



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Geologia

Gabriela de Oliveira Carvalho

**Petrografia, mineralogia e geoquímica diques metamáficos intrusivos na
Formação Tiradentes e sua relação com as ocorrências auríferas da
região de Tiradentes/ São João del Rei, MG**

Rio de Janeiro

2024

Gabriela de Oliveira Carvalho

**Petrografia, mineralogia e geoquímica de diques metamáficos intrusivos
na Formação Tiradentes e sua relação com as ocorrências auríferas da
região de Tiradentes/ São João del Rei, MG**

Trabalho de Conclusão de Curso em
Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade
Federal do Rio de Janeiro - UFRJ,
apresentado como requisito
necessário para obtenção do título
de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Luiz
Campos Pires
Co-orientador: Prof^a. Dr^a. Silvia
Regina de Medeiros.

Rio de Janeiro
2024

Gabriela de Oliveira Carvalho

**Petrografia, mineralogia e geoquímica de diques metamáficos intrusivos
na Formação Tiradentes e sua relação com as ocorrências auríferas da
região de Tiradentes/ São João del Rei, MG**

Trabalho de Conclusão de Curso em
Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade
Federal do Rio de Janeiro - UFRJ,
apresentado como requisito
necessário para obtenção do título
de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Luiz
Campos Pires
Co-orientador: Prof^a. Dr^a. Silvia
Regina de Medeiros.

Aprovado em:

Por:

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Luiz Campos Pires (IGEO/UFRJ)

Orientador: Prof^a. Dr^a. Silvia Regina de Medeiros.

Prof. Dr. André Ribeiro (IGEO/UFRJ)

Prof. Dr. Felipe Nepomuceno de Oliveira (IGEO/UFRJ)

Rio de Janeiro

2024

À minha família, Maria Aparecida, Neoman, Renan e Laís.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Maria Aparecida de Oliveira Carvalho e Neoman de Mattos Carvalho por nunca terem medido esforços, fazendo o possível e o impossível para que eu fosse atrás de meus sonhos. Pai e mãe, nunca terei como retribuir o papel de vocês para que tornasse geóloga, muito obrigada.

Gostaria de agradecer aos meus professores, que me capacitaram, ouviram e direcionaram minha trajetória na geologia, sendo inspirações de profissionais de excelência. Principalmente os meus orientadores Gustavo Pires e Silvia Medeiros, que estão comigo desde 2019 e me acompanharam em todas as etapas no curso.

Antes de entrar na UFRJ, meu caminho foi guiado pelo ISMART (Instituto Social para Motivar Apoiar e Reconhecer Talentos), que esteve comigo desde o ensino fundamental e me preparou para que eu conseguisse chegar na UFRJ. Através do ISMART pude ter acesso a oportunidades inimagináveis dentro da minha realidade, obrigada. Além disso, fiz amizades com mulheres incríveis que estão comigo até hoje. Sou extremamente grata às minhas parceiras de ISMART Emília Gava, Fernanda Gonzaga, Luana Lobão, Nathalia Oliveira, Rebeca Gaudêncio e Taina Silva.

Indispensável agradecer meus colegas de turma Amanda Mendes, Mateus Ferreira, Matheus Violante, Sarah Aleixo e Sofia d'Orsi. Tantas experiências em campo, noites de estudo e trabalhos feitos em conjunto que grande parte do que aprendi devo a vocês. Também ao grupo dos painéis, onde cada um teve uma presença única e enriquecedora em minha trajetória, Gustavo Machado, Erick Almeida, Victor Chagas, João Vitor Mussili, Enzo Borges e Gabriel Amon. Além dos grupos formados, outros grandes colegas de curso marcaram minha graduação. Muito obrigada Camille Ribeiro, Juliana Arraes, David Machado, Bernardo Rocha, Giovanna Novello, Letícia Cardoso, Teresa Mourão, Úrsula Riente e Ana Clara Varca pelo apoio incondicional e suporte nas disciplinas.

Não poderei deixar de agradecer aos membros do UFRJ SEG Student Chapter, que me apoiaram e se aventuraram na mineração junto comigo, fazendo possível realizar o sonho de estagiar na Mina Cuiabá. Além dos professores Carlos Seoane e Atlas Corrêa não só por terem sido guias nos campos do capítulo estudantil e gigantes nas aulas, mas também pelos

conselhos e conversas. Também ao Deniro Costa, Dan Mothé, Beatriz Fontes e João Pedro Silveira, amigos da UFMG, UERJ, Unicamp e UFG, que também se dedicam à geologia econômica e me inspiram por suas trajetórias.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à equipe de Mecânica de Rochas da Mina Cuiabá, em especial à Bruna Souza, João Pedro Alves, Sidney Neto e Welton Gomes, ao Comitê de Qualidade de Lavra, além da geóloga Lorrana Roriz. Muito obrigada por me introduzirem à mineração subterrânea e por terem me ensinado a geologia no cotidiano de uma operação, me ajudando a superar desafios, me enxergar como parte do processo e por serem exemplos de profissionais.

RESUMO

CARVALHO, Gabriela de Oliveira. **Petrografia, mineralogia e geoquímica de diques metamáficos intrusivos na Formação Tiradentes e sua relação com as ocorrências auríferas da região de Tiradentes/ São João del Rei, MG. 2024**, p.43. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

A Formação Tiradentes, localizada no sul do Cráton São Francisco, consiste de uma sucessão de quartzitos e metapelitos depositados em uma bacia Mesoproterozoica, do tipo rifte aulacógeno, a Bacia São João Del Rei. Esta ocorre sobreposta por uma sucessão de metacarbonatos e metapelitos, que compõem a base da Bacia Carandaí. O conjunto foi deformado e metamorfozido em condições de fácies xisto verde durante a orogênese Brasileira, no Neoproterozoico. A Fm. Tiradentes é cortada por um enxame de diques máficos associados ao rifteamento que originou a Bacia Carandaí, que possuem idade entre 1.5Ga e 1.37Ga. A importância do estudo se dá pelo histórico de extração de ouro na região no século XVII, com poucos estudos sobre a mineralização. O trabalho tem como objetivo a descrição de minerais em grãos, petrografia, difração de Raios-X e litogeoquímica dos diques a fim de compreender a gênese desse magmatismo e seu papel nas mineralizações de ouro. As rochas estudadas apresentam a clorita como principal mineral metamórfico, indicando metamorfismo no fácies xisto verde. Além disso, a litogeoquímica mostrou que as rochas estudadas pertencem a série alcalina e foram formadas em ambiente compatível com basaltos alcalinos continentais e E-MORB. Por fim, a descrição de minerais em grãos em pontos onde já houve extração de ouro mostraram a presença de ouro somente na amostra de veio de quartzo associada aos diques estudados, estando este metal ausente nas amostras de metabasitos. Assim, os diques podem ter atuado como uma barreira físico-química para a formação da mineralização, corroborando para a precipitação de ouro e sulfetos nos veios de quartzo que cortam com os diques.

Palavras-chave: petrografia; geoquímica; mineralização de ouro.

ABSTRACT

CARVALHO, Gabriela de Oliveira. **Petrography, mineralogy and geochemistry of intrusive metamafic dykes and their relation with gold occurrences in Tiradentes/ São João Del Rei region, Minas Gerais, Brazil.** 2024, p.43. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

The Tiradentes Formation, located in the south of the São Francisco Craton, consists of a succession of quartzites and metapelites deposited in a Mesoproterozoic basin of the aulacogenic rift type, the São João Del Rei Basin. This is overlain by a succession of metacarbonates and metapelites, which make up the base of the Carandaí Basin. This group was deformed and metamorphized under green schist facies conditions during the Brasiliana orogeny in the Neoproterozoic. The Fm. Tiradentes is cut by a cluster of mafic dykes associated with the rifting that originated the Carandaí Basin, with age between 1.5 and 1.37 Ga. The importance of the study is due to the history of gold extraction in the region in the 17th century, with few studies on mineralization. The aim of the work is to describe the minerals in grains, petrography, X-ray diffraction and litho-geochemistry of the dykes in order to understand the genesis of this magmatism and their role in gold mineralization. The rocks studied show chlorite as the main metamorphic mineral, indicating metamorphism in green schist facies. In addition, litho-geochemistry showed that the rocks studied belong to the alkaline series and were formed in an environment compatible with continental alkaline basalts and E-MORB. In addition, the description of minerals at sites where gold has already been mined showed the presence of gold only in quartz veins associated with the dykes studied, while this metal was absent in the metabasite samples. The dykes may have acted as a physical-chemical barrier to the formation of mineralization, contributing to the precipitation of gold and sulphides in the quartz veins in contact with the mafic dykes.

Key-words: petrography; geochemistry; gold mineralization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.2. Objetivos	15
2. MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1. Trabalho de campo	16
2.2. Preparação das amostras	16
3. GEOLOGIA REGIONAL.....	19
3.1 Bacias Proterozoicas	21
3.1. Diques máficos.....	23
4. RESULTADOS.....	24
4.1. Mapeamento geológico de detalhe	24
4.2. Petrografia.....	27
4.3. Caracterização mineralógica via difração de raios-X	31
4.4. Litogeoquímica de elementos maiores e menores	33
4.5. Descrição dos minerais em grãos – concentrados de bateia	36
5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....	39
6. REFERÊNCIAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização das Serras do Lenheiro e de São José, em São João del Rei e Tiradentes, MG.	15
Figura 2: Fluxograma preparo de amostras para descrição dos minerais em grãos.	17
Figura 3: Etapas do preparo das amostras para descrição dos minerais em grãos. (A) Deslamagem; (B) Bateia; (C) Ultrassom; (D) Reação com ácido oxálico; (E) Estufa; (F) Bromofórmio; (G) Quarteador; (H) Imã de ferrite; (I) Separador isodinâmico Frantz.....	18
Figura 4: Etapas do preparo das amostras para análise de difração de Raios-X e litogeoquímica. (A) Amostras analisadas; (B) Britador de mandíbulas; (C) Moinho pulverizador de panela.	19
Figura 5: Localização da área de estudo em relação ao Cráton São Francisco. Modificado de Trouw et al. 2013.....	20
Figura 6: Coluna estratigráfica mostrando as sequências das Formações Tiradentes, Carandaí, e Barroso, além dos diques máficos que cortam somente a primeira sequência. No topo da coluna debritos do Terceário e sedimentos recentes e atuais. Ribeiro et al., 2003.	23
Figura 7: Mapa geológico da serra do Lenheiro com a localização dos pontos estudados e região do mapeamento realizado em destaque pelo retângulo vermelho. Modificado de Nepomuceno et al. 2021.	25
Figura 8: Mapa geológico 1:5000 desenvolvido durante a disciplina de geologia de campo III em região onde afloram os dois principais diques da Serra do Lenheiro.	26
Figura 9: Serra do Lenheiro - Afloramento de dique de metabasito com veios de quartzo paralelos à foliação.....	27
Figura 10: Principais feições petrográficas dos Fotografias das lâminas de clorititos. (A e B) Visão geral da lâmina, nicóis descruzados; (C) Aglomerado de quartzo; (D) Fenocristal de apatita; (E) Aglomerado de clorita, possível substituição mineral; (F) Resquício de um cristal de plagioclásio.	28
Figura 11: Principais feições petrográficas das lâminas de metabasitos afaníticos porfiríticos. (A e B) Visão geral da lâmina, nicóis descruzados; (C)	

Pseudomorfo de clorita pela substituição completa de fenocristais de plagioclásio; (D e E) Fenocristais de apatita à nicóis descruzados; (G) Fenocrista de apatita defletindo a foliação principal à nicóis cruzados; (H) Aglomerado de quartzo. 29

Figura 12: Principais feições petrográficas dos metabasitos afaníticos porfiríticos. (A e B) Visão geral da lâmina, nicóis descruzados; (C) Fenocristais de plagioclásio com textura polissintética à nicóis descruzados; (D) Textura simplectita em mineral opaco; (E e F) Fenocristal de hornblenda à nicóis cruzados e descruzados, respectivamente. 30

Figura 13: Difractogramas representativos dos três grupos litológicos identificados na petrografia. Grupo 1: clorititos; Grupo 2: metabasitos afaníticos porfiríticos; Grupo 3: metabasitos porfiríticos. 32

Figura 14: Diagrama de Floyd & Winchester (1975) com as amostras analisadas. 33

Figura 15: Diagrama multielementar para elementos terras raras normalizado para condrito, Nakamura 1974. 35

Figura 16: Diagrama ternário de Meschede 1986 para ambiente tectônico. ... 36

Figura 17: Mapa geológico das serras de São José com a localização do ponto SJ-29. Modificado de Nepomuceno et al. 2021. 37

Figura 18: Afloramento do ponto SJ-29, antigo garimpo de ouro na serra de São José. 37

Figura 19: Minerais em grãos encontrados nas amostras SJ-29C e SJ29D, referentes aos diques máficos. (A) Magnetita; (B) Goethita; (C) Turmalina e rutilo; (D) Zircão. 38

Figura 20: Minerais em grãos encontrados nas amostras SJ-B, referentes ao veio de quartzo em contato com o dique. (A) Magnetita; (B) Turmalina; (C) Rutilo; (D) Pirita; (E) Magnetita + Ouro; (F) Ouro. 38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Análises geoquímicas dos diques de metabasito.....	34
---	----

1. INTRODUÇÃO

A região de São João Del Rei/ Tiradentes, MG, foi alvo de diversos ciclos exploratórios de ouro desde o século XVII, impulsionando o desenvolvimento econômico dessas cidades e levando à sua relevância para o turismo atualmente. Ainda que existam muitos trabalhos científicos acerca da geologia regional, o conhecimento geológico sobre as mineralizações de ouro e sua relação com as rochas da região é escasso, com poucos trabalhos publicados.

De acordo com a literatura, as mineralizações de ouro ocorrem hospedadas em quartzitos, metapelitos e metaconglomerados da Formação Tiradentes, de idade mesoproterozoica, e também em veios de quartzo. Além disso, a mineralização tem maior potencial quando as rochas descritas anteriormente estão em contato com diques máficos (Ribeiro *et al.* 2003).

Os diques máficos aflorantes na região cortam a Formação Tiradentes, mas não cortam as sucessões sedimentares da Bacia Prados, estando esse magmatismo associado ao rifteamento que originou a Bacia Carandaí. As datações em zircão realizadas na Formação Tiradentes indicam idade em torno de 1.5Ga para a unidade, já os dados obtidos para a Formação Carandaí, indicam idade aproximada de 1.370Ma (Ribeiro *et al.* 2013). Assim, os diques máficos estudados possuem idade entre 1.5Ga e 1.370Ma. Nesse contexto, o trabalho foi desenvolvido a fim de realizar um estudo aprofundado dos diques máficos que afloram na região para melhor compreensão da sua gênese e relação com as históricas mineralizações de ouro.

1.1. Localização da área de estudo

A área de estudo encontra-se nos municípios de São João del Rei e Tiradentes, mais especificamente nas Serras do Lenheiro e São José, no sul do estado de Minas Gerais (Figura 1).

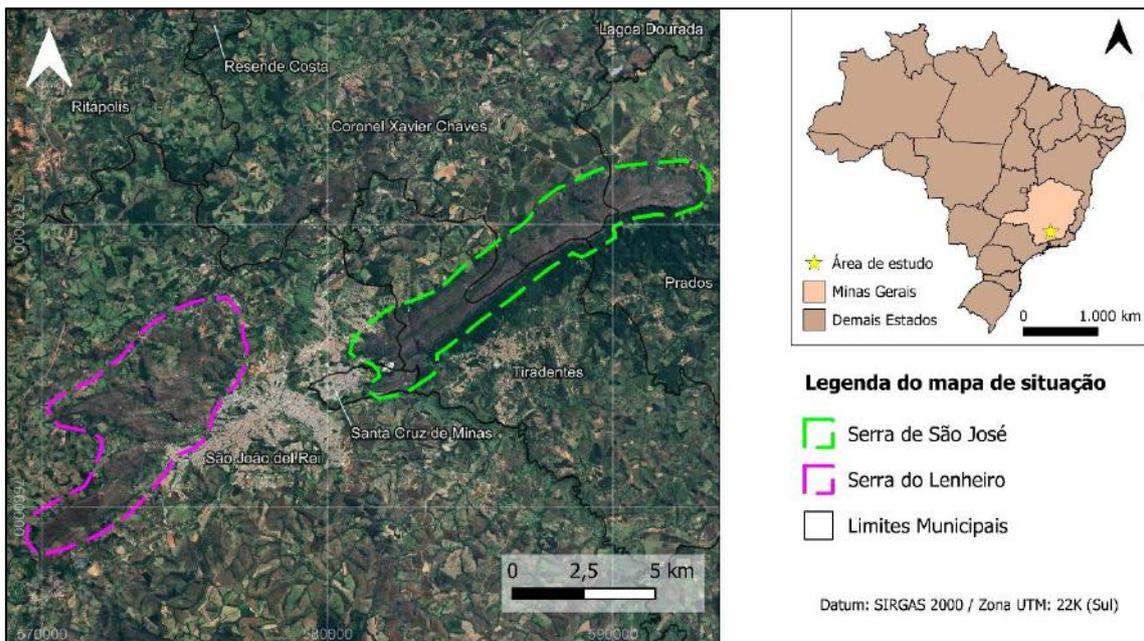


Figura 1: Mapa de localização das Serras do Lenheiro e de São José, em São João del Rei e Tiradentes, MG.

1.2. Objetivos

O trabalho tem como objetivo caracterizar as rochas que compõem os diques metamáficos intrusivos na Fm. Tiradentes em termos de mineralogia, petrografia, e litogeoquímica além de discutir seu papel nas mineralizações de ouro na região. Para isso, foi estabelecido os seguintes objetivos específicos:

- Classificar os diques de metadiabásio a partir da descrição petrográfica e difração de Raios-X (DRX);
- Classificar os diques de metadiabásio a partir dos dados geoquímicos obtidos por ICP-MS quanto composição química e ambiente tectônico;
- Caracterizar os minerais em grãos das amostras coletadas em antigas áreas de garimpo da região próximas aos diques de metadiabásio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras analisadas nesse trabalho foram coletadas durante os trabalhos de campo de 2018-2019 e outras foram doadas pelo prof. Andre Ribeiro. Foram analisadas 14 amostras para a petrografia, 10 para a análise litogeoquímica e 3 amostras para descrição de minerais em grãos, distribuídas nas serras de São José e do Lenheiro. Além da confecção de um mapa geológico 1:5000 do flanco norte da serra do Lenheiro, durante a disciplina de estágio de campo III.

2.1. Trabalho de campo

Foram realizadas 2 atividades de campo. A primeira durante a disciplina de Geologia de Campo III, realizada em junho de 2022. Nesta etapa foi confeccionado o mapa geológico 1:5000 do flanco norte da serra do Lenheiro, região onde se encontra dois dos três principais diques estudados neste trabalho.

Posteriormente, em junho de 2023, foi realizada visitas em pontos estratégicos onde há conhecimento de atividades pretéritas de garimpo para coleta de amostras a fim de buscar um maior entendimento sobre a mineralização e sua relação com os diques da região estudada.

2.2. Preparação das amostras

Esta etapa contou com a preparação de amostras coletadas durante as atividades de campo descritas anteriormente e de alíquotas coletadas anteriormente pelos professores Gustavo Pires e André Ribeiro.

Para a descrição de minerais em grãos, as amostras foram submetidas às seguintes etapas (Figuras 2 e 3): Deslamagem, concentração em bateia, aparelho ultrassom, reação com ácido oxálico, secagem em estufa, separação por líquido denso bromofórmio, separação magnética por imã de ferrite e separador isodinâmico Frantz. Já para a análise litogeoquímica os exemplares foram submetidos a outros preparos (Figura 4): Fragmentação e pulverização, utilizando britador de mandíbulas e moinho pulverizador de panela. Além das etapas descritas acima, também foi realizado o quarteamento das amostras a fim de se reduzir o volume a ser trabalhado e obter alíquotas representativas do material total.

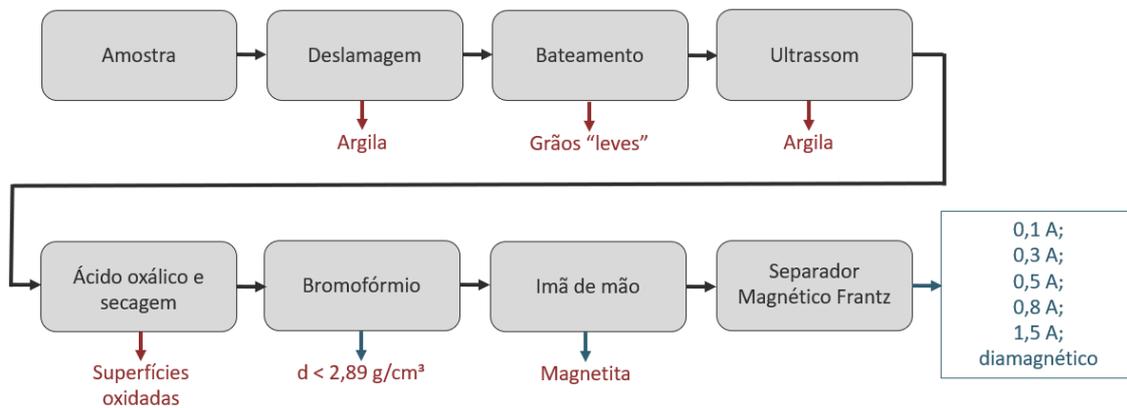


Figura 2: Fluxograma preparo de amostras para descrição dos minerais em grãos.



Figura 3: Etapas do preparo das amostras para descrição dos minerais em grãos. (A) Deslamagem; (B) Bateia; (C) Ultrassom; (D) Reação com ácido oxálico; (E) Estufa; (F) Bromofórmio; (G) Quarteador; (H) Imã de ferrite; (I) Separador isodinâmico Frantz.



Figura 4: Etapas do preparo das amostras para análise de difração de Raios-X e litogeoquímica. (A) Amostras analisadas; (B) Britador de mandíbulas; (C) Moinho pulverizador de panela.

3. GEOLOGIA REGIONAL

O Cráton São Francisco é uma unidade tectônica inserida no território brasileiro que se manteve estável durante os eventos tectono-metamórfico da Orogênese Brasileira/ Pan-Africana (Almeida *et al.*, 1977). Ele é delimitado pelas faixas orogênicas Araçuaí, Ribeira, Brasília (Figura 5), além das faixas Rio Preto, Riacho do Pontal e Sergipana em que foram resultados da deformação brasileira.

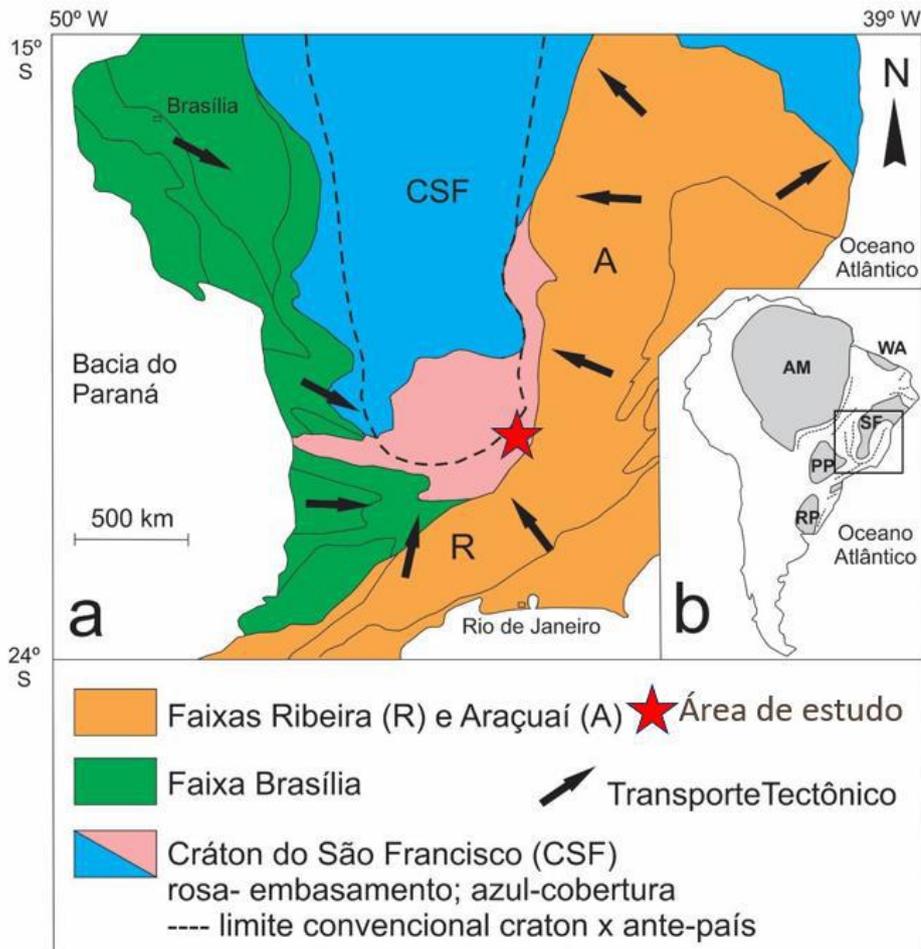


Figura 5: Localização da área de estudo em relação ao Cráton São Francisco. Modificado de Trouw et al. 2013.

A área de estudo está localizada à sul do Cráton São Francisco (Figura 5), onde afloram rochas metassedimentares da Formação Tiradentes, dispostas de maneira discordante sobre o embasamento, Cinturão Mineiro, e foram formadas por um rifteamento, além de um ambiente de margem passiva e ante-país (Ribeiro *et al.*, 1995; Ribeiro *et al.*, 2013; Kuster *et al.*, 2020).

O Cinturão Mineiro é uma unidade de idade Paleoproterozoica localizada na porção sul do Cráton São Francisco. Segundo Alkmim e Teixeira (2017), o Cinturão Mineiro apresenta cerca de 180 km de extensão, seguindo um trend regional NE-SW e delimitado por duas grandes zonas de cisalhamento que o separam da porção Arqueana da Paleoproterozoico. É composto litologicamente por ortognaisses, metagranitoides, metadioritos, metagabros, metavulcânicas e rochas metassedimentares em que correspondem a rochas de um ambiente de arcos, sendo predominantemente oceânicos e amalgamados durante 2,47–2,10 Ga (Barbosa *et al.*, 2019; Moreira *et al.*, 2018). Esses arcos foram divididos em

quatro conjuntos: dois de idade sideriana (Cassiterita, Resende Costa,) e dois de idade riaciana (Serrinha e Ritópolis).

3.1 Bacias Proterozoicas

A região de São João del Rei registra rochas metassedimentares que indicam diferentes fases distensivas que ocorreram no proterozoico do paleocráton São Francisco-Congo, representadas pelas Formações Tiradentes, Carandaí, Barroso e Prados. Essas fases extensionais geraram bacias sedimentares do tipo rifte, como bacia de São João del Rei que é cronocorrelada ao Espinhaço Médio (1,60 Ga- 1,35 Ga) (Chemale *et al.*, 2012; Ribeiro *et al.*, 2013).

A Formação Tiradentes é uma sucessão quartzítica com cerca de 1000m de espessura, em que preservam estruturas sedimentares primárias, como marcas de onda e estratificação cruzada. Essa formação é dividida em quatro sequências reconhecidas: Tiradentes, São José, Tejuco e Lenheiro. As duas primeiras são compostas por associações de litofácies de plataforma rasa, enquanto sequência Tejuco por uma sucessão progradacional e a sequência Lenheiro interpretada como um delta de rio entrelaçado representada por metapelito, quartzito fino e quartzito seixoso. Dados geocronológicos de Idades U-Pb de ca. de 1.5 Ga foram obtidas para os quartzitos basais, o que permitiram uma correlação com o Supergrupo Espinhaço (Ribeiro *et al.*, 2013)

A Formação Tiradentes está disposta discordantemente do embasamento e em uma inconformidade angular das Formações Carandaí e Barroso, devido a falhamentos pré-sedimentação da Formação Carandaí (Nepomuceno *et al.*, 2021). Devido a evolução da Bacia Carandaí houve a colocação de diques máficos que cortam os depósitos anteriores a Formação Carandaí (Figura 6).

A Formação Carandaí é representada principalmente por depósitos sin-rifte de diamictitos e pelitos cinza, com uma idade máxima de deposição de 1,38 Ga (Ribeiro *et al.*, 2013). Em contraste, a Formação Barroso consiste em rochas de plataforma carbonática, depositadas em uma bacia do tipo SAG que se sobrepõe à fase rifte. O contato entre as duas unidades é definido por uma camada de marga, que estabelece a transição entre os pelitos da Formação Carandaí e os carbonatos da Formação Barroso.

Disposta em uma discordância angular, com uma espessura de 600 m de sucessão pelítica, a Formação Prados registra um rifteamento ocasionada por

uma reativação tectônica após uma significativa fase erosiva (Nepomuceno *et al.*, 2021). A formação segue uma orientação NE-SW, mesma orientação da Bacia Carandaí, e interpretado recentemente como um aulacógeno relacionado à evolução de uma margem passiva da Bacia de Andrelândia. Apesar de estar relacionada a evolução da Bacia Andrelândia a, Formação Prados é classificada como depositada em uma bacia distinta. Interpretações com base na estratigrafia indicam que a sedimentação ocorreu em um ambiente predominantemente anóxico, sendo formada por laminae e camadas delgadas de metargilitos e metassiltitos cinzentos e esverdeados em uma deposição lacustre (Ribeiro *et al.*, 2003).

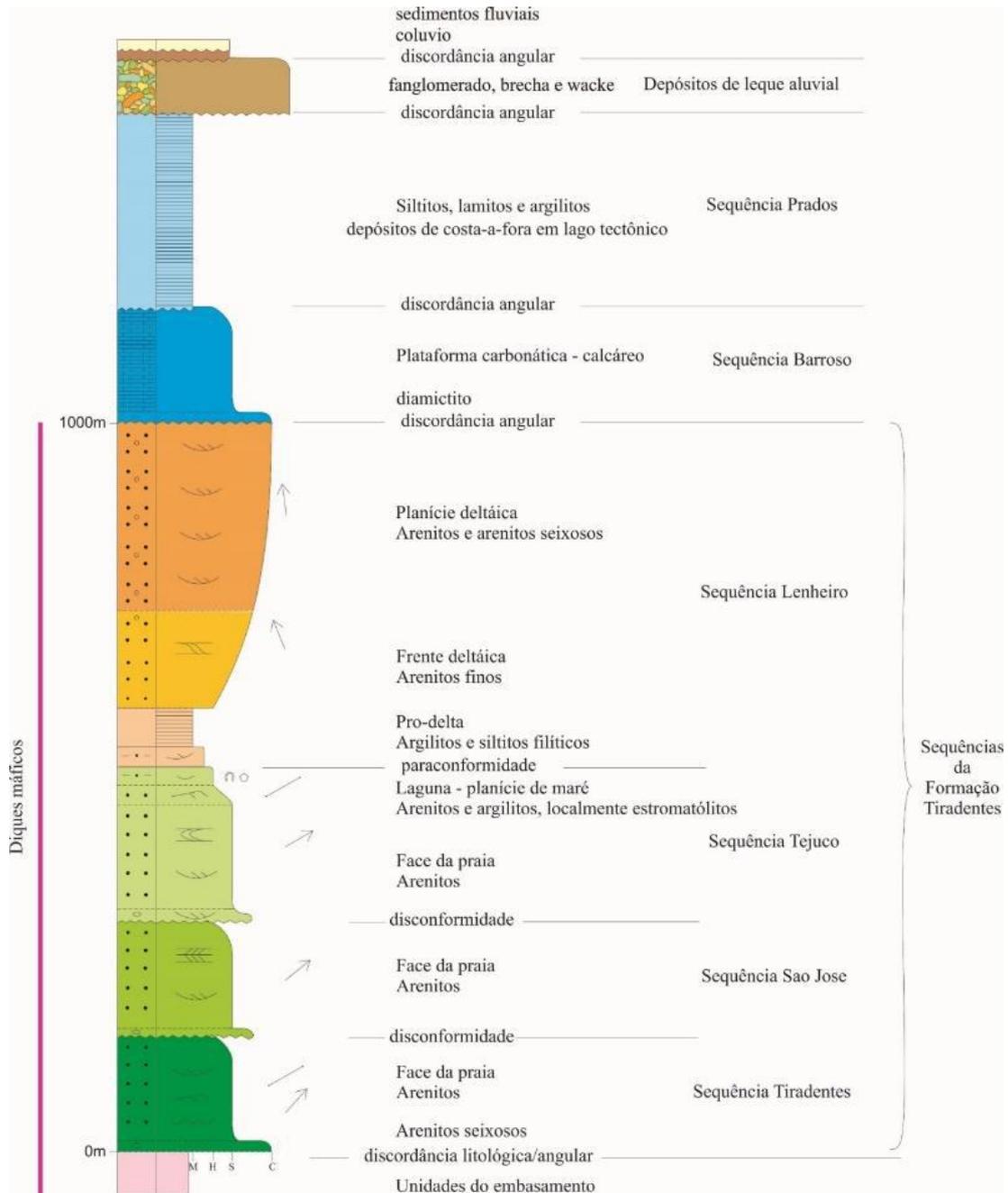


Figura 6: Coluna estratigráfica mostrando as sequências das Formações Tiradentes, Carandaí, e Barroso, além dos diques máficos que cortam somente a primeira sequência. No topo da coluna debritos do Terceário e sedimentos recentes e atuais. Ribeiro *et al.* (2003).

3.1. Diques máficos

Um enxame de diques máficos corta o embasamento e a sucessão de rochas da bacia de São João Del Rei. Estes diques registram um regime distensivo, relacionada ao rifteamento que deu origem a bacia Carandaí. Os diques são corpos de espessura métrica a decamétrica, de direção ENE-WSW e mergulham > 60 para NNW ou SSE. As rochas dos diques são metabasitos esverdeados,

mas na maioria dos afloramentos aparecem argilizadas, com cores amareladas, avermelhadas e até branca, devido a alteração intempérica. São identificados dois tipos litológicos de diques, um composto por matriz fina de sericita, clorita e minerais opacos e outro composta por clorita e menor proporção de sericita, minerais opacos finos e quartzo. Em ambos os diques de metabasito são encontrados cristais de pirita de até 10cm e, também, fenocristais de apatita que indicam que seus prováveis protólitos são alcali-basaltos intracontinentais (Ribeiro *et al.*, 1992; Ribeiro *et al.*, 2013).

Correlacionados a esses diques e ao longo de falhas ocorrem veios de quartzo, em geral, compostos por quartzo branco, as vezes leitoso (Ribeiro *et al.*, 2003). Eles aparecem encaixados em rochas da sequência São João Del Rei e apresentam mineralizações auríferas relacionados principalmente a veios encaixados em fácies heterolíticas da Sequência Tejuco e em arenitos seixosos da Sequência Lenheiro.

Uma vez que as análises U-Pb em grãos de zircão detrítico indicam uma idade mínima em torno de 1.5Ga para as unidades da Formação Tiradentes e de 1.370Ma para debritos da Formação Carandaí (Ribeiro *et al.*, 2013) o exame de diques máficos que corta a Formação Tiradentes e não corta a Formação Prados teria potencialmente idade de cristalização entre 1.5 e 1.37 Ga.

4. RESULTADOS

4.1. Mapeamento geológico de detalhe

Para melhor entender as relações de campo dos diques máficos, foi realizado o mapeamento geológico de detalhe (1:5000), durante a disciplina de Geologia de campo III, em uma área estratégica da Serra do Lenheiro onde ocorrem cavas de garimpos abandonados (Figuras 7 e 8). Foram mapeados dois diques metamáficos de coloração ocre, granulação fina, clivagem com mergulho de 65° para sudeste e são localmente cortados por veios de quartzo paralelos à foliação (Figura 9). Localmente há presença de cavas abandonadas próximo aos diques, principalmente em regiões onde há veios de quartzo aflorantes (Figura 9).

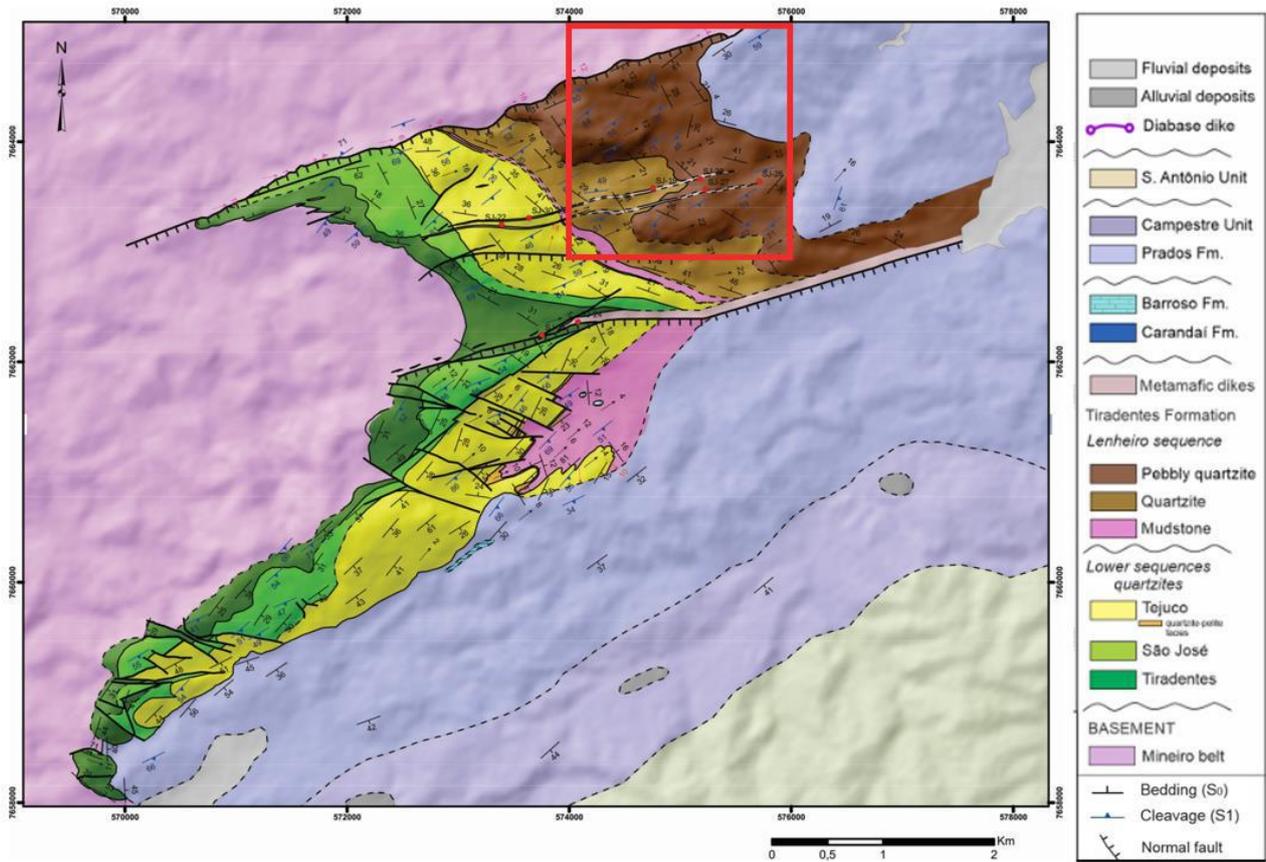


Figura 7: Mapa geológico da serra do Lenheiro com a localização dos pontos estudados e região do mapeamento realizado em destaque pelo retângulo vermelho (Figura 8). Modificado de Nepomuceno et al. 2021.

MAPA GEOLÓGICO DO FLANCO NORTE 4 - SERRA DO LENHEIRO

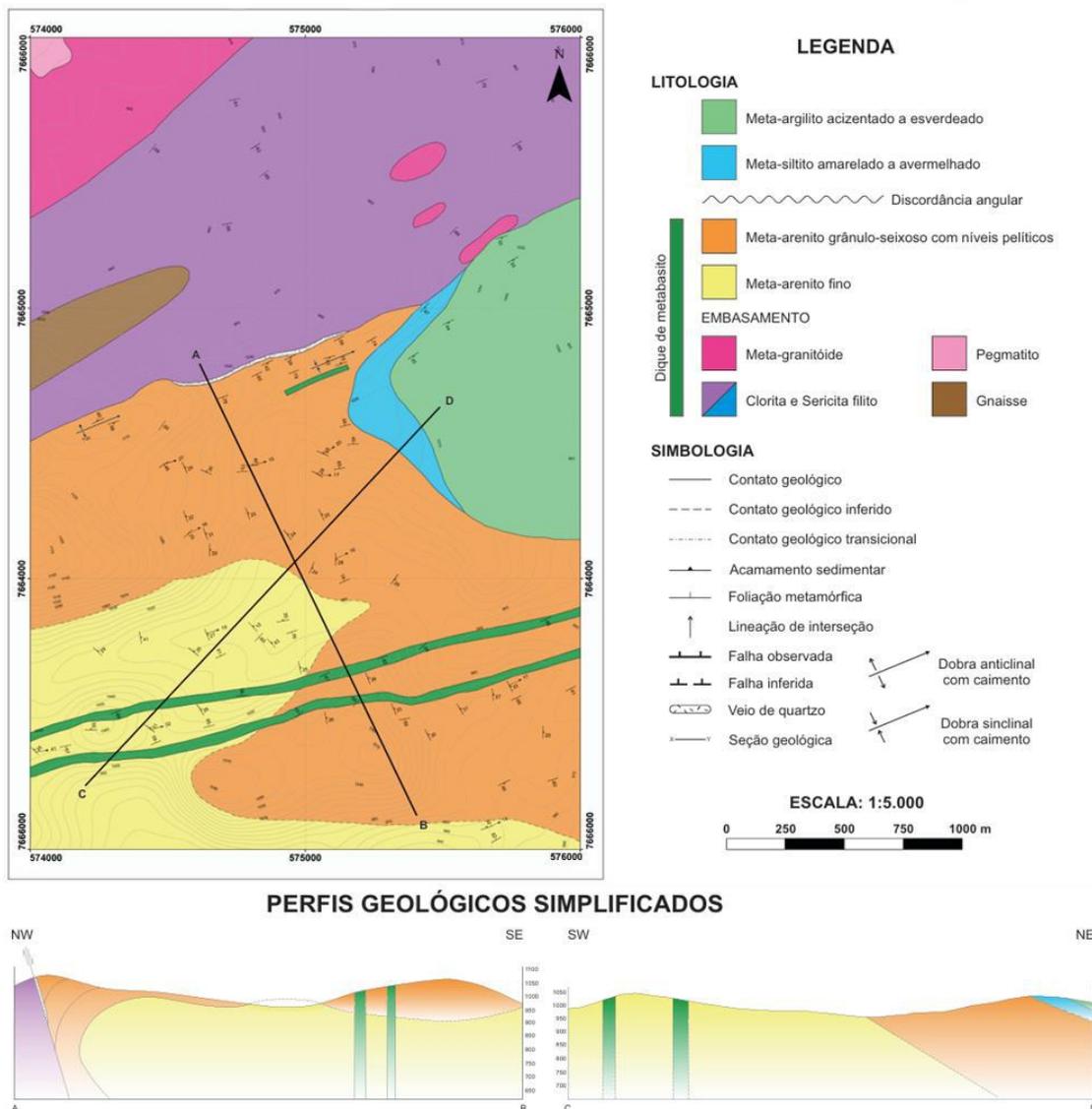


Figura 8: Mapa geológico 1:5000 desenvolvido durante a disciplina de geologia de campo III em região onde afloram os dois principais diques da Serra do Lenheiro.



Figura 9: Serra do Lenheiro - Afloramento de dique de metabasito com veios de quartzo paralelos à foliação.

4.2. Petrografia

A partir da petrografia de 14 amostras, foram identificados três grupos litológicos compondo os diques: cloritito, metabasito afanítico porfirítico e metabasito porfirítico. Os clorititos (clorita filitos) possuem matriz composta por clorita (90%), e fenocristais de apatita e minerais opacos de até 2mm, além de aglomerados de quartzo metamórfico. Trata-se de rochas de granulação muito fina e índice de cor melanocrático (Figura 10).

O segundo grupo, nomeado como metabasitos afaníticos porfiríticos trata de rochas de granulação fina e melanocráticas, com 75% de matriz de clorita e sericita, além de fenocristais de apatita (10%), quartzo e minerais opacos. Seus fenocristais de apatita são subédricos a euédricos, defletem a foliação e por vezes com textura corona de clorita ao redor da apatita. Nesse grupo também se observou substituição mineral de plagioclásio por clorita e sericita, além de aglomerados de quartzo paralelos à foliação (Figura 11).

O terceiro grupo consiste em metabasitos porfíricos, possui granulação média, 40% de matriz de clorita e sericita, e fenocristais de plagioclásio (40%), além de fenocristais de apatita, hornblenda e opacos. Neste grupo também foi observado textura simplectita em minerais opacos e saussuritização do plagioclásio formando agregados de epidoto microcristalino (Figura 12).

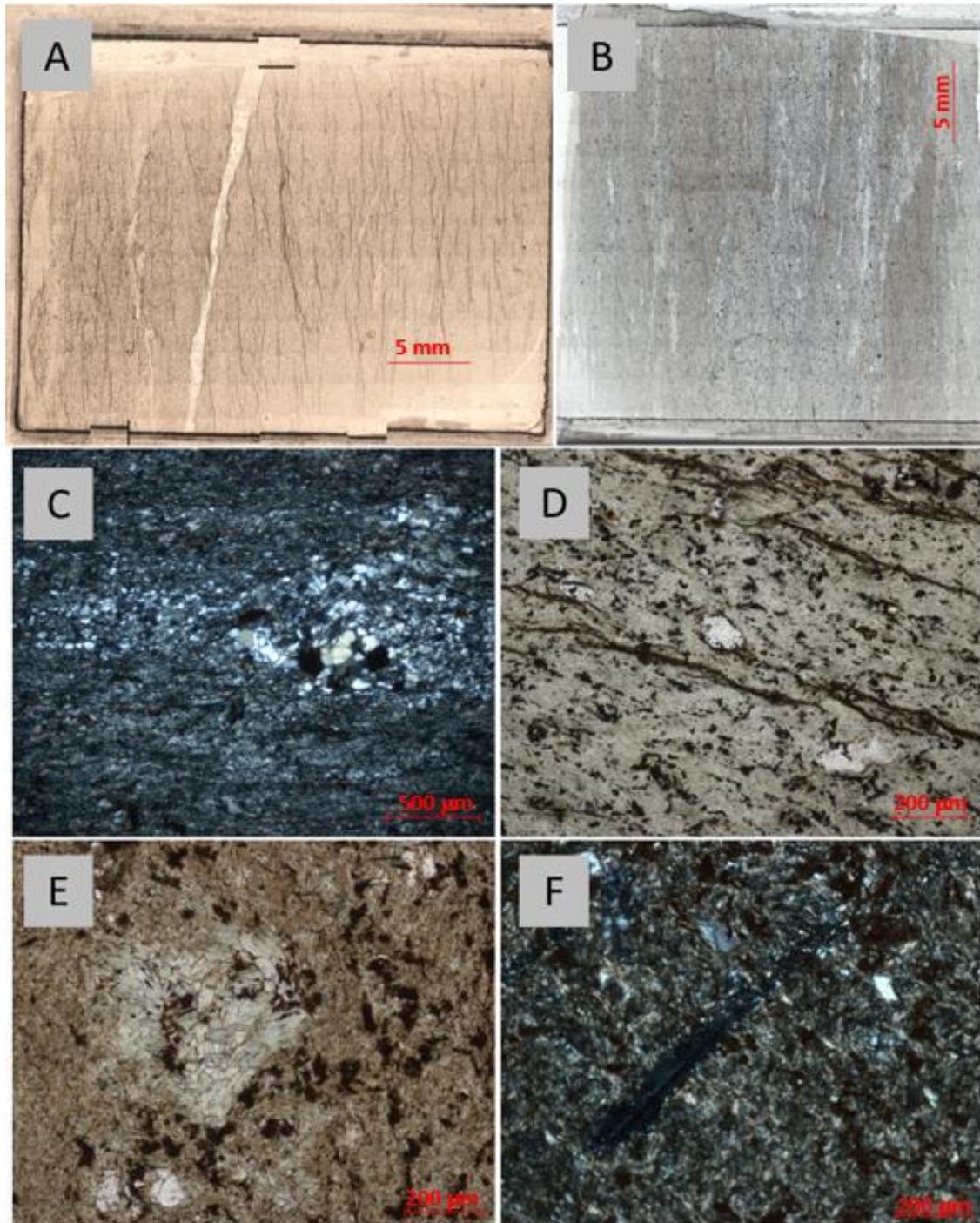


Figura 10: Principais feições petrográficas dos Fotografias das lâminas de clorititos. (A e B) Visão geral da lâmina, nicóis descruzados; (C) Aglomerado de quartzo; (D) Fenocristal de apatita; (E) Aglomerado de clorita, possível substituição mineral; (F) Resquício de um cristal de plagioclásio.

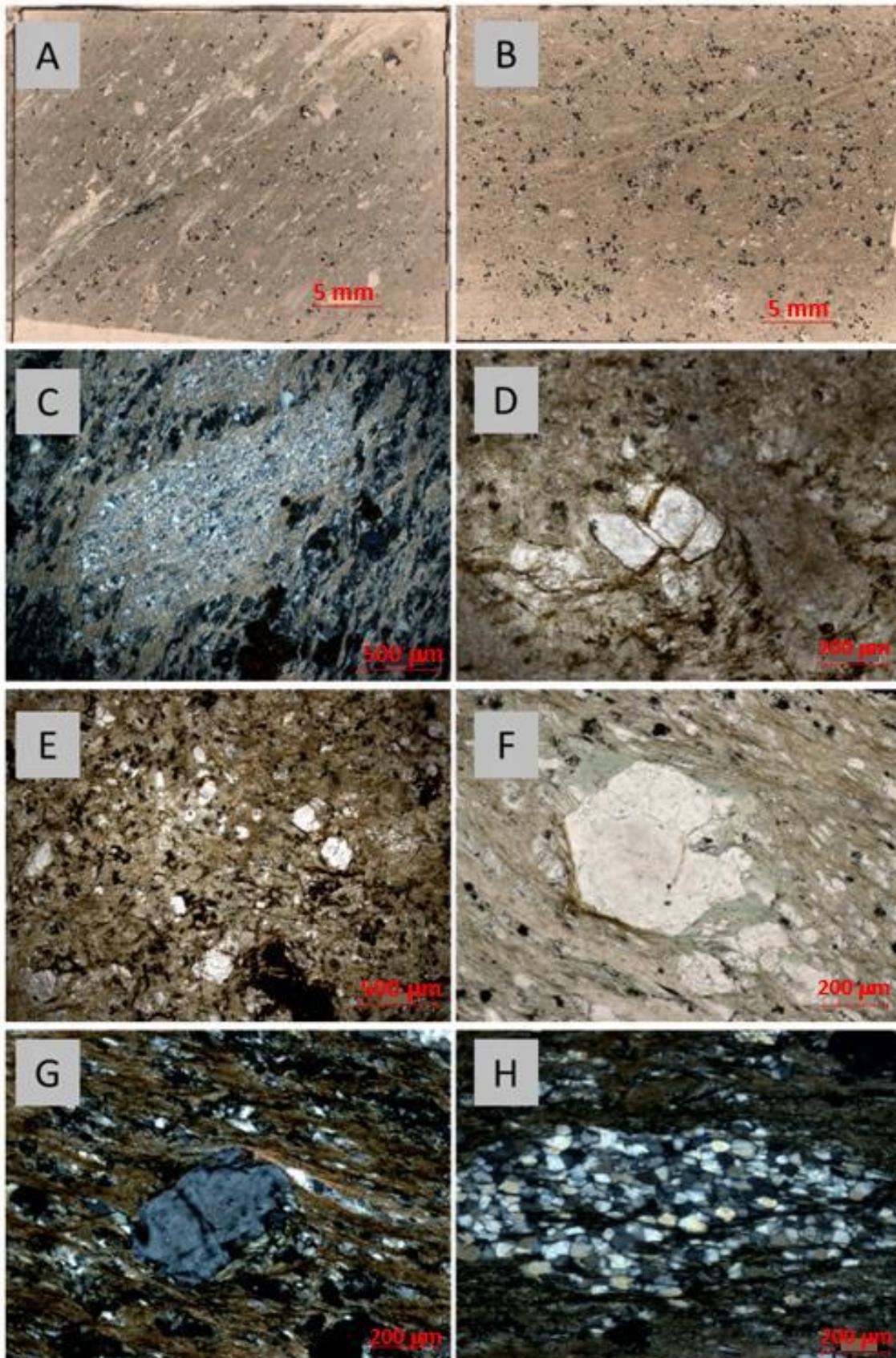


Figura 11: Principais feições petrográficas das lâminas de metabasitos afaníticos porfiríticos. (A e B) Visão geral da lâmina, nicóis descruzados; (C) Pseudomorfo de clorita pela substituição completa de fenocristais de plagioclásio; (D e E) Fenocristais de apatita à nicóis descruzados; (G) Fenocrista de apatita defletindo a foliação principal à nicóis cruzados; (H) Aglomerado de quartzo.

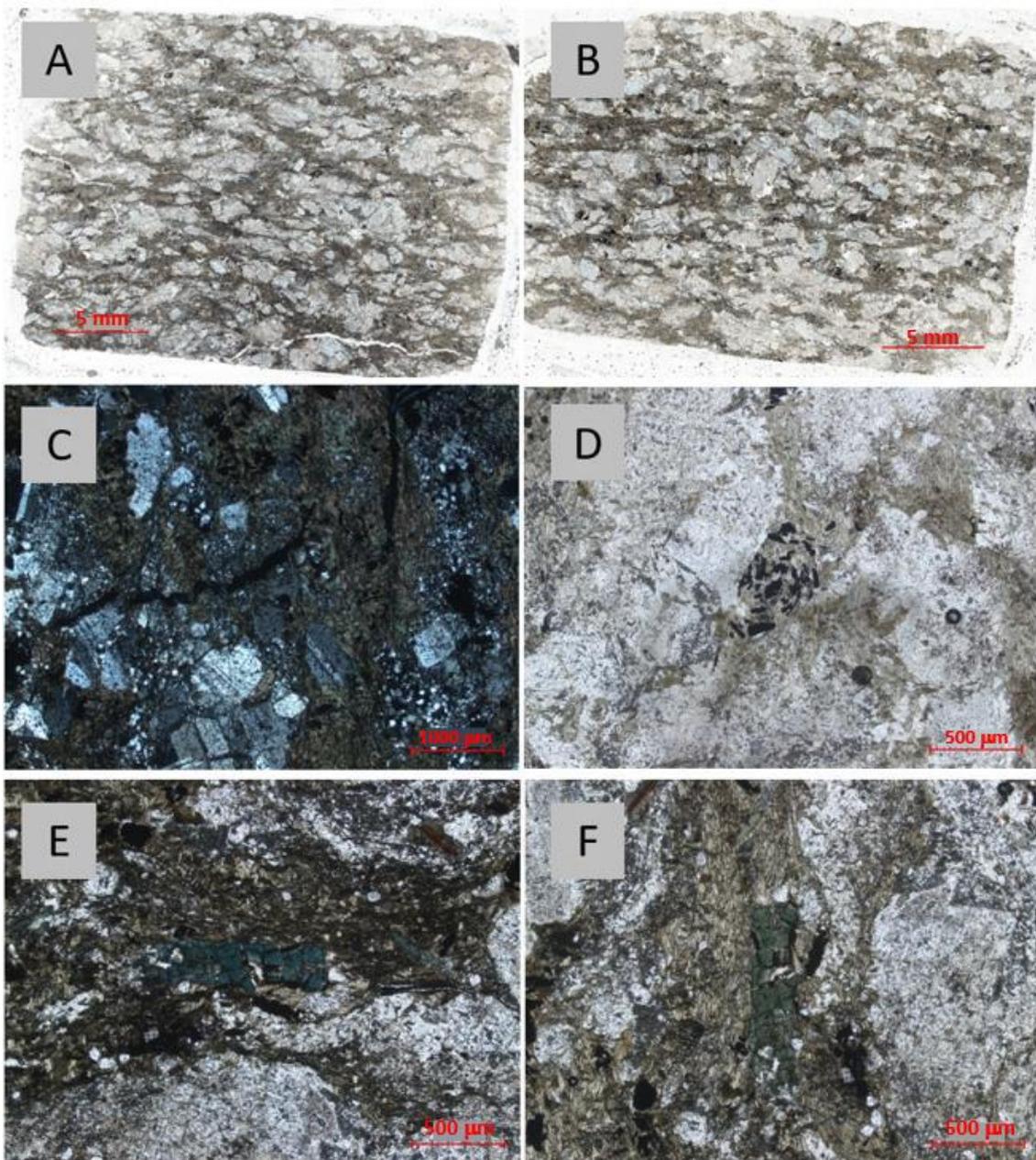


Figura 12: Principais feições petrográficas dos metabasitos afaníticos porfíricos. (A e B) Visão geral da lâmina, nicóis descruzados; (C) Fenocristais de plagioclásio com textura polissintética à nicóis descruzados; (D) Textura simplectita em mineral opaco; (E e F) Fenocristal de hornblenda à nicóis cruzados e descruzados, respectivamente.

4.3. Caracterização mineralógica via difração de raios-X

A análise das 10 amostras estudadas a partir de difração de raio-x (DRX) indicou a presença de chamosita, quartzo, epidoto, ilmenita, albita, magnetita, pirita e rutilo. A partir dos três grupos de rochas identificados durante a petrografia, observou-se os resultados separando os mesmos três grupos (Figura 19). Sendo o grupo dos clorititos composto de chamosita, quartzo, epidoto, rutilo e magnetita, o grupo dos metabasitos afaníticos porfiríticos de chamosita, quartzo, epidoto, pirita e magnetita, e por fim o terceiro grupo, nomeado de metabasito porfirítico, com mineralogia representada por chamosita, albita, epidoto, quartzo, biotita, ilmenita e pirita. Dessa forma, foi possível identificar que a clorita observada na petrografia é chamosita, e o plagioclásio é albita (Figura 13).

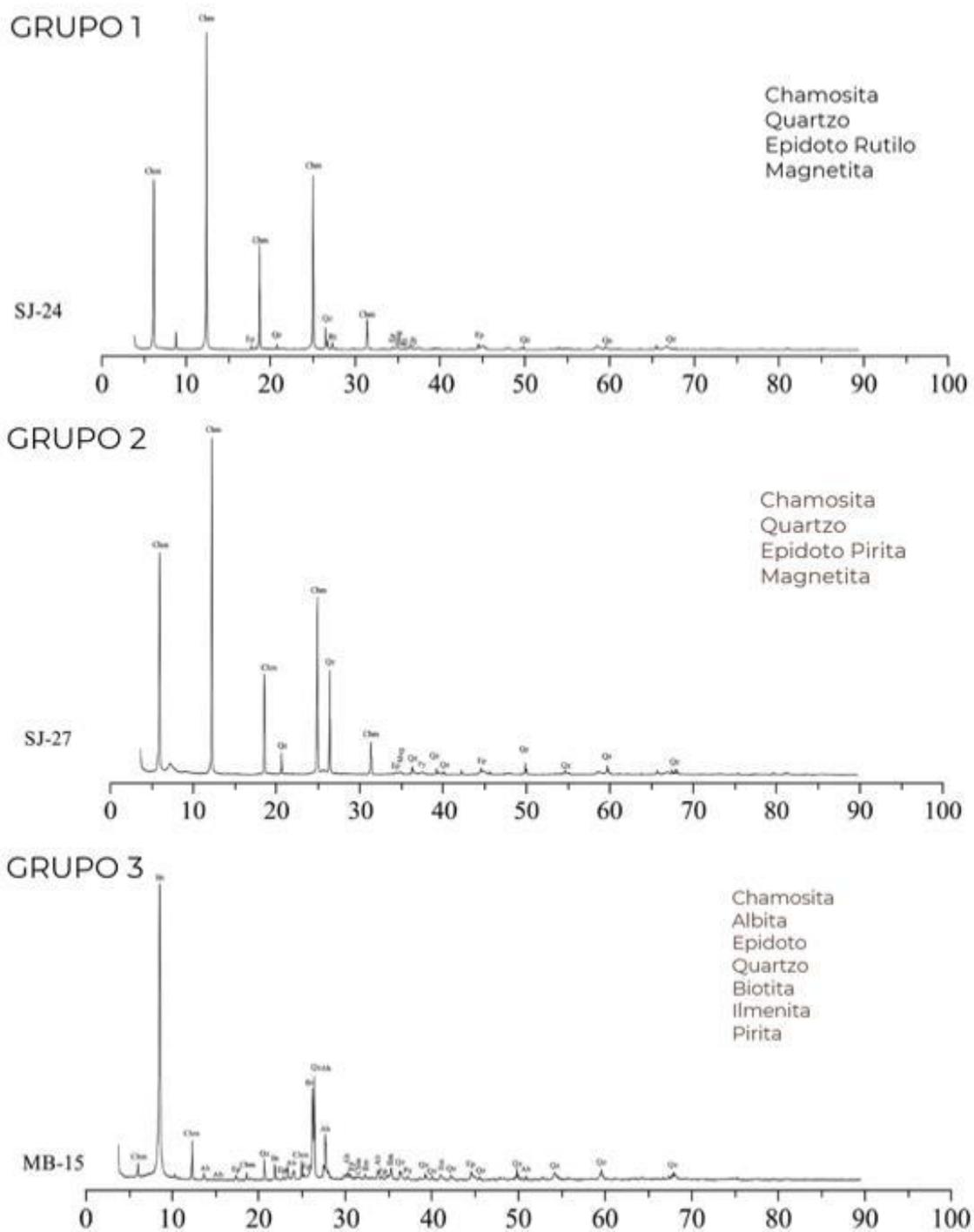
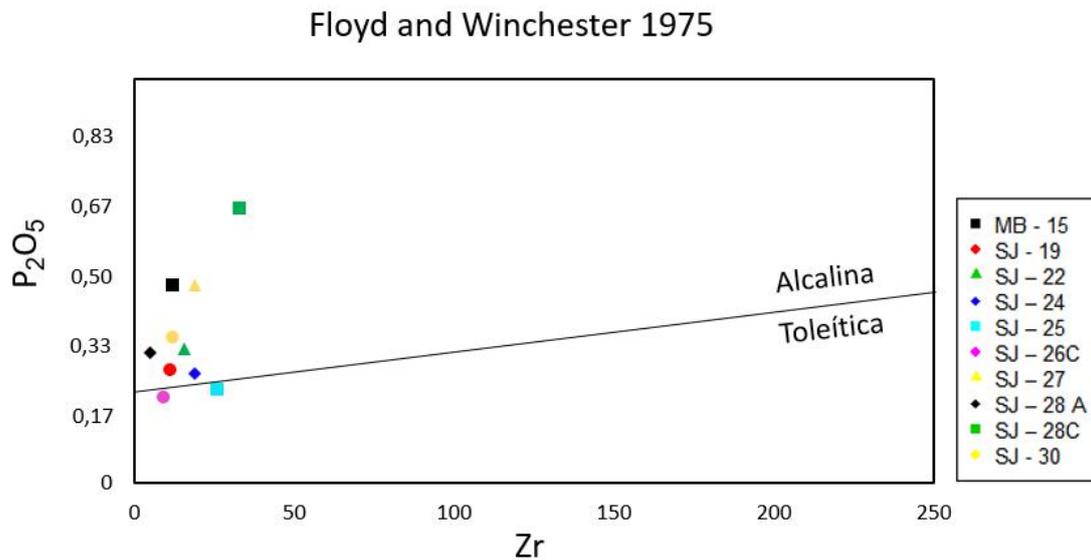


Figura 13: Difractogramas representativos dos três grupos litológicos identificados na petrografia. Grupo 1: cloriticos; Grupo 2: mebasitos afaníticos porfíricos; Grupo 3: metabasitos porfíricos.

4.4. Litogeoquímica de elementos maiores e menores

A análise de FRX e ICP-MS, forneceram dados dos elementos maiores, elementos traço e terras raras presentes nas 10 amostras analisadas (Tabela 1). As amostras apresentam valores altos de perda por calcinação (PPC), chegando a 10,1, reflexo dos minerais hidratados resultantes do metaforismo e hidrotermalismo ao qual essas rochas foram submetidas. Trata-se de rochas básicas a ultrabásicas, com valores de SiO_2 variando de 29,5 a 49%.

Para a classificação da série magmática, foi utilizado o diagrama de Floyd & Winchester (1975), que considera os teores de Zr e P_2O_5 das amostras, por serem elementos imóveis durante processos metamórfico-hidrotermais. As



análises plotam majoritariamente no campo da série alcalina (Figura 14).

Figura 14: Diagrama de Floyd & Winchester (1975) com as amostras analisadas.

Tabela 1: Análises geoquímicas dos diques de metabasito.

	MB - 15	SJ - 19	SJ - 22	SJ - 24	SJ - 25	SJ - 26C	SJ - 27	SJ - 28 A	SJ - 28C	SJ - 30
Na2O	2,1	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01
MgO	5,5	9,7	17	15,3	18,4	9,5	14,1	3,9	8,2	12,7
Al2O3	14,3	21,1	18,7	22,6	21,4	20,6	18,3	22,7	20,8	19,9
SiO2	49	38,8	32,7	30	29,5	36,2	35,5	41,2	43,2	33,8
P2O5	0,49	0,28	0,33	0,27	0,23	0,21	0,49	0,32	0,68	0,36
SO3	0,12	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
K2O	4,6	0,01	0,24	1,1	0,37	0,65	0,67	2,1	3,1	0,5
CaO	3,1	0,02	0,11	0,01	0,01	0,02	0,17	0,1	0,52	0,01
MnO	0,21	0,04	0,04	0,02	0,02	0,14	0,03	0,04	0,03	0,02
Fe2O3	17	18,3	20	17,1	17,2	19,7	18,2	18,3	16,1	21,6
ZnO	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
SrO	0,1	0	0	0,1	0,1	0	0	0,1	0,1	0
WO3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BaO	0,1	0	0	0,1	0	0	0	0	0,1	0
Bi2O3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01
CeO2	0	0	0	0,1	0	0	0	0,1	0	0
Co3O4	0	0	0	1,6	0	0	0	0	0	0
Cr2O3	0	0	0	0,1	0,1	0	0,1	0	0,1	0,1
CuO	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0
Ga2O3	0	0	0	0,1	0	0,1	0	0	0	0
PPC	1,4	8,7	8,7	9,4	8,9	10,1	8	9,1	5,6	8,5
V	36,611	71,827	56,262	65,045	70,82	53,767	70,578	42,729	28,246	63,076
Co	7,078	7,345	7,014	10,156	7,358	9,659	6,896	8,409	5,705	8,037
Ni	3,098	12,337	11,927	20,201	13,48	39,645	7,602	9,236	1,702	10,218
Cu	10,45	25,793	0,899	7,223	15,582	27,584	36,096	12,338	13,906	0,93
Zn	26,191	36,784	19,63	27,898	23,283	61,871	18,149	78,777	23,88	25,231
As	0,239	0,126	0,221	0,165	0,218	0,148	2,874	0,292	0,115	0,215
Rb	18,702	0,514	3,502	4,093	1,464	10,49	7,387	18,586	9,561	6,948
Sr	89,72	4,287	1,118	3,595	4,454	1,303	1,988	8,101	4,733	0,815
Y	9,104	16,734	6,347	15,429	3,165	10,808	12,063	22,323	13,703	3,632
Zr	12,117	11,438	15,56	19,118	25,822	9,069	19,127	5,248	33,116	11,911
Nb	5,376	4,699	3,046	5,189	5,056	6,922	8,617	6,217	6,825	2,31
Pd	0,237	0,298	0,124	0,302	0,071	0,222	0,261	0,503	0,328	0,09
Ag	0,279	0,144	0,413	2,095	0,201	0,086	0,389	0,097	0,589	0,144
Sn	0,505	0,448	0,239	0,455	0,346	0,456	0,614	0,51	0,834	0,206
Ba	127,91	52,61	6,264	112,21	33,47	28,41	21,407	101,18	60,97	10,73
La	6,784	21,196	7,472	83,949	14,06	14,322	11,454	26,654	11,075	7,487
Ce	14,401	23,451	15,547	24,049	31,625	16,077	18,533	44,08	23,718	12,052
Pr	2,012	8,376	2,366	30,635	4,376	3,772	3,648	8,424	3,221	2,308
Nd	8,723	42,221	10,072	120,587	17,751	14,542	15,266	35,942	13,093	9,232
Sm	1,851	10,768	2,05	23,038	3,486	3,023	2,652	7,745	2,53	1,883
Eu	0,694	3,206	0,625	6,378	0,898	1,191	0,8	2,948	0,928	0,742
Gd	2,337	9,447	2,548	33,748	5,013	4,457	4,34	10,785	4,033	2,695
Tb	2,335	11,52	2,603	32,851	4,756	4,131	4,232	10,763	3,892	2,696
Dy	1,924	6,624	1,345	11,381	1,578	2,696	2,354	6,422	2,378	1,235
Ho	0,393	1,072	0,259	1,856	0,28	0,525	0,496	1,176	0,535	0,238
Er	2,474	10,109	2,425	26,655	4,112	3,85	4,072	9,941	4,029	2,422
Tm	0,147	0,233	0,079	0,278	0,066	0,117	0,16	0,291	0,209	0,069
Yb	0,812	1,247	0,463	1,476	0,45	0,637	0,916	1,635	1,308	0,456
Lu	0,2	0,469	0,123	0,713	0,143	0,211	0,21	0,531	0,283	0,125
Ta	0,363	0,704	0,227	1,066	0,256	0,504	0,516	0,946	0,541	0,229
W	6,892	2,246	1,807	2,805	2,978	1,465	3,875	2,358	3,849	2,363
Pt	0,01	0,021	0,014	0,028	0,032	0,056	0,016	0,011	0,025	0,011
Au	0,003	0,005	0,003	0,006	0,005	0,004	0,005	0,003	0,004	0,003
Pb	1,351	1,001	0,388	0,614	1,62	2,616	1,563	3,113	0,663	0,347
Bi	0,002	0,004	0,003	0,002	0,006	0,008	0,004	0,006	0,003	0,004

No diagrama de normalização dos elementos terras raras para condrito de Nakamura (1974) observa-se um enriquecimento dos terras raras leves em relação aos terras raras pesados (Figura 15). Neste diagrama, também é observada ausência de anomalia de Eu.

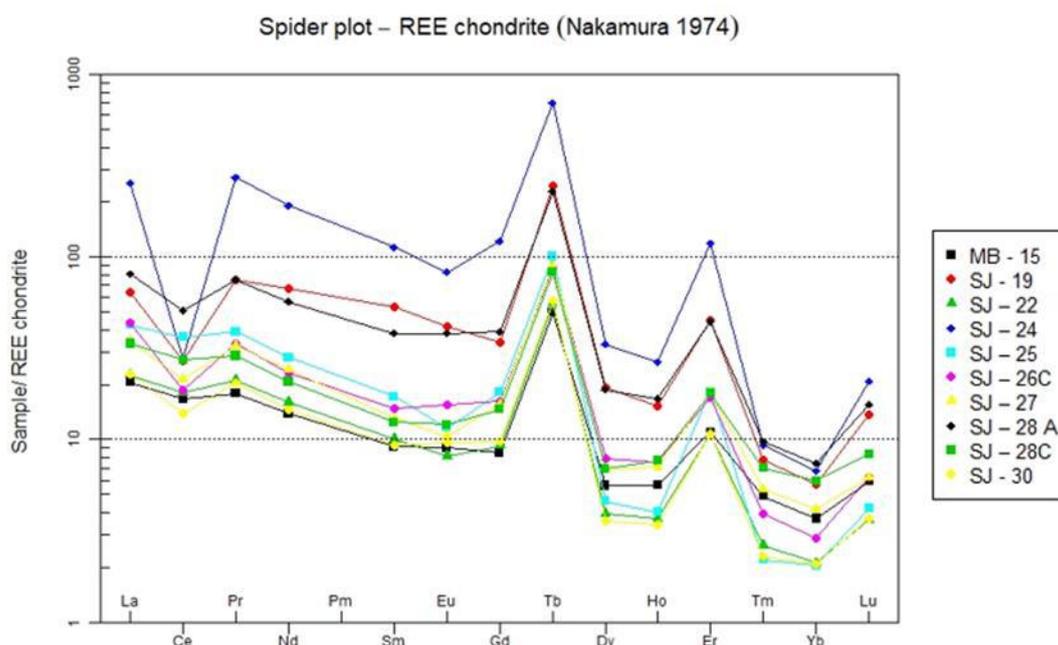


Figura 15: Diagrama multielementar para elementos terras raras normalizado para condrito, Nakamura 1974.

Para determinação do ambiente tectônico, foi utilizado o diagrama ternário de Meschede (1986), que considera o conteúdo de Zr, Nb e Y nas amostras, por serem elementos imóveis durante processos metamórfico-hidrotermais. As rochas estudadas apresentam enriquecimento em Y e semelhança com basaltos alcalinos continentais e E-MORB, ainda que dispersas no gráfico (Figura 16).

Zr/4 – 2Nb – Y (Meschede 1986)

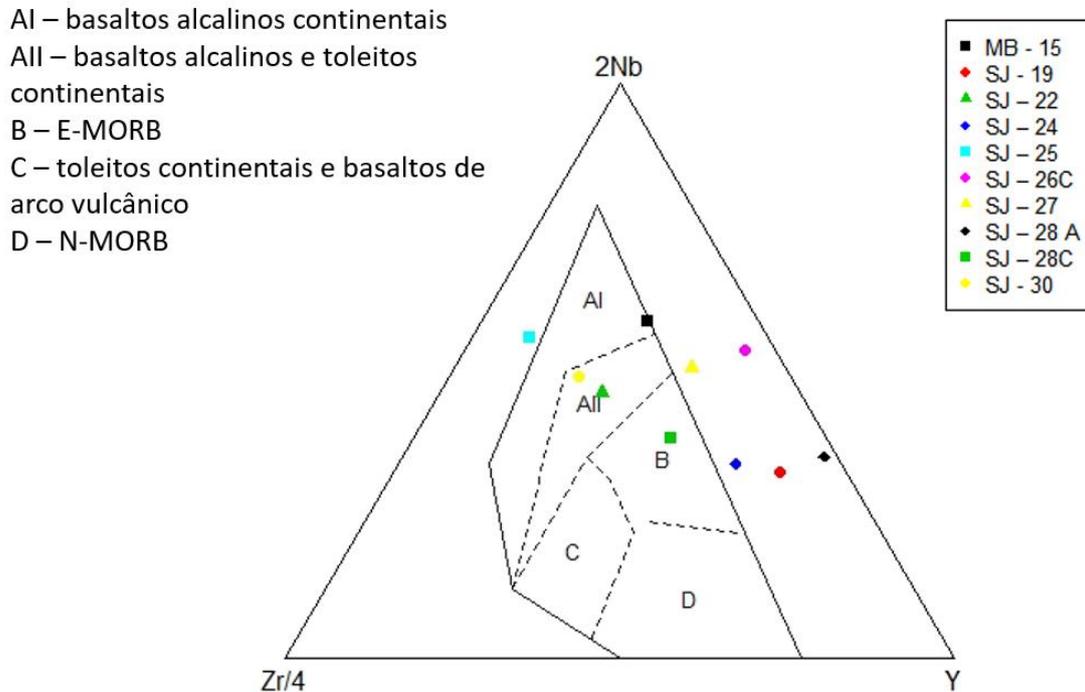


Figura 16: Diagrama ternário de Meschede 1986 para ambiente tectônico.

4.5. Descrição dos minerais em grãos – concentrados de bateia

Foram descritas 3 amostras de um antigo garimpo de ouro localizado na Serra de São José (Figuras 17 e 18, ponto SJ-29) em lupa binocular. As amostras foram coletadas de 2 porções do dique e 1 do veio de quartzo que o corta, comparando a mineralogia observada em cada litologia em questão.

A partir da análise dos minerais em grãos da amostra SJ-29B, coletada em um veio de quartzo em contato com o dique de metadiabásio (Figura 18), foram identificados magnetita, turmalina, rutilo, pirita limotinizada, zircão, apatita e ouro (Figura 19).

Com relação as amostras referentes ao dique máfico, SJ-29C e SJ-29D, apresentaram minerais com capas de alteração que dificultaram a identificação dos mesmos. Ainda com o uso de ácido oxálico durante o preparo das amostras, grande parte dos minerais tiveram suas características alteradas, sendo identificados magnetita, goethita, turmalina, rutilo e zircão (Figura 20).

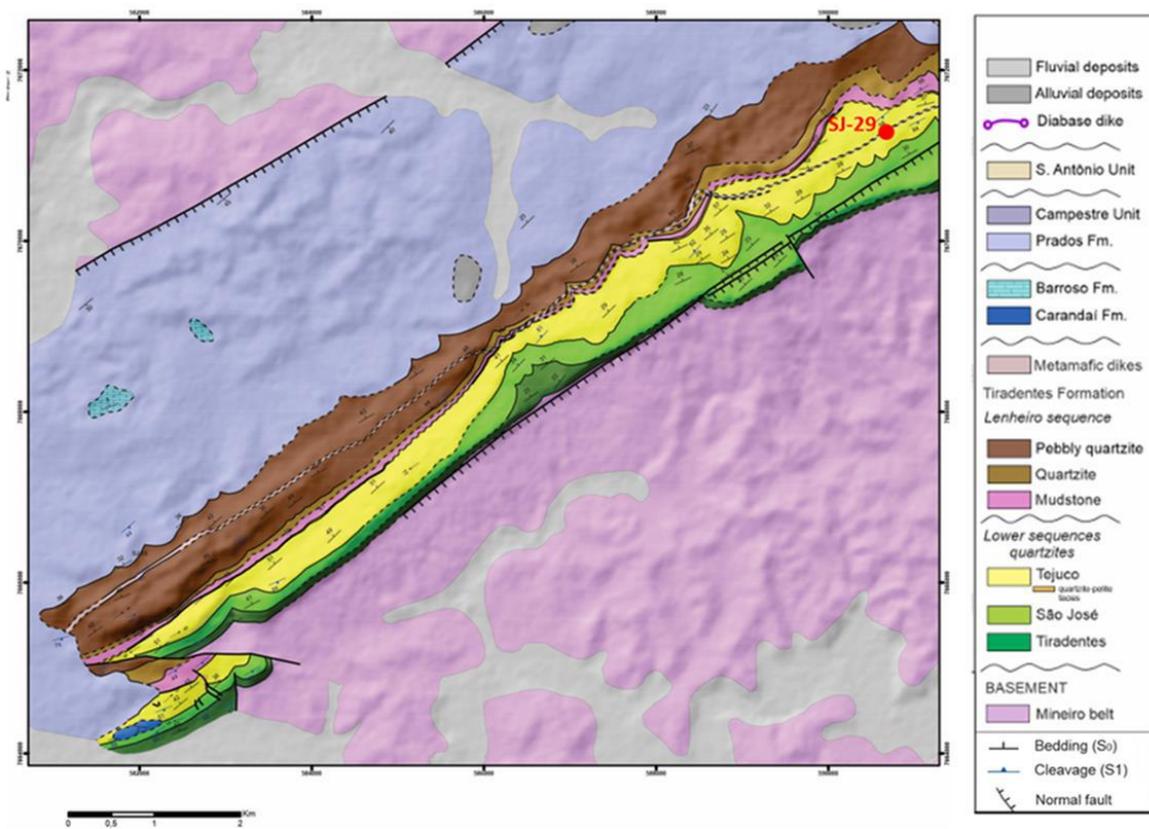


Figura 17: Mapa geológico das serras de São José com a localização do ponto SJ-29. Modificado de Nepomuceno et al. 2021.



Figura 18: Afloramento do ponto SJ-29, antigo garimpo de ouro na serra de São José.

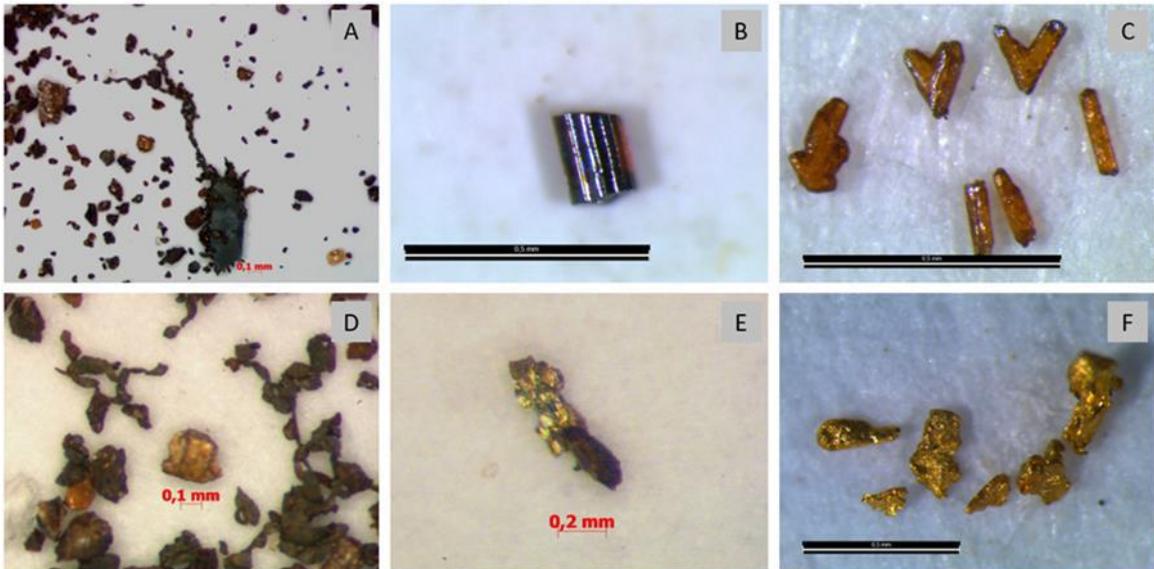


Figura 19: Minerais em grãos encontrados nas amostras SJ-B, referentes ao veio de quartzo em contato com o dique. (A) Magnetita; (B) Turmalina; (C) Rutilo; (D) Pirita; (E) Magnetita + Ouro; (F) Ouro.

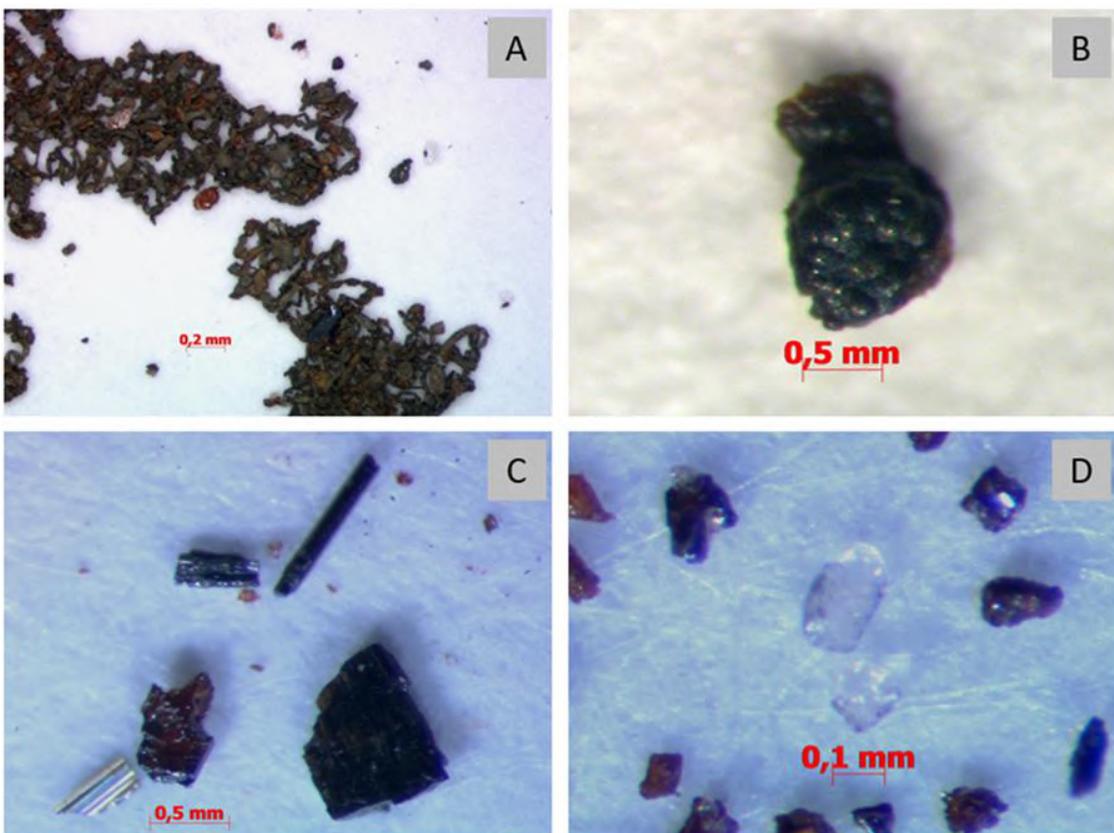


Figura 20: Minerais em grãos encontrados nas amostras SJ-29C e SJ29D, referentes aos diques máficos. (A) Magnetita; (B) Goethita; (C) Turmalina e rutilo; (D) Zircão.

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os diques de metabasito intrusivos na Fm. Tiradentes foram submetidos a processos metamórficos e hidrotermais aos quais alteraram sua composição original, o que torna complexa a caracterização do magma parental para essa litologia. Assim, para as análises realizadas, não foram considerados elementos móveis, uma vez que os resultados obtidos a partir desses elementos foram inconclusivos.

A partir do mapeamento realizado observou-se a relação dessas rochas com as Formações Tiradentes, Carandaí, Barroso e Prados, uma vez que elas cortam somente a Fm. Tiradentes. Dessa forma, assim como já descrito por (Ribeiro *et al.*, 2013), os diques são mais jovens que as rochas das Formações Prados e correspondem ao final da deposição da Fm Tiradentes, ou ao início da deposição da Fm Carandaí.

Na descrição petrográfica foram observadas diferentes granulações, sendo as mais finas com maior cloritização que as de granulação mais grossa. Tal aspecto pode ser reflexo da característica do protólito ígneo, onde os clorititos representariam cumulos máfico-ultramáficos. Em contrapartida, os clorititos apresentam mais veios e aglomerados de quartzo metamórfico em sua composição, sugerindo, alternativamente, que os clorititos são resultantes de maior interação com o fluido metamórfico-hidrotermal e tiveram seus minerais primários alterados e metassomatizados, processo este facilitado pela granulação mais fina da rocha. A modal de fenocristais de apatita observada durante a descrição petrográfica indica um caráter alcalino para os diques.

A caracterização mineralógica via difração de raios-X contribuiu para o refino da mineralogia apresentada através da petrografia, resultando em chamosita, albita, epidoto, quartzo, biotita, rutilo, magnetita, ilmenita e pirita. A chamosita é o membro ferroso da solução sólida Fe-Mg da clorita e possui origem metamórfica e/ou hidrotermal. Para ambientes metamórficos, é característico do fácies xisto verde, indicando que os diques foram submetidos a condições de pressão entre 2 e 6 Kbar e temperatura entre 300 e 450°C.

A partir da análise litogeoquímica foi determinada que as rochas estudadas pertencem a série alcalina, de acordo com o diagrama de Floyd & Winchester (1975). Além disso, o *spidergram* de Nakamura (1974), mostra um leve enriquecimento dos terras raras leves em relação aos terras raras pesados,

também característico de rochas da série alcalina. Assim, esses dados corroboram com o que foi observado na descrição petrográfica e as rochas estudadas apresentam caráter alcalino. Para caracterização do ambiente tectônico de formação dos diques, as amostras plotaram nos campos de basaltos continentais e E-MORB no gráfico de Meschede (1986), compatíveis com o ambiente de rifte descrito na região.

A partir da descrição de minerais em grãos foi identificada a ocorrência de ouro nos veios de quartzo próximo aos diques, porém não foi observado grãos de ouro nas rochas máficas do estudo, indicando que a mineralização está associada aos veios de quartzo que ocorrem junto aos diques e não necessariamente aos diques.

Nesse contexto, a mineralização de ouro ocorre em paragênese com a magnetita, pirita, turmalina e rutilo e associada aos veios de quartzo hospedados nos diques máficos estudados, quando estes encaixados na intercalação de quartzitos e metapelitos da Fm. Tiradentes. A grande quantidade de minerais ferrosos nas rochas metamáficas associada à importante presença de pirita na paragênese do ouro nos veios sugere que a deposição do metal precioso pode ter sido resultante da sulfetação de minerais ferrosos das rochas metamáficas, encaixante dos veios (Groves *et al.* 1998). A presença de turmalina nos veios de quartzo hospedados nas rochas metamáficas indica que ao menos parte dos fluidos mineralizantes tiveram origem nos quartzitos encaixantes, migrando até os sítios deposicionais em fraturas. Dessa forma, as rochas estudadas podem ter atuado como barreira físico-química para a formação da mineralização, potencializando-a, o que é corroborado pela associação de ouro e sulfetos nos veios de quartzo em contato com os diques.

6. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F.M., 1977. **O Cráton do São Francisco. Revista Brasileira de Geociências**, 7(4):349-364.

BARBOSA, N.; TEIXEIRA, W.; ÁVILA, C.A.; MONTECINOS, P.M.; BONGIOLO, E.M. & VASCONCELOS, F.F., 2019. **U-Pb geochronology and coupled Hf-Nd-Sr isotopic-chemical constraints of the Cassiterita Orthogneiss (2.47–2.41-**

Ga) in the Mineiro belt, São Francisco craton: Geodynamic fingerprints beyond the Archean-Paleoproterozoic Transition. Precambrian Research, 326: 399-416.

CHEMALE JR., F., DUSSIN, I.A., ALKMIN, F.F., MARTINS, M.S., QUEIROGA, G., ARMSTRONG, R., SANTOS, M.N., 2012. **Unravelling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: the case of the Espinhaço Supergroup, Minas Gerais, Brazil.** Gondwana Research 22, 200–206.

FLOYD, P.A., WINCHESTER, J.A., 1975. **Magma type and tectonic setting discrimination using immobile elements.** Earth and Planetary Science Letters, 27: 211--218.

GROVES, D. I., GOLDFARB, R. J., GEBRE-MARIAM, M., HAGEMANN, S. G., ROBERT, F., 1998. **Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types.** Ore geology reviews, 13(1-5), 7-27.

KUSTER, K., RIBEIRO, A., TROUW, R.A.J., DUSSIN, I., MARIMON, R.S., 2020. **The Neoproterozoic Andrelândia group: evolution from an intraplate continental margin to an early collisional basin south of the São Francisco craton, Brazil.** Journal of South America Earth Sciences. v. 102, p. 102666.

MESCHEDÉ, M., 1986. **A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram.** Chemical Geology, 56: 207-218.

MOREIRA, H.; SEIXAS, L.; STOREV, C.; FOWLER, M.; LASALLE, S.; STEVENSON, R. & LANA, C., 2018. **Evolution of Siderian juvenile crust to Rhyacian high Ba-Sr magmatism in the Mineiro Belt, southern São Francisco Craton.** Geoscience Frontiers, 9: 977-995.

NAKAMURA, N., 1974. **Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites.** *Geochimica et cosmochimica acta*, 38(5), 757-775.

NEPOMUCENO, F., RIBEIRO, A., SILVA, D.R., PIRES, G.L.C., TROUW, R.A.J., ARAÚJO, M.C.N., MAFIA, M., 2021. **Meso to Neoproterozoic polyphase rifting and tectonic inversion: The example of the São João del Rei region at the southern border of 30 the São Francisco Craton, Brazil.** *Journal of South American Earth Sciences*, v.109, p.103294.

RIBEIRO, A., TEIXEIRA, N., SOARES, L.A., 1992. **Gold-bearing Proterozoic Metasediments – Eastern Brazil.** *Simpósio Geologia Econômica*; In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo, SP; *Boletim de Resumos Expandidos* 1:229-230.

RIBEIRO, A., TROUW, R.A.J., ANDREIS, R.R., PACIULLO, F.V.P., VALENÇA, J.G., 1995. **Evolução das bacias Proterozóicas e o Termo-tectonismo Brasileiro na margem sul do Cráton do São Francisco.** *Revista Brasileira de Geociências.*, 25(4):235-248.

RIBEIRO, A., 1997. **Estratigrafia e paleoambientes nas sucessões metassedimentares Proterozóicas das serras do Lenheiro e São José, São João Del Rei, Sul de Minas Gerais.** Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 167 p.

RIBEIRO, A., ÁVILA, C.A., VALENÇA, J.G., PACIULLO, F.V.P., TROUW, R.A.J., 2003A. **Geologia da Folha São João del Rei 1:100.000.** In: Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Trouw, R., Heilbron, M. (Eds.), *Projeto Sul de Minas, Etapa I: Geologia e Recursos Mineraiis do Sudeste Mineiro.* Companhia Mineradora de Minas Gerais, pp. 521–622.

RIBEIRO, A., TEIXEIRA, W., DUSSIN, I.A., ÁVILA, C.A., NASCIMENTO, D., 2013. **U–Pb LA-ICP-MS detrital zircon ages of the São João del Rei and**

Carandaí basins: New evidence of intermittent Proterozoic rifting in the São Francisco paleocontinent. *Gondwana Research* 24 (2013) 713–726.