA, DA AMOSTRA MG176.....	38
FIGURA 36: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y ₂ O ₃ X IDADE PARA AS MONAZITAS DA AMOSTRA MG176.....	39
FIGURA 37: MAPAS COMPOSICIONAIS DE TH, U E Y EM MONAZITAS DA AMOSTRA SF3-41.....	40
FIGURA 38: MÉDIA PONDERADA DAS IDADES U-TH-PB _T EM MONAZITAS, NA MATRIZ OU INCLUSAS EM GRANADA OU CIANITA, DA AMOSTRA SF3-41.....	40
FIGURA 39: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y ₂ O ₃ X IDADE PARA AS MONAZITAS DA AMOSTRA SF3-41.....	41
FIGURA 40: IMAGENS BSE DAS MONAZITAS INCLUSAS EM CIANITAS DA AMOSTRA SF3-41. APESAR DE POSSUÍREM TEOR DE Y ₂ O ₃ SEMELHANTE, APRESENTAM IDADES DISTINTAS.....	41
FIGURA 41: IMAGEM BSE DOS CRISTAIS DE RUTILO ANALISADOS. CÍRCULO PRETO INDICA A LOCALIZAÇÃO DA ANÁLISE ISOTÓPICA.....	42
FIGURA 42: IDADES U-PB DE RUTILO NA MATRIZ (A) E INCLUSOS EM GRANADA (B) DA AMOSTRA RR2A1.....	43
FIGURA 43: IMAGENS DE BSE DOS CRISTAIS DE RUTILO ANALISADOS, MARCAÇÕES EM VERMELHO INDICAM O LOCAL ANALISADO.....	45
FIGURA 44: DIAGRAMA DE CAIXA (BOXPLOT) DAS CONCENTRAÇÕES DE ZR EM RUTILO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	46
FIGURA 45: DIAGRAMA DE CAIXA (BOXPLOT) DAS TEMPERATURAS RESULTANTES DO CÁLCULO DE ZR EM RUTILO DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	46

FIGURA 46: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y_2O_3 (% PESO) X IDADE (U-TH-PB _T) PARA AS MONAZITAS NA MATRIZ DAS ROCHAS ANALISADAS DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS (N = 292).....	48
FIGURA 47: DIAGRAMA DE DISPERSÃO Y_2O_3 (% PESO) X IDADE (U-TH-PB _T) PARA AS MONAZITAS INCLUSAS EM GRANADA OU CIANITA DAS ROCHAS ANALISADAS DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS (N = 151).....	49
FIGURA 48: DIAGRAMA DE DISPERSÃO COM ERROS DOS GRUPOS UTILIZANDO A RELAÇÃO Y_2O_3 (%PESO) X IDADE (U-TH-PB _T) DOS CRISTAIS DE MONAZITA DA MATRIZ DAS ROCHAS ANALISADAS DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS. .	50
FIGURA 49: DIAGRAMA DE DISPERSÃO COM ERROS DOS GRUPOS UTILIZANDO A RELAÇÃO Y_2O_3 (%PESO) X IDADE (U-TH-PB _T) DOS CRISTAIS DE MONAZITAS INCLUSAS EM GRANADA E CIANITA DAS ROCHAS ANALISADAS DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS.....	50
FIGURA 50: GRÁFICO DE ESTIMATIVA DE DENSIDADE POR KERNEL (KDE) DOS DADOS GEOCRONOLÓGICOS OBTIDOS PARA AS MONAZITAS DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS. N – NÚMERO DE ANÁLISES.	51
FIGURA 51: MAPA DE FASES MINERAIS DE PARTE DA LÂMINA PETROGRÁFICA DA AMOSTRA RR2A1.	53
FIGURA 52: CRISTAL DE APATITA APRESENTANDO INCLUSÕES DE ZIRCÃO, MONAZITA, ALLANITA E GALENA (A). EM (B) DESTAQUE PARA AS INCLUSÕES E FORMAS DE OCORRÊNCIA.....	53
FIGURA 53: RELAÇÃO ENTRE COMPRIMENTO DE DIFUSÃO EFETIVO (A), TAXA MÉDIA DE RESFRIAMENTO (DT/DT) E TEMPERATURA DO PICO METAMÓRFICO PARA O PB EM RUTILO BASEADO EM MODELAGEM DE DIFUSÃO USANDO O COEFICIENTE DE DIFUSÃO NATURAL PARA RUTILO.....	55
FIGURA 54: VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DE ACORDO COM A DISTÂNCIA AO EMPURRÃO..	59
FIGURA 55: MODELAGEM METAMÓRFICA PARA ROCHAS METAPELÍTICAS DA <i>NAPPE</i> DE PASSOS.	62

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
SUMÁRIO	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. APRESENTAÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	2
1.3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	2
2. MATERIAIS E MÉTODOS	3
2.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO	4
2.2. PETROGRAFIA	4
2.3. ANÁLISE EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	5
2.4. ANÁLISES QUÍMICAS, DATAÇÃO E GEOTERMOMETRIA EM MICROSSONDA ELETRÔNICA	5
2.5. DATAÇÃO EM LA-ICP-MS	7
2.6. INTEGRAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS	7
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	8
3.1. NAPPE DE PASSOS	10
3.2. IDADE DO METAMORFISMO DAS ROCHAS DA NAPPE DE PASSOS	13
4. RESULTADOS	15
4.1. GEOLOGIA LOCAL	15
4.2. GEOCRONOLOGIA U-Th-Pb _T EM MONAZITA	24
4.3. GEOCRONOLOGIA U-Pb EM RUTILO	42
4.4. ELEMENTOS TRAÇO EM RUTILO	43
5. DISCUSSÕES	47
5.1. GEOCRONOLOGIA: MONAZITA E RUTILO	47
5.2. IMPLICAÇÕES DO GEOTERMÔMETRO Zr EM RUTILO	58
5.3. INTEGRAÇÃO DOS DADOS E INTERPRETAÇÕES (<i>P</i>)- <i>T-t</i>	60
6. CONCLUSÕES	64
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXO A – DADOS DE QUÍMICA MINERAL E GEOCRONOLOGIA U-Th-Pb _T EM MONAZITA	71
ANEXO B – QUÍMICA MINERAL DE ELEMENTOS TRAÇO E GEOTERMOMETRIA EM RUTILO	88

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

Formado em contexto de colisão continental, durante a consolidação do supercontinente Gondwana no Neoproterozoico (BRITO NEVES *et al.*, 1999; CAMPOS NETO, 2000), o Orógeno Brasília exhibe atualmente as raízes de um antigo orógeno de proporções himalaianas. O presente trabalho foca seus estudos nas rochas da *Nappe* de Passos, uma estrutura tectônica presente no sudoeste de Minas Gerais, na região de Passos/São Sebastião do Paraíso. As rochas dessa *nappe* são historicamente interpretadas como pertencentes ao Grupo Araxá (ZANARDO, 1992; SIMÕES, 1995), as quais representam uma sequência plataformal depositada na margem oeste do Cráton São Francisco. A área estudada registra em suas rochas um gradiente metamórfico inverso onde, no topo da sequência, ocorrem as rochas de mais alto grau (LUVIZOTTO, 2003) e entre estas rochas ocorrem granulito de HP (LUVIZOTTO *et al.*, 2011, 2014; FUMES *et al.*, 2022) e eclogito retrogradado (LUVIZOTTO *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2021).

Na região de São Sebastião do Paraíso, rochas metassedimentares de médio a alto grau metamórfico, entre as fácies xisto verde e granulito, estão dispostas lateralmente ao longo de um caminamento de leste para oeste de poucos quilômetros. A associação de granulitos de alta pressão e eclogitos é um forte indício de zona de subducção profunda de litosferas oceânicas e continentais (BLACK *et al.*, 1994; CABY, 2003; ATTOH & MORGAN, 2004; AGBOSSOUMONDÉ *et al.*, 2004). A ocorrência destas rochas pode sinalizar para a delimitação mais precisa de uma zona de sutura que envolve fechamento de oceanos e formação de grandes cadeias de montanhas dentro do Orógeno Brasília. A sequência que representa as rochas da *Nappe* de Passos é interpretada na literatura como contínua, isto é, não existem descontinuidades importantes paralelas aos contatos das unidades (SIMÕES, 1995; LUVIZOTTO, 2003). Todavia, com os modelos de inversão metamórfica propostos para a área (*e.g.*, SIMÕES, 1995), que se apoiam na inversão das isothermas e cisalhamento não coaxial paralelo aos estratos principais, a inversão do gradiente bórico não é explicada. Simões *et al.* (2022) propõem que a origem da *Nappe* de Passos é similar ao do Orógeno Himalaiano, onde provavelmente ocorreu inversão da isoterma devido a subducção, processos de *channel flow* associado ao aquecimento por cisalhamento e transporte de rochas de mais alta pressão sob

rochas de menor pressão por cisalhamento dúctil reverso. Simões (1995) propõe a divisão da *Nappe* de Passos em nove unidades litoestratigráficas, sendo elas nomeadas, da base para o topo, de Unidade A a Unidade I. Luvizotto (2003) indica que as ocorrências de eclogito estão dispostas ao longo do contato entre as Unidades E e F, de acordo com a proposta de Simões (1995). A ocorrência destas rochas ao longo do contato pode marcar uma importante descontinuidade na sequência, contrastando com as interpretações anteriores e levantando a possibilidade da *Nappe* de Passos ser composta por mais de uma unidade tectônica alóctone. Portanto, estudos petrocronológicos desta área podem fornecer importantes informações sobre condições geodinâmicas durante a formação do Gondwana e sobre possíveis descontinuidades ao longo da *Nappe* de Passos.

1.2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

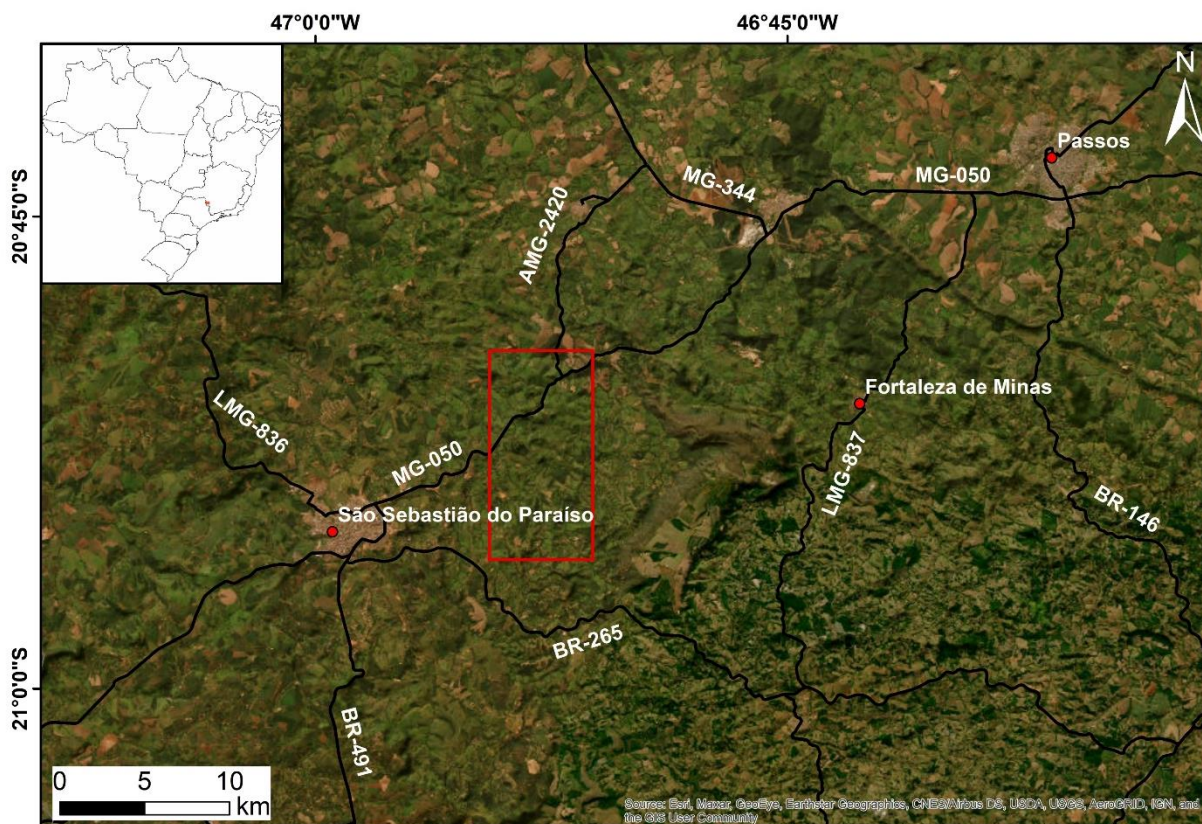
O objetivo da presente dissertação é investigar, com métodos geocronológicos (datação *in situ* de monazita e rutilo) e termométricos (Zr-em-rutilo), a idade e as condições do metamorfismo de rochas posicionadas tectonoestratigraficamente acima e abaixo das ocorrências de retroeclogito reportadas na região de São Sebastião do Paraíso – MG.

Para isso, a partir da integração e interpretação dos resultados obtidos nesta pesquisa, esses foram comparados com os presentes na literatura, tanto para a *Nappe* de Passos quanto para o Orógeno Brasília Meridional.

1.3. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no sudoeste de Minas Gerais, entre as cidades de Fortaleza de Minas, Pratápolis e São Sebastião do Paraíso (Figura 1) e abrange parte da folha topográfica SF-23-V-A-VI-3 (São Sebastião do Paraíso, em escala 1:50.000) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O acesso a região de pesquisa, partindo da capital estadual Belo Horizonte, se dá pela BR-262 até o trevo com a MG-050, em Juatuba, a qual deve ser seguida por 350km até a área estudada.

Figura 1: Mapa de localização da região de pesquisa com as principais vias de acesso e zonas urbanas. Retângulo vermelho indica a área de estudo.



2. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades e os métodos de trabalho necessários para alcançar os objetivos propostos foram desenvolvidos nos laboratórios do Departamento de Geologia (DG), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da Universidade Estadual Paulista - Câmpus Rio Claro.

Os trabalhos foram desenvolvidos em três etapas: (i) levantamento preliminar, que envolveu a busca por bibliografias sobre o contexto da *Nappe* de Passos e Orógeno Brasília Meridional, e cartografias da área de estudo e regiões próximas. Também foi realizado o levantamento de amostras e lâminas disponíveis no acervo do Departamento de Geologia (IGCE/UNESP); (ii) trabalhos laboratoriais, para a aquisição de dados e informações acerca das lâminas petrográficas selecionadas; e (iii) trabalhos de escritório, onde foram realizadas as interpretações e integração dos dados obtidos.

2.1. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO

Essa atividade se estendeu ao longo de todo trabalho, a fim de manterem atualizadas as informações relacionadas aos tópicos de petrologia metamórfica e geocronologia, principalmente do sistema de *nappes* do Orógeno Brasília Meridional. Para isso foram utilizados artigos científicos (*e.g.*, PARRISH, 1990; DARDENNE, 2000; SPEAR & PILE, 2002; FOSTER *et al.*, 2002, 2003; VALERIANO *et al.*, 2000, 2004, 2008; ZACK *et al.*, 2004; TOMKINS *et al.*, 2007; LUVIZOTTO *et al.*, 2009a,b; FUMES *et al.*, 2022, SIMÕES *et al.*, 2022), dissertações (*e.g.*, LUVIZOTTO, 2003), teses (*e.g.*, SIMÕES, 1995), livros (*e.g.*, YARDLEY, 2004; PASSCHIER & TROUW, 2005) e resumos publicados em eventos geocientíficos (*e.g.*, LUVIZOTTO *et al.*, 2011, 2012, 2014). O levantamento foi realizado por sistemas eletrônicos de pesquisa científica, tais como SciELO, Google Acadêmico, Periódicos CAPES e os repositórios da UNESP e USP.

Para o levantamento de material cartográfico foram utilizadas imagens de satélite (SRTM) para a confecção do modelo digital de elevação (MDE), mapas geológicos disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM/SGB), a base cartográfica SF-23-V-A-VI-3 (Folha São Sebastião do Paraíso, escala 1:50.000) disponível no site do IBGE, acervo interno do DPM/UNESP e do mapa geológico-estrutural confeccionado por Luvizotto (2003), que foi organizado em ambiente SIG. Também foram utilizadas imagens de satélite disponibilizadas pelo programa *Google Earth Pro*, para a criação do mapa de localização.

2.2. PETROGRAFIA

Foram selecionadas nove lâminas petrográficas das unidades estudadas do acervo do Departamento de Geologia (IGCE/UNESP). Esse acervo é composto por material coletado em mapeamentos pretéritos, como o projeto Serra da Fábrica realizado no ano de 1993 e catalogado com a sigla SF, do mestrado do orientador realizado em 2003 e catalogado com a sigla MG, além de projetos do orientador financiados pelos órgãos CNPq e FAPESP, os quais são catalogados com a sigla RR.

Inicialmente as amostras foram descritas em microscópio petrográfico de luz transmitida, com o objetivo de observar os principais minerais índices do metamorfismo, as características microestruturais e relações texturais para o reconhecimento da paragênese metamórfica de cada lâmina delgada.

Dessa maneira, ao final das etapas anteriores, foram selecionadas lâminas petrográficas de acordo com algumas características, como: (i) menor índice de alteração intempérica; (ii) presença de fases minerais importantes para análises, como monazita e rutilo; e (iii) representatividade da rocha na unidade estudada.

2.3. ANÁLISE EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

Após a descrição petrográfica em microscópio petrográfico de luz transmitida, nove lâminas delgadas foram metalizadas em carbono e analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), marca JEOL, modelo JSM 6010 LA, com detector de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) do Departamento de Geologia (IGCE/UNESP). O MEV foi configurado para operar com tensão de aceleração de 15 kV e distância focal de 10 mm. O equipamento não possui detector de corrente. Assim, o ajuste da corrente que incide sobre a amostra se deu com base no tempo morto do sistema, para análises de EDS, que foi mantido em aproximadamente 25%.

Nesta etapa foram realizadas análises químicas qualitativas e semiquantitativas, caracterizações texturais e estruturais presentes na amostra, geração de imagens de alta qualidade para utilização em publicações e na dissertação, a identificação de minerais acessórios com auxílio do EDS e seleção de minerais de interesse, como monazita, que posteriormente foi analisada em Microsonda Eletrônica.

2.4. ANÁLISES QUÍMICAS, DATAÇÃO E GEOTERMOMETRIA EM MICROSSONDA ELETRÔNICA

Nesta etapa foram realizadas análises pontuais de química mineral em cristais de monazita e rutilo na Microsonda Eletrônica (EPMA), marca JEOL, modelo JXA-8230 *superprobe*, do Departamento de Geologia (IGCE/UNESP), para a obtenção da concentração de elementos maiores, menores e traço nas fases acessórias.

A monazita (Ce, La, Th, Sm)PO₄, é um fosfato comum em rochas ígneas ácidas, pegmatitos, carbonatitos e em rochas metamórficas de médio a alto grau, podendo ser utilizada para datação de caminhamentos *P-T-t* ao longo de um ou mais eventos metamórficos.

Foram confeccionados mapas composicionais semiquantitativos de alta-resolução para os elementos Y, Th e U para melhor observação dos diferentes domínios existentes nos cristais

de monazita e possíveis zonações desses elementos, das amostras GL09, MG173, RR2A1, MG175 (cianita-granada-biotita-muscovita xisto feldspático), RR4B (granada-biotita gnaiss), RR4A, MG176 e SF3-41 (cianita-granada-biotita±muscovita xisto feldspático).

A confecção dos mapas composicionais e análises pontuais foi conduzida sob condições de aceleração de 15 kV, corrente de 100 nA, tempo de permanência (*dwell time*) de 100 ms e *step size* de 10 µm. As análises pontuais em monazita foram realizadas em diferentes domínios, quando existentes, marcados pelo zoneamento dos elementos Y e Th, essas análises seguiram as condições propostas por Vlach (2010), utilizando-se aceleração de 15 kV e corrente de 100 nA.

Os procedimentos para datação U-Th-Pb_T em cristais de monazita seguiram as condições propostas por Williams *et al.* (2006). Foram selecionados, quando possível, ao menos dez cristais de monazita inclusos, em minerais índices do metamorfismo, e dez cristais dispostos na matriz. Além de selecionar diferentes morfologias de monazita, com o objetivo de observar e comparar seus resultados. Para essas análises foi utilizado o padrão de referência “Moacyr” (±509 Ma, GONÇALVES *et al.*, 2016) a cada 20 análises, e os resultados foram utilizados como controle de qualidade dos dados.

Para o cálculo das idades das análises pontuais em monazita, e seus erros associados, foram utilizados dois procedimentos. O primeiro, foi realizado utilizando a metodologia de Vlach & Gualda (2000), que posteriormente foi realizado o cálculo de idade média das amostras por meio da *toolbox* IsoplotR (VERMEESCH, 2018), uma ferramenta gratuita e de código aberto em linguagem R para estudos de geocronologia. O segundo método se deu pela utilização da ferramenta “*MonaziteAge*” (versão 2.03 – McSwiggen & Associados, 2010) disponível no equipamento da JEOL, para a comparação entre a idade média U-Th-Pb_T e da isócrona química (CHIME). Esse aplicativo determina a idade química da monazita utilizando o método da isócrona química ThO₂* - PbO (CHIME) de Suzuki & Adachi (1991, 1994) e Suzuki *et al.* (1994), o qual a idade é calculada pelo declive da linha de regressão de ThO₂* vs PbO.

Também foram realizadas análises pontuais em rutilo (TiO₂), um mineral encontrado em uma ampla gama de rochas, principalmente as de origem metamórfica e pode ser utilizado para estudos de proveniência, datação e termometria (ZACK *et al.*, 2004; TOMKINS *et al.*, 2007; LUVIZOTTO *et al.*, 2009a,b).

Essas análises pontuais em rutilo foram conduzidas em condições de feixe de elétrons focado com aceleração de 20 kV e corrente de 80 nA, utilizando os procedimentos propostos por Wark & Watson (2006) e Luvizotto *et al.* (2009a), para os elementos Al, Si, Ti, V, Cr, Fe,

Nb, Zr, Sn, Sb, Hf, Ta e W. Análises repetidas nos materiais de referência R10 e Sy (LUVIZOTTO *et al.*, 2009b) foram utilizadas como controle de qualidade. Análises de elementos traço em rutilo foram realizadas nas amostras GL09, MG173, RR2A1, MG175 (cianita-granada-biotita-muscovita xisto feldspático), MG182 (granada-biotita gnaisse), RR4A e SF3-41 (cianita-granada-biotita±muscovita xisto feldspático).

Zack *et al.* (2004) e Tomkins *et al.* (2007) mostram que a concentração de Zr em rutilo possui forte influência da temperatura (T) e pressão (P) na formação do cristal. Para o cálculo da temperatura por meio do Zr-em-rutilo, foram utilizadas as calibrações de Tomkins *et al.* (2007).

2.5. DATAÇÃO EM LA-ICP-MS

Nesta etapa foi realizada datação U-Pb em cristais de rutilo no Laboratório de Espectrometria de Massa de Alta Resolução do Departamento de Geologia da UNESP de Rio Claro. Os cristais de rutilo, da amostra RR2A1 (Unidade E), foram analisados utilizando um sistema de ablação a laser Photon-Machines Excimer Laser 193mm combinado com um espectrômetro de massa de plasma acoplado indutivamente de campo de setor (LA-SF-ICP-MS Thermo Scientific Element 2). Os dados foram adquiridos utilizando as recomendações de Zack *et al.* (2011).

Para a validação da acurácia e precisão dos dados obtidos, foi utilizado o rutilo padrão R10 (1095 Ma, LUVIZOTTO *et al.*, 2009b) a cada duas análises nos cristais da amostra. Os dados brutos foram corrigidos e tratados utilizando o programa IoliteTM 4.0 (HELLSTROM *et al.*, 2008) e as idades calculadas utilizando a *toolbox* IsoplotR (VERMEESCH, 2018).

2.6. INTEGRAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS

A partir dos dados obtidos em etapas prévias, procurou-se relacionar os eventos metamórficos propostos na literatura, para a *Nappe* de Passos, com os dados geocronológicos e de termometria obtidos nesta pesquisa. Essas informações, em conjunto com a litoestratigrafia, permitiram uma nova interpretação acerca do caminamento (*P*)-*T*-*t* das Unidades E, F e G.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

O Orógeno Brasília, situado na porção leste da Província Tocantins, possui direção preferencial N-S e ocorre ao longo da margem oeste do Cráton São Francisco, estendendo-se por mais de 1.200 km. A formação do Orógeno Brasília é resultado da subducção para oeste da litosfera oceânica da paleoplaca São Franciscana no Neoproterozoico, durante o evento Brasileiro/Pan-Africano, como parte inicial da amalgamação do Gondwana Oeste (ALMEIDA, 1977; ALMEIDA *et al.*, 1981; DARDENNE, 2000; VALERIANO *et al.*, 2008; VALERIANO, 2017).

Almeida (1977) e Almeida *et al.* (1981) definiram a Província Tocantins como uma unidade geológica importante localizada na margem oeste do Cráton São Francisco. Essa província consiste em três secções: Araguaia, Paraguai e Brasília. Os dois primeiros possuem vergência tectônica para as margens leste e sudeste do Cráton Amazônico, enquanto o Orógeno Brasília possui vergência para o Cráton São Francisco (VALERIANO *et al.*, 2004).

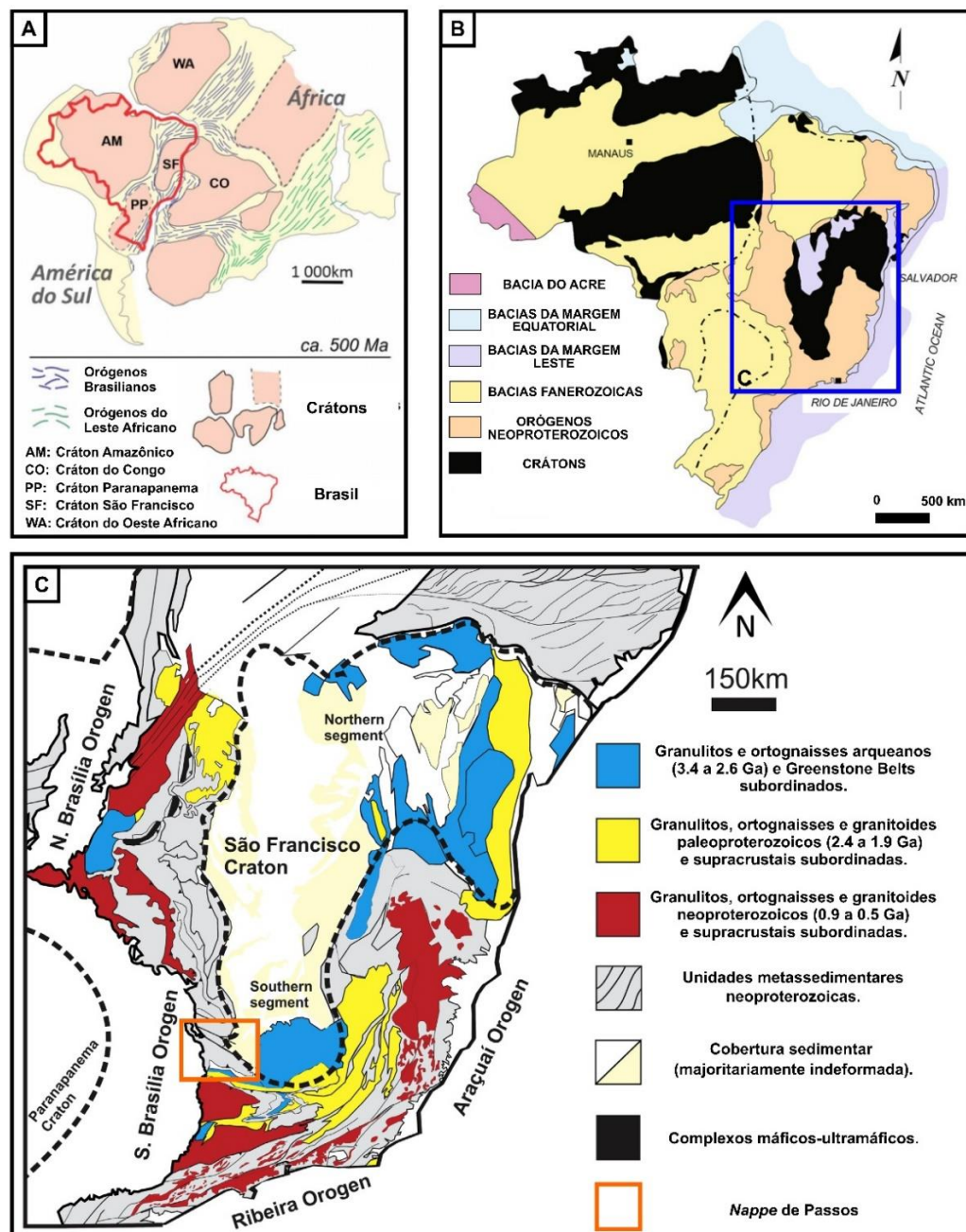
O Orógeno Brasília pode ser dividido em dois segmentos separados pela Sintaxe dos Pirineus: setentrional e meridional. A porção meridional do Orógeno Brasília apresenta orientação para sudeste com uma pronunciada concavidade para leste em sua extremidade, o qual é resultado da acomodação de terrenos acrescionários ao longo da margem oeste do Cráton São Francisco (Figura 2). Essa região consiste essencialmente de rochas metassedimentares neoproterozoicas, as quais são recobertas por um sistema de *nappes* que possuem metamorfismo variando da fácies xisto verde superior até granulito, aumentando gradualmente para oeste (ARAÚJO FILHO, 2000; DARDENNE, 2000; VALERIANO *et al.*, 2008; VALERIANO, 2017, FUMES *et al.*, 2022).

Por possuir diferentes estilos estruturais, graus metamórficos e litoestratigrafias, diversos autores (*e.g.*, DARDENNE, 2000; VALERIANO *et al.*, 2004; VALERIANO *et al.*, 2008; VALERIANO, 2017) subdividem, da base ao topo ou de leste a oeste, o Orógeno Brasília Meridional em três domínios: (i) Domínio Cratônico; (ii) Domínio Externo; e (iii) Domínio Interno.

O Domínio Cratônico ocorre no extremo leste do Orógeno Brasília Meridional sendo formado por parte do embasamento do Cráton São Francisco e terrenos arqueanos do tipo granito-greenstone, além da cobertura metassedimentar neoproterozoica não metamorfizada e indeformada (DARDENNE, 2000; VALERIANO *et al.*, 2004; VALERIANO *et al.*, 2008; VALERIANO, 2017). O Domínio Externo é composto por associações alóctones de rochas

metassedimentares dos grupos Paranoá, Canastra e Ibiá, ocorrendo sob metamorfismo de fácies xisto verde, localmente alcançando a zona da granada (VALERIANO, 2017). O Domínio Interno compreende três *nappes* sinformais separadas por rampas laterais de direção WNW: Araxá, Passos e Luminárias (de norte a sul). Essas *nappes* correspondem a unidades alóctones metapsamopelíticas e metavulcânicas polideformadas do Grupo Araxá, exibem paragêneses de fácies xisto verde superior, anfibolito e granulito (de alta-P) (VALERIANO *et al.*, 2004; VALERIANO, 2017, FUMES *et al.*, 2022).

Figura 2: Mapa tectônico do Orógeno Brasília Sul e margem sudoeste do Cráton São Francisco. (A) Reconstrução paleogeográfica do Gondwana Ocidental há 500 Ma. Modificado de Wang *et al.* (2019). (B) Províncias Estruturais brasileiras. Modificado de Alkmin (2015). (C) Mapa tectônico do Cráton São Francisco e Orógenos Brasília e Ribeira, com destaque para a *Nappe* de Passos. Modificado de Marimon *et al.* (2020).

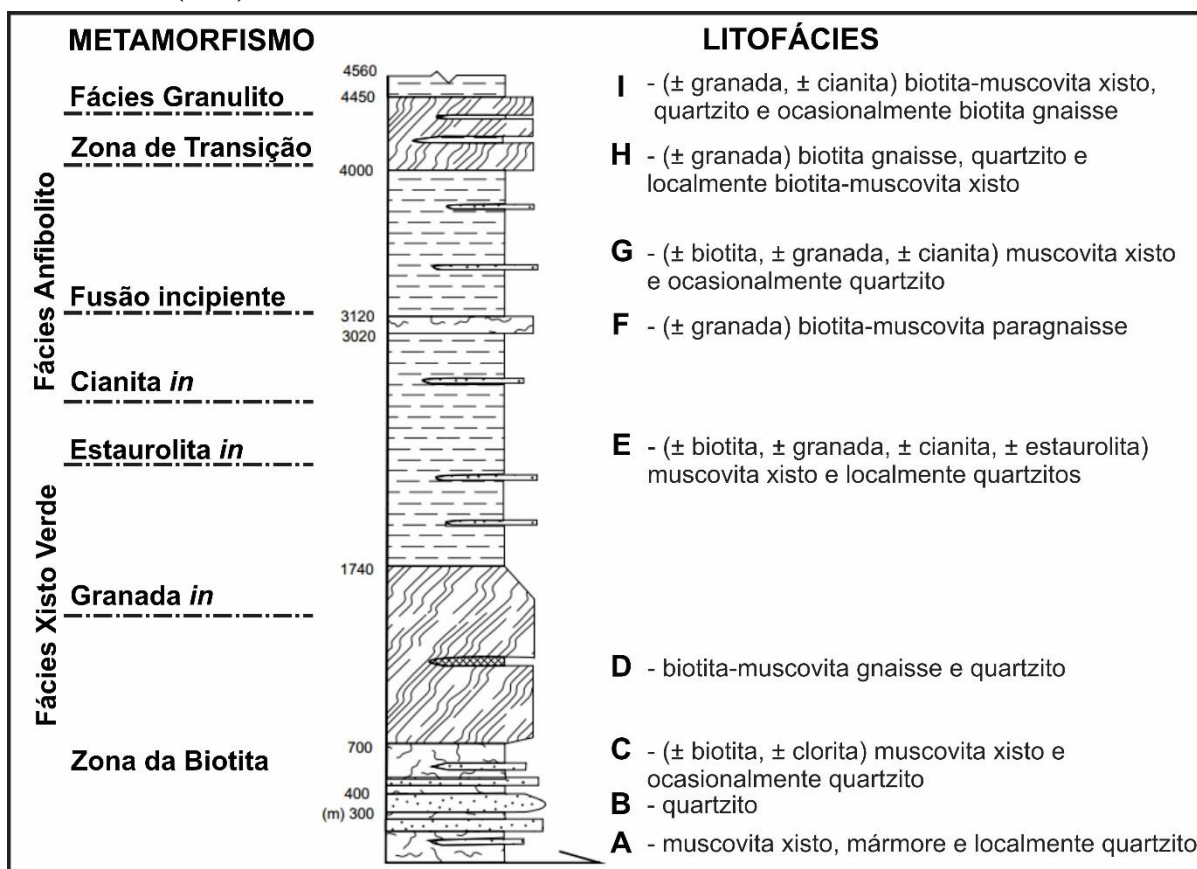


3.1. NAPPE DE PASSOS

De acordo com Simões (1995), a *Nappe* de Passos pode ser subdivida, da base para o topo, em nove unidades litoestratigráficas (Figuras 3 e 4), nomeadas de Unidade A até Unidade I: Unidade A – ocorre na base da *nappe* e é composta por muscovita xisto intercalado, ocasionalmente, com camadas métricas de quartzito e, localmente, lentes de mármore; Unidade B – quartzito fino a médio com intercalações decimétricas a métricas de muscovita xisto e quartzito micáceo; Unidade C – caracterizada por ($\pm$ biotita, $\pm$ clorita) muscovita xisto intercalado, metricamente, com quartzito e raras ocorrências de albita-clorita-actinolita xisto de origem metabásica; Unidade D – formada por biotita-muscovita gnaiss com bandamento decimétrico a métrico, com raras intercalações de muscovita xisto, quartzito e anfibolito; Unidade E – constituído por ($\pm$ cianita, $\pm$ estauroлита) granada-biotita-muscovita xisto com intercalação com quartzito, muscovita-quartzo xisto e anfibolito; Unidade F – caracterizada por biotita gnaiss com porfiroblastos de feldspato, localmente migmatítico; Unidade G – xistos semelhantes à Unidade E; Unidade H – formada por ($\pm$ granada) biotita gnaiss com bandamento decimétrico a métrico marcado pela alternância de granada-biotita gnaiss e cianita-granada gnaiss quartzoso, com intercalações métricas ocasionais de granada-biotita xisto, quartzito e anfibolito; e Unidade I – ocorre no topo da unidade e é constituída por ($\pm$ cianita) granada-biotita-muscovita xisto intercalado com quartzito, quartzo xisto, biotita gnaiss, cianita gnaiss quartzoso e anfibolito. Fumes *et al.* (2022) descrevem a ocorrência de granulito de alta pressão a partir da Unidade H, cuja associação mineral de pico é representada pela ocorrência de granada, feldspato potássico, *melt*, cianita e rutilo.

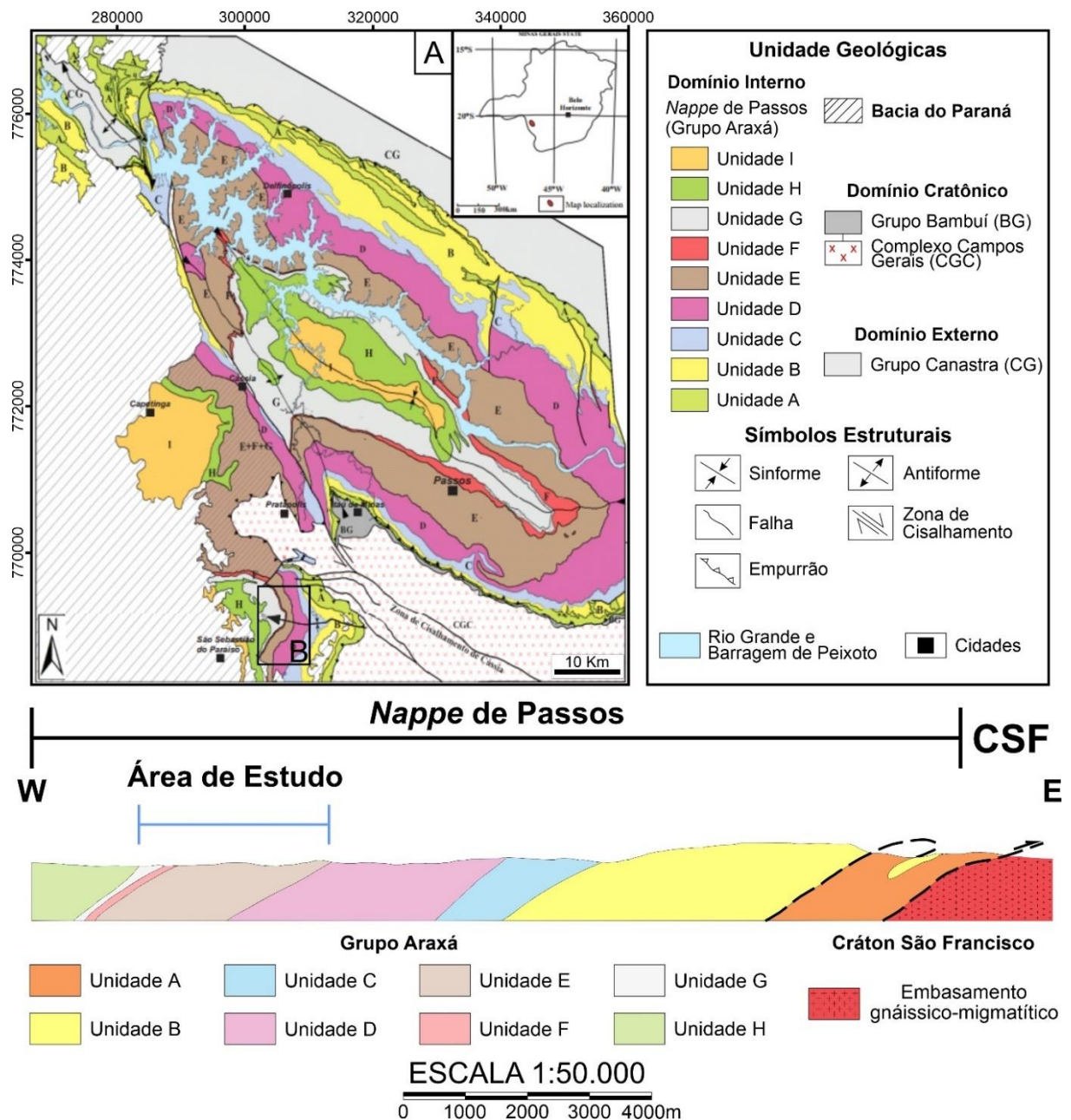
As três unidades basais formam o Ciclo Sedimentar Inferior, sendo caracterizadas por sedimentação matura, possivelmente de um sistema plataformal proximal. As demais unidades representam o Ciclo Depositional Superior, que apresenta expressiva contribuição de sedimentos imaturos (SIMÕES, 1995).

Figura 3: Coluna litoestratigráfica da *Nappe* de Passos, de acordo com Simões (1995). Modificado de Valeriano *et al.* (2004).



Simões (1995) dividiu em quatro as fases deformacionais (D1 a D4) as estruturas presentes na *Nappe* de Passos. A fase deformacional D1 é caracterizada essencialmente pela foliação S1 (xistosidade) que ocorre paralela ao bandamento composicional, observada facilmente nas charneiras de dobras D2. A fase D2 é responsável pela foliação principal da área (xistosidade ou clivagem de crenulação), ocorrendo em toda a *nappe*, mas localmente a foliação principal pode corresponder a outras fases (S1 ou S3). Outra estrutura D2, frequente nas rochas, é a lineação mineral que indica direção de transporte da *nappe* (de topo para leste). A fase D3 gerou dobras abertas a suaves, com planos axiais íngremes a verticais e eixos N, e isópacas que ocorrem da escala micro a macroscópica. A fase D4 também é caracterizada por dobras suaves a abertas, possuindo plano axial de vertical a subvertical e linhas de charneira com direção entre N e NNE, com caimentos suaves para SSW ou NNE.

Figura 4: Mapa geológico e seção geológica da *Nappe* de Passos em (A), de acordo com Hartung (2018). Área de estudo em (B). Modificado de Luvizotto (2003).



Segundo Simões (1995), dois eventos metamórficos podem ser identificados na *Nappe* de Passos, denominados de metamorfismo principal (MP) e retrometamorfismo (RM), ambos relacionados a segunda fase deformacional, porém em estágios do caminhamento *P-T-t-d* distintos. As rochas da *nappe* apresentam gradiente metamórfico invertido, variando da zona da biotita da fácies xisto verde, na base, até a fácies granulito, no topo. Essa inversão do gradiente é marcada pela paragéneses gerada pelo MP, onde unidades superiores possuem paragéneses de mais alto grau em relação as unidades inferiores (TEIXEIRA & DANNI, 1978;

SIMÕES *et al.*, 1988; SIMÕES, 1995, VALERIANO *et al.*, 2004; LUVIZOTTO *et al.*, 2017; VALERIANO, 2017; FUMES *et al.*, 2022). Por meio de dados termobarométricos e estruturais, Simões (1995) e Simões *et al.* (2022) concluíram que o gradiente metamórfico invertido da *Nappe* de Passos se deve a inversão das isothermas em sistemas de subducção aliadas ao intenso cisalhamento dúctil durante a exumação da *nappe*.

Na região de São Sebastião do Paraíso (MG), as rochas da *Nappe* de Passos na porção basal foram metamorfizadas em temperatura da ordem de 450 °C e pressão de 0.6 GPa, já no topo da sequência esses valores chegam a ~830°C e pressão de 1.2 GPa. Assim, com os dados petrográficos, geocronológicos e termobarométricos, foi proposto um caminamento *P-T* horário para essa porção da *nappe*. (LUVIZOTTO, 2003; LUVIZOTTO *et al.*, 2017, FUMES *et al.*, 2022).

No limite entre as unidades E e F são descritas ocorrências de retroeclogito (hornblenda-granada-piroxênio xisto) por Luvizotto (2003) e Santos *et al.* (2021). O metamorfismo dessa rocha atingiu ~725 °C e uma pressão mínima de 1.6 GPa, podendo, em estágios iniciais, ter atingido menor valor de temperatura e maior pressão, tais condições sugerem subducção em profundidades maiores que 60 km (SANTOS *et al.*, 2021). Semelhante às demais rochas da *nappe*, o eclogito possui trajetória *P-T-t* no sentido horário (SANTOS *et al.*, 2021).

3.2. IDADE DO METAMORFISMO DAS ROCHAS DA *NAPPE* DE PASSOS

Diversos autores apresentam dados geocronológicos U-Pb e K-Ar para as rochas da *Nappe* de Passos (VALERIANO *et al.*, 2000; VALERIANO *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021; FUMES *et al.*, 2022). As unidades do Ciclo Depositional Inferior registram, principalmente, idades de proveniência da sedimentação da margem passiva do Cráton São Francisco. Já as unidades do Ciclo Depositional Superior apresentam, principalmente, idades U-Pb (630 – 605 Ma) e K-Ar (580 – 570 Ma) relacionadas à exumação e colocação da *Nappe* de Passos (VALERIANO *et al.*, 2004).

O pico metamórfico da *Nappe* de Passos é marcado pela ocorrência de leucossoma sintectônico com idade de aproximadamente 630 Ma (U-Pb, em monazita), segundo Valeriano *et al.* (2004), idades semelhantes foram encontradas em rochas de HP, no topo da *nappe*, por FUMES *et al.* (2022). Enquanto o retrometamorfismo ocorreu há aproximadamente 600 Ma, baseado em idades U-Pb de cristais de monazita (VALERIANO *et al.* 2004). Idades

intermediárias em monazita, entre 615 e 620 Ma, também são descritas por Valeriano *et al.* (2004), que as relacionam a redefinição parcial do sistema U-Pb em monazita durante a exumação.

Idades U-Pb em rutilo entre 595 e 580 Ma são descritas em anfibolitos (VALERIANO *et al.*, 2004), granulitos de alta pressão (FUMES *et al.*, 2022) e retroeclogitos (SANTOS *et al.* 2021). Apesar dessas idades serem próximas às obtidas para monazitas retrometamórficas, considerando o erro (VALERIANO *et al.*, 2004). Valeriano *et al.* (2004) as interpretam como registros do resfriamento da *Nappe* de Passos, uma vez que também estão dentro da margem de erro dos dados de K-Ar em mica branca (580 – 570 Ma; VALERIANO *et al.*, 2000).

Tabela 1: Idades U-Pb e K-Ar de rochas da *Nappe* de Passos. Números sobrescritos: 1 – Valeriano *et al.* (2000); 2 – Valeriano *et al.* (2004); 3 – Santos *et al.* (2021); e 4 – Fumes *et al.* (2022). Abreviação mineral de acordo com Warr (2021).

Rocha (Unidade)	Mineral (incl.)	Idade (Ma)	Interpretação	Método
HP Granulito (H)	Monazita (grt)	640 – 630 ⁴	Pico metamórfico	EPMA
Leucossoma (G)	Monazita	631 ± 4 ²	Pico metamórfico	ID-TIMS
HP Granulito (H)	Monazita	630 – 623 ⁴	Pico metamórfico	EPMA
Grt-Pl-Bt Xisto (E)	Monazita	624 - 615 ²	Redefinição parcial U-Pb	ID-TIMS
Ortoquartzito (H)	Monazita	622 ± 2 ²	Redefinição parcial U-Pb	ID-TIMS
HP Granulito (H)	Monazita (ky)	615 ± 14 ⁴	Exumação	EPMA
Leucossoma (G)	Monazita	606 ± 2 ²	Exumação	ID-TIMS
Ortoquartzito (H)	Monazita	604 ± 8 ²	Exumação	ID-TIMS
Anfibolito (G, H)	Rutilo	595 - 593 ²	Exumação e resfriamento	ID-TIMS
HP Granulito (H)	Rutilo	590 – 585 ⁴	Exumação e resfriamento	LA-ICP-MS
Retroeclogito (F/G)	Rutilo	579 ± 23 ³	Exumação e resfriamento	LA-ICP-MS
Quartzito (Várias)	Mica branca	580 – 570 ¹	Resfriamento final	ICP-MS

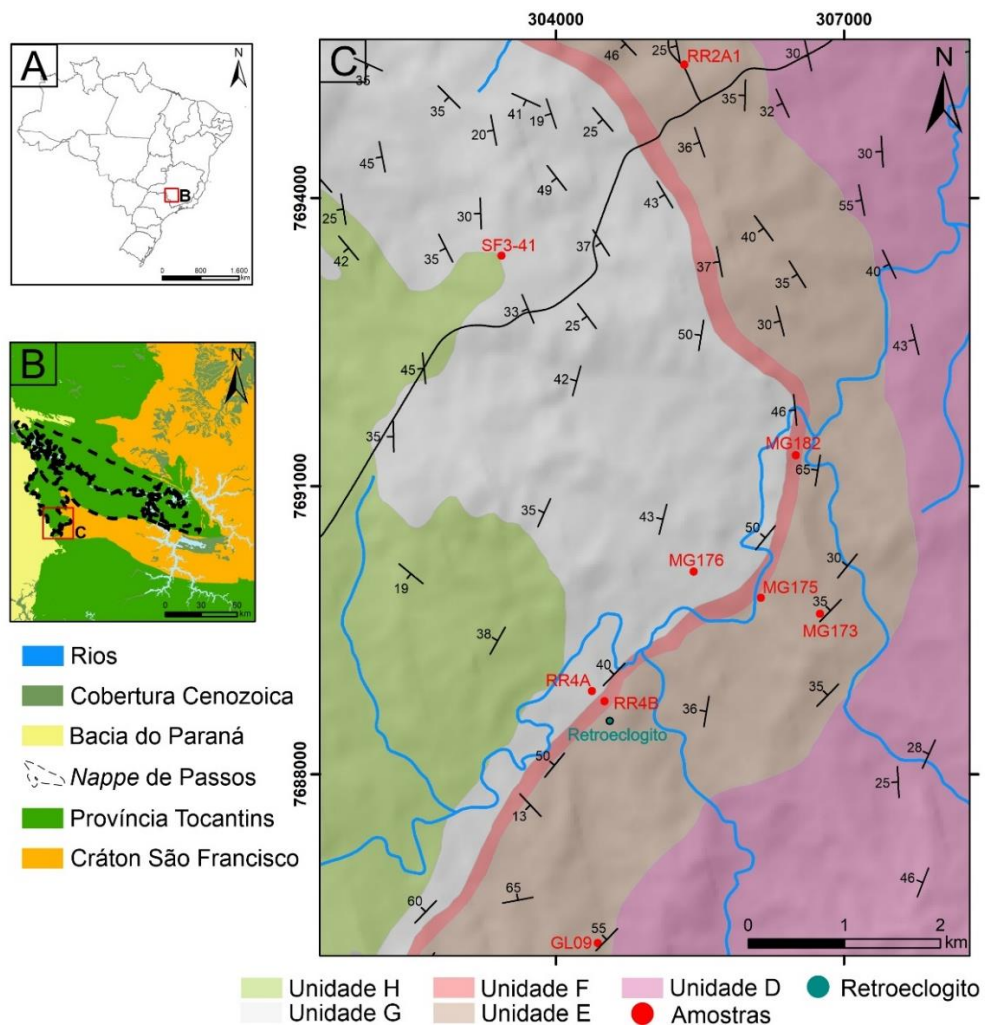
4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das descrições dos litotipos estudados, geocronologia U-Th-Pb_T em monazita, geocronologia U-Pb em rutilo e termometria de elemento traço (Zr) em rutilo.

4.1. GEOLOGIA LOCAL

A *Nappe* de Passos é formada por rochas do Grupo Araxá, o qual é subdividido em nove unidades litoestratigráficas na área de estudo, sendo elas, da base para o topo, em Unidade A até Unidade I (SIMÕES, 1995). A localização dos litotipos estudados estão representados no mapa geológico da Figura 5. Como base cartográfica para a confecção, é utilizado o mapa apresentado por Luvizotto (2003) para a região de São Sebastião do Paraíso.

Figura 5: Mapa Geológico da *Nappe* de Passos na região de São Sebastião do Paraíso (MG), com a localização das amostras estudadas. Modificado de Luvizotto (2003).



4.1.1. UNIDADE E

Quatro amostras dessa unidade foram coletadas em diferentes porções da área de pesquisa e correspondem da base ao topo da sequência (Figura 5). A maioria das amostras (MG173, MG175 e RR2A1) são classificadas como cianita-granada-biotita-muscovita xisto com estauroлита, rocha representativa da unidade, exceto a amostra GL09, a qual é classificada como cianita-granada-biotita-muscovita xisto feldspático.

As rochas são constituídas principalmente por muscovita (± 15 a 25%), biotita (± 10 a 15%), quartzo (± 20 a 30%), plagioclásio (± 10 a 20%), granada (± 10 a 20%), cianita (± 1 a 5%) e estauroлита (traço a 1%). Outros minerais, como apatita, ilmenita, magnetita, monazita, rutilo, zircão, pirita e turmalina, ocorrem como fases acessórias.

As rochas apresentam foliação (S_n) penetrativa do tipo xistosidade, a qual é bem-marcada pela orientação de biotita e muscovita (Figura 6A). Outros minerais também se encontram alongados e definidos de acordo com a S_n , como quartzo e plagioclásio (Figura 6F). A textura que caracteriza essa trama é a lepidoblástica alongada, formado por cristais subédricos a euédricos, com granulação fina a média e com a presença de porfiroblastos geralmente poiquilíticos de granada e plagioclásio.

Os porfiroblastos de granada apresentam foliação interna (S_i) geralmente distintas da foliação externa (S_e), como a formação da S_i perpendicular à S_e ou S_i em espiral, indicando origem sin-tectônica (Figuras 7A-D). Os minerais inclusos geralmente são biotita, muscovita e quartzo, além de mais raramente serem encontrados cianita e estauroлита. Normalmente os porfiroblastos possuem sombra de pressão formada por biotita, muscovita ou quartzo (Figuras 6A, C e D). A amostra GL09 possui um porfiroblasto de granada com textura em atol, euédrica e com inclusões de apatita, biotita, clorita, pirita e plagioclásio (Figura 6A).

Normalmente os cristais de cianita e estauroлита, das amostras estudadas, apresentam coroas de alteração para muscovita (Figuras 6E-H). Essas texturas indicam reequilíbrio durante o retrometamorfismo, as quais são apresentadas nas equações abaixo.

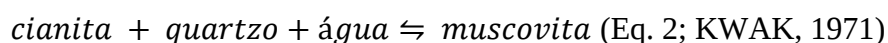
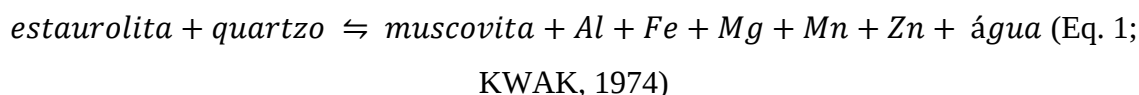


Figura 6: Fotomicrografias das amostras da Unidade E, GL09 (A), MG175 (B, G e H), RR2A1 (C e D) e MG173 (E e F). Em (A) porfiroblasto de granada com textura em atol, com inclusões de biotita, pirita, plagioclásio, apatita e clorita. (B) Intercalação de camadas ricas em mica e em quartzo, com a presença de turmalina e estauroлита. (C e D) Porfiroblasto de plagioclásio com inclusões de quartzo e biotita. (E e F) Cristal de estauroлита parcialmente alterado para sericita. (G e H) Cristal de cianita parcialmente alterado para sericita. Nomenclatura de acordo com Warr (2021).

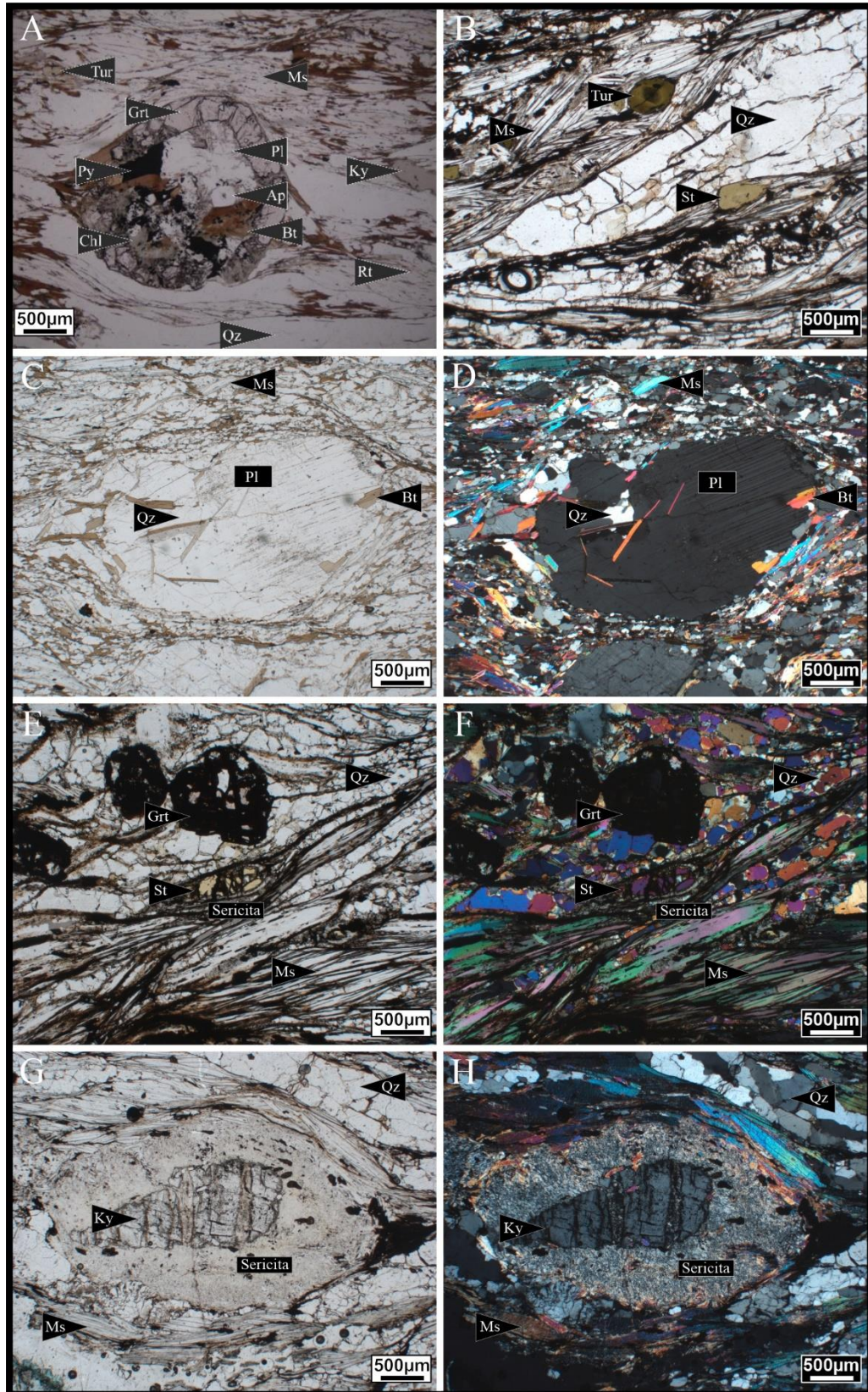
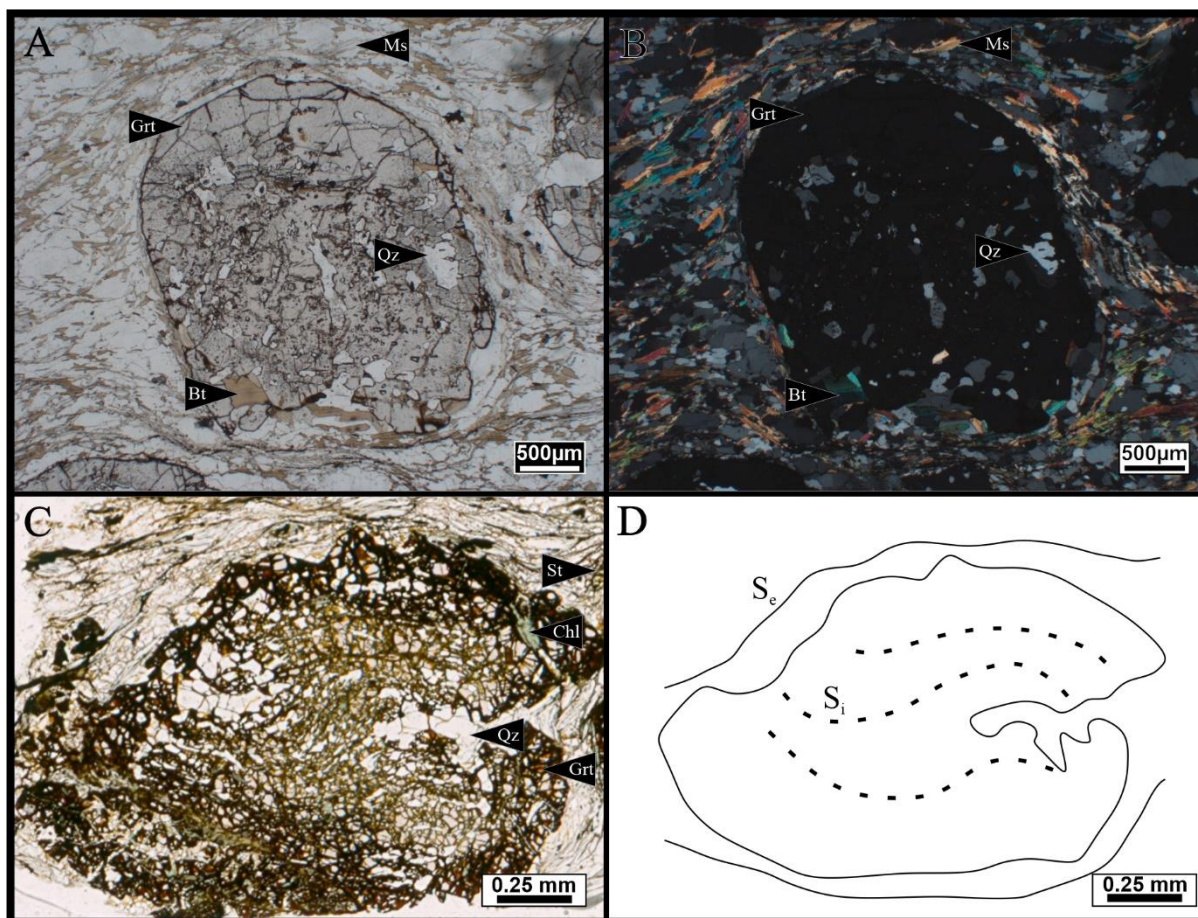


Figura 7: Fotomicrografia da amostra RR2A1 (A-B), fotomicrografia da amostra MG173 (C) e representação comparativa entre S_i e S_e (D). Em (A-B) porfiroblasto sin-tectônico de granada com inclusões de quartzo, que define S_i , e biotita, apresentando S_i perpendicular a S_e . Em (C) porfiroblasto sin-tectônico de granada com inclusões de quartzo, que definem S_i em formato espiral, como observado em (D).



4.1.2. UNIDADE F

A Unidade F é representada por duas amostras (Figura 5), classificadas como granada-biotita paragneisse.

A rocha é constituída principalmente por quartzo (± 40 a 50%), plagioclásio (± 20 a 30%), K-feldspato (± 15 a 20%), biotita (± 10 a 20%) e granada (± 5 a 10%). Outros minerais, como zircão, rutilo e opacos, ocorrem como fases acessórias. A ocorrência de muscovita nessas amostras é rara, sendo observada quando resultado da alteração de biotita.

A rocha apresenta bandamento milimétrico a centimétrico, os quais são marcados pela alternância de bandas ricas em biotita e ricas em quartzo e feldspatos. A textura que caracteriza essa trama é principalmente granoblástica lobulada, formada por cristais anédricos, com granulação média a grossa e com a presença de porfiroblastos de granada, geralmente poiquilítica, e K-feldspato (Figuras 8A-D).

Os porfiroblastos de granada geralmente apresentam S_i perpendicular a S_e , possuindo principalmente inclusões de quartzo e plagioclásio, mas podendo ocorrer biotita e clorita inclusas, indicando formação sin-tectônica. Zonas de pressão podem ser formadas nesses porfiroblastos, mas geralmente esses cristais não apresentam tal textura. A amostra RR4B possui grande quantidade de cristais de granada, que são menores dos que os encontrados na amostra MG182, aproximadamente 500 μm e 2000 μm respectivamente. Essa diferença de tamanho e quantidade pode indicar grande taxa de nucleação na primeira amostra em relação à segunda. Ocorrem na rocha porções que se assemelham a produtos anatéticos, sendo marcado por veios de quartzo, K-feldspato e plagioclásio com granulação muito grossa, geralmente paralelos ao bandamento (Figura 9).

Figura 8: Fotomicrografia das amostras RR4B (A-B, E-F) e MG182 (C-D). Em (A-B) visão geral da lâmina RR4B, apresentando granada como porfiroblasto, com raras inclusões, ou disposto na matriz. Em (C-D) porfiroblasto sin-tectônico de granada com inclusões de quartzo, definindo S_e perpendicular a S_i . Em (E-F) porfiroblasto de k-feldspato, sem inclusões, e intercrescimento de quartzo vermicular em lóbulo de plagioclásio (mimerquita).

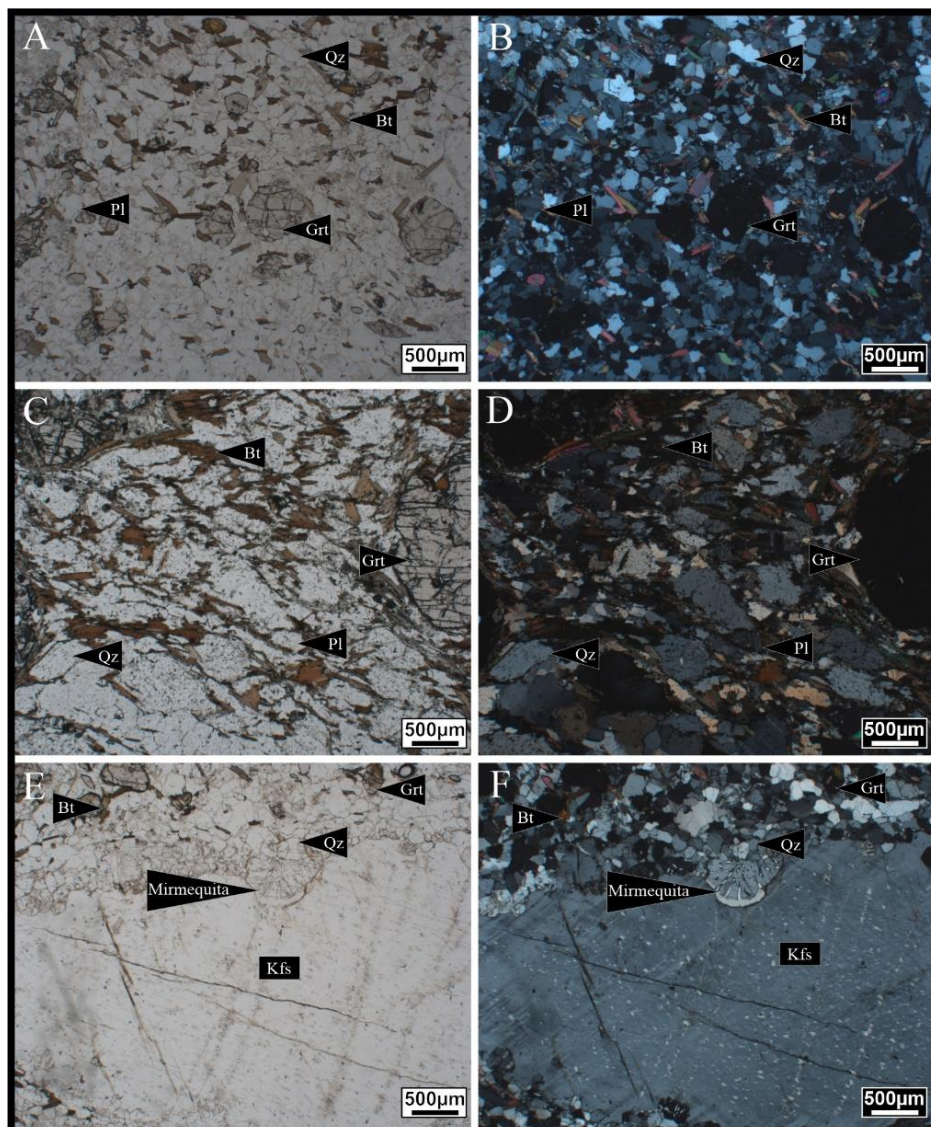
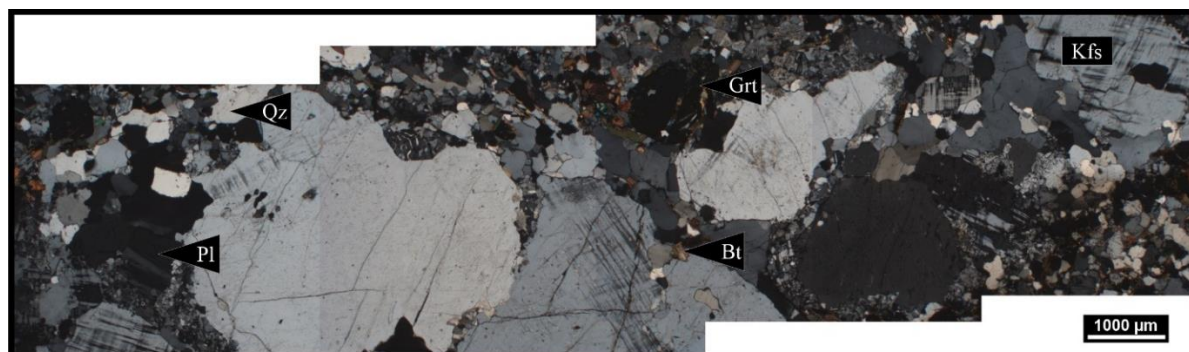


Figura 9: Fotomicrografia da amostra RR4B, mostrando possível produto anatético marcado por cristais de granulação muito grossa de quartzo e feldspatos.



4.1.3. UNIDADE G

Três amostras dessa unidade foram coletadas em diferentes porções da área de pesquisa e correspondem a base e topo da sequência (Figura 5). Todas as amostras são classificadas como cianita-granada-biotita ($\pm$ muscovita) xisto feldspático.

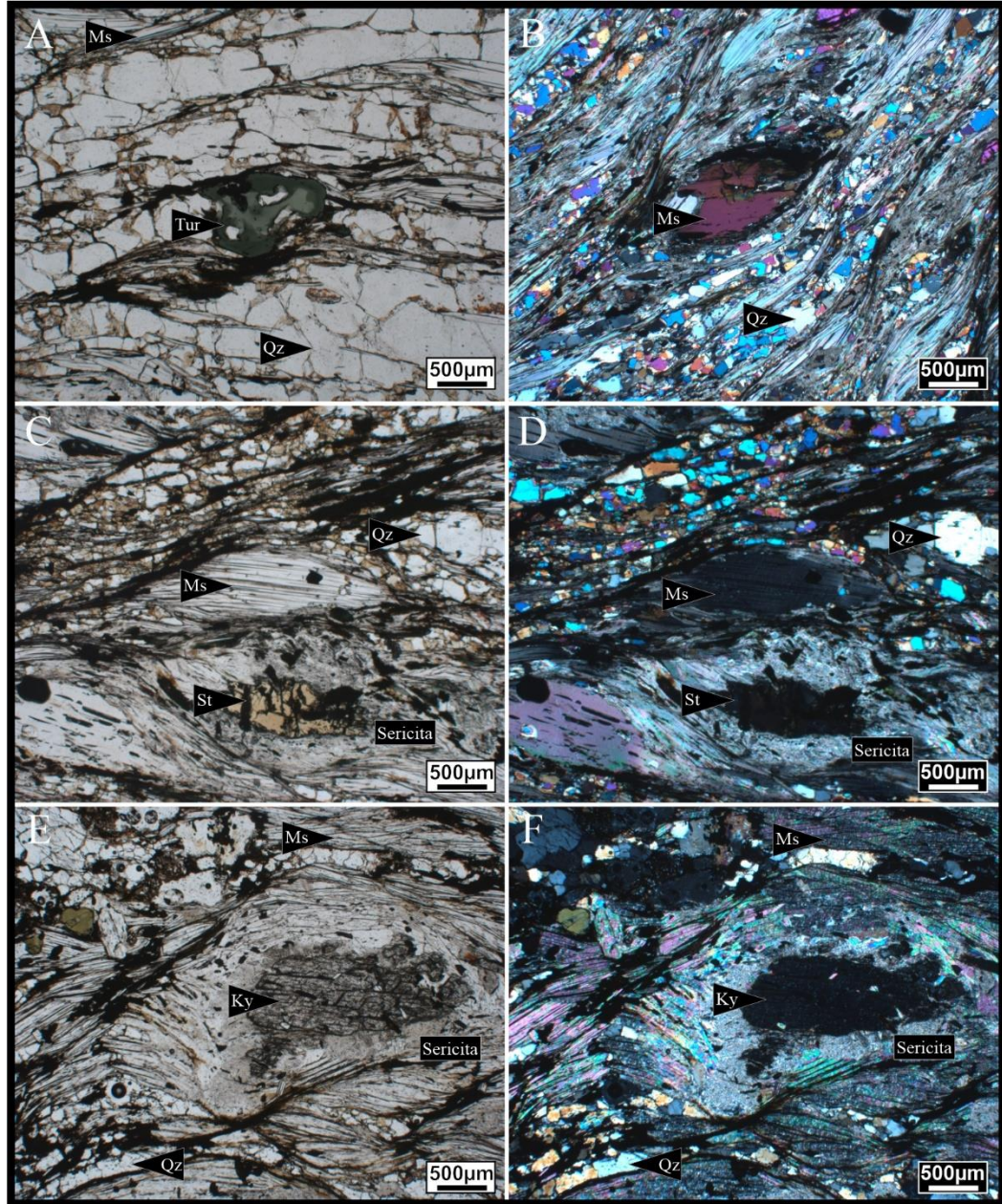
As rochas podem ser separadas em dois grupos de acordo com sua localização litoestratigráfica e composição mineralógica. As rochas próximas à base da unidade, são formadas principalmente por muscovita ($\pm$ 20 a 25%), biotita ($\pm$ 15 a 25%), quartzo ($\pm$ 15 a 25%), plagioclásio ($\pm$ 10 a 15%), granada ($\pm$ 10 a 15%), cianita ($\pm$ 5 a 10%) e estauroлита (2%) (Figuras 10A-F). Outros minerais, como ilmenita, zircão, magnetita, monazita, rutilo e turmalina, ocorrem como fases acessórias. Já para a amostra próxima ao contato com a unidade superior, o xisto é constituído majoritariamente por biotita ($\pm$ 30%), quartzo ($\pm$ 25%), plagioclásio ($\pm$ 15%), granada ($\pm$ 10%), K-feldspato ($\pm$ 10%) e cianita ($\pm$ 5%) (Figuras 11A-D). Minerais opacos, rutilo, apatita e clorita ocorrem como fases acessórias.

No geral, essas rochas apresentam foliação penetrativa do tipo xistosidade, a qual é bem-marcada pela orientação de biotita e ($\pm$) muscovita. Outros minerais também se encontram alongados definindo S_n , como quartzo, plagioclásio e cianita. A textura que caracteriza essa trama é a lepidoblástica alongada, formado por cristais subédricos a euédricos de muscovita e biotita, com granulação fina a média e com a presença de porfiroblastos geralmente poiquilíticos de granada, plagioclásio e cianita (Figuras 11A-D, 12A-B e 13).

Os porfiroblastos de granada apresentam foliação interna (S_i) geralmente distinta da foliação externa (S_e), como a formação da S_i perpendicular à S_e , mas tendendo ao paralelismo quando próximo a borda, ou S_i em sigmoidal, indicando origem sin-tectônica (Figuras 12A-B, 13). Os minerais inclusos geralmente são biotita, ilmenita, muscovita, quartzo, mas raramente

são encontrados cianita e estaurolita. Os porfiroblastos de cianita possuem inclusões de monazita. Normalmente os porfiroblastos possuem sombra de deformação formando biotita, muscovita ou quartzo.

Figura 10: Fotomicrografia das amostras RR4A (A, C, D) e MG176 (B, E, F). Turmalina em camada quartzosa (A). Muscovita em forma de *mica fish* (B). Cristal de estaurolita alterando para mica branca (sericita) (C e D). Em (E-F) resquício de cristal de cianita para sericita e muscovita.



As amostras próximas a base dessa sequência são semelhantes ao xisto representativo da Unidade E, apresentando a mesma trama mineralógica e feições nas inclusões dos porfiroblastos de granada. Porém a amostra SF3-41, como expresso anteriormente, apresenta características distintas em relação a esse litotipo, tanto na composição mineralógica, quanto a

ocorrência desses cristais. Por exemplo, a presença de cianita sem o halo de alteração para sericita, cianitas com propriedades ópticas distintas (Figuras 11B e 11D), maior granulação (Figuras 11A e 11C), além da ausência de muscovita, que pode ser resultado do consumo desse mineral nas reações metamórficas ou pela quebra da muscovita, representado pela Eq. 3.

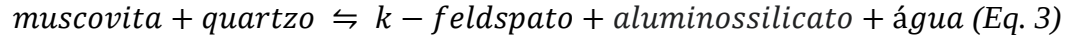


Figura 11: Fotomicrografias da amostra SF3-41. Em (A-B) cristal de cianita com extinção ondulante, enquanto a cianita presente em (C-D) não apresenta essa propriedade óptica.

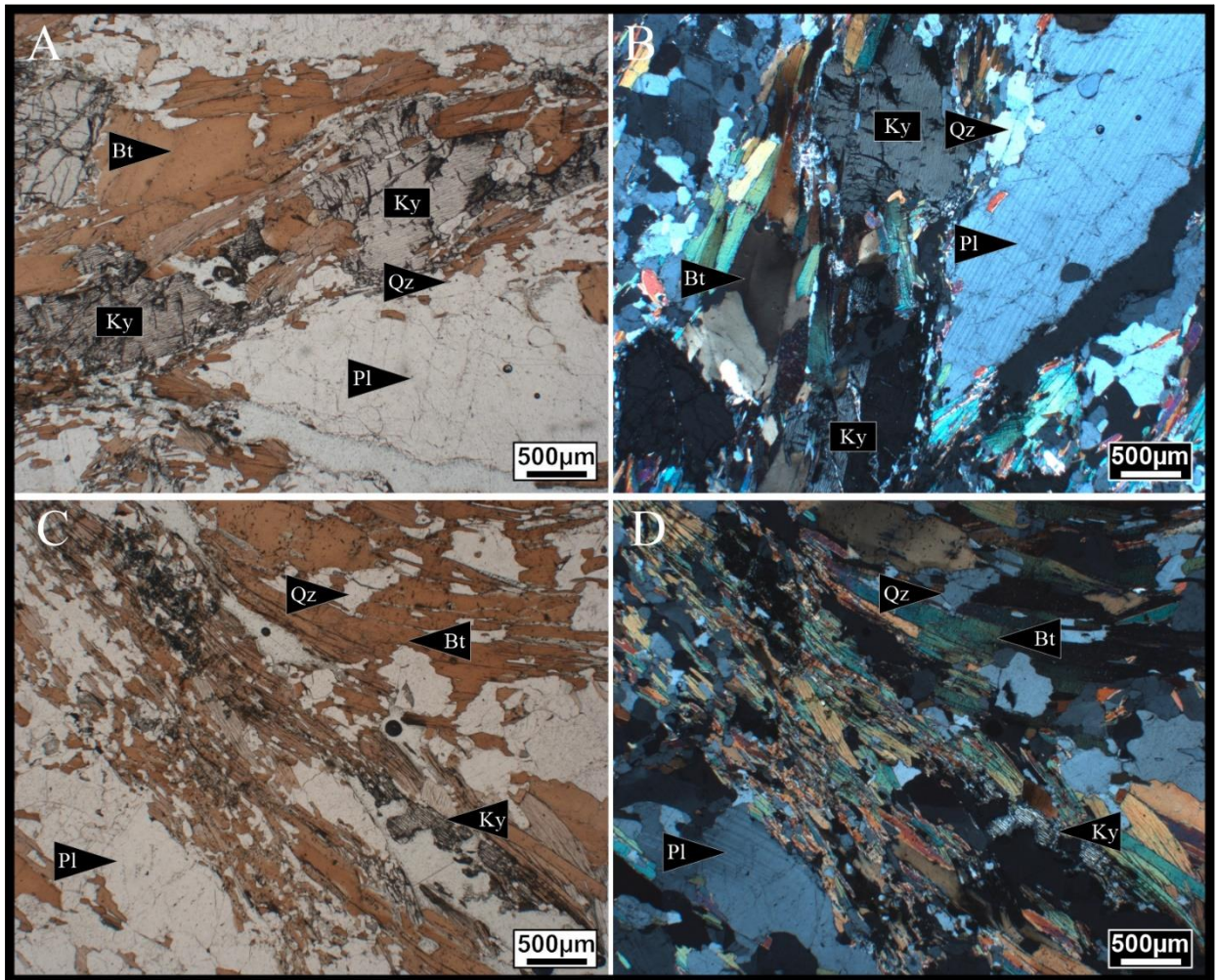


Figura 12: Fotomicrografia de porfiroblasto sin-tectônico de granada da amostra MG176. Os cristais de quartzo definem S_i , o qual apresenta formato sigmoidal. Em (A) os polarizadores estão paralelos e em (B) estão cruzados.

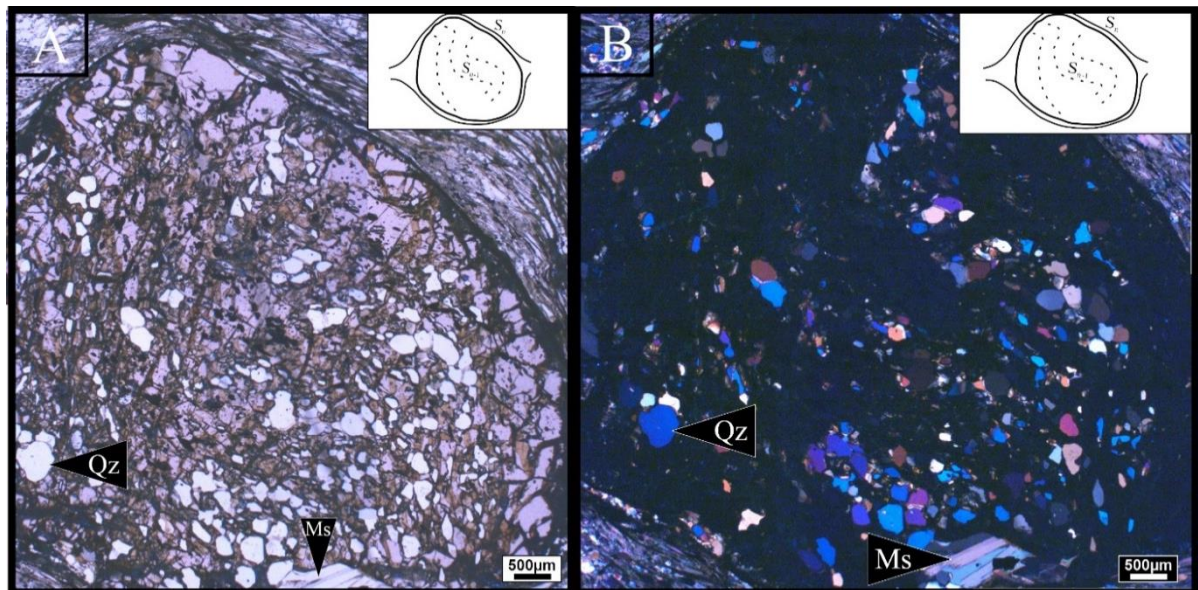
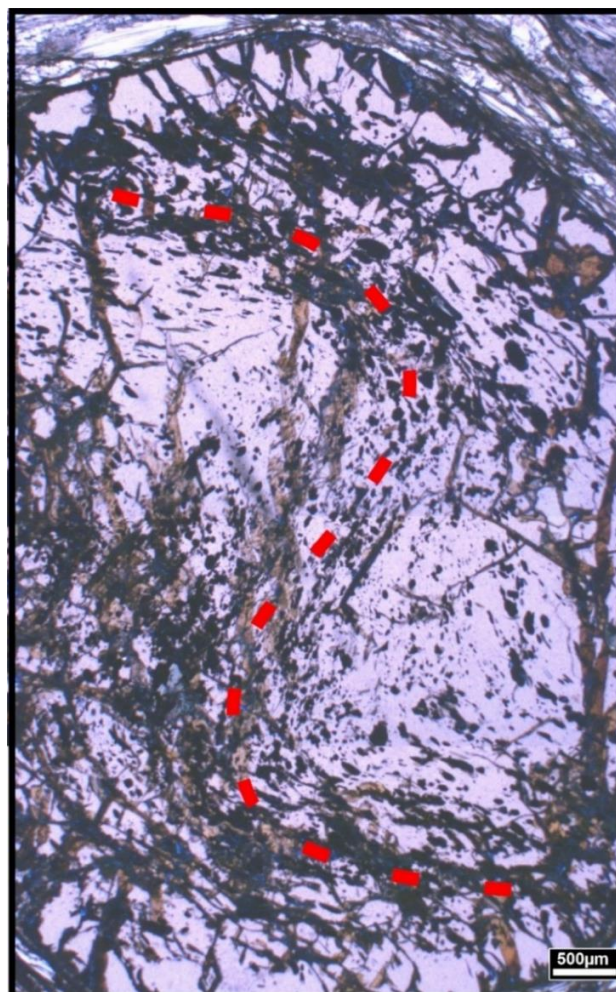


Figura 13: Fotomicrografia de porfiroblasto sin-tectônico de granada da amostra MG176. Cristais de ilmenita e magnetita definem a S_i , que apresenta padrão sigmoidal.



4.2. GEOCRONOLOGIA U-Th-Pb_T EM MONAZITA

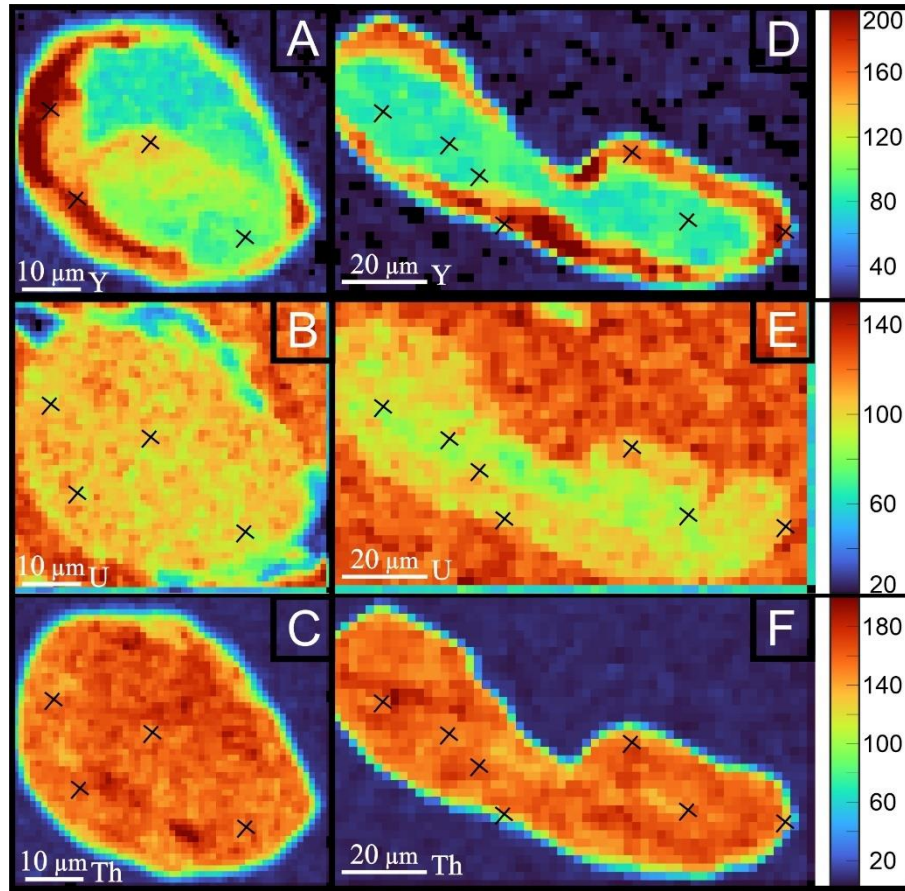
Foram analisados cristais de monazita, na matriz ou inclusos em granada ou cianita, das amostras GL09, MG173, MG175, MG176, RR2A1, RR4, RR4A e SF3-41 (Anexo A), totalizando 443 análises químicas pontuais. Para cada cristal, buscou-se analisar no mínimo dois pontos de interesse, baseando-se em domínios enriquecidos ou empobrecidos em ítrio, a fim de observar possíveis relações entre a idade e a química mineral, segundo postulado por Foster *et al.* (2002, 2003).

4.2.1. UNIDADE E

Foram analisadas quatro amostras dessa unidade (da base ao topo: GL09, MG173, RR2A1, MG175). A amostra GL09 está disposta na porção basal da unidade, sendo caracterizada como um cianita-granada-biotita-muscovita xisto feldspático. A maioria dos cristais de monazita são anédricos e alongados, com alguns cristais arredondados, e diâmetro médio de 125 μm (*e.g.*, Figura 14), exceto um cristal (Mnz22) que possui aproximadamente 275 μm . Nessa amostra foram analisados quinze cristais, onde apenas três estão em granada, totalizando 64 análises pontuais na matriz e 22 análises em cristais inclusos em granada.

No geral, os cristais de monazita são quimicamente heterogêneos, apresentam variado teor de Y e médio teor de Th (Anexo A). São observados, em algumas monazitas, zoneamentos de Y nas bordas dos cristais e menor teor no seu interior (Figuras 14A, D), entretanto o elemento tório apresenta caráter oposto, possuindo o interior mais enriquecido do que a borda do cristal (Figuras 14C, F). Os mapas de urânio não indicam zoneamento ou relação textural nos cristais, como observado nas Figuras 14B e E.

Figura 14: Mapas composicionais de Y, U e Th em monazitas da amostra GL09. Em (A), (B) e (C) mapas da monazita mnz2.2 e em (D), (E) e (F) mapas da monazita mnz1. Em “x” estão representados os pontos com análise quantitativa nesses cristais.



Para essa amostra, a datação U-Th-Pb_T em monazita na matriz indica idade média de 636 ± 3 Ma, já as encontradas inclusas em granada possuem idade média de 640 ± 5 Ma (Figura 15). Os cristais de monazita, tanto na matriz quanto inclusas nas granadas, possuem idade média semelhante, quando considerado o erro, e também apresentam variado conteúdo de Y₂O₃, mas com a maioria dos teores menor do que 1,0%, principalmente entre 0,2% e 0,5% (Figura 16).

Figura 15: Média ponderada das idades U-Th-Pb_T em monazitas, na matriz ou inclusas em granada, da amostra GL09. Linhas na horizontal indicam os valores médios. Os erros estão em 2σ.

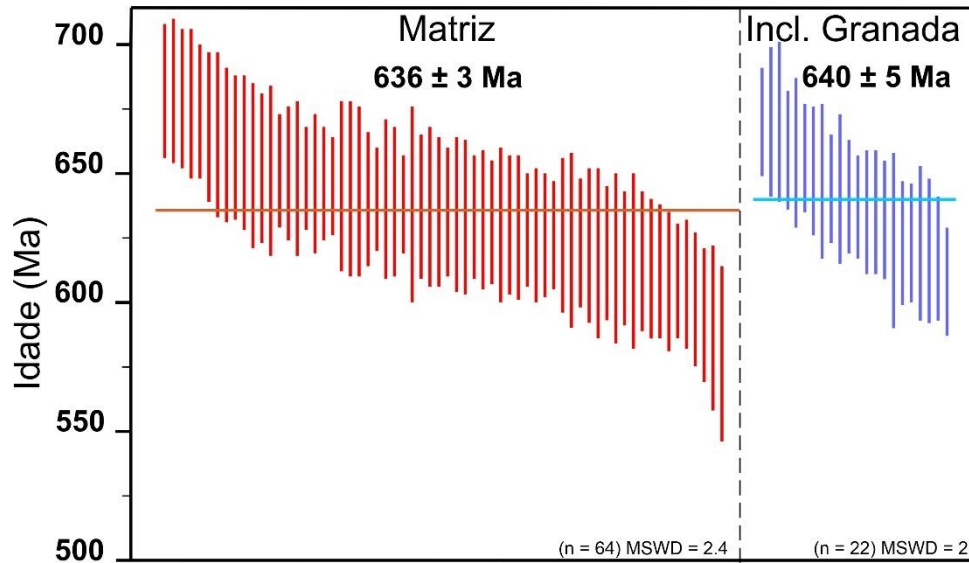
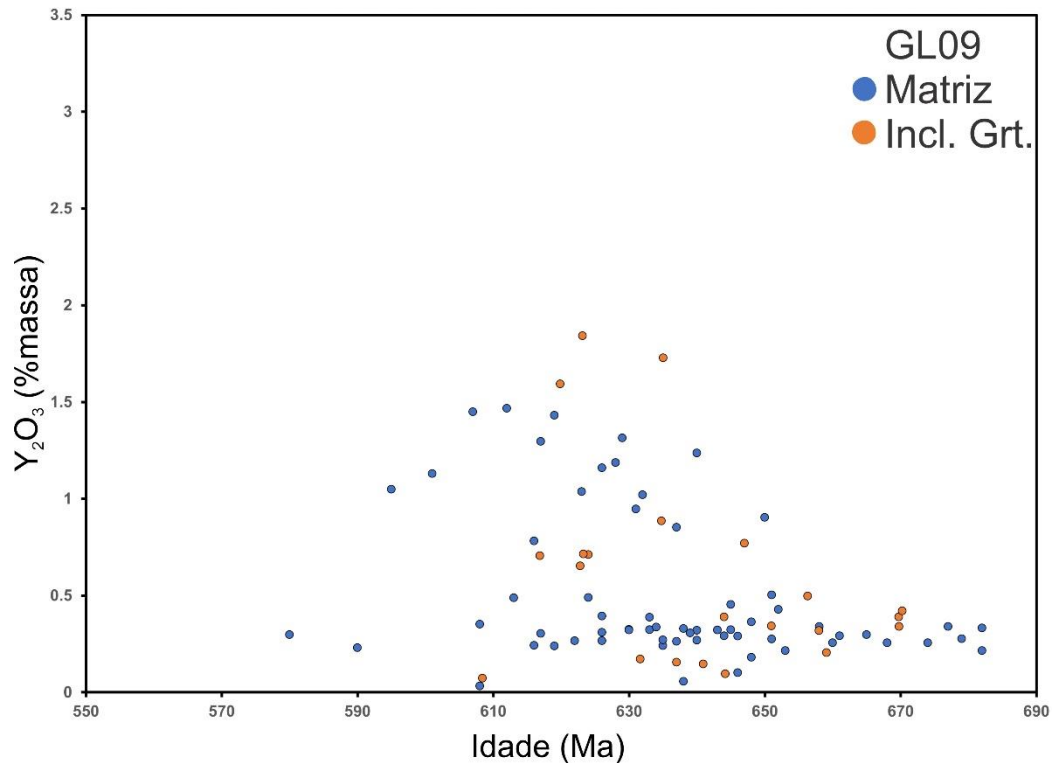


Figura 16: Diagrama de dispersão Y₂O₃ x idade para as monazitas da amostra GL09.



A amostra MG173 está localizada na porção central da Unidade E e é classificada como cianita-granada-biotita-muscovita xisto com estauroлита, rocha representativa da unidade. A maioria dos cristais de monazita são subédricos e arredondados a ovalados, e possuem diâmetro entre 70 μm e 110 μm, exceto os cristais Mnz1 e Mnz2, que possuem aproximadamente 320 μm e 280 μm, respectivamente (*e.g.*, Figura 17). Nessa amostra foram analisados vinte cristais,

metade está incluída em granada, com 44 análises pontuais, e a outra metade disposta na matriz, com 63 análises pontuais.

No geral os cristais de monazita são quimicamente heterogêneos, apresentando dois grupos distintos: um com alto teor de Y e médio de Th; e outro com baixo teor de Th e Y (Anexo A). O zoneamento de Y é comum no primeiro grupo de cristais, normalmente ocorrendo em todo o cristal e sem zoneamento de Th, exceto no núcleo da Mnz1, que apresenta alto teor de Th (Figuras 17A, C). O segundo grupo apresenta fraco zoneamento de Th e Y na borda e de U no núcleo (Figuras 18A, B e C). Os mapas de urânio indicam que possa existir correlação entre esse elemento e Th, uma vez que apresentam relações texturais semelhantes (*e.g.*, Figuras 17A e B) ou opostas (*e.g.*, Figuras 18A e B).

Figura 17: Mapas composicionais de Th, U e Y em monazitas da amostra MG173. Em (A), (B) e (C) mapas das monazitas mnz1, maior, e mnz2, menor. Em “x” estão representados os pontos com análise quantitativa nesses cristais.

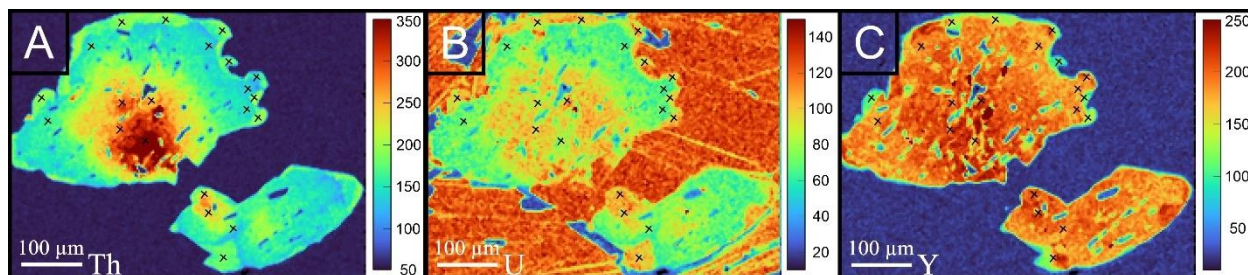
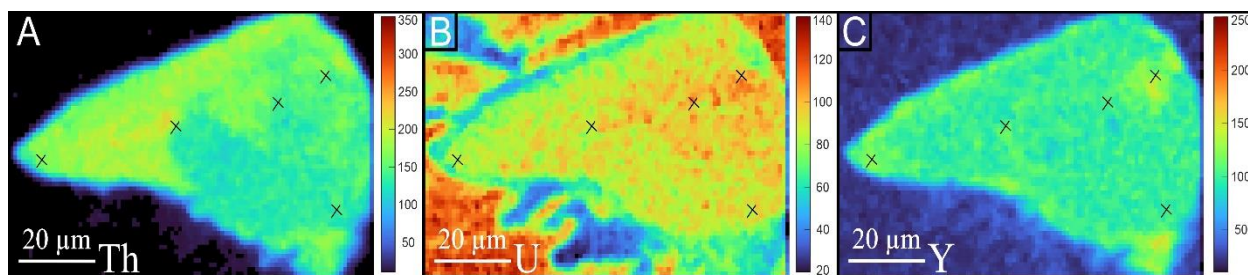


Figura 18: Mapas composicionais de Th, U e Y em monazitas da amostra MG173. Em (A), (B) e (C) mapas das monazitas mnz8.1. Em “x” estão representados os pontos com análise quantitativa nesses cristais.



Na amostra MG173, resultados obtidos para as monazitas na matriz indicam idade média de 613 ± 4 Ma, já as encontradas incluídas em granada possuem idade média de 618 ± 5 Ma (Figura 19). Os cristais de monazita apresentam teores variados de Y_2O_3 , entre 2,0% e 0,1% (Figura 20). Pela relação Y_2O_3 x idade é observado que não existe um padrão nos cristais da matriz, mas os cristais de monazita incluídas em granada podem ser separadas em dois grupos, um com teor de Y_2O_3 próximo a 1,5%, que apresenta idade média de 612 ± 6 Ma, e outro com teores abaixo de 1,0%, com idade média de 627 ± 8 Ma. Essa variação pode ser resultado da

dissolução parcial das bordas das granadas 3 e 4 (Figura 21B), formando monazita rica em Y ou laminação composicional, marcado por bandas com presença de estauroлита, próximo às granadas 3 e 4, ou com ausência desse mineral, próximo às granadas 1 e 2.

Figura 19: Média ponderada das idades U-Th-Pb_T em monazitas, na matriz ou inclusas em granada, da amostra MG173. Linhas na horizontal indicam os valores médios. Os erros estão em 2σ. * Idade média para monazitas inclusas em granada e que apresentam teor de Y₂O₃ maior que 1,0%; ** Idade média para monazitas inclusas em granada e que apresentam teor de Y₂O₃ menor que 1,0%.

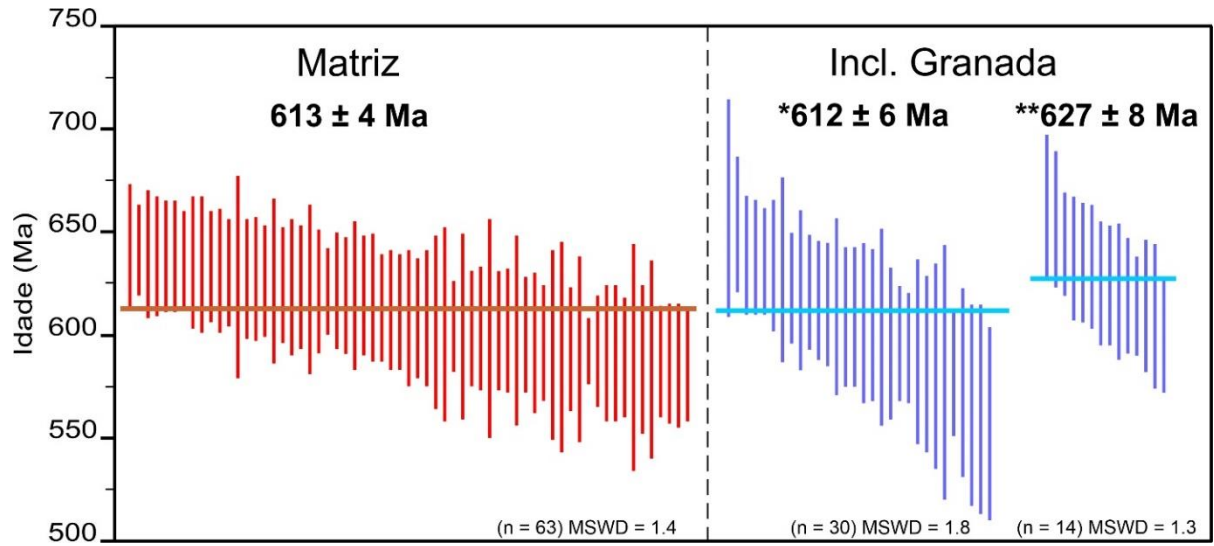


Figura 20: Diagrama de dispersão Y₂O₃ x idade para as monazitas da amostra MG173.

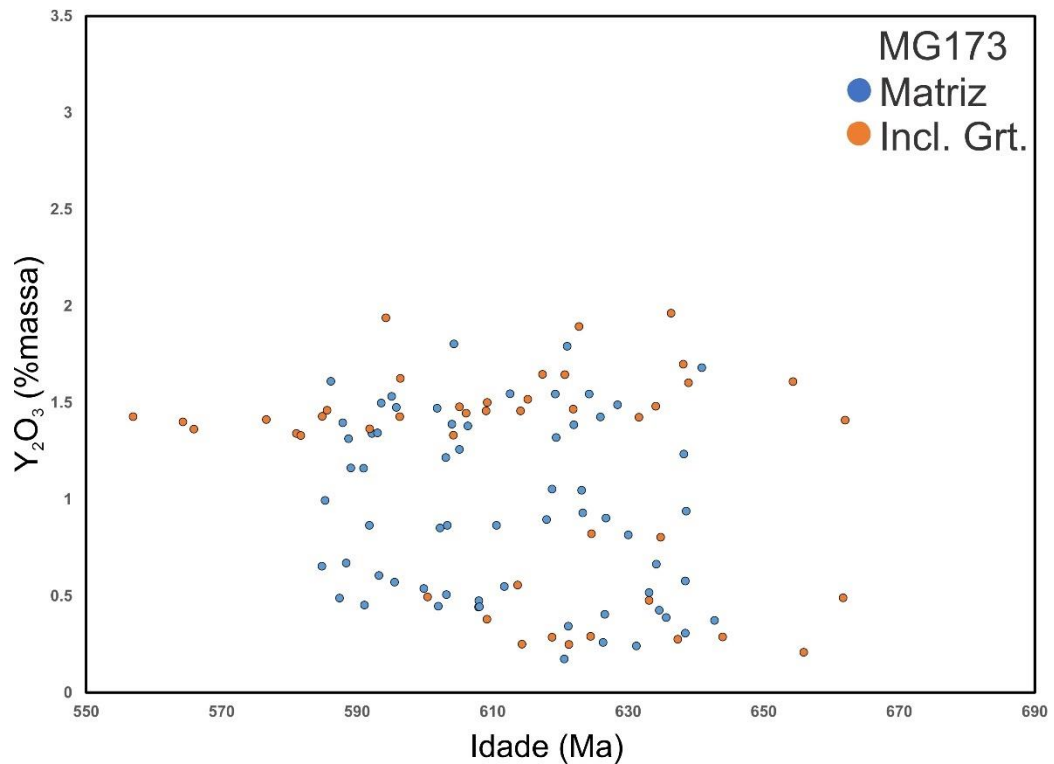
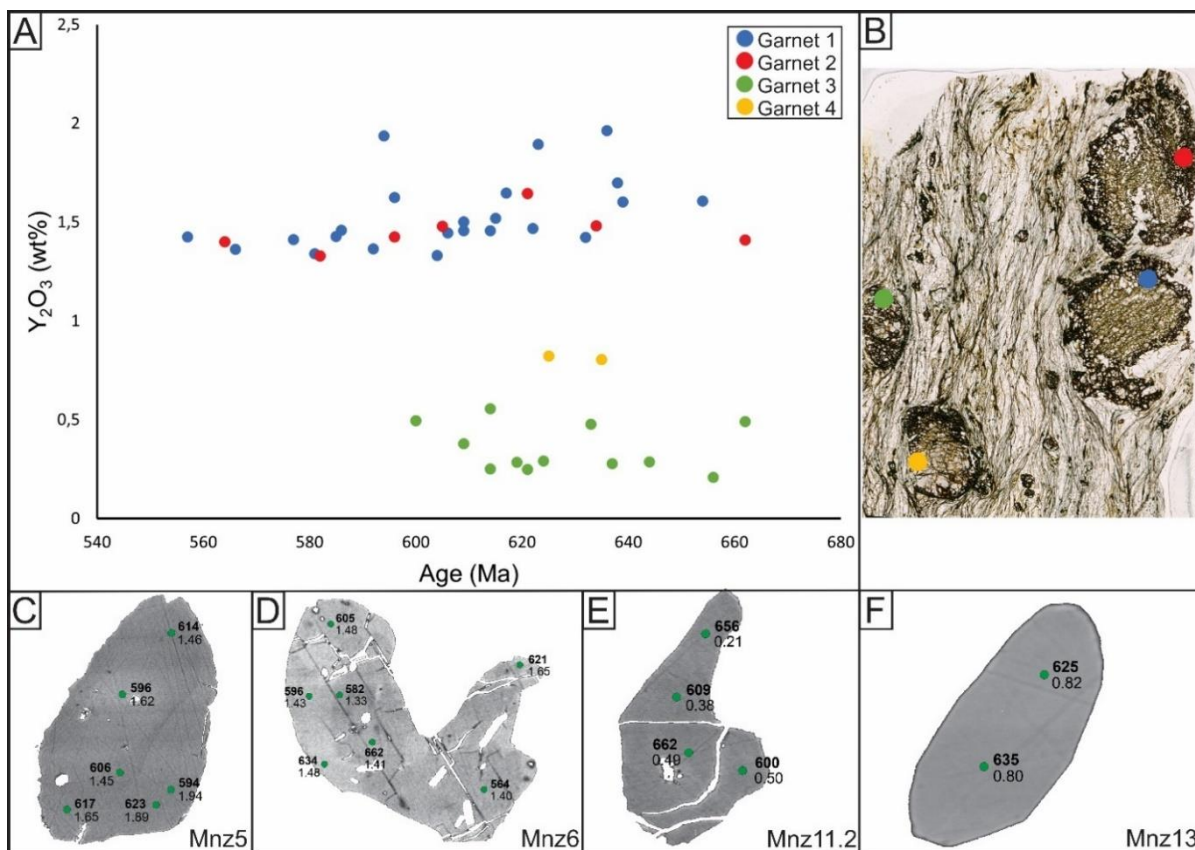


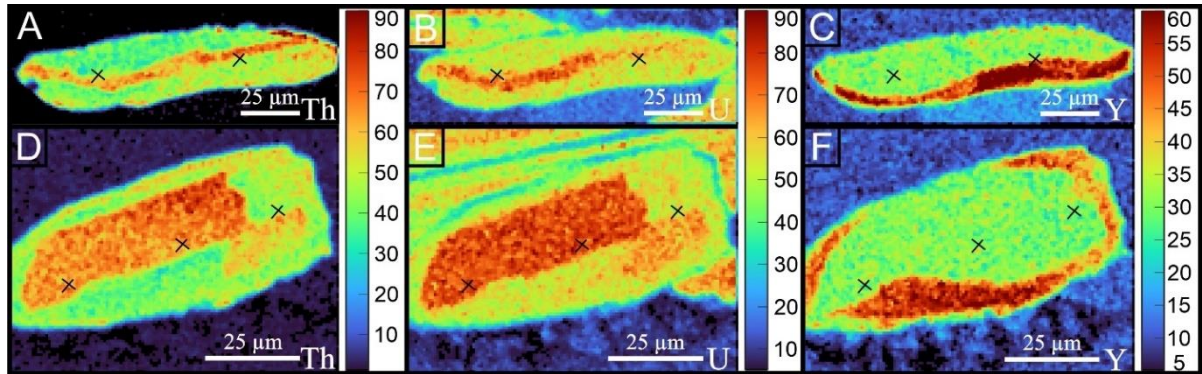
Figura 21: Diagrama de dispersão das monazitas inclusas em granadas da amostra MG173, Unidade E. Em (A) é possível observar as semelhanças e diferenças nos teores de Y_2O_3 das monazitas inclusas. Em (B) a localização das monazitas apresentadas em C, D, E e F.



A amostra RR2A1, assim como a anterior, também ocorre na porção central da Unidade E e é classificada como um cianita-granada-biotita-muscovita xisto feldspático, coletado em uma lente com algumas centenas de metros de comprimento e poucas dezenas de metros de largura. A maioria dos cristais de monazita são subédricos, ovalados a alongados e possuem diâmetro entre 50 μm e 80 μm , exceto os cristais Mnz13 e Mnz14, que possuem aproximadamente 135 μm e 110 μm , respectivamente (*e.g.*, Figura 22). Nessa amostra foram analisados sete cristais, todos dispostos na matriz, totalizando 24 análises pontuais.

Em sua maioria, os cristais de monazita são quimicamente heterogêneos, apresentam concentrações baixas de Y e Th e U (Anexo A). Os cristais apresentam zoneamento de Y em suas bordas, sendo mais enriquecido do que o núcleo (Figuras 22C e F), enquanto o oposto é observado para o Th e U, que geralmente ocorrem enriquecidos no núcleo em relação as bordas, indicando possível relação entre os elementos (Figuras 22A, B, D e E).

Figura 22: Mapas composicionais de Th, U e Y em monazitas da amostra RR2A1. Em (A), (B) e (C) mapas da monazita mnz13 e em (D), (E) e (F) mapas da monazita mnz10. Em “x” estão representados os pontos com análise quantitativa nesses cristais.



Na amostra RR2A1, os resultados para monazitas na matriz (Figura 23A) indicam uma idade média de 579 ± 4 Ma, entretanto utilizando o método da isócrona química ThO_2^* -PbO (CHIME), é obtida uma idade mais antiga, de 622 ± 26 Ma (Figura 23B). A diferença dessas idades e possíveis motivos serão discutidos no próximo capítulo. Todos os cristais de monazita apresentam teor de Y_2O_3 abaixo de 0,7%, ocorrendo principalmente na faixa entre 0,1% e 0,3% (Figura 24).

Figura 23: Média ponderada das idades U-Th-Pb_T em monazitas da amostra RR2A1 (A) e idade determinada pelo método da isócrona química ThO_2^* -PbO (CHIME) (B). Linhas na horizontal indicam os valores médios. Os erros estão em 2σ .

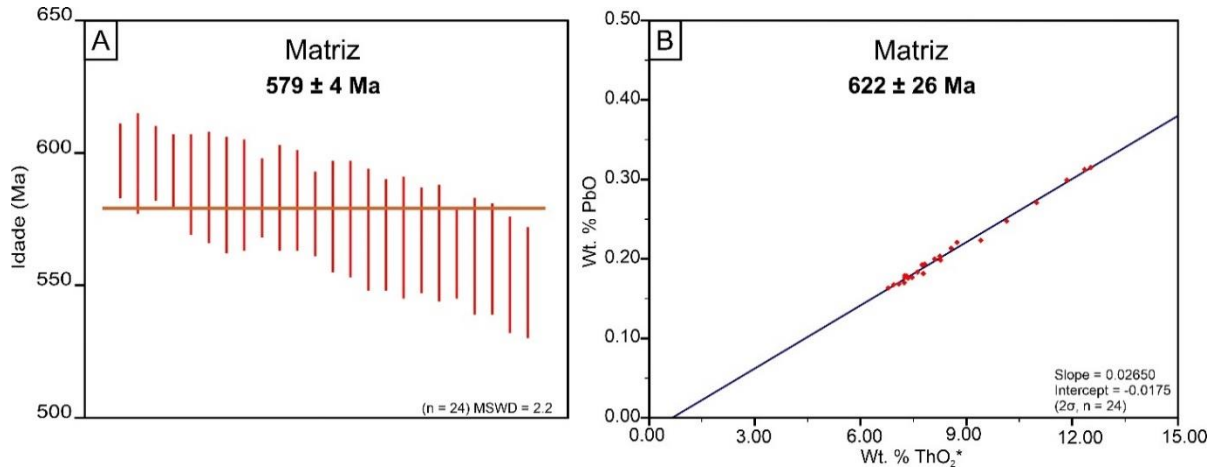
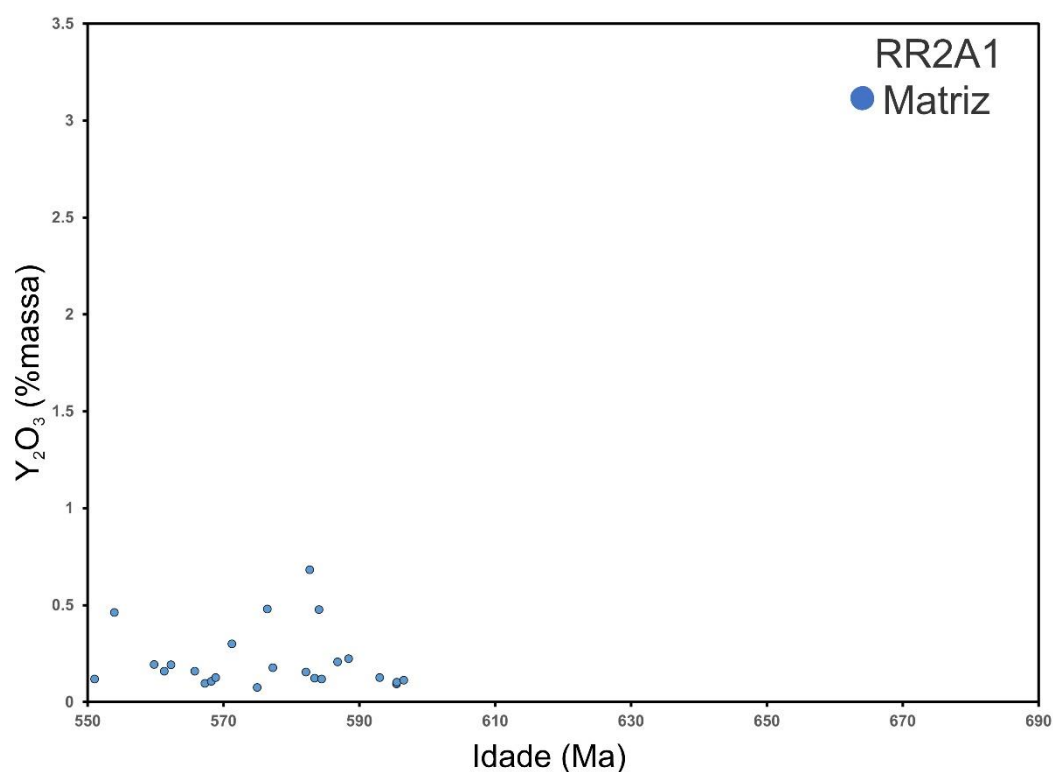


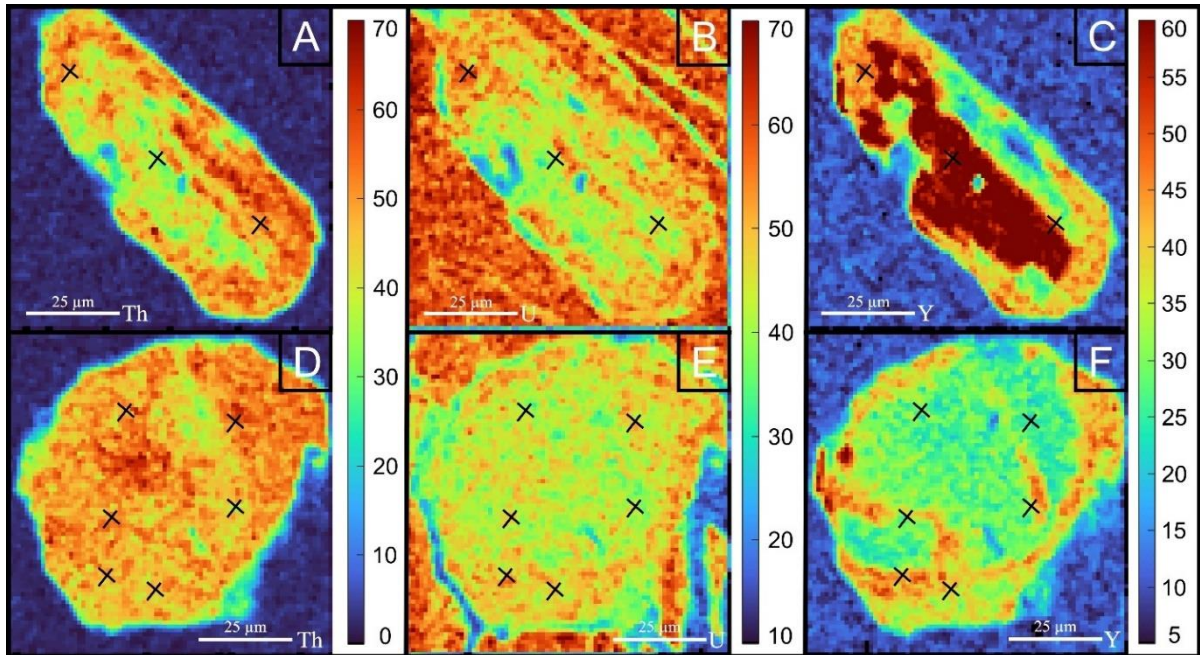
Figura 24: Diagrama de dispersão Y_2O_3 x idade para as monazitas da amostra RR2A1.



No topo da unidade ocorre a amostra MG175, sendo classificada como cianita-granada-biotita-muscovita xisto. A maioria dos cristais de monazita são subédricos, ovalados e possuem diâmetro entre 50 μm e 80 μm (*e.g.*, Figura 25). Nessa amostra foram analisados seis cristais, todos na matriz e totalizam 22 análises pontuais. Assim como na amostra anterior, não ocorrem monazitas inclusas em granada.

Os cristais de monazitas são quimicamente heterogêneos, apresentam concentrações baixas de Y, U e Th (Anexo A). Os cristais podem ser separados em dois grupos texturais com base no Y: com o núcleo enriquecido em relação a borda; e outro com o núcleo empobrecido em relação a borda (Figuras 25C e F). Nos dois grupos o Th apresenta concentração semelhante por todo o cristal, sem possuir relação com o Y ou U (Figuras 25A, B, D e E), exceto na monazita mnz8 (Figuras 25D e F), que possuem relação inversa (Figuras 25A e C).

Figura 25: Exemplos de mapas composicionais de Th, U e Y em monazitas da amostra MG175. Em (A), (B) e (C) mapas da monazita mnz8 e em (D), (E) e (F) mapas da monazita mnz7. Em “x” estão representados os pontos com análise quantitativa nesses cristais.



Na amostra MG175, os resultados obtidos para monazita na matriz (Figura 26) indicam uma idade média de 604 ± 5.4 Ma. Todos os cristais analisados apresentam teores de Y_2O_3 menores que 1,0% (Figura 27).

Figura 26: Média ponderada das idades U-Th-Pb_T em monazitas da amostra MG175. Linhas na horizontal indicam os valores médios. Os erros estão em 2σ .

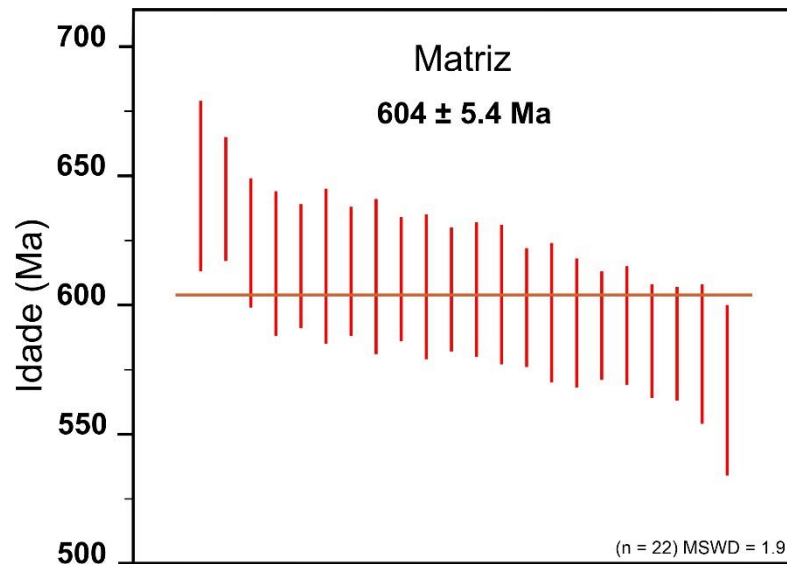
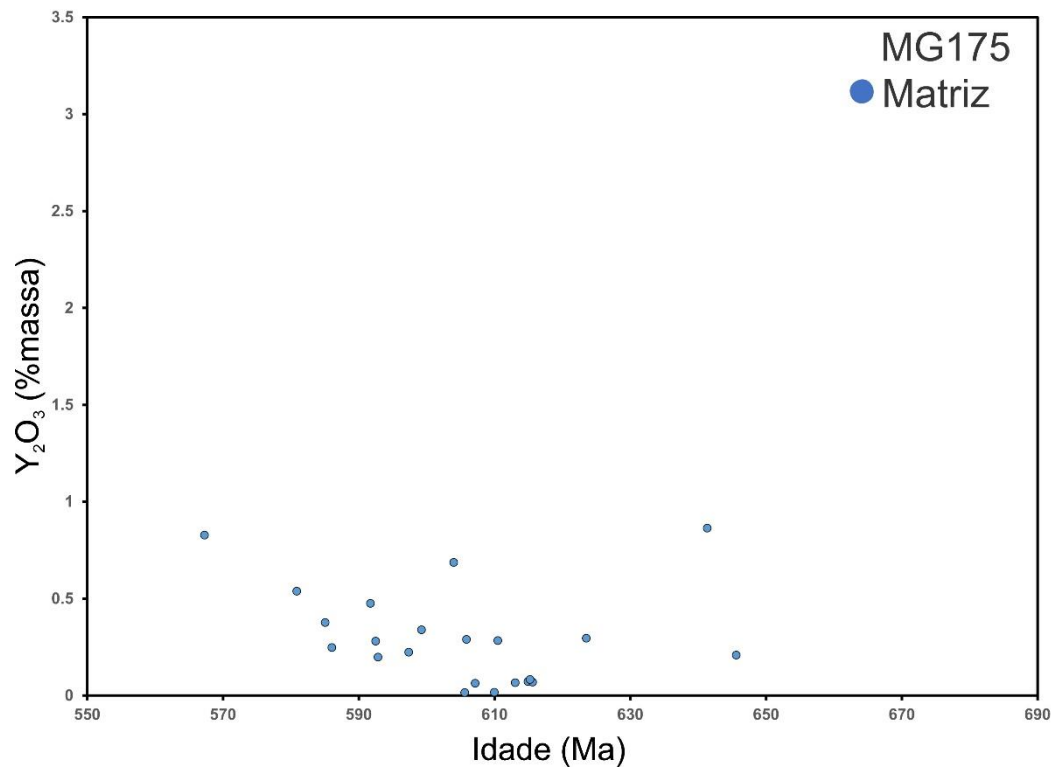


Figura 27: Diagrama de dispersão $Y_2O_3 \times$ idade para as monazitas da amostra MG175.



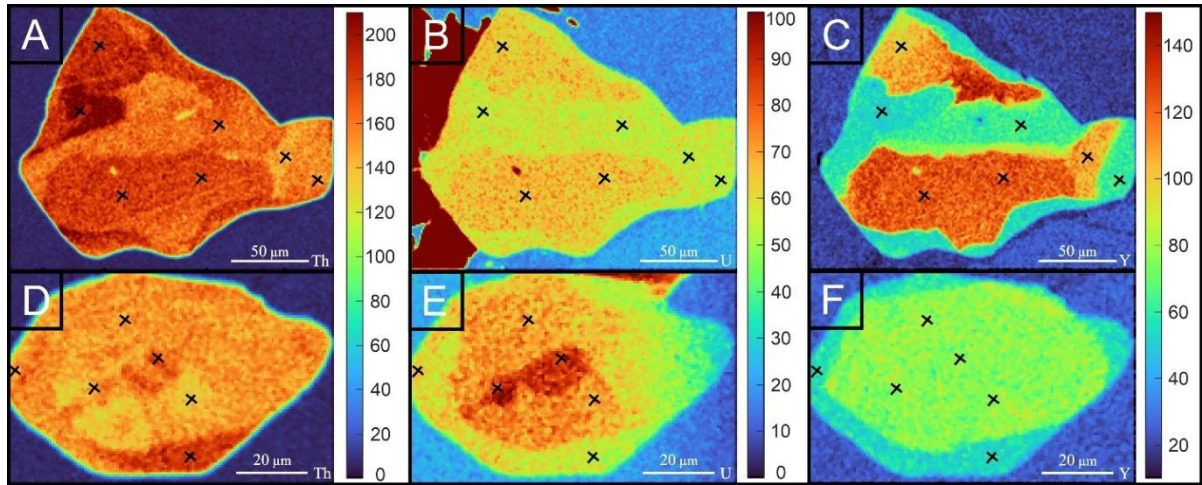
4.2.2. UNIDADE F

A amostra RR4B é um granada-biotita gnaiss com porfiroblastos de feldspato.

A maioria dos cristais de monazita são subédricos a anédricos, ovalados a ameboides e possuem diâmetro entre 80 μm e 250 μm (*e.g.*, Figura 28). Nessa amostra foram analisados seis cristais, os quais três estão inclusos em granada, com 12 análises pontuais, e três dispostos na matriz, com 18 análises pontuais.

Em sua maioria, os cristais de monazita são quimicamente heterogêneos, apresentam concentrações médias de Y e U e altas de Th (Anexo A). A monazita mnz7 apresenta textura *patchy* (Figuras 28A, B e C), sendo mais bem representada no mapa de Th, indicando dissolução-precipitação. A monazita mnz2 possui teores de Y e Th menores do que a anterior, mas é possível observar que o interior é mais enriquecido em Y e U do que a borda (Figuras 28E e F), enquanto o inverso é observado para Th (Figura 28D).

Figura 28: Mapas composicionais de Th, U e Y em monazitas da amostra RR4B. Em (A), (B) e (C) mapas da monazita mnz7 e em (D), (E) e (F) mapas da monazita mnz2. Em “x” estão representados os pontos com análise quantitativa nesses cristais.



Os resultados obtidos para monazitas na matriz (Figura 29) indicam idade média de 620.5 ± 5.5 Ma, enquanto as encontradas inclusas em granada são mais antigas e possuem idade média de 628 ± 7 Ma. Todas as monazitas datadas apresentam teor de Y_2O_3 abaixo de 1% (Figura 30).

Figura 29: Média ponderada das idades U-Th-Pb_T em monazitas, na matriz e inclusas em granada, da amostra RR4B. Linhas na horizontal indicam os valores médios. Os erros estão em 2σ .

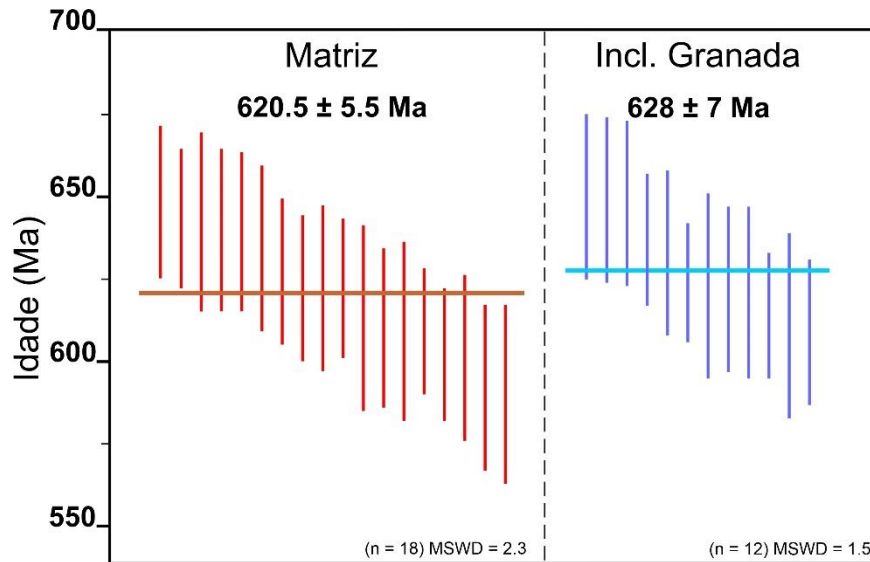
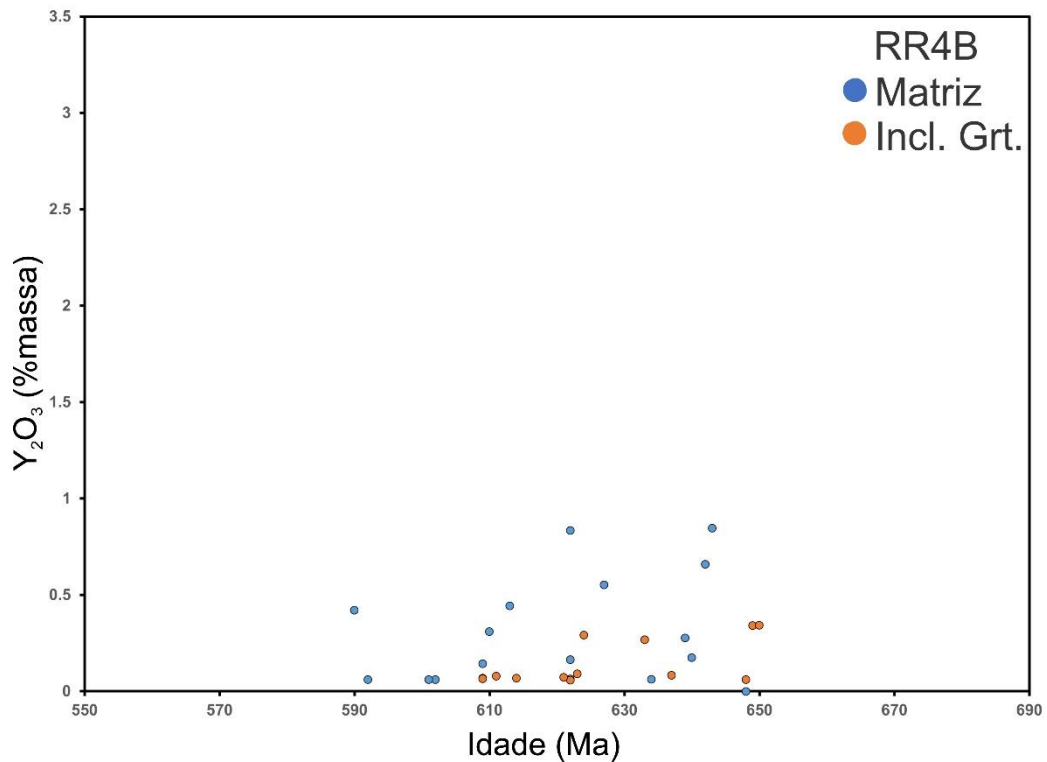


Figura 30: Diagrama de dispersão Y_2O_3 x idade para as monazitas da amostra RR4B.



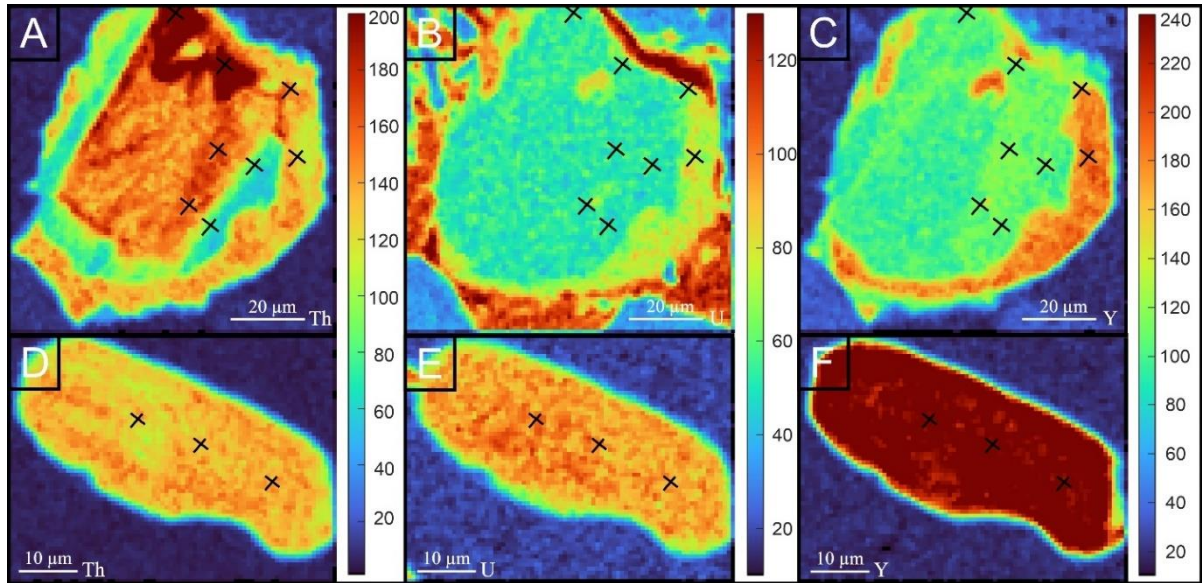
4.2.3. UNIDADE G

Na base da Unidade G está localizada a amostra RR4A, sendo classificada como um cianita-granada-muscovita-biotita xisto com estaurolita.

A maioria dos cristais de monazita são subédricos a anédricos, alongados a amebóides e possuem diâmetro entre 40 μm e 80 μm (*e.g.*, Figura 31). Nessa amostra foram analisados oito cristais, sendo três inclusos em granada, com 18 análises pontuais, e cinco dispostos na matriz, com 15 análises pontuais.

Em sua maioria, os cristais de monazita são quimicamente heterogêneos (*e.g.*, mnz2 – Figuras 31D, E e F), apresentam concentrações altas de Y, médias de U e Th (Anexo A). Os cristais podem apresentar zoneamento de Y em suas bordas (*e.g.*, mnz2 - Figura 31C) ou totalmente enriquecidos (*e.g.*, mnz6 - Figura 31F). Esse mesmo padrão também é observado nos mapas de U (Figuras 31B e E). O mapa de Th da monazita mnz6 (Figura 31A) mostra parte do núcleo e a borda enriquecido nesse elemento, com algumas porções com menor teor.

Figura 31: Mapas composicionais de Th, U e Y em monazitas da amostra RR4B. Em (A), (B) e (C) mapas da monazita mnz7 e em (D), (E) e (F) mapas da monazita mnz2. Em “x” estão representados os pontos analisados nesses cristais.



Análises em cristais de monazita na matriz da amostra RR4A indicam idade média de 648 ± 5 Ma, enquanto as inclusas em granada possuem idade média de 638 ± 6 Ma (Figura 32). Nota-se que os cristais de dispostos na matriz são mais enriquecidos em ítrio do que aqueles na granada, que apresentam dois padrões distintos: um empobrecido em ítrio ($< 1,0\%$) com idades média de 629 ± 7 Ma e outro enriquecido em ítrio ($> 1,0\%$) com idade média de 658 ± 11 Ma (Figura 33).

Figura 32: Média ponderada das idades U-Th-Pb_T em monazitas, na matriz e inclusas em granada, da amostra RR4A. Linhas na horizontal indicam os valores médios. Os erros estão em 2σ .

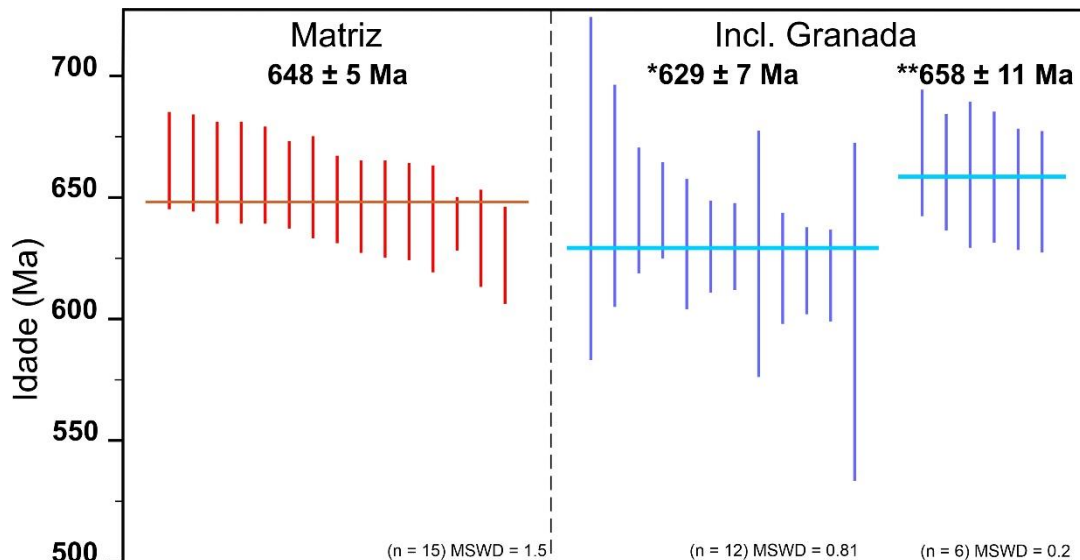
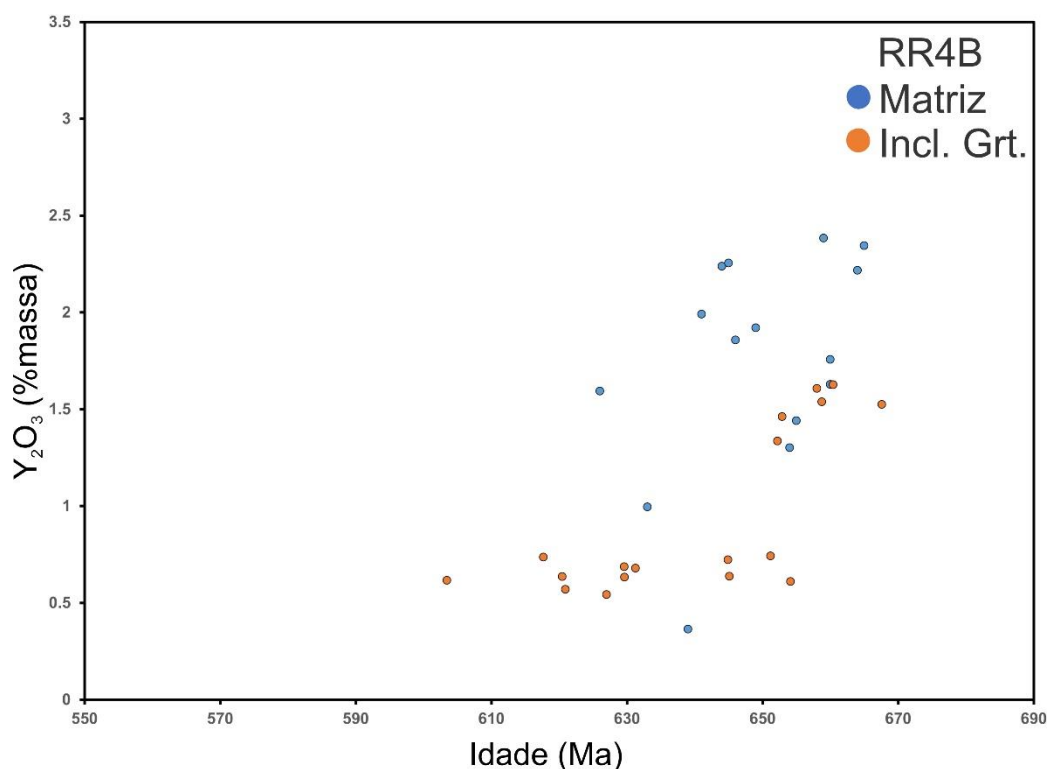


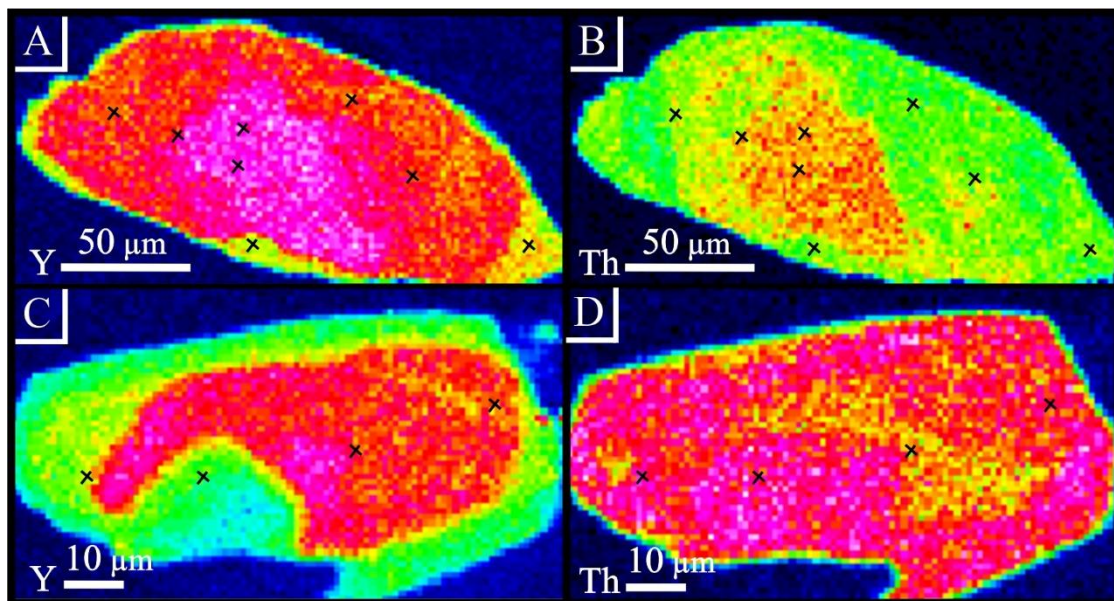
Figura 33: Diagrama de dispersão Y_2O_3 x idade para as monazitas da amostra RR4A.



A amostra MG176 ocorre próximo a base da unidade, sendo classificada como cianita-granada-muscovita-biotita xisto. A maioria dos cristais de monazita são subédricos e arredondados a ovalados, e possuem diâmetro entre 75µm e 150µm, exceto o cristal Mnz16 que possui aproximadamente 205µm (*e.g.*, Figura 34). Nessa amostra foram analisados dezoito cristais, os quais seis estão inclusos em granada, com 17 análises químicas pontuais, e doze estão dispostos na matriz, com 58 análises químicas pontuais.

Os cristais de monazita são, em sua maioria, quimicamente heterogêneos, apresentam alto a muito alto teor de Y e alto Th (Anexo A). O zoneamento de Y é comum nos cristais de monazita, normalmente ocorrendo no núcleo, podendo possuir o núcleo com teores mais altos ou baixos de Th (Figura 34A-B). As monazitas inclusas em granada geralmente são menores ($\pm 70 \mu\text{m}$) do que as que ocorrem na matriz ($\pm 140 \mu\text{m}$), e possuem o núcleo zoneado em Y.

Figura 34: Mapas composicionais de Th, U e Y em monazitas da amostra MG176. Em (A), (B) e (C) mapas da monazita mnz16 e em (D), (E) e (F) mapa da monazita mnz12. Em “x” estão representados os pontos analisados nesses cristais.



Para a amostra MG176, os resultados obtidos para cristais de monazita na matriz indicam idade média de 608 ± 4 Ma, enquanto as inclusas em granada possuem idade média de 609 ± 6 Ma (Figura 35). Os teores de Y_2O_3 para essas monazitas (Figura 36) são os maiores dentre as rochas amostradas, com teores máximos próximos a 3,5% e média de aproximadamente 2,0%. Tanto as monazitas da matriz, quanto inclusos em granada apresentam teores semelhantes.

Figura 35: Média ponderada das idades U-Th-Pb_T em monazitas, na matriz ou inclusos em granada, da amostra MG176. Linhas na horizontal indicam os valores médios. Os erros estão em 2σ .

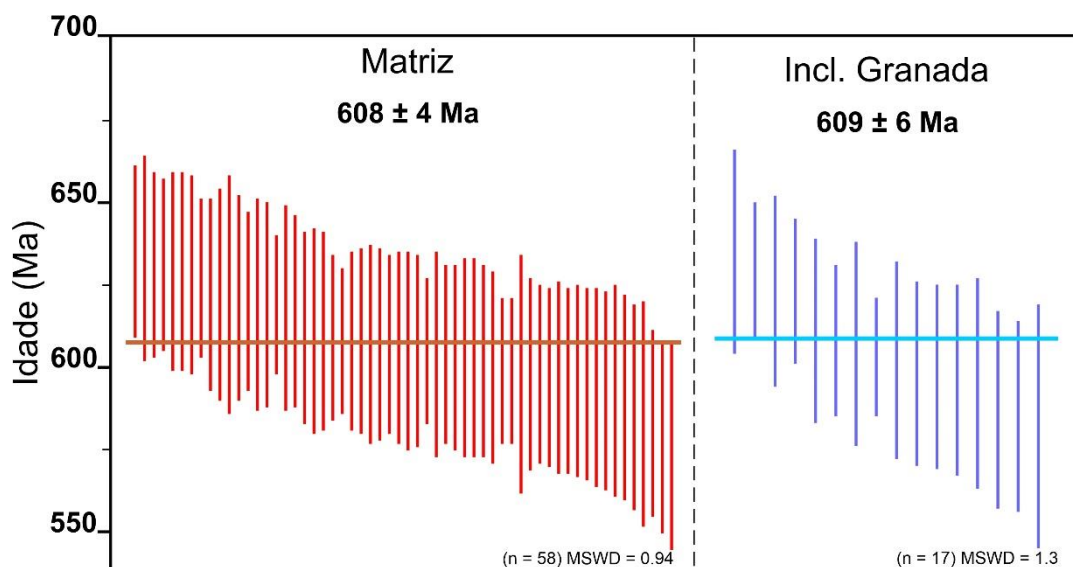
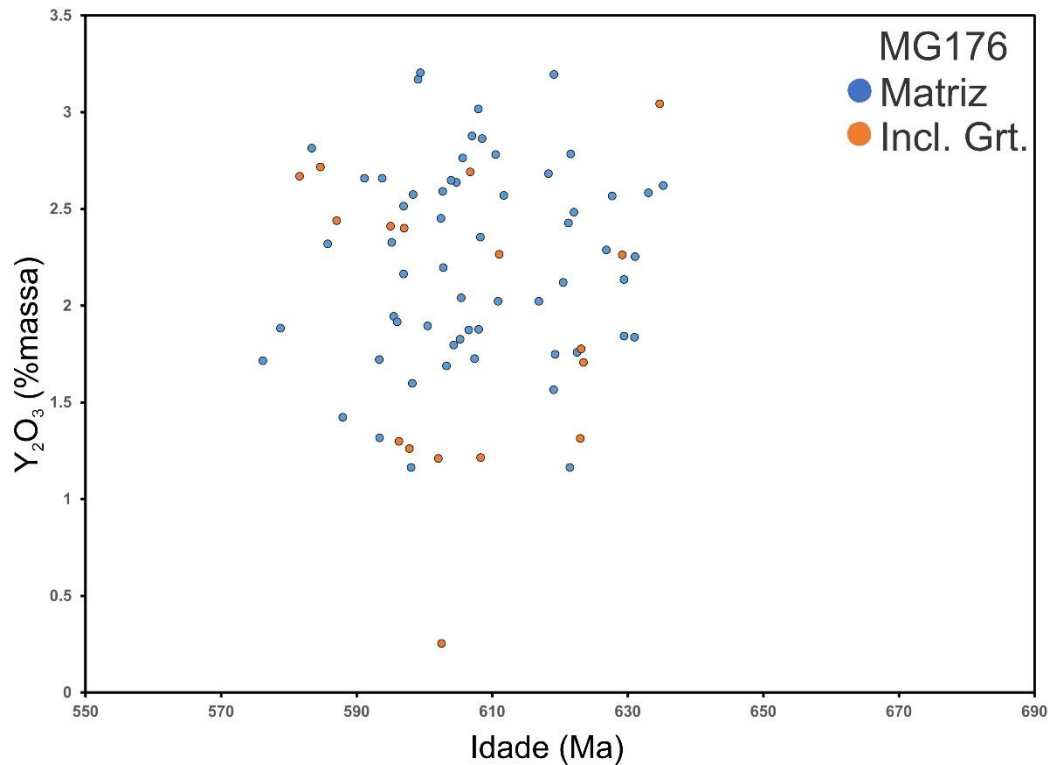


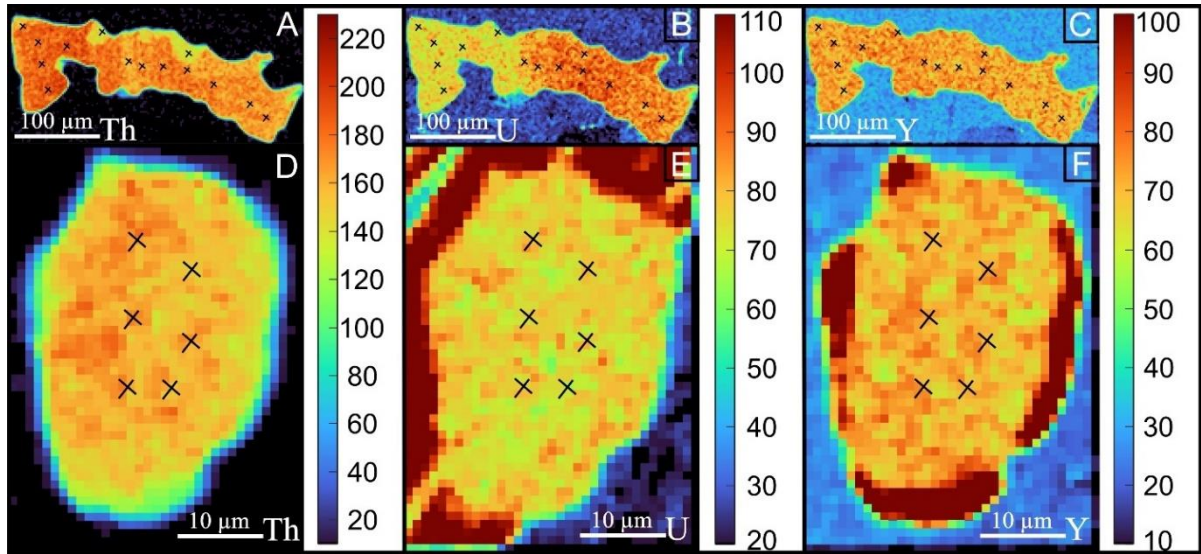
Figura 36: Diagrama de dispersão Y_2O_3 x idade para as monazitas da amostra MG176.



A amostra SF3-41 é representativa do topo da unidade, sendo classificada como um plagioclásio-cianita-granada-biotita xisto. A maioria dos cristais de monazita são anédricos e arredondados a ovalados, e possuem diâmetro entre 35 μm e 65 μm , exceto dois cristais (Mnz4 e Mnz6) que possuem aproximadamente 120 μm e 350 μm , respectivamente (*e.g.*, Figura 37). Nessa amostra foram analisados oito cristais, onde dois estão inclusos em granada, totalizando 22 análises químicas, dois inclusos em cianita, totalizando 8 análises químicas, e três estão dispostos na matriz, totalizando 28 análises químicas.

Os cristais de monazita são quimicamente heterogêneos, apresentam baixo teor de Y, médio teor de U e médio a alto de Th (Anexo A). Apenas em dois cristais são observados zoneamentos de Y (mnz1.1 e mnz1.2), que estão localizados nas bordas, onde apresentam-se enriquecidos em Y e empobrecidos de Th (Figuras 37D e F). Contudo, o oposto não é observado no núcleo desses cristais, que apresentam teor médio nos três elementos (Figuras 37D, E e F). As monazitas inclusas em granada (mnz6 e mnz7) são pobres em Y, mas possuem teor médio de U e elevado de Th, que diminuem gradualmente de uma extremidade a outra do cristal (Figuras 37A, B e C).

Figura 37: Mapas composicionais de Th, U e Y em monazitas da amostra SF3-41. Em (A), (B) e (C) mapas da monazita mnz6 e em (D), (E) e (F) mapas da monazita mnz1.1. Em “x” estão representados os pontos com análise quantitativa nesses cristais.



Para a amostra SF3-41 os resultados obtidos para monazitas na matriz indicam idade média de 623 ± 6 Ma, enquanto as inclusas em granada possuem idade média de 628 ± 6 Ma e as inclusas em cianita apresentam idade média de 623 ± 8 Ma, no entanto cada cristal de cianita apresenta idade distinta, de 630 ± 11 Ma e 616 ± 11 Ma (Figuras 38, 40). Os teores de Y_2O_3 para essas monazitas (Figura 39) apresentam características semelhantes, todos os cristais apresentam quantidade de óxido de ítrio (III) abaixo de 0,3%. Essa baixa concentração é a menor encontrada para as rochas analisadas, e possuem teor médio de 0,15%, semelhante ao valor encontrado para as monazitas da amostra RR2A1.

Figura 38: Média ponderada das idades U-Th-Pb_T em monazitas, na matriz ou inclusas em granada ou cianita, da amostra SF3-41. Linhas na horizontal indicam os valores médios. Os erros estão em 2σ .

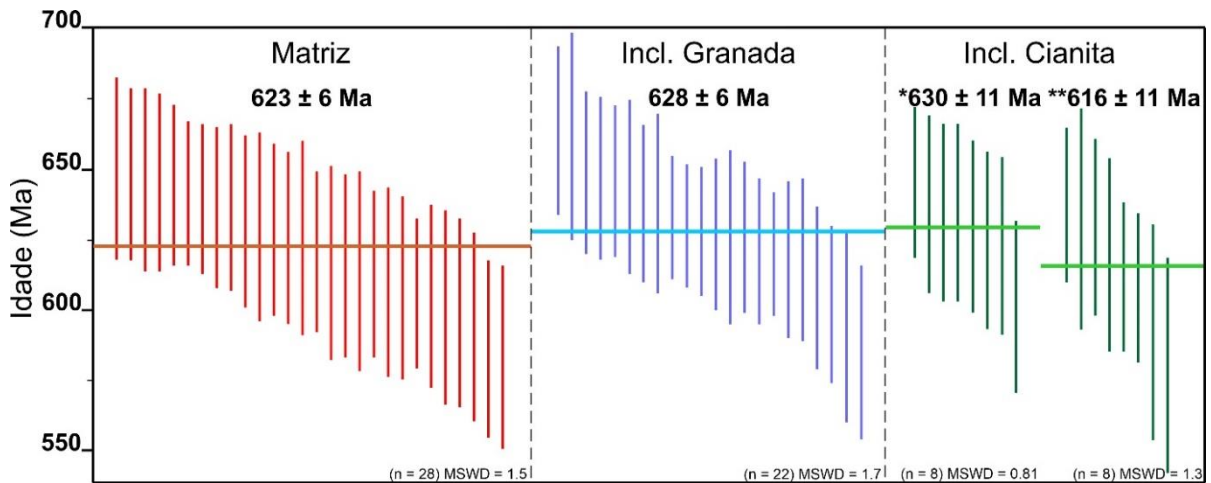


Figura 39: Diagrama de dispersão $Y_2O_3 \times$ idade para as monazitas da amostra SF3-41.

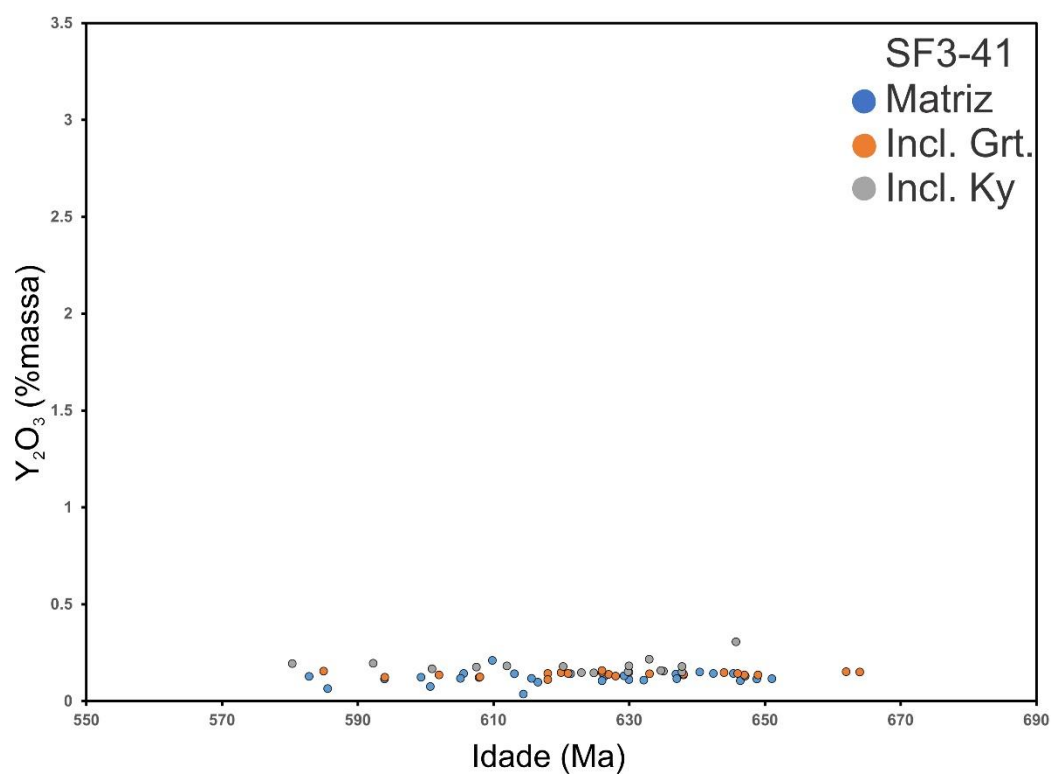
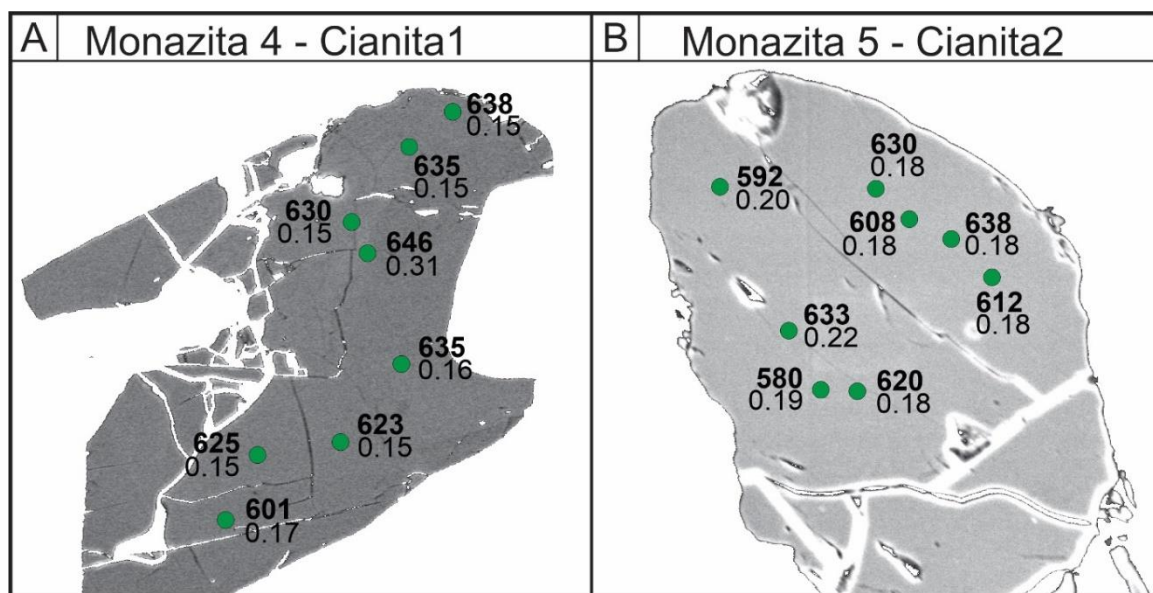


Figura 40: Imagens BSE das monazitas inclusas em cianitas da amostra SF3-41. Apesar de possuírem teor de Y_2O_3 semelhante, apresentam idades distintas.

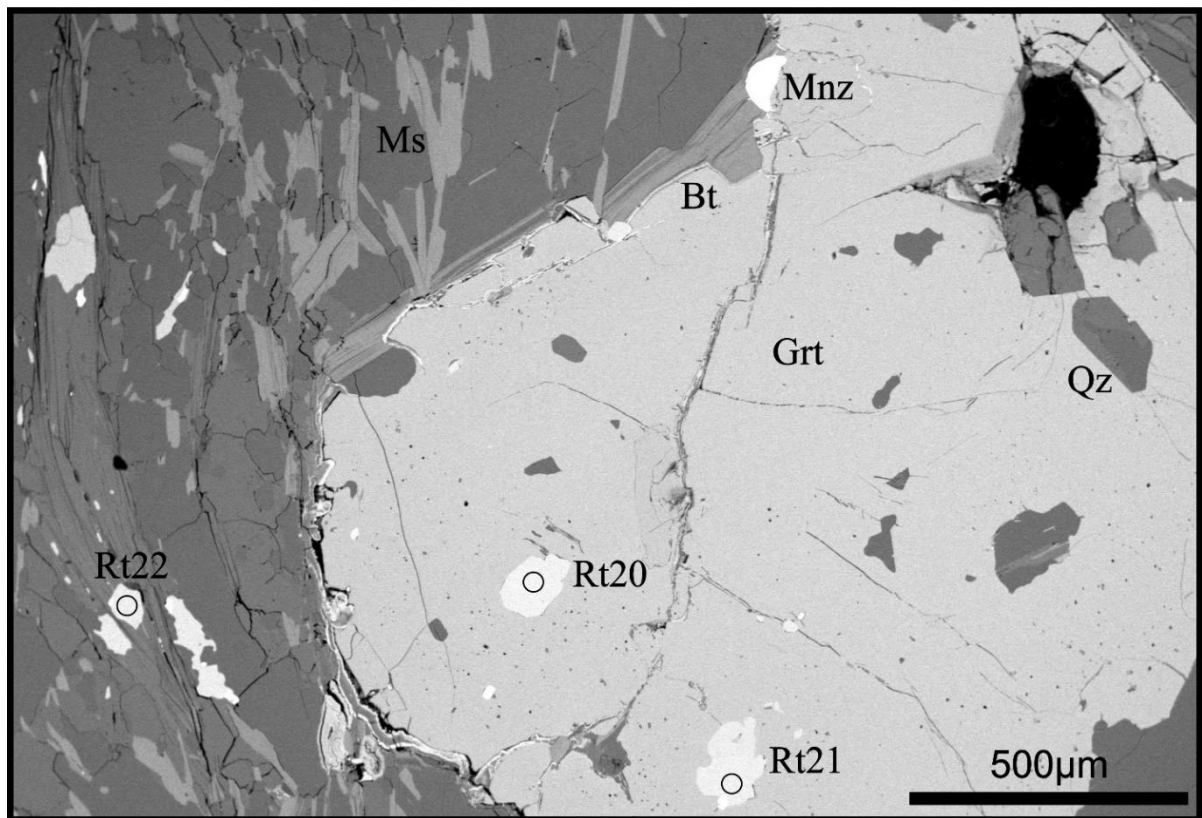


4.3. GEOCRONOLOGIA U-Pb EM RUTILO

Foram analisados cristais de rutilo na matriz e inclusos em granada da amostra RR2A1 que totalizaram dezessete análises isotópicas (Apêndice B).

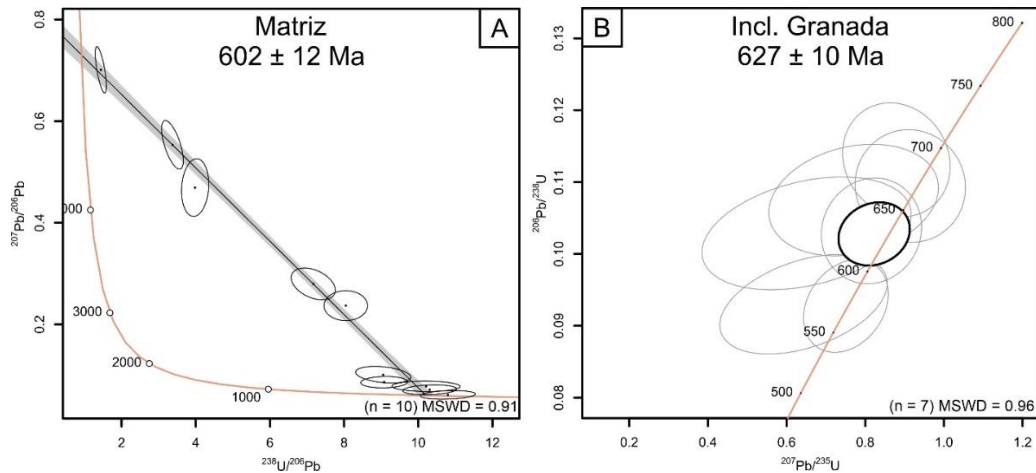
A maioria dos cristais de rutilo são arredondados a ovalados ou alongados, e possuem diâmetro entre 100 μm e 150 μm (Figura 41). Nessa amostra foram analisados onze cristais, sete estão inclusos em granada e quatro estão dispostos na matriz.

Figura 41: Imagem BSE dos cristais de rutilo analisados. Círculo preto indica a localização da análise isotópica.



As idades U-Pb em rutilo variam de acordo com a textura. Os cristais da matriz indicam idade Discórdia, no intercepto inferior, de 602 ± 12 Ma (Figura 42A), enquanto os cristais inclusos em granada possuem idade Concórdia de 627 ± 10 Ma (Figura 42B).

Figura 42: Idades U-Pb de rutilo na matriz (A) e inclusos em granada (B) da amostra RR2A1.



4.4. ELEMENTOS TRAÇO EM RUTILO

Foram analisados elementos traço em rutilo de seis amostras de xisto, das quais quatro ocorrem na Unidade E (GL09, MG173, RR2A1 e MG175) e duas na Unidade G (RR4A e SF3-41), e um em paragneisse da Unidade F (MG182). No total foram realizadas 110 análises em rutilos dispostos na matriz ou inclusos em granada. Devido a ocorrência de inclusões de zircão em alguns dos rutilos estudados, as análises com concentrações elevadas de Si e Zr foram descartadas, seguindo as condições indicadas por Luvizotto & Zack (2009). Para a aplicação desse geotermômetro, foi empregada a calibração de Tomkins *et al.* (2007). Os dados estão disponíveis no Anexo B.

Foi utilizado o valor de 10 kbar, ou 1 GPa, para a pressão durante os cálculos para a temperatura de cada amostra. Essa medida foi utilizada baseando-se nas médias dos resultados geobarométricos obtidos por Simões *et al.* (2022) para rochas metamáficas e quartzitos das Unidades E e G. Outro fator é a ocorrência de granulitos em unidades superiores que apresentam pressão de aproximadamente 12 kbar (Fumes *et al.*, 2022). O erro do cálculo de temperatura do geotermômetro Zr em rutilo, de Tomkins *et al.* (2007), é de $\pm 30^\circ$. Além disso, apenas foi considerada a maior concentração obtida para o cálculo da temperatura, sem considerar os valores *outliers* positivos.

A amostra MG173 (Unidade E) possui cristais de rutilo na matriz e incluso em granada (Figura 43A). Os cristais são, normalmente, subédricos e com tamanho entre 50 e 200 μm . Os cristais apresentam principalmente textura límpida, mas podem ocorrer lamelas (Figura 43A) ou substituição para ilmenita. O teor de Zr nos rutilos analisados inclusos em granada varia entre 141 e 296 ppm (Figura 44). Assim, a temperatura calculada para essa amostra, considerando o maior teor de Zr, é de 649°C para cristais inclusos em granada (Figura 45).

A amostra GL09 (Unidade E) contém cristais de rutilo incluído em granada e presentes na matriz. No geral os cristais são subédricos e com tamanho menor que 100µm. Possuem textura límpida e, em alguns casos, lamelas de ilmenita. A concentração de Zr nos rutilos incluídos em granada varia de 148 a 259 ppm (Figura 44). Considerando o maior teor de Zr, a temperatura calculada para essa amostra é de 638°C para os cristais incluídos em granada (Figura 45).

Os cristais de rutilo da amostra RR2A1 (Unidade E) ocorrem na matriz (Figura 43B) e incluído em granada. No geral são subédricos e apresentam tamanho médio de 100µm, na matriz, e 150 µm, quando incluídos. Os cristais podem ocorrer com textura límpida ou com lamelas de ilmenita. O teor de Zr nos rutilos incluídos em granada varia entre 116 e 280 ppm, enquanto os na matriz varia de 120 a 251 ppm (Figura 44). Assim, a temperatura calculada para a amostra, considerando o maior teor de Zr, corresponde a 644°C para cristais incluídos em granada e 636°C para cristais na matriz (Figura 45).

A amostra MG175 (Unidade E) possui rutilo na matriz (Figura 43C) e incluído em granada. Os cristais são subédricos e apresentam os maiores rutilos analisados, podendo chegar a 600µm. Os cristais apresentam lamelas de ilmenita (Figura 43C) ou ocorrer límpidos. O teor de Zr nos rutilos da matriz varia de 244 a 348 ppm, enquanto os incluídos em granada possuem concentração de 237 a 370 ppm (Figura 44). Considerando o maior teor de Zr, a temperatura calculada é de 667°C para cristais incluídos em granada e 662°C para cristais na matriz (Figura 45).

Os cristais de rutilo da amostra MG182 (Unidade F) estão incluídos em granada (Figura 43D) ou na matriz, porém foram realizadas análises apenas em cristais incluídos, já os encontrados na matriz apresentam tamanho menor que 20µm, impossibilitando a análise. Os cristais são subédricos e apresentam tamanho variado, entre 50 e 500µm. No geral os cristais apresentam lamelas de ilmenita (Figura 43D) ou límpidos. O teor de Zr nos rutilos incluídos em granada varia de 222 a 363 ppm (Figura 44). Considerando o maior teor de Zr, a temperatura calculada para a amostra é de 665°C em cristais incluídos em granada (Figura 45).

Os cristais de rutilo da amostra RR4A (Unidade G) ocorrem incluídos em granada (Figura 43E) ou na matriz, porém foram realizadas análises apenas em rutilos incluídos, já os encontrados na matriz apresentam tamanho menor que 20µm, impossibilitando a análise. No geral são subédricos e apresentam tamanho médio de 120µm. Os cristais podem ocorrer com textura límpida ou com lamelas de ilmenita (Figura 43E). O teor de Zr nos rutilos incluídos em

granada varia de 222 a 400 ppm (Figura 44). A temperatura calculada para a amostra, considerando o maior teor de Zr, corresponde a 673°C (Figura 45).

A amostra SF3-41 (Unidade G) apresenta rutilo na matriz ou incluso em granada (Figura 44F). Os cristais são subédricos e de tamanho variado, entre 50 e 250µm quando inclusos ou menor que 20µm na matriz. Majoritariamente apresentam textura límpida, mas podem ocorrer lamelas de ilmenita e pequenas inclusões de zircão (Figura 44F). A concentração de Zr nos cristais inclusos na granada varia de 378 a 600 ppm (Figura 45). A temperatura calculada, considerando o maior teor de Zr, é de 709°C (Figura 46).

Figura 43: Imagens de BSE dos cristais de rutilo analisados, marcações em vermelho indicam o local analisado. (A) Rutilo Grt3-Rt1 da amostra MG173 (B) Rutilo Rt21 da amostra RR2A1, furo indica local onde foi realizada datação em LA-ICP-MS. (C) Rutilo Rt6 da amostra MG175. (D) Rutilo Rt2 da amostra MG182. (E) Rutilos Rt1 e Rt4 da amostra RR4A. (F) Rutilos Rt2, Rt3, Rt4, Rt5 e Rt6 da amostra SF3-41.

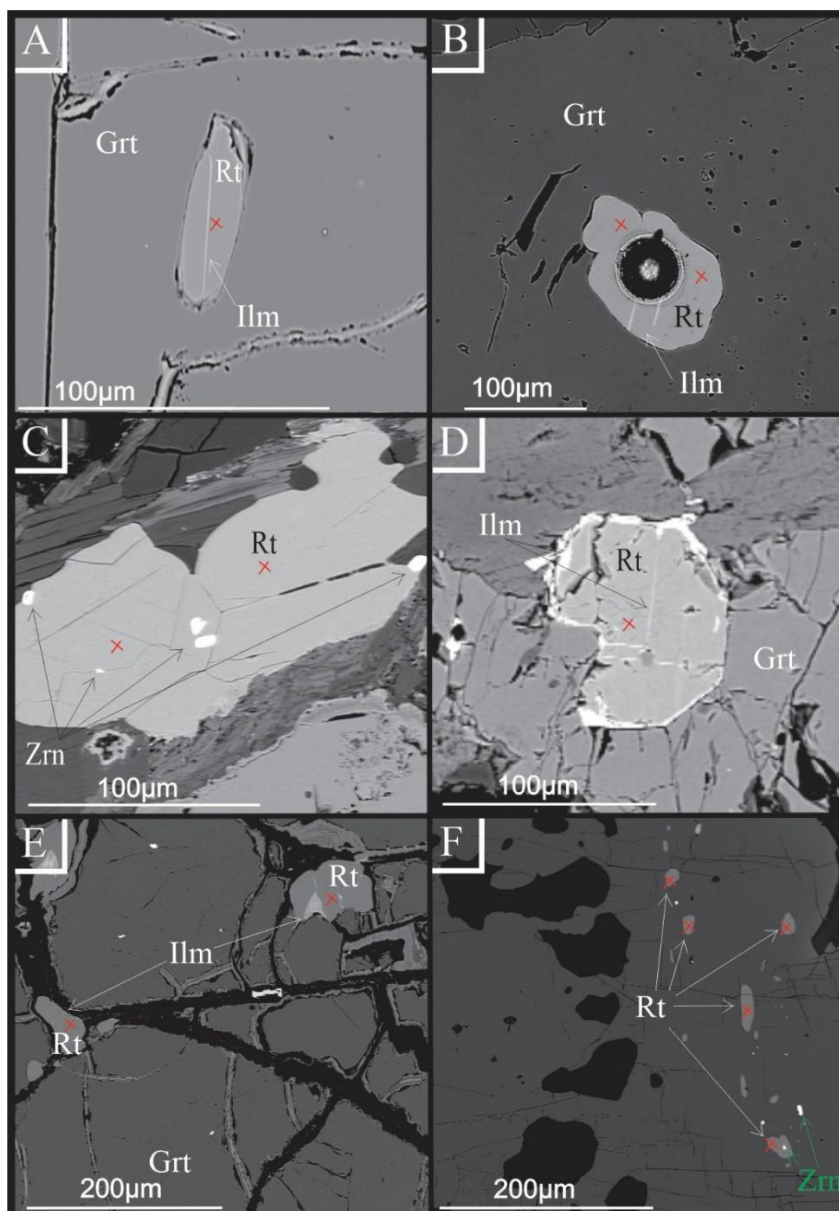


Figura 44: Diagrama de caixa (*boxplot*) das concentrações de Zr em rutilo das amostras estudadas. Limites superiores e inferiores (*whiskers*) definem o intervalo. Limites superiores e inferiores dos retângulos indicam os terceiros e primeiros quartis, respectivamente. A reta dentro do retângulo indica a mediana, enquanto a letra “x” representa a média. Círculos representam *outliers*. O número no topo de cada caixa representa a quantidade de análises para a amostra. As concentrações estão divididas pela localização do cristal de rutilo, sendo na matriz (Mtx) ou incluso em granada (Grt).

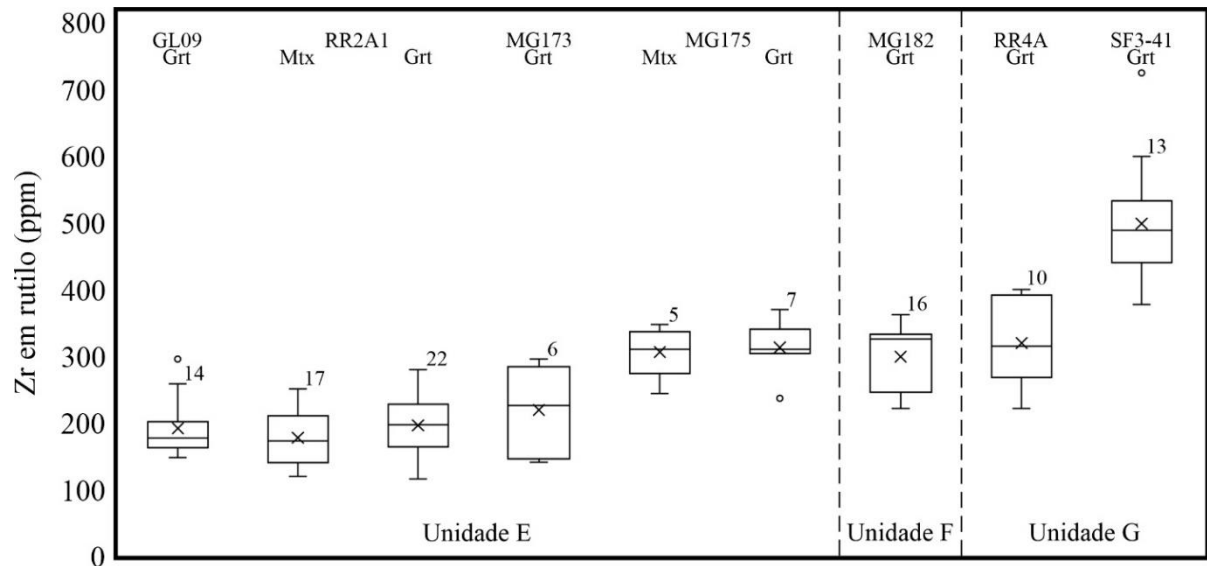
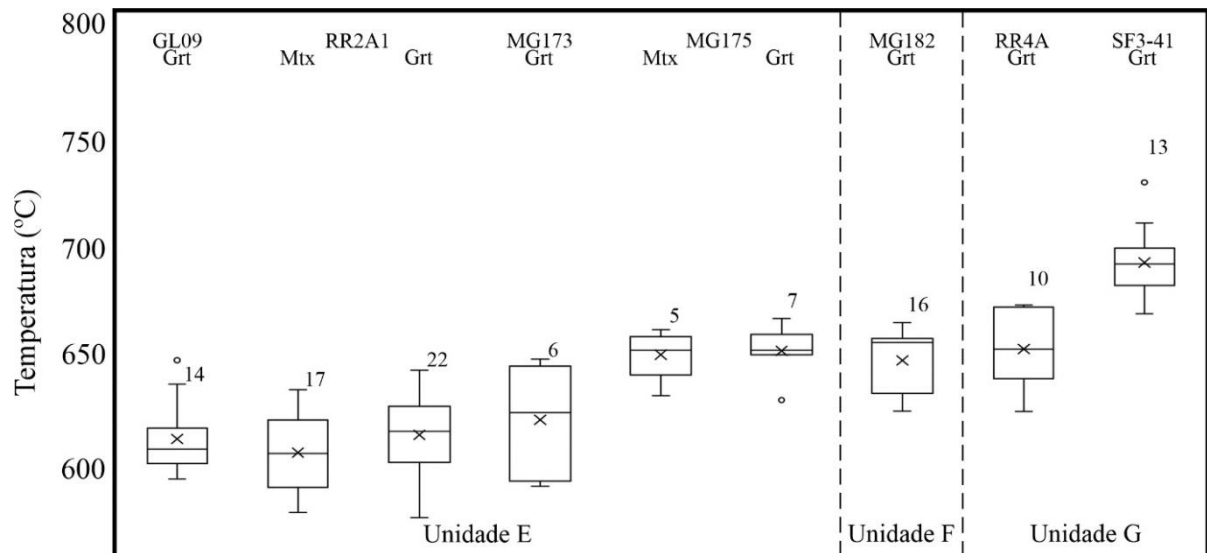


Figura 45: Diagrama de caixa (*boxplot*) das temperaturas resultantes do cálculo de Zr em rutilo das amostras estudadas. Limites superiores e inferiores (*whiskers*) definem o intervalo. Limites superiores e inferiores dos retângulos indicam os terceiros e primeiros quartis, respectivamente. A reta dentro do retângulo indica a mediana, enquanto a letra “x” representa a média. Círculos representam *outliers*. O número no topo de cada caixa representa a quantidade de análises para a amostra. As temperaturas estão divididas pela localização do cristal de rutilo, sendo na matriz (Mtx) ou incluso em granada (Grt).



5. DISCUSSÕES

Baseando nos dados obtidos nessa pesquisa, é possível indicar a ocorrência de diferentes momentos ao longo da trajetória P - T - t , do evento tectônico gerador da *Nappe* de Passos, por meio das idades obtidas nos cristais de monazita e rutilo, além de informações acerca da temperatura para as rochas das unidades intermediárias da *Nappe* de Passos, através do geotermômetro Zr em rutilo. Por intermédio da integração desses dados, com o auxílio das paragêneses descritas, é possível indicar semelhanças e diferenças entre as rochas dessas unidades e assim propor uma nova discussão acerca da evolução (P)- T - t da *nappe*.

5.1. GEOCRONOLOGIA: MONAZITA E RUTILO

5.1.1. MONAZITA

A monazita é um importante mineral para estudos metamórficos, pois ele providência informações acerca desses processos como, por exemplo, a idade do evento. As relações texturais da monazita, além do seu conteúdo de ítrio, também são utilizados para relacionar com o caminhamento P - T das rochas analisadas. Trabalhos de Foster *et al.* (2002, 2003) e Larson *et al.* (2022) mostram as relações texturais, químicas e cronológicas em monazitas metamórficas e sua relação com o caminhamento P - T - t .

Em rochas metapelíticas, as principais fases que carregam Y e HREE são allanita, xenotímio, apatita, monazita e granada, porém a última é a mais importante e comum em pelitos, podendo carrear quase a totalidade desse elemento na rocha. O conteúdo de ítrio na monazita reflete o equilíbrio desse mineral com as demais fases, principalmente granada, e normalmente a monazita apresenta-se zonada em Y. Dessa maneira, é possível relacionar cada zona de Y com uma porção específica da história, onde: (i) quando a monazita cresce em equilíbrio com o xenotímio, ou durante a quebra de granada rica em Y ou antes do crescimento da granada, em um sistema relativamente rico em Y, terá um conteúdo de Y_2O_3 entre 1,3 e 2,5%; ou (ii) quando o crescimento da monazita ocorre com a presença de granada na assembleia e sem a ocorrência de xenotímio, ou o sistema é pobre em Y, o conteúdo de Y_2O_3 na monazita será menor que 1% (FOSTER *et al.*, 2002, 2003).

Larson *et al.* (2022) ao reanalisarem as amostras utilizadas por Foster *et al.* (2002), indicam que monazitas espacialmente associadas a granadas e apatita e que apresentem baixo

conteúdo de Y, podem ser associadas a quebra da granada se houver um tampão local. Os autores indicam que, além do conhecimento textural e espacial da monazita, também é necessário compreender sobre outras fases minerais, como granada, apatita e/ou xenotímio, que também participam do balanço geral de ETRs da rocha.

Dessa maneira, no presente trabalho se optou por, além da idade média, utilizar relação textural e de posição na abordagem dos dados obtidos (Figuras 46 e 47). Isto se deu pela presença de monazitas com texturas que representam dissolução e reprecipitação (*e.g.*, Figura 28A), além de diferentes teores de ítrio em monazitas de uma mesma rocha. Dessa forma foi possível separar essas informações em diferentes grupos de acordo com a relação $Y_2O_3 \times$ Idade de cada amostra.

Figura 46: Diagrama de dispersão Y_2O_3 (% peso) $\times$ Idade (U-Th-Pb_T) para as monazitas na matriz das rochas analisadas da *Nappe* de Passos (n = 292). Unidade E – GL09, MG173, SSPRR2A1, MG175; Unidade F – SSPRR4; Unidade G – SSPRR4A, MG176, SF3-41.

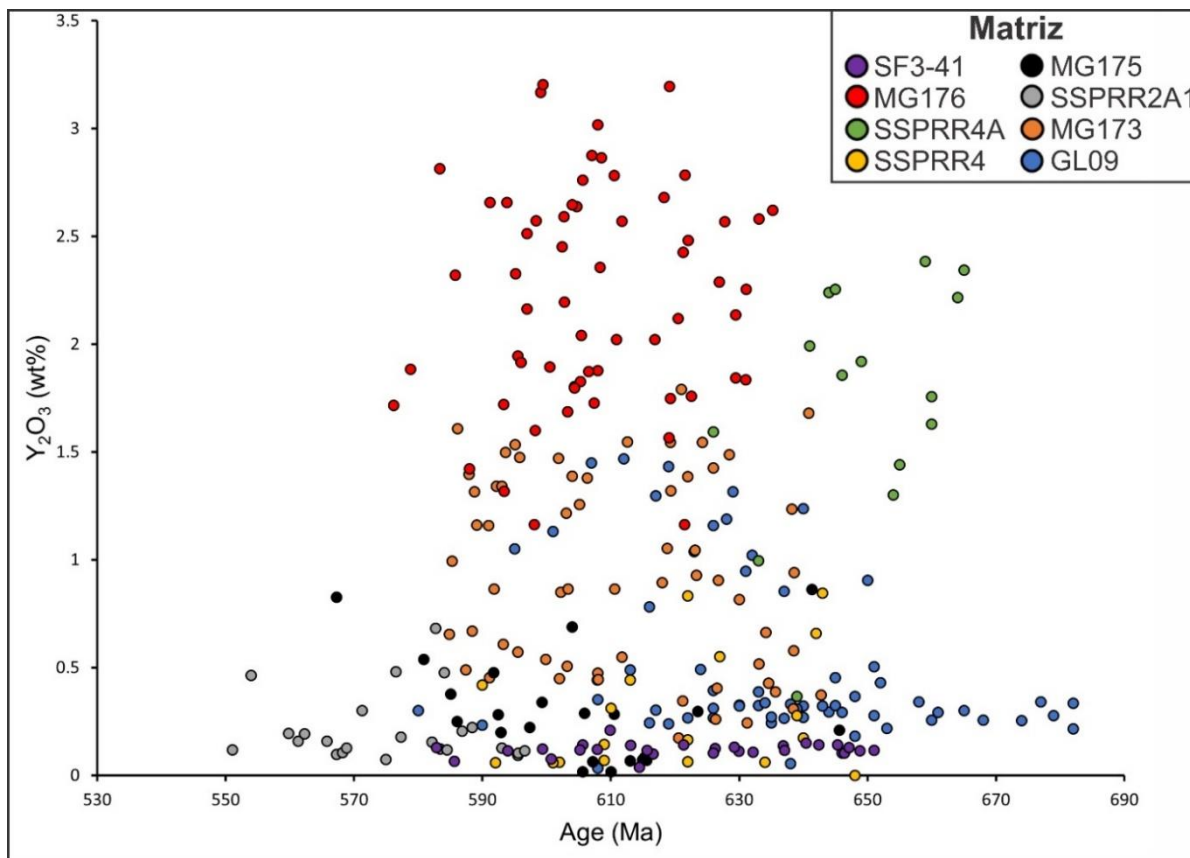
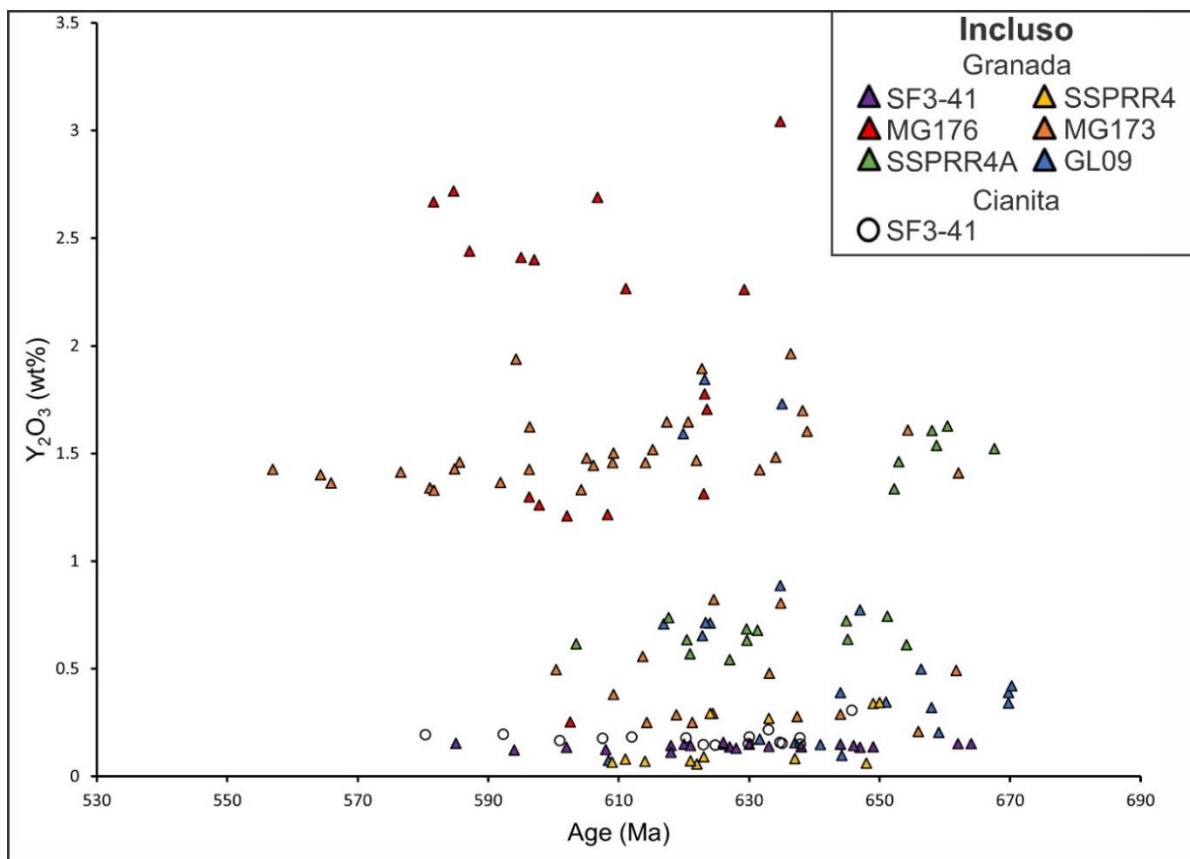


Figura 47: Diagrama de dispersão Y_2O_3 (% peso) x Idade (U-Th-Pb_T) para as monazitas inclusas em granada ou cianita das rochas analisadas da *Nappe* de Passos (n = 151). Unidade E – GL09, MG173; Unidade F – SSPRR4; Unidade G – SSPRR4A, MG176, SF3-41.



Nos cristais de monazita presentes na matriz (Figura 46) é notado grande variação dos dados, tanto para a idade quanto para o teor de Y_2O_3 , que variam entre 550 Ma e 680 Ma e entre 0,0% e 3,2%. A maioria das monazitas das amostras não possui padrão textural químico definido, podendo apresentar idades semelhantes com teores de Y_2O_3 acima ou abaixo de 1,0% (*e.g.*, amostra MG173 – Figuras 46, 48) ou pouca ou nenhuma variação de Y_2O_3 ao longo da faixa de idades (*e.g.*, amostra SF3-41 – Figuras 46, 48). No entanto, a presença de texturas de dissolução e precipitação (*e.g.*, amostra RR4B - mnz7, Figura 28A), de sobrecrecimento e a grande faixa de idades de monazita, indica amplo tempo de crescimento durante o metamorfismo da *Nappe* de Passos.

Os cristais de monazita inclusos em granada ou cianita, no geral, também não apresentam texturas químicas definidas e faixa de idade semelhante as da matriz, porém são observados grupos distintos dentro de uma mesma amostra, como no caso das rochas MG173, RR4A e SF3-41 (Figuras 47, 49). As diferenças são marcadas por idades e teores de Y_2O_3 distintos dentro de uma mesma amostra e podem representar momentos distintos da história da *Nappe* de Passos. Na figura 47 também é notada a presença de dois grandes conjuntos de dados

baseados no teor de Y_2O_3 , um com teor acima e outro abaixo de 1%, mas que possuem faixa de idade semelhante, preservados nos cristais de monazita inclusas em granada e cianita.

Figura 48: Diagrama de dispersão com erros dos grupos utilizando a relação Y_2O_3 (%peso) x Idade (U-Th-Pb_T) dos cristais de monazita da matriz das rochas analisadas da *Nappe* de Passos. Unidade E – GL09, MG173, SSPRR2A1, MG175; Unidade F – SSPRR4; Unidade G – SSPRR4A, MG176, SF3-41.

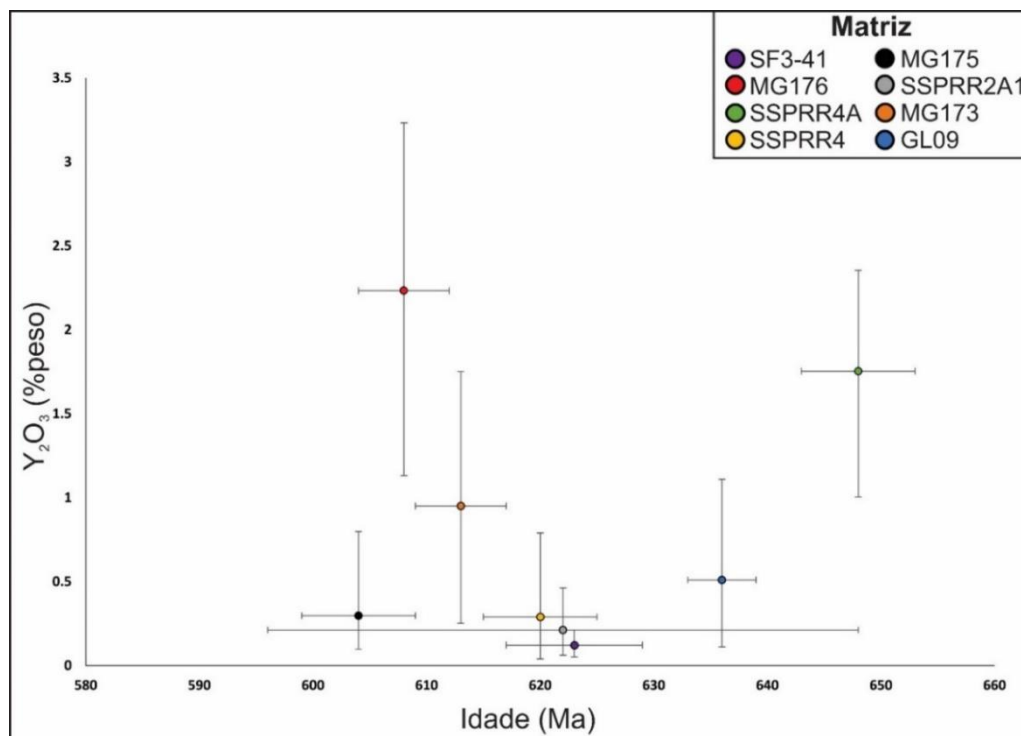
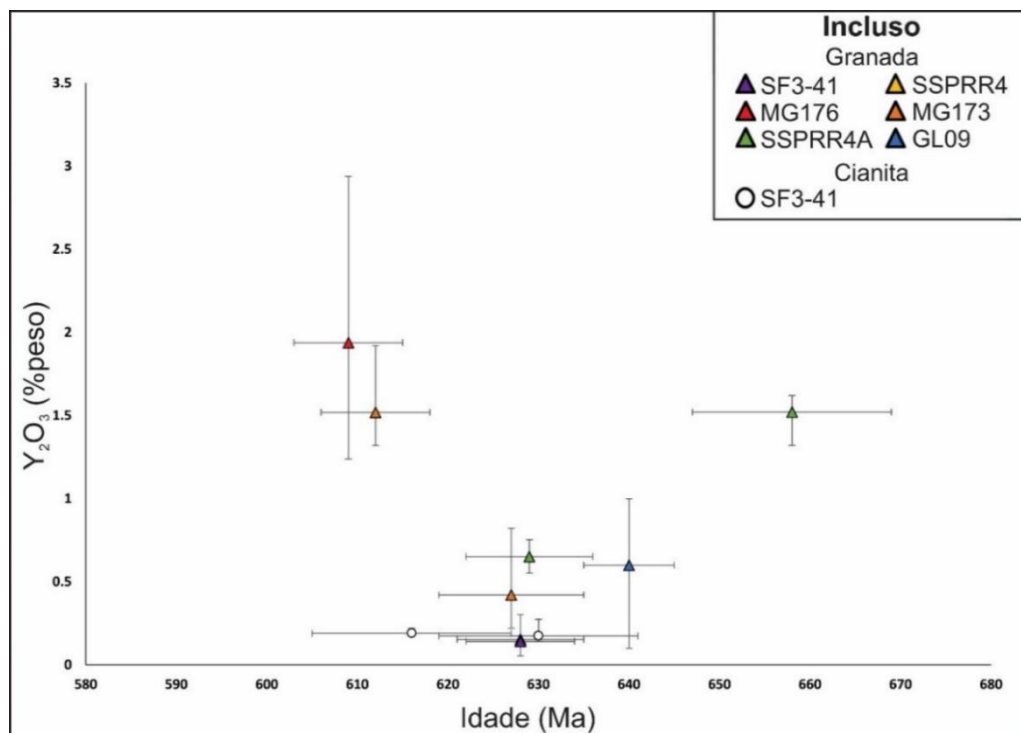
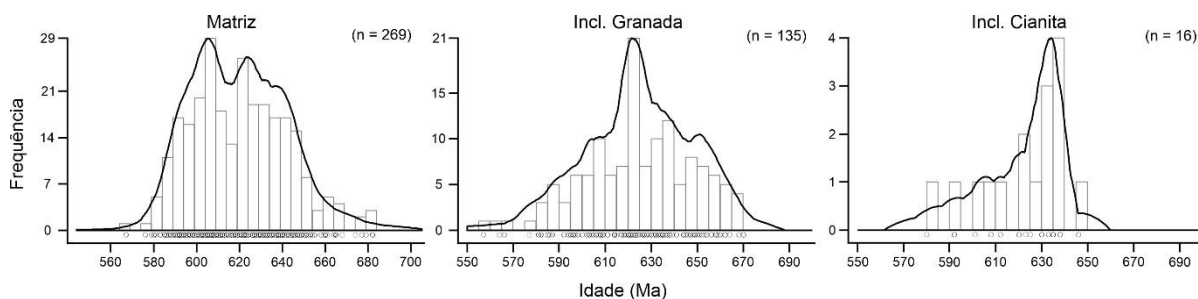


Figura 49: Diagrama de dispersão com erros dos grupos utilizando a relação Y_2O_3 (%peso) x Idade (U-Th-Pb_T) dos cristais de monazitas inclusas em granada e cianita das rochas analisadas da *Nappe* de Passos. Unidade E – GL09, MG173; Unidade F – SSPRR4; Unidade G – SSPRR4A, MG176, SF3-41.



Gráficos de estimativa de densidade por Kernel (KDE) foram elaborados para as idades de monazita presentes na matriz, inclusas em granada ou em cianita (Figura 50). Para os cristais na matriz, o diagrama apresenta espalhamento de idades entre 682 e 567 Ma, com pico principal em ~605 Ma e secundário em ~625 Ma. Os cristais de monazita inclusos em granada também possuem grande espalhamento de idade, entre 670 e 557 Ma, mas apresentam apenas um pico, com idade de ~625 Ma. Para as monazitas inclusas em cianita, a dispersão da idade é menor, entre 646 e 580 Ma, mas possuem idade de pico semelhante as demais, com aproximadamente 630 Ma. Assim, indicando crescimento de monazita por um grande período da história metamórfica.

Figura 50: Gráfico de Estimativa de Densidade por Kernel (KDE) dos dados geocronológicos obtidos para as monazitas da *Nappe* de Passos. n – número de análises.



5.1.2. RR2A1 – IDADE MÉDIA U-Th-Pb_T vs ISÓCRONA QUÍMICA (CHIME)

Diferentes sistemas, químicos ou isotópicos, podem ser utilizados para a obtenção de idades de cristais de monazita (*e.g.*, idade média U-Th-Pb_T, isócrona química, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$). A obtenção de idades por meio do método da isócrona química ThO₂* - PbO (CHIME), de Suzuki e Adachi (1991, 1994) e Suzuki *et al.* (1994), é calculada utilizando a inclinação da linha de regressão ThO₂* vs PbO pela ferramenta da JEOL “*MonaziteAge*” (versão 2.03 - McSwiggen e Associados, 2010).

Três resultados podem ser observados quando realizados por esse método: (i) os cristais de monazita não apresentam Pb inicial e não perderam Pb durante a sua história, assim gerando uma linha de regressão com origem no zero e a inclinação seria a função da idade dos cristais; (ii) os cristais de monazita originalmente contiveram Pb não radiogênico, gerando idades mais antigas, dessa maneira a quantidade de Pb seria o local do intercepto no eixo Y e a idade original pode ser calculada pela inclinação; e (iii) os cristais de monazita podem ter perdido Pb ao longo da sua história, gerando idades mais jovens, porém se os cristais possuírem tamanho semelhante ainda é possível calcular a quantidade de Pb perdido, nesse caso o intercepto do eixo Y será negativo, mas a idade original pode ser calculada pela inclinação.

Os cristais de monazita da amostra RR2A1 se enquadram no terceiro caso, possuindo linha de regressão com intercepto do eixo Y negativo (Figura 23B), indicando a perda de Pb ao longo da sua história. A idade para esses cristais (622 ± 26 Ma) é mais antiga quando comparada ao método da idade média U-Th-Pb_T (579 ± 4 Ma), reforçando a hipótese da perda de Pb. Alguns autores (*e.g.*, PARRISH, 1990, HARRISON *et al.* 2002) indicam que a monazita pode perder Pb quando passa por eventos termais prolongados ou episódicos, quando presentes em fácies anfibolito superior a granulito. Turuani *et al.* (2022) mostram que alguns cristais de monazita com idades discordantes do Complexo Napier (Antártida) possuem inclusões de nanocristais de galena (PbS) podem reter Pb da monazita.

A presença de apatita na amostra RR2A1 é alta, se comparada as outras amostras estudadas. Essa fase mineral possui, em média, 300µm e está presente em toda a matriz e inclusa em granada, porém com aumento do cristal em direção à borda (Figura 51). Esse padrão de inclusão é semelhante ao observado para as monazitas, porém com tamanho diminuto (~ 10 µm) e presentes apenas na borda da granada. No geral, essas apatitas ocorrem fraturadas e podem possuir inclusões de cristais de zircão, monazita e galena, além de monazita e allanita preenchendo as fraturas (Figura 52).

A datação pela metodologia CHIME indica que os cristais de monazita da amostra RR2A1 tiveram perda de Pb durante a sua história, apresentando idade de 622 ± 26 Ma e intercepto -0,0175 no eixo Y (Figura 23B). A presença de galena, um sulfeto de chumbo, incluso em apatita (Figura 52), pode ter causado a mobilização de Pb da monazita para esse mineral e indicando idades mais recentes para as monazitas dessa amostra, sendo correlato ao apresentado por Turuani *et al.* (2022).

Segundo diversos autores (*e.g.*, BINGEN *et al.*, 1996; SPEAR E PILE, 2002; FINGER E KRENN, 2007), a apatita incorpora significativa quantidade de ETR durante o aumento do gradiente metamórfico, principalmente em altas pressões, e assim, ser uma fonte importante para o crescimento de monazita ao longo do caminho de descompressão. Dessa maneira, as relações minerais presente na apatita podem indicar que ela seja uma importante fonte para o crescimento da monazita e, subordinadamente, allanita, por meio processos de dissolução-precipitação ou pela descompressão anterior ao pico metamórfico. No entanto, a idade obtida para a amostra é posterior ao pico metamórfico definido para a *Nappe* de Passos (630 a 640 Ma, VALERIANO *et al.*, 2004; FUMES *et al.*, 2022), sendo a primeira opção a mais provável.

Figura 51: Mapa de fases minerais de parte da lâmina petrográfica da amostra RR2A1.

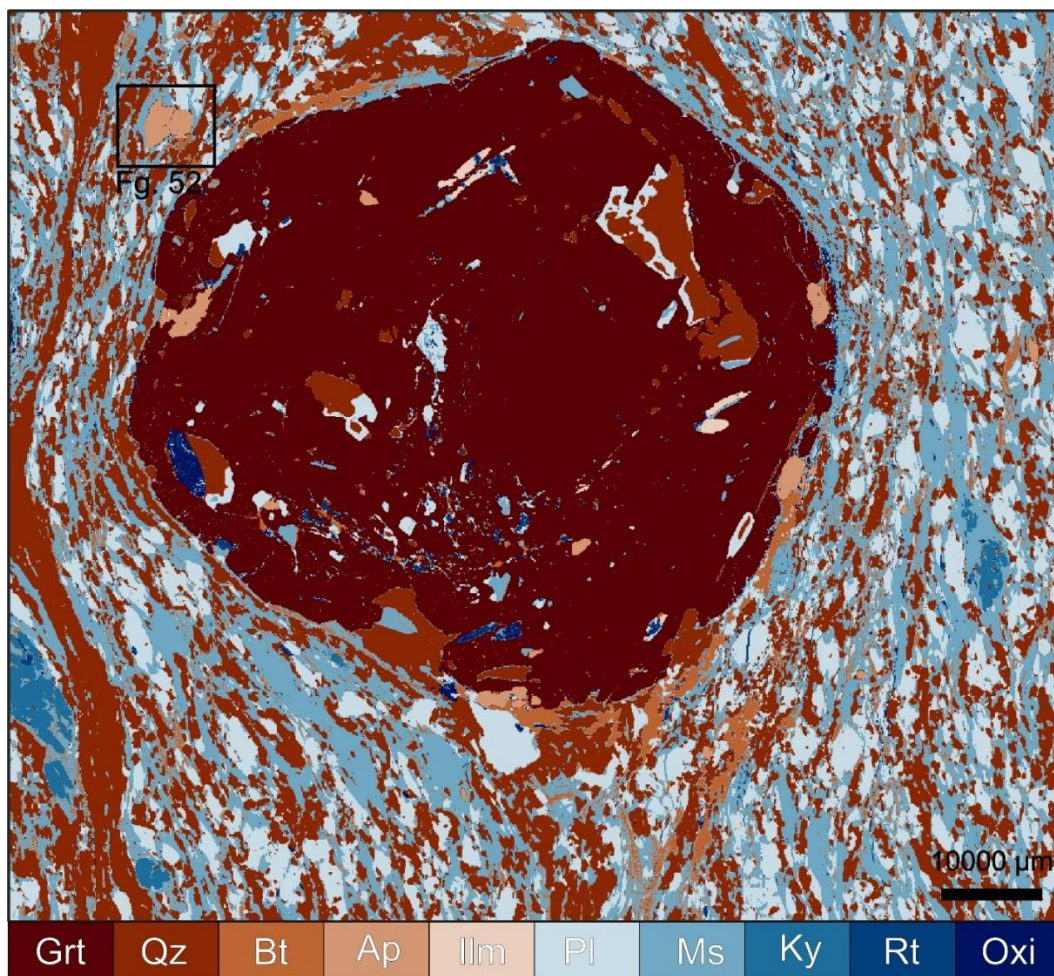
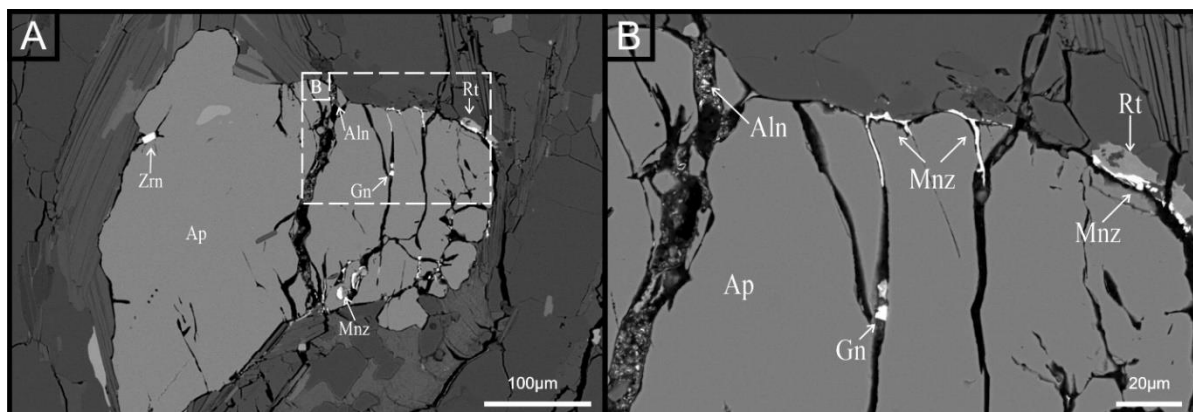


Figura 52: Cristal de apatita apresentando inclusões de zircão, monazita, allanita e galena (A). Em (B) destaque para as inclusões e formas de ocorrência.



5.1.3. RUTILO

De acordo com Cherniak (2000), um cristal de rutilo de aproximadamente 100µm apresenta temperatura de fechamento do sistema U-Pb em ~600°C. Zack & Kooijman (2017)

indicam que as idades U-Pb em rutilos guardam o período de resfriamento em condições de crosta inferior.

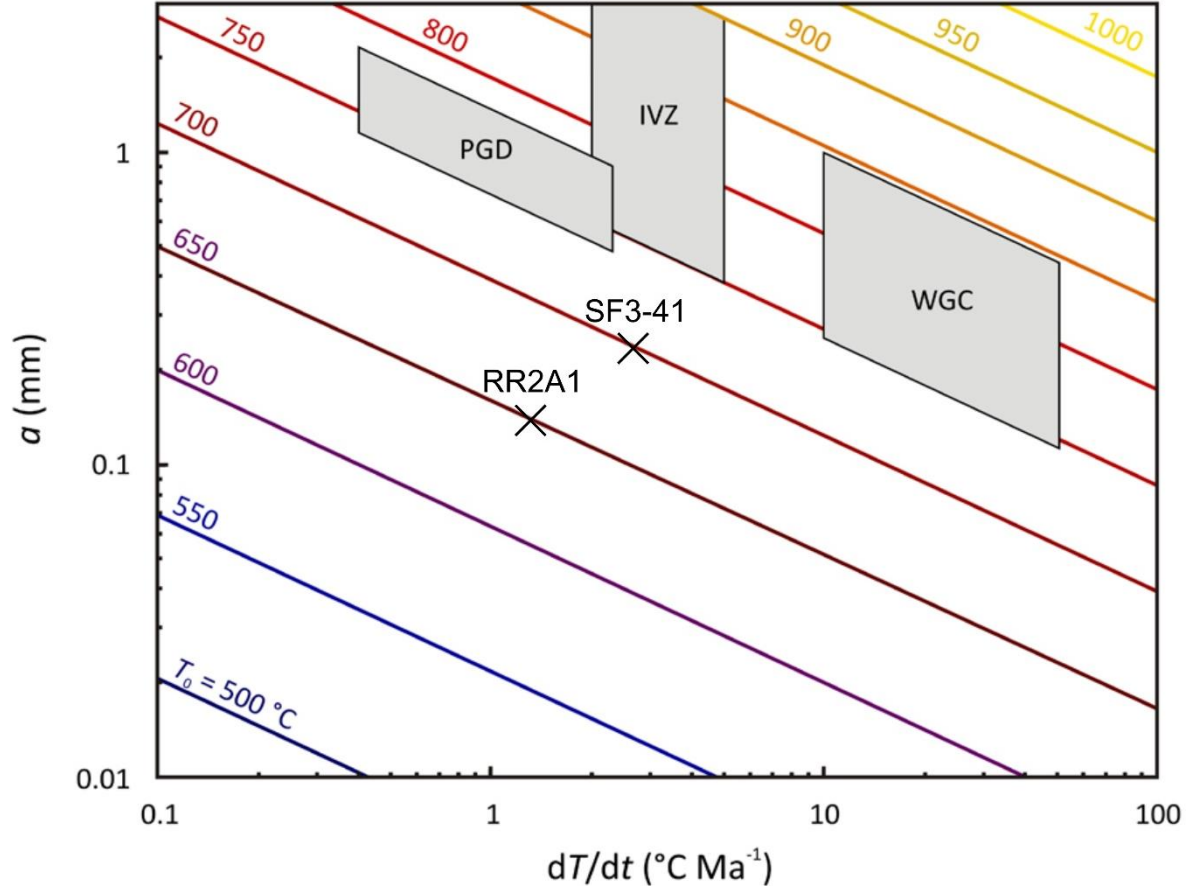
Para a amostra RR2A1, duas idades U-Pb em rutilo distintas foram obtidas, a mais recente, presente nos cristais da matriz, apresenta idade do intercepto inferior em 602 ± 12 Ma, enquanto a mais antiga, ocorrendo em cristais inclusos em granada, possui idade concordante em 627 ± 10 Ma (Figura 42).

A idade mais jovem, considerando os erros, está de acordo com os dados obtidos por Valeriano *et al.* (2004) de 594 Ma, utilizando TIMS, e por Fumes *et al.* (2022) de aproximadamente 590 Ma, utilizando LA-ICP-MS. Dessa maneira, essa idade obtida para os cristais da matriz do cianita-granada-biotita-muscovita xisto com estaurolita, estão relacionados com o estágio de resfriamento da *Nappe* de Passos, semelhante ao encontrado para os anfíbolitos e granulitos da *nappe*.

De acordo com Zack & Kooijman (2017), é possível achar idades de cristalização de rutilo se os cristais forem grandes o suficiente ou se o resfriamento for muito rápido. Também, segundo os autores, em rochas metamórficas de alto grau, a preservação da idade no núcleo do cristal depende de alguns fatores, como a temperatura do pico metamórfico, taxa de resfriamento e o tamanho do cristal (Figura 53). Por exemplo, rápidas taxas de resfriamento ou menores temperaturas de pico metamórfico resultam em menores tempos para a difusão ocorrer, gerando comprimento de difusão efetivo menor.

Assim, as idades obtidas para os rutilos inclusos em granada são interpretadas como a idade de cristalização dos cristais e não o resfriamento da *nappe*. Como indicado na Figura 53, quando traçada a temperatura do pico metamórfico, cerca de 650 °C, e a taxa de resfriamento, cerca de 1.4°C/Ma, para a amostra RR2A1, é obtido um tamanho mínimo de 150µm para os cristais de rutilo preservarem a idade de cristalização em seu núcleo. Esse tamanho é semelhante aos cristais inclusos em granada, que deve ter atuado como um escudo e ajudado a preservar a composição química de formação do rutilo, mas maiores do que os rutilos presentes na matriz (~100µm). Essa idade também é semelhante, ao definido na literatura (*e.g.*, VALERIANO *et al.*, 2007; FUMES *et al.*, 2022) para o pico metamórfico da *Nappe* de Passos, indicando que o rutilo fazia parte da assembleia do pico.

Figura 53: Relação entre comprimento de difusão efetivo (a), taxa média de resfriamento (dT/dt) e temperatura do pico metamórfico para o Pb em rutilo baseado em modelagem de difusão usando o coeficiente de difusão natural para rutilo. Áreas sombreadas mostram temperatura do pico metamórfico e taxa média de resfriamento. PGD - Domínio de Granulitos Pikwitonei (Canadá); IVZ – Zona de Ivrea (Itália); WGC – Complexo Gnáissico Ocidental (Noruega). Modificado de Zack & Kooijman (2017).



5.1.4. IMPLICAÇÕES TECTONO-METAMÓRFICAS

De acordo com os dados geocronológicos do metamorfismo presentes na literatura (*e.g.* VALERIANO *et al.*, 2000, 2004; SANTOS *et al.*, 2021; FUMES *et al.*, 2022), o pico metamórfico da *Nappe* de Passos ocorreu entre 640 e 630 Ma, seguido por exumação até e resfriamento final entre 590 e 570 Ma. Dessa maneira a maioria das idades, com a margem de erro associado, obtidas nesse trabalho estão de acordo com os dados da literatura, exceto idades mais antigas em monazita (> 660 Ma) e rutilo ($\pm$ 630 Ma). Os dados geocronológicos serão discutidos abaixo e relacionados a evolução metamórfica da área estudada.

5.1.4.1. ESTÁGIOS METAMÓRFICOS INICIAIS (> 640 Ma)

Para Valeriano *et al.* (2004), idades mais antigas (> 640 Ma) podem representar eventos metamórficos pretéritos, possivelmente relacionados a estágios metamórficos iniciais. Essas idades também podem corresponder a eventos compressionais, tais como processos acrescionários, durante o período de sedimentação do Grupo Araxá. Se esses eventos ocorreram, importantes desconformidades não mapeadas podem estar presentes.

A norte da *Nappe* de Passos, na região do complexo granulítico Anápolis-Itauçu, idades de 650 – 640 Ma para o metamorfismo de alto grau foram obtidos por geocronologia U-Pb em zircões (PIUZANA *et al.*, 2003). Já a sul, na *Nappe* Três Pontas-Varginha, idades entre 662 e 655 Ma, por U-Th-Pb_T em monazita, foram obtidas para granulitos residuais de alta pressão e são interpretados como próximo ao pico metamórfico, enquanto idades de 648 Ma, também em monazita, indicam recristalização pós-pico (RENO *et al.* 2012).

Na área estudada apenas a amostra RR4A apresenta idade média em monazita acima de 640 Ma, ocorrendo tanto na matriz, com 648 ± 5 Ma, quanto na granada, com 658 ± 11 Ma. Todos os pontos analisados apresentam teor de Y₂O₃ acima de 1% (Figuras 48 e 49), indicando, segundo Foster *et al.* (2003), que essas monazitas cresceram antes da ocorrência de granada.

Utilizando o diagrama de Estimativa de Densidade por Kernel (Figura 50), é observado que a ocorrência de idades acima de 640 Ma é marcante para as análises químicas pontuais em monazitas inclusas em granada ou presentes na matriz, cerca de 25% e 18% dos dados, respectivamente. Esses dados geocronológicos ocorrem, principalmente, nas amostras GL09 e RR4A e, de maneira secundária, nas amostras MG173 e SF3-41.

Dessa forma, neste trabalho, essas idades são interpretadas como estágios iniciais do metamorfismo que não foram apagados ou redefinidos pelo pico metamórfico, semelhante ao proposto por Valeriano *et al.* (2004).

5.1.4.2. PICO METAMÓRFICO (625 a 640 Ma)

Trabalhos de Valeriano *et al.* (2004) e Fumes *et al.* (2022) mostram que o pico metamórfico, para a *Nappe* de Passos, ocorreu entre 640 e 630 Ma. Idades semelhantes para o pico metamórfico ocorrem em todo o Orógeno Brasília Sul, como na *Nappe* de Araxá (Valeriano *et al.*, 2004), *Nappe* Socorro-Guaxupé (Rocha *et al.*, 2017), *Nappe* de Luminárias (Fumes *et al.*, 2019), *Nappe* Três Pontas-Varginha (Reno *et al.*, 2009) e Sistema de *Nappes*

Andrelândia (Coelho *et al.* 2017). Esse período é representado pela subducção para oeste dos setores distais dos Grupos Andrelândia e Araxá sob o bloco Paranapanema (Valeriano *et al.*, 2004).

O pico metamórfico da *Nappe* de Passos é marcado, por meio da idade média U-Th-Pb_T em monazita, principalmente nos cristais de monazita inclusos em granada ou cianita, ocorrendo na matriz apenas da amostra GL09 (Figuras 48 e 49). Todos os teores de Y₂O₃ para essas idades apresentam valores abaixo de 1%, indicando a formação e crescimento de granada durante o pico metamórfico, o que é compatível com o observado na petrografia. Idades para o ápice do metamorfismo também estão presente nos rutilos inclusos em granada (Figura 42B), que indicam crescimento do cristal em 627 ± 10 Ma.

Os picos observados no diagrama de Estimativa de Densidade por Kernel (Figura 50), marcados pela moda, indicam que a maior ocorrência de idades está relacionada ao pico metamórfico da *nappe* tanto na matriz quanto quando inclusos. Para os cristais de monazita na matriz, cerca de 22% ocorrem nesse período, enquanto para os inclusos na granada esse valor é de 25% e, já para a cianita é de 43%.

Dessa forma, as idades obtidas para o pico metamórfico da *Nappe* de Passos são semelhantes às encontradas na literatura, apesar de indicar um período maior para essa fase que Valeriano *et al.* (2004) e Fumes *et al.* (2022).

5.1.4.3. EXUMAÇÃO/TRANSPORTE DA *NAPPE* DE PASSOS (< 625 Ma)

Com a continuação da colisão entre as paleoplacas São Franciscana e Paranapanema - terreno Goiás, ocorreu a exumação e resfriamento da *Nappe* de Passos até aproximadamente 605 Ma, em U-Pb em monazita, marcando o estágio final da atividade tectonometamórfica, enquanto o resfriamento final do Orógeno Brasília Sul se deu em 594 Ma, marcado por idades U-Pb em rutilo (VALERIANO *et al.* 2004).

A exumação da *Nappe* de Passos é marcada, utilizando a idade média U-Th-Pb_T e CHIME, por cristais de monazita presentes na matriz, ocorrendo inclusas apenas nas amostras MG173, MG176 e SF3-41 (Figuras 48 e 49). Os teores de Y₂O₃ são mais enriquecidos quando comparados aos valores para o pico metamórfico, indicando a alteração e/ou dissolução da granada e liberação de ETR para o sistema, segundo Foster *et al.* (2003). No entanto, nem todos os teores estão acima de 1,3%, isso se deve pela presença de outras fases minerais, como apatita, que podem ter funcionado como um tampão local, como descrito por Larson *et al.* (2022). A

presença de apatita, e secundariamente allanita, é descrita para todas as amostras estudadas (e.g., Figuras 51 e 52), dessa maneira esses minerais podem ter influenciado na formação de monazita pobre em ítrio durante a exumação.

No diagrama de Estimativa de Densidade por Kernel (Figura 50) o principal pico para as monazitas da matriz é marcado em aproximadamente 605 Ma, o que não ocorre para os cristais inclusos. Isso se dá pelas monazitas apresentarem mais de uma moda, indicando um segundo momento de crescimento importante desse mineral, semelhante ao que é descrito por Valeriano *et al.* (2004), que atribuem esse crescimento ao retrometamorfismo durante a exumação da *nappe*.

Nos diagramas de KDE, esse período apresenta a maior quantidade de idades pontuais, com cerca de 60% dos dados de monazitas na matriz, 50% dos dados de inclusas em granada e em cianita.

Idades U-Pb em rutilo obtidas nesse trabalho (602 ± 12 Ma, Figura 42A) também estão de acordo e dentro do erro com o apresentado na literatura para a área de pesquisa (e.g., VALERIANO *et al.*, 2004; SANTOS *et al.*, 2021; FUMES *et al.*, 2022). Essa idade marca a exumação e transporte da Nappe de Passos para condições de aproximadamente 600°C em cristais de aproximadamente 100µm (CHERNIAK, 2000). Idades K-Ar em mica branca indicam temperatura da ordem de 300°C para a Nappe de Passos entre 580 e 570 Ma (VALERIANO *et al.*, 2000).

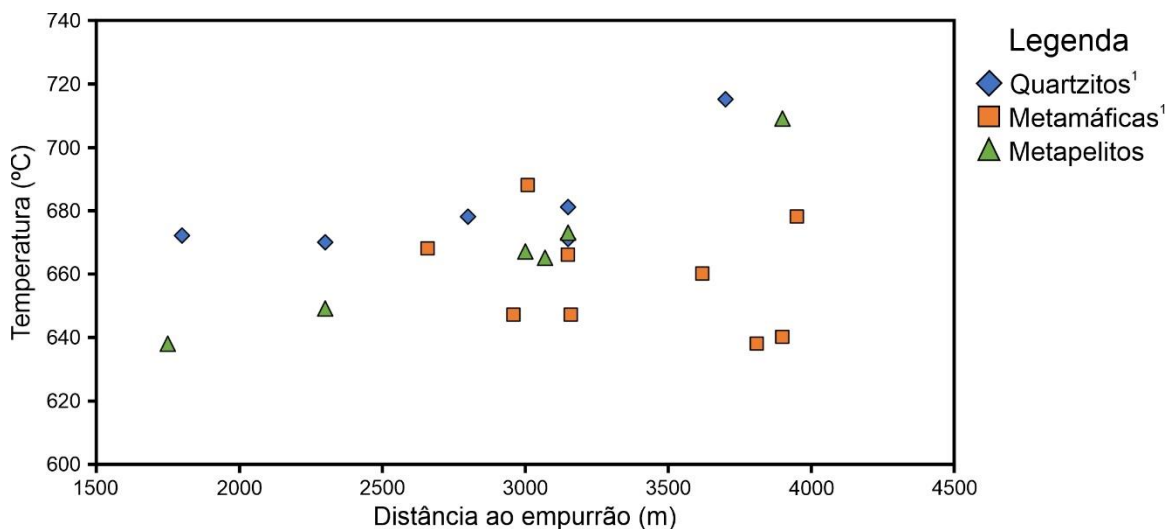
5.2. IMPLICAÇÕES DO GEOTERMÔMETRO Zr EM RUTILO

As informações acerca da temperatura, obtidas nesse trabalho, para as unidades estudadas, indicam aumento do gradiente térmico, mas com pequena variação ao longo da Unidade E em relação a Unidade F e a base da Unidade G (Figuras 45 e 54).

Apesar do aumento do gradiente térmico, é possível observar um pequeno acréscimo de 24°C na temperatura dos xistos da Unidade E, desde a sua base (638°C, amostra GL09) até o topo (662°C, amostra MG175), porém dentro do erro de $\pm 30^\circ\text{C}$ do geotermômetro Zr em rutilo. Esses valores também são próximos aos encontrados para o xisto na base da Unidade G, com 673°C (amostra RR4A) e do granada-biotita paragneisse da Unidade F, com 665°C (amostra MG182), porém são inferiores em 45°C das rochas encontrados no topo da Unidade G (709°C, amostra SF3-41), em relação a base dessa unidade.

Esses valores são próximos aos apresentados por Simões *et al.* (2022), que realizaram geotermometria em quartzitos, utilizando os geotermômetros Zr-em-rutilo e Ti-em-quartzo, e em rochas metamáficas, pelo geotermômetro hornblenda-plagioclásio (Figura 54). De acordo com os autores, a temperatura média para as unidades são, para a Unidade E de 620°C para rochas metamáficas e 670°C para quartzitos, e para a Unidade G de 650°C para rochas metamáficas e 690°C para quartzitos.

Figura 54: Variação da temperatura de acordo com a distância ao empurrão. Comparação entre os dados obtidos neste trabalho (triângulo azul) com quartzitos (losango laranja) e metamáficas (círculo verde) da literatura. Número sobrescrito: 1 – Simões *et al.* (2022).



A concentração de Zr em rutilo nos xistos não possui grande dispersão em relação a sua localização, como na matriz ou incluso em granada. A única exceção é a amostra SF3-41, que possui teores de 378 a 600 ppm. Apesar de não apresentar grande variação na concentração do elemento, a característica de dispersão nos dados é comum em rochas de fácies granulito (*e.g.*, LUVIZOTTO & ZACK, 2009), que ocorrem em unidades superiores da *Nappe* de Passos e apresentam tal característica (FUMES *et al.*, 2022).

Fumes *et al.* (2022) indicam que a temperatura para as rochas granulíticas das Unidades H/I, utilizando o geotermômetro Zr-em-rutilo, apresentam temperatura da ordem de 830°C, sendo superiores em aproximadamente 130°C para a estimativa para a amostra SF3-41, localizada próxima ao contato com a Unidade H.

Dessa maneira, o aumento gradacional da temperatura, da base para o topo, das unidades estudadas, indica que possíveis discontinuidades ao longo dessa sequência são improváveis. No entanto, entre os metapelitos do topo da Unidade G e da Unidade H ocorre diferença superior a 100°C, que pode apontar possível discontinuidade geológica.

5.3. INTEGRAÇÃO DOS DADOS E INTERPRETAÇÕES (P)-T-t

Por meio da integração de dados geocronológicos, U-Th-Pb_T em monazita e U-Pb em rutilo, e de temperatura, pelo geotermômetro Zr-em-rutilo, em rochas posicionadas tectonoestratigraficamente acima e abaixo das ocorrências de retroeclogito, foi possível realizar interpretações acerca do cianita-granada-biotita-xisto das Unidades E e G e sua evolução ao longo do caminamento (P)-T-t da *Nappe* de Passos.

Luvizotto (2003) e Simões (1995) indicam que a *Nappe* de Passos é uma sequência contínua e não apresenta descontinuidades importantes paralelas ao contato entre as unidades. Os autores também indicam que a *nappe* apresenta gradiente metamórfico invertido, onde rochas de maior grau estão posicionados acima de rochas com menor grau. Simões *et al.* (2022) indicam que a *Nappe* de Passos possui evolução tectônica semelhante ao Orógeno Himalaiano, seguindo a proposta de Goscombe *et al.* (2018), apesar de possuir algumas diferenças. Os autores propõem que a inversão do gradiente metamórfico provavelmente envolveu inversão da isoterma devido a subducção, processos de *channel flow* e transporte de rochas de mais alta pressão sobre rochas de menor pressão por cisalhamento dúctil reverso.

Os dados de temperatura obtidas pelo geotermômetro Zr-em-rutilo das rochas metapelíticas, das Unidades E, F e G, apresentam temperaturas próximas as apresentadas por Simões *et al.* (2022) para quartzitos e rochas metamáficas nessas unidades. Esses dados também auxiliam na indicação da existência da inversão do gradiente metamórfico para a *Nappe* de Passos.

Por meio da relação Y₂O₃ *versus* idade em monazita e idades U-Pb em rutilo, é possível separar os dados geocronológicos em três etapas do caminamento (P)-T-t e evolução tectônica da *Nappe* de Passos: estágios metamórficos iniciais, marcado por idades acima de 640 Ma; estágio de pico metamórfico, marcado por monazitas inclusas em granada que apresentam idades entre 625 e 640 Ma e pela cristalização de rutilo, marcado pela idade U-Pb; e estágio de exumação/transporte tectônico, representado por idades mais novas que 625 Ma, presentes em monazitas e em rutilo.

Essas idades são semelhantes às encontradas por Valeriano *et al.* (2004), que indicam dois momentos distintos de formação de monazita, há 630 Ma, durante o pico metamórfico e há 605 Ma, atribuída ao retrometamorfismo durante a exumação da *Nappe* de Passos. Idades mais antigas e menos comuns, próximas a 650 Ma em zircão, também são apresentadas pelos

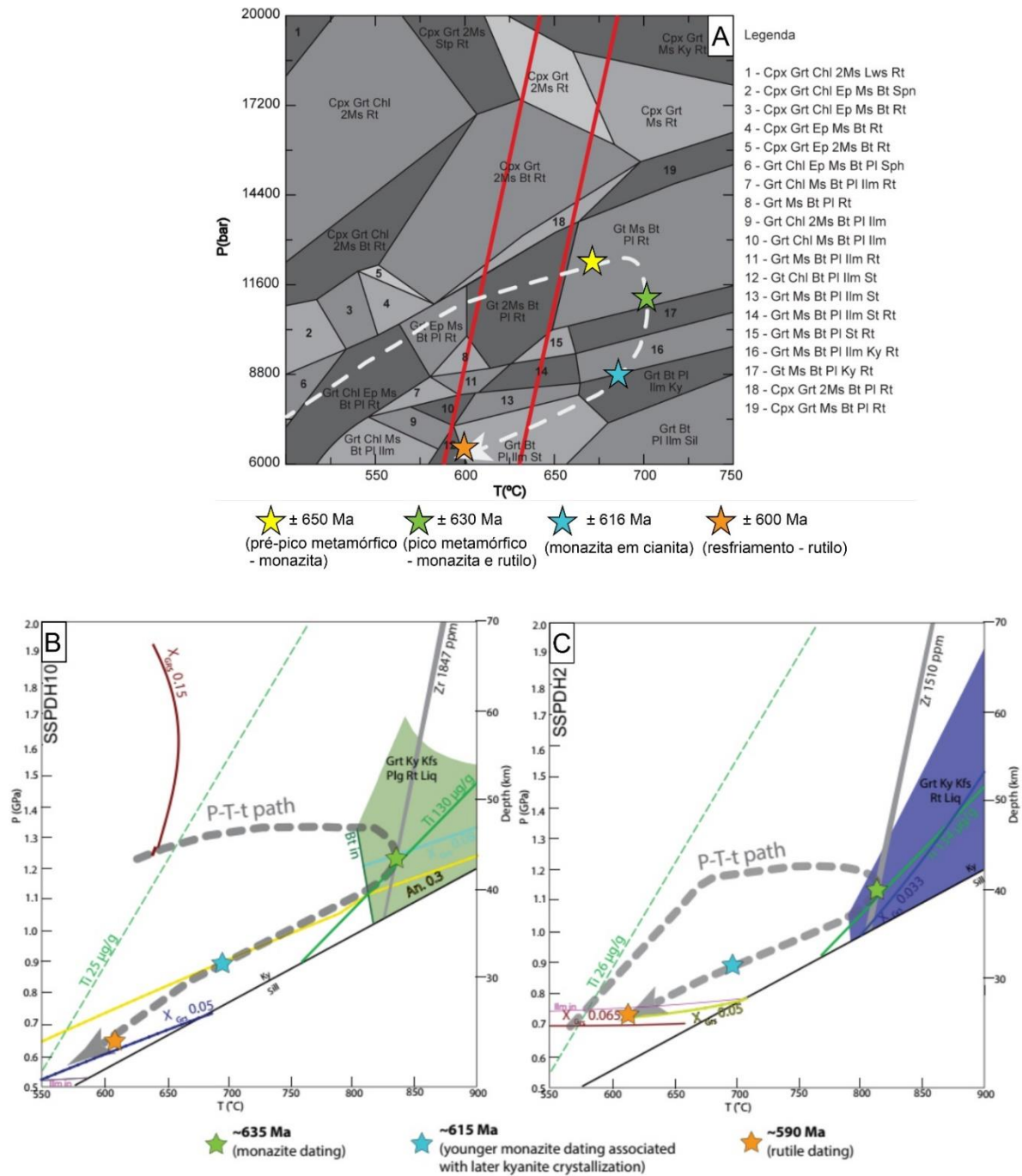
autores, que as interpretam como possíveis fases iniciais do metamorfismo nos domínios interno e externo do Orógeno Brasília.

Dessa maneira, com a integração dos dados geocronológicos, em monazita e rutilo e do geotermômetro Zr-em-rutilo, associados a modelagem metamórfica para os xistos metapelíticos, realizada por Teixeira (2021), é possível traçar uma evolução (P)- T - t para as Unidades E e G da *Nappe* de Passos (Figura 55A). A etapa tectonometamórfica inicial da *nappe* ocorreu entre 640 e 660 Ma (Figura 34), sendo pretérita ao pico metamórfico, possivelmente compreendendo fase(s) compressional(is), como processos acrescionários, anteriores à colisão entre as paleoplacas São Franciscana e Paranapanema, podendo representar o momento de maior pressão do caminhamento metamórfico. A etapa intermediária é marcada pelo pico metamórfico, que apresenta a maior quantidade de crescimento e formação de monazita (Figura 34), apresentando idade entre 625 e 640 Ma e representando o momento de maior temperatura da *nappe*, gerando fusão parcial nas rochas metapelíticas. A etapa final é representada pelo transporte, retrometamorfismo e resfriamento da *nappe*, marcada pelo aumento do teor de Y_2O_3 nos domínios de monazita com idades mais recentes que 620 Ma até 605 Ma (Figura 34) e pela idade U-Pb mais recente em rutilo.

Comparando as modelagens metamórficas (Figura 55) realizadas por Fumes *et al.* (2022), para granulitos, e Teixeira (2021), para xistos, é observado que ambos apresentam caminhamento similar com sentido horário, porém em graus metamórficos distintos no período do pico metamórfico. No entanto, quando o resfriamento apresenta temperatura de 600°C, temperatura de fechamento do sistema U-Pb em rutilo, as três modelagens convergem para pressão aproximada de 6 kbar e, pelos dados geocronológicos em rutilo, ocorreram no mesmo período, em aproximadamente 590 Ma. Isso indica que os granulitos e xistos da *Nappe* de Passos estavam em condições semelhantes na crosta inferior no mesmo período.

Comparando as modelagens metamórficas (Figura 55) realizadas por Fumes *et al.* (2022), para granulitos, e Teixeira (2021), para xistos, é observado que ambos apresentam caminhamento similar com sentido horário, porém em graus metamórficos distintos no período do pico metamórfico. No entanto, quando o resfriamento apresenta temperatura de 600°C, temperatura de fechamento do sistema U-Pb em rutilo, as três modelagens convergem para pressão aproximada de 6 kbar e, pelos dados geocronológicos em rutilo, ocorreram no mesmo período, em aproximadamente 590 Ma. Isso indica que os granulitos e xistos da *Nappe* de Passos estavam em condições semelhantes na crosta inferior no mesmo período.

Figura 55: Modelagem metamórfica para rochas metapelíticas da *Nappe* de Passos. Em (A) modelagem para xistos (modificado de TEIXEIRA, 2021) e em (B) e (C) para granulitos (FUMES *et al.*, 2022).



Os dados geocronológicos, geotermômetros e modelagem metamórfica, com a integração dos dados da literatura, indicam que descontinuidades metamórficas são improváveis na *Nappe* de Passos. A colocação de unidades mais quentes sobre unidades mais frias (*e.g.*, Unidade H sobre Unidade G) deve ter ocorrido por cisalhamento dúctil reverso, podendo, no contato entre essas unidades, ter ocorrido o aquecimento do topo da unidade mais

fria, gerando mudanças mineralógicas em relação ao resto da unidade (*e.g.*, amostra SF3-41). Essa interpretação é semelhante ao proposto por Simões (1995), Luvizotto (2003) e Simões *et al.* (2022).

No entanto, devido a variação de aproximadamente 130°C entre as Unidades G e H/I, essa hipótese não deve ser descartada. Para isso é necessário mapeamento minucioso e realização de estudos geotermo-barométricos ao longo do contato. Também é necessário a realização do adensamento de dados geocronológicos e geotermo-barométricos para a *Nappe* de Passos, semelhante ao apresentado por Goscombe *et al.* (2018) para a região Himalaiana.

6. CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos neste trabalho, algumas conclusões foram alcançadas acerca das diferenças e semelhanças das Unidades E, F e G, além da evolução do caminamento P - T - t da *Nappe* de Passos.

- Ocorreu a formação de monazita ao longo de toda a evolução da *Nappe* de Passos, principalmente durante o pico metamórfico e retrometamorfismo.
- Novas idades U-Th-Pb_T em monazita (± 650 Ma), para a *Nappe* de Passos, são apresentadas, sendo relacionadas ao metamorfismo progressivo.
- Idades de cristalização de rutilo (627 ± 10 Ma) são relacionadas ao pico metamórfico, mas idades de resfriamento ($\sim 600^\circ\text{C}$, 602 ± 12 Ma) também foram obtidas.
- O geotermômetro Zr em rutilo apresenta valores de temperatura semelhantes aos presentes na literatura, entre 640°C e $709^\circ\text{C} \pm 30^\circ\text{C}$, além de confirmar o gradiente metamórfico invertido nos metapsamopelitos.
- A modelagem metamórfica dos granulitos e xistos da *Nappe* de Passos possuem caminamento no sentido horário semelhante, com distinção apenas para o grau metamórfico.
- É improvável a existência de descontinuidades na *Nappe* de Passos, porém estudos mais detalhados são necessários.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmin, F.F. 2015. Geological Background: A Tectonic Panorama of Brazil. *In*: Vieira, B.C., Salgado, A.A.R., Santos, L.J.C. (eds) **Landscapes and Landforms of Brazil**. Spring. Cap. 2., p.9-17.
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências** 7, 349-364.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A. 1981. Brazilian structural provinces: An introduction. **Earth-Science Reviews** 17, 1-29.
- Araújo Filho, J.O. 2000. The Pirineus Syntaxis: An example of the intersection of two Brasiliano fold-thrust belts in central Brazil and its implications for the tectonic evolution of western Gondwana. **Revista Brasileira de Geociências** 30, 144-148.
- Attoh, K., Morgan, J., 2004. Geochemistry of high-pressure granulites from the PanAfrican Dahomeyide orogen, West Africa: constraints on the origin and composition of the lower crust. **Journal of African Earth Sciences** 39, 201–208.
- Agbassoumondé, Y., Guillot, S., Menot, R.P., 2004. Pan-African subduction—collision event evidenced by high-P coronas in metanorites from the Agou massif (southern Togo). **Precambrian Research** 135, 1–21.
- Bingen, B., Demaiffe, D., Hertogen, J. 1996. Redistribution of rare earth elements, thorium, and uranium over accessory minerals in the course of amphibolite to granulite facies metamorphism; the role of apatite and monazite in orthogneisses from southwestern Norway. **Geochim. Cosmochim. Acta**, v.60, p.1341-1354.
- Black, R., Latouche, L., Liegeois, J.P., Caby, R., Bertrand, J.M., 1994. Pan African displaced terranes in the Tuareg shield (Central Sahara). **Geology** 22, 641–644.
- Brito Neves, B., Campos Neto M.C., Fuck, R.A., 1999. From Rodinia to Western Gondwana: an approach to the Brasiliano-Pan African Cycle and orogenic collage. Episodes-**Newsmagazine of the International Union of Geological Sciences** 22: 155–166.
- Caby, R., 2003. Terrane assembly and geodynamic evolution of central–western Hoggar: a synthesis. **Journal of African Earth Sciences** 37, 133–159.
- Campos Neto, M.C., 2000. Orogenic Systems from Southwestern Gondwana: an approach to Brasiliano-Pan African cycle and orogenic collage in southeastern Brazil. **Tectonic Evolution of South America** 31: 335–365.
- Cherniak, D.J. 2000. Pb diffusion in rutile. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v.139, p.198-207.
- Coelho, M.B., Trouw, R.A.J., Ganade, C.E., Vinagre, R., Mendes, J.C., Sato, K. 2017. Constraining timing and P-T conditions of continental collision and late overprinting in the Southern Brasília Orogen (SE-Brazil): U-Pb zircon ages and geothermobarometry of the Andrelândia Nappe System. **Precambrian Research**, v.292, p.194-215.
- Connolly J (1990) Multivariable phase diagrams; an algorithm based on generalized thermodynamics. **American Journal of Science** 290: 666–718

Connolly J, Petrini K (2002) An automated strategy for calculation of phase diagram sections and retrieval of rock properties as a function of physical conditions. **Journal of Metamorphic Geology** 20: 697–708

Dardenne, M. A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: *Tectonic Evolution of South America*. [S.l.]: 31 **Congresso Internacional de Geologia**. Rio de Janeiro. 231–264.

Finger, F., Krenn, E. 2007. Three metamorphic monazite generations in a high-pressure rock from the Bohemian Massif and the potentially important role of apatite in stimulating polyphaser monazite growth along a PT loop. **Lithos**, v.95, p.103-115.

Foster, G., Gibson, H.D., Parrish, R., Horstwood, M., Fraser, J., Tindle, A. 2002. Textural, chemical and isotopic insights into the nature and behaviour of metamorphic monazite. **Chemical Geology** v.191, p.183-207.

Foster, G., Parrish, R.R. 2003. Metamorphic monazite and the generation of P-T-t paths. In: Vance, D., Muller, W., Villa, I.M. 2003. *Geochronology: Linking the Isotopic Record with Petrology and Textures*. **Geological Society**, London, Special Publications, 220, p.25-47.

Fumes, R.A., Luvizotto, G.L., Moraes, R., Heilbron, M., Vlach, S.R.F. 2019. Metamorphic modeling and petrochronology of metapelitic rocks from the Luminárias Nappe, southern Brasília belt (SE Brazil). **Brazilian Journal of Geology**, v.49.

Fumes, R.A., Luvizotto, G.L., Moraes, R., Lanari, P., Valeriano, C.M., Zack, T., Caddick, M.J., Simões, L.S.A., 2022. Petrochronology of high-pressure granulite facies rocks from Southern Brasília Orogen, SE Brazil: Combining quantitative compositional mapping, single-element thermometry and geochronology. **Journal of Metamorphic Geology**, 1-36.

Gonçalves, G.O., Lana, C., Scholz, R., Buick, I.S., Gerdes, A., Kamo, S.L., Corfu, F., Marinho, M.M., Chaves, A.O., Valeriano, C., Nalini Jr, H.A. 2016. An assessment of monazite from the Itambé pegmatite district for use as U-Pb isotope reference material for microanalysis and implications for the origin of the “Moacyr Monazite”. **Chemical Geology**, v.424, p.30-50.

Goscombe, B., Gray, D., Foster, D.A. 2018. Metamorphic response to collision in the central himalayan orogen. **Gondwana Research**. V.57, p.191-265.

Harrison, T.M., Catlos, E.J., Montel, J.M. 2002. U-Th-Pb Dating of Phosphate Minerals. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v.48, p.524-558.

Hartung, R.F., 2018. **Estudo de Megaporfiroblastos de Granada da Nappe de Passos**. Dissertação de mestrado. IGCE-UNESP.

Hellstrom, J.C., Paton, C., Woodhead, J.D., Hergt, J.M. 2008. Iolite: software for spatially resolved LA-(quad and MC) ICP-MS analysis. In: Sylvester, P. (Ed), *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues*. **Mineralogical Association of Canada**, p.343-348.

Kwak, T.A.P. 1971. The Selective Replacement of the Aluminum Silicates by White Mica. **Contr. Mineral. And Petrol**. V.32, p.193-210.

Kwak, T.A.P. 1974. Natural Staurolite Breakdown Reactions at Moderate to High Pressures. **Contr. Mineral. And Petrol**. V.44, p.57-80.

Lanari P, Vidal O, De Andrade V, Dubacq B, Lewin E, Grosch EG, Schwartz S (2014) XMapTools: A MATLAB®-based program for electron microprobe X-ray image processing and geothermobarometry. **Computers & Geosciences** 62: 227–240

Lanari P, Vho A, Bovay T, Airaghi L, Centrella S (2018) Quantitative compositional mapping of mineral phases by electron probe micro-analyser. **Geological Society**, London, Special Publications 478: SP478–4

Larson, K.P., Shrestha, S., Cottle, J.M., Guilmette, C., Johnsonm T.A., Gibson, H.D., Gervais, F. 2022. Re-evaluating monazite as a record of metamorphic reactions. **Geoscience Frontiers**. v.13, p.18.

Luvizotto, G.L., 2003. **Caracterização metamórfica das rochas do Grupo Araxá na região de São Sebastião do Paraíso, sudoeste de Minas Gerais**. Master's thesis, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista.

Luvizotto, G.L., Zack., T. 2009. Nb and Zr behavior in the rutile dating high-grade metamorphism and retrogression: An example from the Ivrea-Verbano Zone. **Chemical Geology**, v.261, p.303-317.

Luvizotto, G.L., Zack, T., Triebold, S., Von Eynatten, H., 2009a. Rutile occurrence and trace element behavior in medium-grade metasedimentary rocks: example from the Erzgebirge, Germany. **Mineralogy and Petrology** 97: 233–249.

Luvizotto, G.L., Zack, T., Meyer, H.P., Ludwig, T., Triebold, S., Kronz, A., Münker, C., Stockli, D.F., Prowatke, S., Klemme, S. 2009b. Rutile crystals as potential trace element and isotope mineral standards for microanalysis. **Chemical Geology**, v.261, p.346-369.

Luvizotto, G.L., Simões, L.S.A., Moraes, R., de Souza, D.M., Carneiro, H.P., 2011. **High-Pressure Granulite facies rocks from the Passos Nappe in São Sebastião do Paraíso**. In: 12 Simpósio de Geologia do Sudeste, 2011, Nova Friburgo. Anais do 12 Simpósio de Geologia do Sudeste.

Luvizotto, G. L. ; Simões, L. S. A. ; de Souza, D. M. . **Geothermobarometry of retro-eclogites from the Passos Nappe in São Sebastião do Paraíso - MG, Brazil**. In: 46 Congresso Brasileiro de Geologia, 2012, Santos. Anais do 46 Congresso Brasileiro de Geologia, 2012.

Luvizotto, G.L., Zack, T., de Souza, D.M., Simões, L.S.A., Silvestre, M.D., 2014. **Pseudosections and Zr-InRutile Thermometry Applied to Granulite Facies Rocks From Passos Nappe, São Sebastião do Paraíso - Mg**. In: 47º Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador.

Luvizotto, G.L., Fumes, R.A., Moraes, R., Ferraz, E.R.M. 2017. **P-T Constraints on High-Pressure Granulites from the Southern Brazilian Belt: Ti-Quartz and Zr-in-Rutile Thermometry**. In: Goldschmidt2017 Abstract.

Marimon, R.S., Trouw, R.A.J., Dantas, E.L. 2020. Significance of age periodicity in the continental crust record: The São Francisco Craton and adjacent Neoproterozoic orogens as a case study. **Gondwana Research**, v.86, p.144-163.

Parrish, R.R. 1990. U-Pb dating of monazite and its application to geological problems. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v.27, 1431-1450.

Passchier, C.W., Trouw, R.A.J. 2005. **Microtectonics** 2º Edition. Springer, p.366.

Piuzana, D., Pimentel, M.M., Fuck, R.A., Armstrong, R. 2003. Neoproterozoic granulite facies metamorphism and coeval granitic magmatism in the Brasília Belt, Central Brazil: regional implications of new SHRIMP U-Pb and Sm-Nd data. **Precambrian Research**, v.125, p.245-273.

Powell, R., Holland, T., Worley, B., 1998. Calculating phase diagrams involving solid solutions via nonlinear equations, with examples using THERMOCALC. **Journal of Metamorphic Geology** 16: 577–588.

Reno, B.L., Piccoli, P.M., Brown, M., Trouw, R.A.J. 2012. In situ monazite (U-Th)-Pb ages from the Southern Brasília Belt, Brazil: constraints on the high-temperature retrograde evolution of HP granulites. **Journal of Metamorphic Geology**, v.30, p.81-112.

Rocha, B.C., Moraes, R., Moller, A., Cioffi, C.R., Jercinovic, M.J. 2017. Timing of anatexis and melt crystallization in the Socorro-Guaxupé Nappe, SE Brazil: insights from trace element composition of zircon, monazite and garnet coupled to U-Pb geochronology. **Lithos**, v.227, p.337-355.

Santos, C.A., Luvizotto, G.L., Moraes, R., Fumes, R.A., Zack, T. 2021. Metamorphism of retroeclogites from the Passos Nappe, Southern Brasília Orogen. **Journal of South American Earth Sciences**, v.112 p.13.

Silva, A.J.C.A., Simões, L.S.A., Dufrane, S.A. 2019. Tectonic implications of U-Pb ages of detrital zircon grains in metasedimentary rocks of the northwestern sector of the Passos Nappe, southern Brasília Belt, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v.95.

Simões, L.S.A., 1995. **Evolução tectono-metamórfica da nappe de Passos, sudoeste de Minas Gerais**. Ph.D. thesis, IG-Universidade de São Paulo.

Simões, L.S.A., Valeriano, C.M., Zanardo, A., Morales, N. Gomi, C., Moraes, R. 1988. **Zonação metamórfica inversa do Grupo Araxá/Canastra na região de São Sebastião do Paraíso – Alpinópolis**. In: CONOR. BRAS. GEOL., 35. v.3, p.1203-1216.

Simões, L.S.A., Silva, O.S.G., Fumes, R.A., Luvizotto, G.L. 2022. Characterization of the inverted metamorphic gradient of the Passos Nappe (SE-Brazil) based on multiple geothermobarometers. **Journal of South American Earth Sciences**, v.119.

Spear, F.S., Pyle, J.M. 2002. Apatite, Monazite, and Xenotime in Metamorphic Rocks. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v.48, p.293-335.

Suzuki, K., Adachi, M. 1991. Precambrian provenance and Silurian metamorphism of the Tsubonosawa paragneiss in the South Kitakami terrane, Northeast Japan, revealed by the chemical Th-U-total Pb isochron ages of monazite, zircon and xenotime. **Geochemical Journal**, v.25 (5), p.357-376.

Suzuki, K., Adachi, M., 1994. Middle Precambrian detrital monazite and zircon from the hida gneiss on Oki-Dogo Island, Japan: their origin and implications for the correlation of basement gneiss of Southwest Japan and Korea. **Tectonophysics**, v.235 (3), p.277-292.

Suzuki, K., Adachi, M., Kajizuka, I. 1994. Electron microprobe observations of Pb diffusion in metamorphosed detrital monazites. **Earth and Planetary Science Letters**, v.128 (3-4), p.391-405.

Teixeira, N.A., Danni, J. 1978. **Contribuição à Estratigrafia do Grupo Araxá na região de Passos (MG)**. In: Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia, p. 126.

Teixeira, T.H. 2021. **Modelagem Metamórfica de Rochas de Alta Pressão na Região de São Sebastião do Paraíso – MG por Meio de Pseudosseção e Análise Química Mineral**. Trabalho de Conclusão de Curso, IGCE – Universidade Estadual Paulista.

Thomas, J.B., Watson, E.B., Spear, F.S., Shemella, P.T., Nayak, S.K., Lanzirrotti, A., 2010. TitaniQ under pressure: the effect of pressure and temperature on the solubility of Ti in quartz. **Contributions to Mineralogy and Petrology** 160: 743–759

Tomkins, H.S., Powell, R., Ellis, D.J., 2007. The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. **Journal of Metamorphic Geology** 25: 703–713.

Turuani, M.J., Laurent, A.T., Seydoux-Guillaume, A.M., Fougereuse, D., Saxey, D., Reddy, S.M., Harley, S.L., Reynaud, S., Rickard, W.D.A. 2022. Partial retention of radiogenic Pb in galena nanocrystals explains discordance in monazite from Napier Complex (Antarctica). **Earth and Planetary Science Letters**, v.588, p.11.

Valeriano, C.M. 2017. **The Southern Brasília Belt**. In: Heilbron, M.; Cordani, U.G.; Alkmim, F. (Ed.). *São Francisco Craton, Eastern Brazil. Regional Geology Reviews*. Springer International Publishing. 189–203.

Valeriano, C.M., Simões, L.S.A., Teixeira, W., Heilbron, M. 2000. Southern Brasília belt (SE Brazil): tectonic discontinuities, K-Ar data and evolution during the Neoproterozoic Brasiliano orogeny. **Revista Brasileira de Geociências** v.30, p.195-199.

Valeriano, C.M., Machado, N., Simonetti, A., Valladares, C.S., Seer, H.J., Simões, L.S.A. 2004. U-Pb geochronology of southern Brasília Belt (SE-Brazil): sedimentary provenance, Neoproterozoic orogeny and assembly of West Gondwana. **Precambrian Research** 130, p.27-55.

Valeriano, C.M., Pimentel, M.M., Heilbron, M., Almeida, J.C.H., Trow, R.A.J. 2008. Tectonic evolution of the Brasília Belt, Central Brazil, and early assembly of Gondwana. **Geological Society** 294, 197-210.

Vermeesch, P., 2018. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. **Geoscience Frontiers**, v.9, p.1479-1493.

Vlach S.R.F. 2010. Th-U-PbT dating by electron probe microanalysis, part I. Monazite: analytical procedures and data treatment. **Revista do Instituto de Geociências - USP** 10

Vlach, S. R. F.; Gualda, G. A. R. 2000. Microprobe Monazite Dating and the Ages of Some Granitic and Metamorphic Rocks From Southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 1, p. 214–218.

Wang, W., Cawood, P.A., Pandit, M.K., Zhao, J.H., Zheng, J.P. 2019. No collision between Eastern and Western Gondwana at their northern extent. **Geology**, v.47, n.4, p.308-312.

Warr, L.N. 2021. IMA – CNMNC approved mineral symbols. **Mineralogical Magazine**, v. 85, p. 291-320.

Williams, M.L., Jercinovic, M.J., Goncalves, P., Mahan, K. 2006. Format and philosophy for collecting, compiling, and reporting microprobe monazite ages. **Chemical Geology**, v.225, p.1-15.

Yardley, B.W.D. 2004. **Introdução à Petrologia Metamórfica**. 2ª edição. Ed. UnB.

Zack T., Moraes, R., Kronz, A. 2004. Temperature dependence of Zr in rutile: Empirical calibration of a rutile thermometer. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v.148, p.471-488.

Zanardo, A., 1992. **Análise petrográfica, estratigráfica e microestrutural da região de Guaxupé-PassosDelfinópolis (MG)**. Ph.D. thesis, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, Brazil

ANEXO A – DADOS DE QUÍMICA MINERAL E GEOCRONOLOGIA
U-Th-PbT EM MONAZITA (EPMA)

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
GL09	mnz-1-1	Matriz	1.160	41644	7048	1829	626	24
GL09	mnz-1-2	Matriz	1.131	37364	7071	1642	601	26
GL09	mnz-1-3	Matriz	1.238	38618	6803	1761	640	26
GL09	mnz-1-4	Matriz	0.304	33830	4455	1349	617	33
GL09	mnz-1-5	Matriz	0.268	44327	5671	1778	626	26
GL09	mnz-1-6	Matriz	0.309	39570	5019	1615	639	29
GL09	mnz-1-7	Matriz	0.293	40757	5751	1739	646	27
GL09	mnz-2-1-1	Matriz	0.388	37183	5144	1545	633	30
GL09	mnz-2-1-2	Matriz	1.316	34471	6280	1564	629	28
GL09	mnz-2-1-3	Matriz	1.050	38064	6573	1598	595	26
GL09	mnz-2-2-1	Matriz	0.490	38248	6350	1633	613	27
GL09	mnz-2-2-2	Matriz	0.906	40427	6567	1820	650	26
GL09	mnz-2-2-3	Matriz	1.298	37411	7082	1689	617	26
GL09	mnz-2-2-4	Matriz	1.039	39389	7287	1778	623	25
GL09	mnz-3-1-1	Matriz	0.783	36555	6648	1623	616	27
GL09	mnz-3-1-2	Matriz	0.338	35043	5860	1552	634	30
GL09	mnz-3-1-3	Matriz	0.240	32453	5218	1385	619	33
GL09	mnz-3-1-4	Matriz	0.244	32075	4869	1336	616	34
GL09	mnz-3-1-5	Matriz	1.022	37538	6792	1707	632	27
GL09	mnz-5-1	Matriz	0.855	32263	7652	1651	637	28
GL09	mnz-5-2	Matriz	1.451	39633	7317	1742	607	25
GL09	mnz-5-3	Matriz	1.189	48712	7866	2111	628	22
GL09	mnz-12-1	Incl. Granada	0.345	47750	5397	1924	651	25
GL09	mnz-12-2	Incl. Granada	0.773	36229	4954	1534	647	30
GL09	mnz-12-3	Incl. Granada	1.731	37325	8640	1884	635	24
GL09	mnz-12-4	Incl. Granada	0.320	38734	5062	1645	658	29
GL09	mnz-12-5	Incl. Granada	0.390	40395	5003	1652	644	29
GL09	mnz-12-6	Incl. Granada	0.340	36532	4390	1542	670	31
GL09	mnz-12-7	Incl. Granada	0.389	40010	4914	1700	670	29

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
GL09	mnz-12-8	Incl. Granada	0.713	30931	4467	1283	624	34
GL09	mnz-14-1-1	Matriz	0.034	53678	7451	2142	608	22
GL09	mnz-14-1-2	Matriz	0.491	28538	5383	1300	624	34
GL09	mnz-14-1-3	Matriz	0.335	42031	4742	1776	682	28
GL09	mnz-14-1-4	Matriz	0.322	33833	4394	1402	643	33
GL09	mnz-14-1-5	Matriz	0.341	39814	4965	1717	677	29
GL09	mnz-14-1-6	Matriz	0.300	31770	4620	1224	580	34
GL09	mnz-14-1-7	Matriz	0.103	46309	9198	2233	646	22
GL09	mnz-14-2-1	Incl. Granada	0.156	41729	12758	2406	637	20
GL09	mnz-14-2-2	Incl. Granada	1.844	29672	5407	1333	623	30
GL09	mnz-14-2-3	Incl. Granada	1.593	33708	6234	1515	620	28
GL09	mnz-14-2-4	Incl. Granada	0.887	39427	8250	1906	635	24
GL09	mnz-17-1	Matriz	0.268	39357	4468	1515	622	30
GL09	mnz-17-2	Matriz	0.272	41308	4748	1630	635	29
GL09	mnz-17-3	Matriz	0.218	39191	3485	1494	653	32
GL09	mnz-17-4	Matriz	0.266	37837	4219	1484	637	31
GL09	mnz-17-5	Matriz	0.293	38847	4834	1633	661	30
GL09	mnz-18-1-1	Matriz	0.948	38728	8135	1864	631	24
GL09	mnz-18-1-2	Matriz	1.433	35221	7313	1653	619	26
GL09	mnz-18-1-3	Matriz	1.469	35540	7135	1627	612	26
GL09	mnz-18-1-4	Matriz	0.366	33791	5845	1550	648	30
GL09	mnz-18-1-5	Matriz	0.340	35057	5941	1623	658	30
GL09	mnz-18-1-6	Matriz	0.352	40151	6099	1649	608	27
GL09	mnz-18-2-1	Matriz	0.327	38353	6790	1725	630	27
GL09	mnz-18-2-2	Matriz	0.324	43800	7403	1946	633	24
GL09	mnz-18-2-3	Matriz	0.322	32497	6572	1536	630	30
GL09	mnz-19-1	Incl. Granada	0.708	36283	9545	1882	617	24
GL09	mnz-19-2	Incl. Granada	0.653	39124	10175	2038	623	23
GL09	mnz-19-3	Incl. Granada	0.074	50739	9836	2277	608	21

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
GL09	mnz-19-4	Incl. Granada	0.097	53459	8114	2330	644	21
GL09	mnz-19-5	Incl. Granada	0.148	49221	8834	2264	641	22
GL09	mnz-19-6	Incl. Granada	0.173	46813	8432	2124	632	23
GL09	mnz-19-7	Incl. Granada	0.714	32241	10464	1873	623	24
GL09	mnz-19-8	Incl. Granada	0.498	44811	10626	2365	656	21
GL09	mnz-19-9	Incl. Granada	0.421	39634	12337	2432	670	21
GL09	mnz-19-10	Incl. Granada	0.206	43262	9448	2213	659	23
GL09	mnz-20-1-1	Matriz	0.430	39193	5148	1650	652	29
GL09	mnz-20-1-2	Matriz	0.312	38394	4631	1514	626	30
GL09	mnz-20-1-3	Matriz	0.324	35274	4236	1431	645	33
GL09	mnz-20-1-4	Matriz	0.270	37255	4550	1507	640	31
GL09	mnz-20-1-5	Matriz	0.454	40981	15335	2662	645	19
GL09	mnz-20-1-6	Matriz	0.056	47616	13809	2677	638	19
GL09	mnz-20-2-1	Matriz	0.217	39094	7771	1995	682	26
GL09	mnz-20-2-2	Matriz	0.256	37892	8342	1992	674	26
GL09	mnz-20-2-3	Matriz	0.395	43115	11048	2242	626	21
GL09	mnz-20-2-4	Matriz	0.321	43445	12715	2464	640	20
GL09	mnz-20-2-5	Matriz	0.256	42294	4141	1687	668	29
GL09	mnz-20-2-6	Matriz	0.256	44856	4340	1761	660	28
GL09	mnz-20-2-8	Matriz	0.278	45448	4663	1864	679	27
GL09	mnz-22-1	Matriz	0.182	43101	12510	2465	648	20
GL09	mnz-22-2	Matriz	0.504	36420	11664	2199	651	22
GL09	mnz-22-3	Matriz	0.300	35242	4610	1513	665	32
GL09	mnz-22-4	Matriz	0.277	31866	4989	1419	651	33
GL09	mnz-22-5	Matriz	0.331	28497	3878	1187	638	38
GL09	mnz-22-6	Matriz	0.233	36370	4046	1319	590	32
GL09	mnz-22-7	Matriz	0.243	46277	6062	1895	635	25
GL09	mnz-22-8	Matriz	0.294	31874	4464	1354	644	34
MG173	mnz-1-1	Matriz	0.904	33219	5893	1486	627	29

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
MG173	mnz-1-2	Matriz	0.517	39628	5916	1687	633	27
MG173	mnz-1-3	Matriz	1.397	21794	1690	724	588	48
MG173	mnz-1-5	Matriz	1.545	26914	3828	1103	619	36
MG173	mnz-1-7	Matriz	1.315	18913	1374	621	589	55
MG173	mnz-1-8	Matriz	0.866	32034	7867	1542	592	27
MG173	mnz-1-9	Matriz	1.054	28676	7273	1467	619	29
MG173	mnz-1-10	Matriz	1.498	20354	1438	670	594	51
MG173	mnz-1-11	Matriz	1.235	37235	5959	1636	638	27
MG173	mnz-1-13	Matriz	0.607	33267	6153	1429	593	30
MG173	mnz-1-14	Matriz	1.425	26928	2326	976	626	40
MG173	mnz-1-15	Matriz	1.803	49288	6817	1952	604	22
MG173	mnz-1-18	Matriz	1.341	90910	3049	2691	592	16
MG173	mnz-1-19	Matriz	1.791	52190	6874	2094	621	21
MG173	mnz-1-20	Matriz	1.681	48646	6420	2017	641	22
MG173	mnz-1-21	Matriz	1.470	22251	2046	785	602	46
MG173	mnz-1-22	Matriz	1.545	32293	6271	1489	624	28
MG173	mnz-2-2	Matriz	0.670	38277	947	1096	588	36
MG173	mnz-2-3	Matriz	1.548	41714	4682	1576	613	26
MG173	mnz-2-4	Matriz	1.380	26172	2165	909	606	42
MG173	mnz-2-5	Matriz	1.488	19878	2042	753	628	49
MG173	mnz-2-6	Matriz	1.474	31479	3319	1137	596	34
MG173	mnz-2-8	Matriz	1.610	23755	8372	1352	586	29
MG173	mnz-2-9	Matriz	1.258	19125	3108	800	605	47
MG173	mnz-2-10	Matriz	0.405	34182	5496	1476	627	30
MG173	mnz-2-2-1	Matriz	0.571	30808	7699	1505	596	28
MG173	mnz-2-2-2	Matriz	0.428	30626	5648	1408	635	32
MG173	mnz-2-2-3	Matriz	0.443	29594	5730	1326	608	33
MG173	mnz-2-2-4	Matriz	1.534	23902	1505	773	595	46
MG173	mnz-3-1-1	Incl. Granada	1.501	29745	3694	1150	609	34

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
MG173	mnz-3-1-2	Incl. Granada	1.608	30329	3943	1279	654	33
MG173	mnz-3-1-3	Incl. Granada	1.603	34042	5301	1484	639	29
MG173	mnz-3-1-4	Incl. Granada	1.364	22113	1531	691	566	49
MG173	mnz-3-1-5	Incl. Granada	1.457	30477	3615	1162	609	34
MG173	mnz-3-2-1	Incl. Granada	1.340	26572	7102	1305	581	30
MG173	mnz-3-2-2	Incl. Granada	1.427	22485	1507	687	557	47
MG173	mnz-3-2-3	Incl. Granada	1.413	19163	2808	736	577	46
MG173	mnz-4-1-1	Incl. Granada	1.332	22895	1516	759	604	48
MG173	mnz-4-1-2	Incl. Granada	1.424	23799	1815	848	632	45
MG173	mnz-4-1-3	Incl. Granada	1.468	26113	2783	988	622	39
MG173	mnz-4-1-4	Incl. Granada	1.459	24246	2202	830	586	43
MG173	mnz-4-2-1	Incl. Granada	1.519	26741	7141	1393	615	30
MG173	mnz-4-2-2	Incl. Granada	1.428	21265	1372	678	585	50
MG173	mnz-4-2-3	Incl. Granada	1.366	24377	1739	802	592	45
MG173	mnz-4-2-4	Incl. Granada	1.700	27688	7644	1522	638	28
MG173	mnz-4-2-5	Incl. Granada	1.963	25384	9492	1626	636	26
MG173	mnz-5-1	Incl. Granada	1.457	24379	2091	865	614	43
MG173	mnz-5-2	Incl. Granada	1.625	37239	5107	1451	596	28
MG173	mnz-5-3	Incl. Granada	1.445	26898	2625	970	606	39
MG173	mnz-5-4	Incl. Granada	1.938	26817	8642	1477	594	27
MG173	mnz-5-5	Incl. Granada	1.895	26195	8553	1526	623	27
MG173	mnz-5-6	Incl. Granada	1.648	26160	7775	1440	617	29
MG173	mnz-6-1	Incl. Granada	1.479	24779	3972	1031	605	37
MG173	mnz-6-2	Incl. Granada	1.427	25008	4057	1029	596	37
MG173	mnz-6-3	Incl. Granada	1.482	26732	5590	1291	634	32
MG173	mnz-6-4	Incl. Granada	1.646	27584	7706	1481	621	28
MG173	mnz-6-5	Incl. Granada	1.401	20097	1461	632	564	51
MG173	mnz-6-6	Incl. Granada	1.410	19265	1634	736	662	53
MG173	mnz-6-7	Incl. Granada	1.329	14546	1686	526	582	62

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
MG173	mnz-7-1	Matriz	0.895	31332	5294	1358	618	31
MG173	mnz-7-3	Matriz	0.929	28183	5280	1280	623	33
MG173	mnz-7-4	Matriz	0.449	32656	6151	1434	602	30
MG173	mnz-7-5	Matriz	1.388	26179	1198	819	604	45
MG173	mnz-7-6	Matriz	0.446	29877	5556	1319	608	33
MG173	mnz-7-7	Matriz	1.343	26845	987	803	593	45
MG173	mnz-7-8	Matriz	1.386	27438	1794	934	622	41
MG173	mnz-7-9	Matriz	1.217	21917	893	675	603	53
MG173	mnz-8-1	Matriz	0.654	37695	6277	1535	585	27
MG173	mnz-8-2	Matriz	0.476	34487	6093	1493	608	29
MG173	mnz-8-3	Matriz	0.508	35187	4979	1401	603	30
MG173	mnz-8-4	Matriz	0.539	44880	3652	1536	600	28
MG173	mnz-8-5	Matriz	0.453	31116	4926	1259	591	33
MG173	mnz-8-2-1	Matriz	0.489	42229	4940	1546	587	27
MG173	mnz-8-2-2	Matriz	0.549	36585	5300	1489	612	29
MG173	mnz-9-1-1	Matriz	0.865	36254	5763	1519	611	28
MG173	mnz-9-1-2	Matriz	0.389	43619	6956	1906	636	24
MG173	mnz-9-1-4	Matriz	0.994	35834	4463	1330	585	30
MG173	mnz-9-2-1	Matriz	0.851	35845	5012	1419	602	29
MG173	mnz-9-2-2	Matriz	0.173	32995	8075	1666	621	28
MG173	mnz-9-2-3	Matriz	0.865	36571	5916	1522	603	28
MG173	mnz-9-2-4	Matriz	0.243	32166	6396	1515	631	30
MG173	mnz-9-2-5	Matriz	0.345	33701	5977	1494	621	30
MG173	mnz-9-2-6	Matriz	0.815	33564	8635	1761	630	26
MG173	mnz-9-2-7	Matriz	0.373	34510	5999	1573	643	30
MG173	mnz-9-3-1	Matriz	0.309	32018	8337	1713	638	27
MG173	mnz-9-3-2	Matriz	0.261	31916	8628	1703	626	27
MG173	mnz-9-3-3	Matriz	0.664	29981	5174	1344	634	33
MG173	mnz-9-3-4	Matriz	1.160	30143	4641	1208	591	33

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
MG173	mnz-9-3-5	Matriz	1.321	32375	6160	1469	619	28
MG173	mnz-9-3-6	Matriz	0.940	31668	5069	1393	639	31
MG173	mnz-10-1	Incl. Granada	0.252	33766	5076	1397	614	32
MG173	mnz-10-2	Incl. Granada	0.278	35755	5507	1549	637	30
MG173	mnz-10-3	Incl. Granada	0.286	38482	5704	1596	619	28
MG173	mnz-10-4	Incl. Granada	0.250	31836	4865	1340	621	33
MG173	mnz-10-5	Incl. Granada	0.292	37188	5769	1581	624	29
MG173	mnz-10-6	Incl. Granada	0.288	45555	5720	1870	644	25
MG173	mnz-11-2-1	Incl. Granada	0.209	34407	4162	1424	656	33
MG173	mnz-11-2-2	Incl. Granada	0.380	31691	3840	1216	609	35
MG173	mnz-11-2-3	Incl. Granada	0.492	30544	4363	1342	662	35
MG173	mnz-11-2-4	Incl. Granada	0.496	43026	4603	1572	600	28
MG173	mnz-11-3-1	Incl. Granada	0.557	50919	4994	1862	614	24
MG173	mnz-11-3-2	Incl. Granada	0.479	40000	4057	1523	633	30
MG173	mnz-12-1	Matriz	1.162	36689	4588	1373	589	29
MG173	mnz-12-2	Matriz	0.578	39417	4954	1604	638	29
MG173	mnz-12-3	Matriz	1.046	35028	4682	1416	623	30
MG173	mnz-13-1	Incl. Granada	0.823	37253	4746	1488	625	30
MG173	mnz-13-2	Incl. Granada	0.804	37320	4782	1519	635	29
RR2A1	mnz-1-1	Matriz	0.092	50309	16175	2774	596	14
RR2A1	mnz-1-2	Matriz	0.120	33566	10542	1794	584	21
RR2A1	mnz-1-3	Matriz	0.075	31076	9818	1638	575	22
RR2A1	mnz-2-1	Matriz	0.195	31888	10125	1639	560	21
RR2A1	mnz-2-2	Matriz	0.206	32924	10559	1786	587	21
RR2A1	mnz-2-3	Matriz	0.223	35753	11899	1983	588	19
RR2A1	mnz-3	Matriz	0.098	29597	12952	1840	567	20
RR2A1	mnz-4	Matriz	0.464	33155	9165	1574	554	22
RR2A1	mnz-5	Matriz	0.120	35115	10021	1684	551	21
RR2A1	mnz-6	Matriz	0.158	32920	9543	1635	566	22

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
RR2A1	mnz-7-1	Matriz	0.478	31979	9544	1665	584	22
RR2A1	mnz-7-2	Matriz	0.302	30285	9242	1558	571	23
RR2A1	mnz-7-3	Matriz	0.682	37631	10095	1856	583	20
RR2A1	mnz-8-1	Matriz	0.159	28466	10184	1562	561	22
RR2A1	mnz-8-2	Matriz	0.154	34321	11502	1889	582	19
RR2A1	mnz-8-3	Matriz	0.178	47162	12619	2301	577	16
RR2A1	mnz-10-1	Matriz	0.114	49258	17832	2898	597	14
RR2A1	mnz-10-2	Matriz	0.127	50158	18034	2922	593	14
RR2A1	mnz-10-3	Matriz	0.107	28022	9511	1514	568	23
RR2A1	mnz-12	Matriz	0.126	33769	9945	1699	569	21
RR2A1	mnz-13-1	Matriz	0.123	43353	15978	2516	583	15
RR2A1	mnz-13-2	Matriz	0.482	31653	9793	1655	576	21
RR2A1	mnz-14-2	Matriz	0.194	39729	12918	2076	562	17
RR2A1	mnz-14-3	Matriz	0.104	41482	10634	2050	596	19
MG175	mnz-1-1	Matriz	0.016	36837	5278	1478	606	26
MG175	mnz-1-2	Matriz	0.209	30167	3116	1177	646	33
MG175	mnz-1-3	Matriz	0.071	34099	3114	1228	615	30
MG175	mnz-2	Matriz	0.377	36240	7657	1617	585	22
MG175	mnz-3-2	Matriz	0.864	39569	5138	1634	641	24
MG175	mnz-3-3	Matriz	0.689	32256	4826	1309	604	27
MG175	mnz-3-4	Matriz	0.282	34864	7658	1601	592	23
MG175	mnz-4-1	Matriz	0.249	37269	7893	1667	586	22
MG175	mnz-4-2	Matriz	0.070	33483	4868	1373	616	28
MG175	mnz-4-4	Matriz	0.064	33837	4559	1335	607	28
MG175	mnz-5	Matriz	0.223	32746	5334	1352	597	27
MG175	mnz-7-1	Matriz	0.339	33605	7798	1599	599	23
MG175	mnz-7-2	Matriz	0.289	33423	7243	1562	606	24
MG175	mnz-7-4	Matriz	0.017	35561	6611	1575	610	24
MG175	mnz-7-5	Matriz	0.068	37002	5679	1538	613	25

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
MG175	mnz-7-6	Matriz	0.296	37537	5310	1546	624	25
MG175	mnz-8-1	Matriz	0.539	32207	4952	1267	581	27
MG175	mnz-8-2	Matriz	0.827	23093	4698	983	567	33
MG175	mnz-8-3	Matriz	0.477	34322	9596	1754	592	21
MG175	mnz-9-1	Matriz	0.083	36876	6469	1612	615	24
MG175	mnz-9-2	Matriz	0.200	34531	6019	1450	593	25
MG175	mnz-10	Matriz	0.285	29456	4536	1220	611	30
RR4B	mnz-2-3	Incl. Granada	0.339	39478	3156	1459	649	25
RR4B	mnz-2-4	Incl. Granada	0.343	36292	3792	1430	650	25
RR4B	mnz-2-5	Incl. Granada	0.066	50169	1603	1520	609	22
RR4B	mnz-3-1	Incl. Granada	0.293	56761	5016	2061	624	18
RR4B	mnz-3-2	Incl. Granada	0.269	36547	3957	1415	633	25
RR4B	mnz-3-3	Incl. Granada	0.090	35770	2246	1212	623	28
RR4B	mnz-3-4	Incl. Granada	0.061	43384	1890	1448	648	25
RR4B	mnz-3-5	Incl. Granada	0.080	36531	2115	1197	611	28
RR4B	mnz-7-1	Matriz	0.062	59569	1137	1715	602	20
RR4B	mnz-7-2	Matriz	0.833	49541	2586	1627	622	21
RR4B	mnz-7-3	Matriz	0.846	48663	2669	1667	643	21
RR4B	mnz-7-4	Matriz	0.659	38594	1904	1299	642	27
RR4B	mnz-7-5	Matriz	0.165	45096	1502	1403	622	25
RR4B	mnz-7-6	Matriz	0.143	41111	1429	1257	609	27
RR4B	mnz-7-7	Matriz	0.552	50394	2062	1615	627	22
RR4B	mnz-8-1	Matriz	0.444	37167	1816	1191	613	28
RR4B	mnz-8-2	Matriz	0.420	38455	1963	1194	590	27
RR4B	mnz-8-3	Matriz	0.065	51848	1127	1557	622	22
RR4B	mnz-8-5	Matriz	0.000	43927	3542	1623	648	23
RR4B	mnz-9-1	Incl. Granada	0.069	60178	1624	1811	614	19
RR4B	mnz-9-2	Incl. Granada	0.083	57248	1793	1812	637	20
RR4B	mnz-9-3	Incl. Granada	0.057	43533	1718	1379	622	25

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
RR4B	mnz-9-4	Incl. Granada	0.073	41763	1755	1330	621	26
RR4B	mnz-11-1	Matriz	0.061	44793	1382	1335	601	25
RR4B	mnz-11-2	Matriz	0.311	44389	2279	1424	610	24
RR4B	mnz-11-3	Matriz	0.277	43179	2121	1445	639	24
RR4B	mnz-11-4	Matriz	0.069	64469	1135	1869	609	19
RR4B	mnz-11-5	Matriz	0.174	36606	4259	1462	640	24
RR4B	mnz-11-6	Matriz	0.063	45254	1330	1418	634	25
RR4B	mnz-11-7	Matriz	0.060	43942	1325	1287	592	25
RR4A	mnz-2-1	Incl. Granada	0.724	44125	685	1348	645	26
RR4A	mnz-2-2	Incl. Granada	0.679	42646	785	1287	631	27
RR4A	mnz-2-3	Incl. Granada	0.611	13937	437	454	654	71
RR4A	mnz-2-4	Incl. Granada	0.616	13952	498	424	603	70
RR4A	mnz-2-5	Incl. Granada	1.607	30934	3755	1286	658	27
RR4A	mnz-2-6	Incl. Granada	1.462	36194	3105	1367	653	25
RR4A	mnz-2-7	Incl. Granada	0.686	61303	846	1818	630	19
RR4A	mnz-2-8	Incl. Granada	0.633	68559	995	2038	630	18
RR4A	mnz-3-1	Incl. Granada	0.635	66839	839	1945	620	18
RR4A	mnz-3-2	Incl. Granada	0.738	63406	705	1829	618	19
RR4A	mnz-3-4	Incl. Granada	0.743	21433	1037	730	651	46
RR4A	mnz-3-5	Incl. Granada	1.337	31983	4458	1373	652	25
RR4A	mnz-5-1	Incl. Granada	0.638	58519	754	1774	645	20
RR4A	mnz-5-2	Incl. Granada	0.569	51187	894	1514	621	23
RR4A	mnz-5-3	Incl. Granada	0.543	19441	798	623	627	51
RR4A	mnz-5-4	Incl. Granada	1.627	34673	4468	1472	660	24
RR4A	mnz-5-5	Incl. Granada	1.538	26515	3375	1119	659	30
RR4A	mnz-5-6	Incl. Granada	1.524	35066	3009	1355	668	26
RR4A	mnz-6-1	Matriz	2.240	33076	7945	1720	644	20
RR4A	mnz-6-2	Matriz	2.256	35640	7116	1719	645	20
RR4A	mnz-6-3	Matriz	2.216	36391	6943	1776	664	20

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
RR4A	mnz-8-1	Matriz	1.440	46406	5943	1951	655	18
RR4A	mnz-8-2	Matriz	2.383	37859	6918	1804	659	20
RR4A	mnz-9-1	Matriz	0.995	33993	8070	1729	633	20
RR4A	mnz-9-2	Matriz	1.857	38229	7592	1842	646	19
RR4A	mnz-9-3	Matriz	2.345	34957	7035	1745	665	20
RR4A	mnz-10-1	Matriz	0.366	105970	6043	3626	639	11
RR4A	mnz-10-3	Matriz	1.992	36796	5247	1564	641	22
RR4A	mnz-10-4	Matriz	1.302	40167	5396	1711	654	21
RR4A	mnz-11-1	Matriz	1.920	42944	6841	1918	649	18
RR4A	mnz-11-3	Matriz	1.758	33650	6751	1665	660	21
RR4A	mnz-11-4	Matriz	1.629	34985	6122	1643	660	21
RR4A	mnz-11-5	Matriz	1.593	38746	7007	1745	626	20
MG176	mnz-1-1	Matriz	2.813	30227	5371	1257	583	28
MG176	mnz-1-2	Matriz	2.120	34905	5146	1449	620	27
MG176	mnz-2-1	Matriz	2.163	39367	4492	1455	597	27
MG176	mnz-2-2	Matriz	2.022	33287	4121	1289	611	30
MG176	mnz-2-3	Matriz	2.762	36079	3360	1285	606	29
MG176	mnz-2-4	Matriz	2.783	31700	3381	1178	611	31
MG176	mnz-3-1	Matriz	2.254	42048	4204	1590	631	26
MG176	mnz-3-2	Matriz	2.289	42705	6226	1786	627	24
MG176	mnz-3-3	Matriz	2.514	34989	3642	1262	597	29
MG176	mnz-3-4	Matriz	1.843	34393	3812	1332	629	30
MG176	mnz-3-5	Matriz	1.827	53672	4799	1893	605	22
MG176	mnz-3-6	Matriz	1.717	35083	3159	1178	576	31
MG176	mnz-3-7	Matriz	1.883	35144	4178	1273	579	29
MG176	mnz-3-8	Matriz	2.320	27728	3365	1022	586	34
MG176	mnz-9-1	Incl. Granada	2.262	57258	4282	2024	629	21
MG176	mnz-9-2	Incl. Granada	1.777	60474	3777	2047	623	22
MG176	mnz-9-3	Incl. Granada	1.210	39765	3312	1373	602	30

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
MG176	mnz-9-2-1	Incl. Granada	2.440	31348	4578	1226	587	30
MG176	mnz-9-2-2	Incl. Granada	2.400	32851	4999	1325	597	28
MG176	mnz-9-2-3	Incl. Granada	1.706	61268	3507	2045	623	21
MG176	mnz-9-2-4	Incl. Granada	1.611	46287	2538	1578	641	27
MG176	mnz-9-2-5	Incl. Granada	1.261	46364	1954	1421	598	28
MG176	mnz-9-2-6	Incl. Granada	1.299	46275	1835	1404	596	29
MG176	mnz-9-2-7	Incl. Granada	1.313	46172	1891	1471	623	29
MG176	mnz-10-1	Matriz	1.567	31893	3782	1237	619	32
MG176	mnz-10-2	Matriz	2.785	33323	4185	1319	622	29
MG176	mnz-10-3	Matriz	2.681	30449	3655	1183	618	31
MG176	mnz-10-4	Matriz	2.865	42720	4290	1558	609	25
MG176	mnz-10-5	Matriz	1.688	37819	4272	1409	603	28
MG176	mnz-11-1	Incl. Granada	3.043	32426	3073	1217	635	31
MG176	mnz-11-2	Incl. Granada	2.670	25123	2569	878	582	37
MG176	mnz-12-2-1	Matriz	2.118	34250	3795	1252	595	29
MG176	mnz-12-2-2	Matriz	2.326	28944	4171	1196	622	32
MG176	mnz-12-2-3	Matriz	2.482	35793	3525	1254	588	31
MG176	mnz-12-2-4	Matriz	1.423	37757	4856	1508	623	28
MG176	mnz-13-1	Incl. Granada	1.760	32849	3120	1178	607	31
MG176	mnz-13-3	Incl. Granada	2.718	34931	3341	1208	585	29
MG176	mnz-13-4	Incl. Granada	2.463	27289	3494	1002	574	33
MG176	mnz-13-5	Incl. Granada	2.265	38966	3446	1384	611	28
MG176	mnz-13-6	Incl. Granada	2.411	31056	3083	1103	595	32
MG176	mnz-14-1	Matriz	1.721	34042	4133	1272	593	30
MG176	mnz-14-2	Matriz	1.749	32555	4169	1291	619	31
MG176	mnz-14-3	Matriz	2.658	31627	3204	1122	591	31
MG176	mnz-14-4	Matriz	2.582	31330	3968	1267	633	31
MG176	mnz-14-5	Matriz	2.356	38211	3555	1367	608	28
MG176	mnz-14-6	Matriz	2.658	31671	3914	1190	594	30

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
MG176	mnz-14-7	Matriz	1.797	38842	4508	1461	604	27
MG176	mnz-14-2-1	Matriz	1.916	36072	4447	1360	596	28
MG176	mnz-14-2-2	Matriz	2.622	41388	4089	1571	635	26
MG176	mnz-14-2-3	Matriz	2.876	32721	5721	1409	607	27
MG176	mnz-14-2-5	Matriz	2.453	34679	3788	1279	602	29
MG176	mnz-14-3-1	Matriz	1.878	39732	4191	1465	608	27
MG176	mnz-14-3-2	Matriz	3.018	50617	4294	1773	608	22
MG176	mnz-14-3-3	Matriz	2.568	32235	4316	1314	628	30
MG176	mnz-15-1	Matriz	1.874	36742	4180	1379	607	29
MG176	mnz-15-2	Matriz	1.726	35156	3839	1307	607	30
MG176	mnz-15-3	Matriz	2.638	35051	3125	1234	605	30
MG176	mnz-15-4	Matriz	2.647	32948	3053	1169	604	31
MG176	mnz-15-5	Matriz	2.591	31696	3693	1190	603	30
MG176	mnz-16-1	Matriz	2.023	34908	4102	1345	617	29
MG176	mnz-16-2	Matriz	1.836	36659	4649	1478	631	28
MG176	mnz-16-3	Matriz	2.571	35812	3529	1307	612	29
MG176	mnz-16-4	Matriz	2.427	32877	3039	1200	621	31
MG176	mnz-16-5	Matriz	2.574	39969	3471	1384	598	27
MG176	mnz-16-6	Matriz	3.169	45315	5917	1747	599	22
MG176	mnz-16-7	Matriz	3.204	46870	5937	1792	599	22
MG176	mnz-16-8	Matriz	3.197	48130	5840	1879	619	21
MG176	mnz-18-1	Matriz	2.196	37417	2859	1271	603	30
MG176	mnz-18-2	Matriz	2.135	35391	3265	1309	629	30
MG176	mnz-18-3	Matriz	1.600	37951	4036	1380	598	29
MG176	mnz-18-4	Matriz	2.042	35773	4364	1367	605	29
MG176	mnz-18-5	Matriz	1.896	35783	4053	1328	600	29
MG176	mnz-18-6	Matriz	1.946	34978	4258	1313	596	29
MG176	mnz-18-8	Matriz	1.163	31776	2712	1096	598	36
MG176	mnz-18-9	Matriz	1.163	31743	2748	1142	622	36

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
MG176	mnz-18-10	Matriz	1.318	36198	2858	1218	593	32
SF3-41	mnz-1-1-1	Matriz	0.115	42338	2840	1512	649	31
SF3-41	mnz-1-1-2	Matriz	0.119	39950	2689	1330	605	33
SF3-41	mnz-1-1-3	Matriz	0.121	39649	2669	1326	608	33
SF3-41	mnz-1-1-4	Matriz	0.122	38363	2699	1275	599	34
SF3-41	mnz-1-1-5	Matriz	0.130	39894	2687	1422	647	33
SF3-41	mnz-1-1-6	Matriz	0.118	39518	2598	1333	616	33
SF3-41	mnz-1-2-1	Matriz	0.100	36660	2703	1265	617	35
SF3-41	mnz-1-2-2	Matriz	0.115	35496	3208	1231	594	34
SF3-41	mnz-1-2-3	Matriz	0.105	41164	2780	1467	646	32
SF3-41	mnz-1-2-4	Matriz	0.108	42798	2809	1483	632	31
SF3-41	mnz-1-2-5	Matriz	0.104	42994	2808	1474	626	31
SF3-41	mnz-1-2-6	Matriz	0.038	34780	3066	1242	614	36
SF3-41	mnz-1-2-7	Matriz	0.066	39567	3239	1323	586	32
SF3-41	mnz-2-1	Matriz	0.140	39981	4327	1497	613	30
SF3-41	mnz-2-2	Matriz	0.143	41440	4520	1639	645	29
SF3-41	mnz-2-3	Matriz	0.211	37747	2790	1289	610	34
SF3-41	mnz-2-4	Matriz	0.141	40489	4866	1582	621	29
SF3-41	mnz-2-5	Matriz	0.143	44257	5120	1666	606	27
SF3-41	mnz-2-6	Matriz	0.143	45498	5333	1827	642	26
SF3-41	mnz-2-7	Matriz	0.151	44353	5331	1788	640	27
SF3-41	mnz-4-1	Incl. Cianita	0.151	35610	4172	1419	638	32
SF3-41	mnz-4-2	Incl. Cianita	0.155	36855	4261	1457	635	32
SF3-41	mnz-4-3	Incl. Cianita	0.152	38142	4282	1483	630	31
SF3-41	mnz-4-4	Incl. Cianita	0.306	37801	7146	1787	646	27
SF3-41	mnz-4-5	Incl. Cianita	0.158	36921	4245	1456	635	32
SF3-41	mnz-4-6	Incl. Cianita	0.148	36412	4325	1422	623	32
SF3-41	mnz-4-7	Incl. Cianita	0.147	36775	4278	1432	625	32
SF3-41	mnz-4-8	Incl. Cianita	0.168	35802	4964	1410	601	31

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
SF3-41	mnz-5-1	Incl. Cianita	0.183	35423	4730	1448	630	32
SF3-41	mnz-5-2	Incl. Cianita	0.177	41666	6018	1682	608	27
SF3-41	mnz-5-3	Incl. Cianita	0.180	39822	5817	1696	638	28
SF3-41	mnz-5-4	Incl. Cianita	0.183	40575	6034	1666	612	27
SF3-41	mnz-5-5	Incl. Cianita	0.197	32294	2371	1069	592	39
SF3-41	mnz-5-6	Incl. Cianita	0.218	30600	2718	1128	633	40
SF3-41	mnz-5-7	Incl. Cianita	0.195	30617	2831	1042	580	39
SF3-41	mnz-5-8	Incl. Cianita	0.179	31023	4353	1267	620	35
SF3-41	mnz-6-1	Incl. Granada	0.123	38377	2520	1247	594	34
SF3-41	mnz-6-2	Incl. Granada	0.153	35369	2382	1291	662	37
SF3-41	mnz-6-3	Incl. Granada	0.137	35223	4408	1431	638	32
SF3-41	mnz-6-4	Incl. Granada	0.136	46355	2795	1622	647	29
SF3-41	mnz-6-5	Incl. Granada	0.137	47212	2707	1642	649	29
SF3-41	mnz-6-6	Incl. Granada	0.144	46170	2744	1536	618	29
SF3-41	mnz-6-7	Incl. Granada	0.151	45705	2642	1631	664	30
SF3-41	mnz-6-8	Incl. Granada	0.149	40776	3451	1515	644	31
SF3-41	mnz-6-9	Incl. Granada	0.140	43032	4532	1667	638	28
SF3-41	mnz-6-10	Incl. Granada	0.138	44195	4994	1713	627	27
SF3-41	mnz-6-11	Incl. Granada	0.150	43428	5418	1727	626	27
SF3-41	mnz-6-12	Incl. Granada	0.144	43984	5399	1801	646	27
SF3-41	mnz-6-13	Incl. Granada	0.113	42303	4630	1602	618	28
SF3-41	mnz-6-14	Incl. Granada	0.124	41339	4510	1539	608	29
SF3-41	mnz-7-1	Incl. Granada	0.140	59991	5404	2219	633	22
SF3-41	mnz-7-2	Incl. Granada	0.149	58483	5210	2113	620	22
SF3-41	mnz-7-3	Incl. Granada	0.130	55941	4968	2046	628	23
SF3-41	mnz-7-4	Incl. Granada	0.150	59781	5260	2191	630	22
SF3-41	mnz-7-5	Incl. Granada	0.144	47823	4463	1748	621	26
SF3-41	mnz-7-6	Incl. Granada	0.136	44396	4186	1576	602	28
SF3-41	mnz-7-7	Incl. Granada	0.155	37852	3997	1343	585	31

Amostra	Monazita	Textura	Y ₂ O ₃ (%peso)	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Idade (Ma)	Erro (2σ)
SF3-41	mnz-7-8	Incl. Granada	0.158	38632	4172	1478	626	31
SF3-41	mnz-8-1	Matriz	0.076	36262	3020	1249	601	35
SF3-41	mnz-8-2	Matriz	0.113	37168	2842	1321	630	34
SF3-41	mnz-8-3	Matriz	0.125	36967	2812	1305	626	35
SF3-41	mnz-8-4	Matriz	0.139	45311	2875	1573	637	30
SF3-41	mnz-8-5	Matriz	0.117	46361	2769	1593	637	29
SF3-41	mnz-8-6	Matriz	0.132	42900	2526	1452	629	31
SF3-41	mnz-8-7	Matriz	0.129	39828	2461	1257	583	33
SF3-41	mnz-8-8	Matriz	0.117	40451	2434	1423	651	33

ANEXO B – QUÍMICA MINERAL DE ELEMENTOS TRAÇO E GEOTHERMOMETRIA EM RUTILO

Amostra	Mineral	Textura	Si	Al	V	Sn	Cr	Sb	Ta	Fe	W	Hf	Zr	Nb	P (kbar)	T (°C)
GL09	Rt	Incl Grt	612	90	1142	BD	322	BD	BD	6794	BD	BD	192	1943	10	615
GL09	Rt	Incl Grt	1122	275	1167	95	308	BD	BD	BD	BD	BD	185	2013	10	612
GL09	Rt	Incl Grt	360	275	1394	BD	287	BD	BD	5900	BD	BD	178	1992	10	609
GL09	Rt	Incl Grt	BD	95	1443	95	322	BD	180	BD	BD	BD	192	2565	10	615
GL09	Rt	Incl Grt	164	243	1235	71	294	BD	180	2759	BD	BD	163	2510	10	603
GL09	Rt	Incl Grt	BD	106	1400	BD	301	BD	BD	2347	BD	BD	163	2447	10	603
GL09	Rt	Incl Grt	182	339	1357	150	404	BD	BD	5154	190	BD	148	2810	10	596
GL09	Rt	Incl Grt	122	212	1173	102	308	BD	BD	4337	BD	85	229	2006	10	629
GL09	Rt	Incl Grt	BD	64	1560	126	294	BD	BD	1827	BD	BD	178	1566	10	609
GL09	Rt	Incl Grt	388	42	1382	71	322	BD	BD	1796	BD	BD	296	1936	10	649
GL09	Rt	Incl Grt	BD	48	1480	BD	315	BD	BD	1586	174	BD	259	2083	10	638
GL09	Rt	Incl Grt	89	101	1179	87	239	BD	BD	2620	BD	BD	178	1866	10	609
GL09	Rt	Incl Grt	42	64	1087	110	274	BD	BD	2293	BD	BD	155	1943	10	600
GL09	Rt	Incl Grt	BD	64	1099	BD	239	BD	BD	2340	BD	BD	170	1908	10	606
RR2A1	Rt	Mtx	BD	74	1580	160	1010	BD	BD	1244	BD	BD	120	1133	10	581
RR2A1	Rt	Mtx	280	139	1753	108	1165	BD	558	1740	166	BD	140	4141	10	592
RR2A1	Rt	Mtx	102	58	2054	170	1466	BD	22	699	18	BD	248	1800	10	635
RR2A1	Rt	Mtx	39	79	1986	162	1119	BD	233	1030	24	2	161	2718	10	602
RR2A1	Rt	Mtx	211	51	1918	126	1376	BD	71	900	68	BD	189	1499	10	614
RR2A1	Rt	Mtx	303	84	1238	129	1299	BD	227	1069	26	37	251	2243	10	636
RR2A1	Rt	Mtx	328	81	1706	136	1002	BD	112	1648	151	64	242	2757	10	633
RR2A1	Rt	Mtx	217	81	1590	170	815	BD	93	1293	BD	BD	206	1872	10	620
RR2A1	Rt	Mtx	596	154	1685	187	757	BD	17	1065	70	BD	173	1378	10	607
RR2A1	Rt	Mtx	81	58	1879	152	826	BD	BD	849	72	BD	141	1253	10	593
RR2A1	Rt	Mtx	170	43	1429	150	763	7	60	1387	62	BD	191	2207	10	615
RR2A1	Rt	Mtx	46	100	1490	120	1159	66	22	1407	136	BD	216	2445	10	624
RR2A1	Rt	Mtx	206	52	1524	119	1086	BD	117	998	217	BD	122	2698	10	583
RR2A1	Rt	Mtx	78	95	1427	129	1086	12	244	1501	134	BD	161	2894	10	602
RR2A1	Rt	Mtx	561	114	1251	173	1395	BD	BD	1158	119	BD	133	2380	10	589
RR2A1	Rt	Mtx	82	58	1182	183	1021	BD	108	1329	181	BD	173	2910	10	607

Amostra	Mineral	Textura	Si	Al	V	Sn	Cr	Sb	Ta	Fe	W	Hf	Zr	Nb	P (kbar)	T (°C)
RR2A1	Rt	Mtx	174	70	1330	162	927	BD	142	996	161	6	157	2092	10	600
RR2A1	Rt	Incl Grt	9	153	1693	118	1232	BD	198	4443	185	18	165	4773	10	604
RR2A1	Rt	Incl Grt	144	133	1715	134	1430	BD	119	4909	113	BD	280	2899	10	644
RR2A1	Rt	Incl Grt	74	122	1617	156	1357	BD	128	4595	3	BD	228	2968	10	628
RR2A1	Rt	Incl Grt	28	653	1319	127	772	BD	40	4581	77	BD	182	3115	10	611
RR2A1	Rt	Incl Grt	BD	69	1149	99	1092	BD	242	4726	26	BD	159	3403	10	601
RR2A1	Rt	Incl Grt	18	124	1266	156	795	BD	158	4620	43	BD	212	3179	10	623
RR2A1	Rt	Incl Grt	71	95	1276	96	804	BD	24	5905	94	BD	199	2910	10	618
RR2A1	Rt	Incl Grt	40	93	1429	122	628	BD	0	4354	97	BD	189	594	10	614
RR2A1	Rt	Incl Grt	24	148	1945	102	1258	BD	494	4485	105	BD	230	5342	10	629
RR2A1	Rt	Incl Grt	30	109	1015	82	658	BD	BD	5153	121	BD	255	1433	10	637
RR2A1	Rt	Incl Grt	20	107	1717	104	1033	BD	BD	2901	15	BD	139	1566	10	592
RR2A1	Rt	Incl Grt	4	101	1602	125	1066	BD	48	3283	42	BD	141	1856	10	593
RR2A1	Rt	Incl Grt	28	106	1476	131	649	BD	BD	2915	34	8	196	550	10	617
RR2A1	Rt	Incl Grt	59	49	1912	140	401	BD	6	4113	BD	55	161	1827	10	602
RR2A1	Rt	Incl Grt	65	86	1033	129	852	BD	24	5747	102	BD	191	2870	10	615
RR2A1	Rt	Incl Grt	BD	67	1198	180	1802	BD	BD	2981	150	5	199	1916	10	618
RR2A1	Rt	Incl Grt	38	53	1857	91	383	BD	67	3256	58	BD	116	1596	10	579
RR2A1	Rt	Incl Grt	BD	81	1413	184	1252	BD	43	2099	84	BD	206	1606	10	620
RR2A1	Rt	Incl Grt	BD	77	917	112	1122	BD	71	3358	26	BD	202	3246	10	619
RR2A1	Rt	Incl Grt	27	83	963	72	668	BD	52	3778	120	BD	246	1488	10	634
RR2A1	Rt	Incl Grt	26	103	1517	116	1250	BD	BD	3152	86	BD	193	1625	10	615
RR2A1	Rt	Incl Grt	2	84	935	49	617	BD	29	3322	41	BD	238	1449	10	631
MG173	Rt	Incl Grt	570	85	1695	142	486	BD	BD	5053	238	BD	296	2817	10	649
MG173	Rt	Incl Grt	757	69	1235	BD	554	BD	BD	4019	151	BD	141	1727	10	593
MG173	Rt	Incl Grt	28	90	964	71	486	BD	BD	5651	143	BD	274	1181	10	642
MG173	Rt	Incl Grt	70	550	516	BD	260	BD	BD	7967	270	BD	148	2796	10	596
MG173	Rt	Incl Grt	42	106	854	71	527	BD	180	8278	190	BD	178	3691	10	609
MG173	Rt	Incl Grt	51	95	1192	BD	629	BD	BD	7734	190	BD	281	2335	10	645
MG175	Rt	Incl Grt	BD	116	2125	126	739	BD	BD	BD	BD	BD	237	8885	10	631

Amostra	Mineral	Textura	Si	Al	V	Sn	Cr	Sb	Ta	Fe	W	Hf	Zr	Nb	P (kbar)	T (°C)
MG175	Rt	Incl Grt	BD	58	1499	102	889	BD	BD	BD	BD	BD	341	4963	10	660
MG175	Rt	Incl Grt	47	138	1886	BD	541	BD	BD	7579	BD	BD	304	6564	10	651
MG175	Rt	Incl Grt	BD	85	1093	71	192	BD	336	4563	BD	BD	318	2880	10	654
MG175	Rt	Incl Grt	28	42	1824	79	BD	BD	BD	4128	BD	BD	370	412	10	667
MG175	Rt	Incl Grt	BD	69	1136	95	171	BD	BD	BD	BD	BD	311	1293	10	653
MG175	Rt	Incl Grt	56	79	1192	118	226	BD	BD	5760	BD	BD	311	1349	10	653
MG175	Rt	Mtx	BD	32	2217	102	1197	BD	BD	1415	BD	68	304	2684	10	656
MG175	Rt	Mtx	BD	64	2045	134	1245	BD	BD	1562	BD	BD	348	2684	10	633
MG175	Rt	Mtx	631	48	1867	126	1074	BD	BD	1912	BD	BD	326	3062	10	653
MG175	Rt	Mtx	654	95	1707	134	951	BD	BD	1632	BD	BD	244	3306	10	651
MG175	Rt	Mtx	65	74	2101	110	773	BD	598	1632	BD	BD	311	3320	10	662
RR4A	Rt	Incl Grt	BD	74	1843	BD	493	BD	385	10058	143	BD	252	8361	10	636
RR4A	Rt	Incl Grt	BD	69	1099	BD	465	BD	287	7711	159	BD	274	4026	10	642
RR4A	Rt	Incl Grt	BD	53	1419	BD	465	BD	147	7890	BD	BD	400	1699	10	673
RR4A	Rt	Incl Grt	33	79	1370	BD	486	BD	1163	12857	BD	BD	326	12023	10	656
RR4A	Rt	Incl Grt	65	90	970	BD	547	BD	1376	12072	BD	BD	222	11884	10	626
RR4A	Rt	Incl Grt	BD	79	1204	BD	493	BD	917	9133	BD	BD	274	9877	10	642
RR4A	Rt	Incl Grt	BD	64	1290	BD	465	BD	483	14528	BD	BD	363	6103	10	665
RR4A	Rt	Incl Grt	BD	69	946	BD	493	BD	426	7198	143	BD	304	5655	10	651
RR4A	Rt	Incl Grt	61	79	1179	87	376	BD	BD	BD	BD	BD	392	3167	10	672
RR4A	Rt	Incl Grt	BD	26	725	150	417	BD	BD	3218	174	BD	392	2027	10	672
MG182	Rt	Incl Grt	BD	79	946	BD	1745	BD	BD	3933	BD	BD	222	1706	10	626
MG182	Rt	Incl Grt	BD	58	1185	BD	1546	BD	BD	9600	BD	BD	244	2034	10	633
MG182	Rt	Incl Grt	BD	37	1296	BD	1533	BD	BD	2736	BD	BD	326	1992	10	656
MG182	Rt	Incl Grt	BD	26	1836	102	3038	BD	BD	2208	151	BD	222	1216	10	626
MG182	Rt	Incl Grt	BD	26	1910	126	3182	BD	BD	3210	BD	BD	326	1279	10	656
MG182	Rt	Incl Grt	360	138	1959	95	2347	BD	BD	871	BD	BD	333	762	10	658
MG182	Rt	Incl Grt	444	106	1689	165	2299	BD	BD	1112	BD	BD	304	797	10	651
MG182	Rt	Incl Grt	BD	BD	2125	126	2477	BD	BD	832	BD	BD	252	713	10	636
MG182	Rt	Incl Grt	603	42	1376	142	267	BD	BD	2658	BD	BD	363	1286	10	665

Amostra	Mineral	Textura	Si	Al	V	Sn	Cr	Sb	Ta	Fe	W	Hf	Zr	Nb	P (kbar)	T (°C)
MG182	Rt	Incl Grt	BD	37	1542	126	862	BD	229	3016	198	BD	333	2901	10	658
MG182	Rt	Incl Grt	56	58	1609	150	712	BD	BD	4773	BD	BD	355	1859	10	663
MG182	Rt	Incl Grt	89	32	1824	134	787	BD	BD	1796	190	BD	222	1377	10	626
MG182	Rt	Incl Grt	BD	37	1542	102	1047	BD	BD	1384	BD	BD	348	1091	10	662
MG182	Rt	Incl Grt	BD	BD	1640	BD	1040	BD	BD	1345	BD	BD	333	1049	10	658
MG182	Rt	Incl Grt	538	BD	1701	BD	1047	BD	BD	1112	BD	BD	333	1042	10	658
MG182	Rt	Incl Grt	BD	BD	1689	118	766	BD	BD	2557	BD	BD	274	559	10	642
SF3-41	Rt	Incl Grt	575	37	1873	142	903	BD	BD	3436	182	BD	533	3146	10	698
SF3-41	Rt	Incl Grt	603	101	1732	BD	944	BD	BD	4780	BD	BD	407	2293	10	675
SF3-41	Rt	Incl Grt	BD	42	1591	126	951	BD	BD	3521	BD	BD	533	2237	10	698
SF3-41	Rt	Incl Grt	42	53	1443	79	1054	BD	BD	3855	214	BD	496	2447	10	692
SF3-41	Rt	Incl Grt	56	64	1400	87	1102	BD	BD	4827	182	BD	489	2524	10	691
SF3-41	Rt	Incl Grt	51	58	1511	79	1108	BD	BD	4073	167	85	600	2545	10	709
SF3-41	Rt	Incl Grt	42	254	1296	BD	308	BD	BD	BD	230	BD	378	3705	10	669
SF3-41	Rt	Incl Grt	BD	37	1462	110	431	BD	BD	3397	174	BD	489	2656	10	691
SF3-41	Rt	Incl Grt	28	48	1505	BD	438	BD	BD	3832	222	BD	489	2607	10	691
SF3-41	Rt	Incl Grt	BD	37	1443	87	499	BD	BD	4174	135	BD	459	1692	10	685
SF3-41	Rt	Incl Grt	47	48	1388	102	499	BD	BD	3785	BD	BD	725	1489	10	727
SF3-41	Rt	Incl Grt	75	64	1106	71	465	BD	BD	BD	BD	59	422	1174	10	678
SF3-41	Rt	Incl Grt	BD	37	1726	110	595	BD	BD	2744	214	BD	466	2852	10	687