

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
DEPARTAMENTO DE MINERALOGIA E PETROLOGIA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO CARBONATITO TRÊS
ESTRADAS E CONCENTRADOS DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO COM
VISTAS ÀS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS DE SUA EXPLORAÇÃO COMO
MINÉRIO DE FOSFATO**

FABRICIO DURANTE DA SILVA

PORTO ALEGRE

2019

FABRICIO DURANTE DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO CARBONATITO TRÊS
ESTRADAS E CONCENTRADOS DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO COM
VISTAS ÀS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS DE SUA EXPLORAÇÃO COMO
MINÉRIO DE FOSFATO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Apresentado na forma de monografia, junto à disciplina Projeto Temático em Geologia III, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Vitor Paulo Pereira

Supervisor: Prof. Dr. Artur Cezar Bastos Neto

PORTO ALEGRE

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

CIP - Catalogação na Publicação

Silva, Fabricio Durante da

Caracterização Química E Mineralógica Do
Carbonatito Três Estradas E Concentrados
Do Processo De Beneficiamento Com Vistas
Às Implicações Ambientais De Sua
Exploração Como Minério De Fosfato /
Fabricio Durante da Silva. -- 2019. 88 f.
Orientador: Vitor Paulo Pereira.

Coorientador: Artur Cezar Bastos Neto.
Trabalho de conclusão de curso (Graduação)-

-

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de
Geociências, Curso de Geologia, Porto Alegre,
BR-RS, 2019.

1. Carbonatito. 2. Três Estradas. 3. Geologia
Ambiental. 4. Mineralogia. 5. Geoquímica. I. Pereira, Vitor
Paulo, orient. II. Bastos Neto, Artur Cezar, coorient. III.
Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE MINERALOGIA E PETROLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o Trabalho de Conclusão de Curso "**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO CARBONATITO TRÊS ESTRADAS E CONCENTRADOS DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO COM VISTAS ÀS IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS DE SUA EXPLORAÇÃO COMO MINÉRIO DE FOSFATO**", elaborado por "FABRÍCIO DURANTE DA SILVA", como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Comissão Examinadora:

Profa. Dr. Rommulo Conceição

Prof. Dr. Ruy Paulo Philipp

Prof. Dr. Laercio Dal Olmo Barbosa

PORTO ALEGRE, DEZEMBRO DE 2019.

AGRADECIMENTOS

À UFRGS, pelo ensino e infraestrutura.

À família, de sangue ou não, pelo suporte psicológico e financeiro.

Aos colegas, pelas bobagens que atenuam o cotidiano.

Aos amigos, pelas reflexões que agravam o cotidiano.

Aos professores, com ou sem instrução, pelo ensino e oportunidades.

Aos motoras, pelas viagens.

Aos porteiros, pela confiança.

À Águia pela disposição.

Aos desenvolvedores de softwares abertos, pelo altruísmo.

À vida, pela vida.

O maior trem do mundo
Transporta a coisa mínima do mundo
Meu coração itabirano

Lá vai o trem maior do mundo
Vai serpenteando, vai sumindo
E um dia, eu sei não voltará
Pois nem terra nem coração existem mais.

Carlos Drummond de Andrade, O maior trem do mundo.

RESUMO

Com este trabalho se objetivou realizar um estudo geoquímico e mineralógico do carbonatito Três Estradas (CTE) abordando alguns aspectos petrogenéticos, ambientais e tecnológicos. Este estudo possibilitou verificar que o CTE é um flogopita-apatita-calcita-carbonatito, portador de tremolita, ilmenita, flogopita, magnetita e pirocloro. De acordo com a forma, o CTE foi classificado como pertencente ao tipo linear e ocorre como uma soleira, que possui uma trama planar bem desenvolvida devido a uma foliação de fluxo. Geneticamente, o CTE está interdigitado com uma associação ultramáfica alcalina em intensidade variável. A rocha encaixante do carbonatito é quartzo feldspática de alto grau metamórfico, e pertence ao Complexo Granulítico Santa Maria Chico. Devido à intrusão do carbonatito foi fenitizada por uma distância de até aproximadamente cem metros. A fenitização se manifesta tanto como sódica, que é caracterizada pela ocorrência de albita e titanita precoce, como potássica, com a ocorrência de feldspato potássico, calcita, barita/celestita e epidoto. Geotectonicamente o CTE se insere nos eventos finais da orogenia brasileira do Cinturão Dom Feliciano e está relacionado com a Associação Shoshonítica Lavras do Sul. As análises geoquímicas indicaram que o CTE é relativamente rico em Ti, Cr e V. O estudo da distribuição e teor dos elementos potencialmente tóxicos (U, Th e Cd) são compatíveis com os de outros corpos carbonatíticos atualmente lavrados no Brasil. A ocorrência de pirocloro, como mineral portador de urânio e tório, é errática e em escassas proporções e o Cd possui valores abaixo do limite de detecção. Com o processo de beneficiamento as concentrações destes elementos permanecem baixas nos concentrados de minério e nos rejeitos. Portanto, estes teores, por serem pequenos, não impedem ou prejudicam a exploração do minério e o uso dos rejeitos como remineralizador de solos. Além disto, os elevados teores modais de apatita e a ausência de elementos contaminantes neste mineral possibilita considerar o minério fosfático como sendo de alta qualidade.

Palavras-Chave: Carbonatito. Três Estradas. Geologia ambiental. Urânio e Tório.

ABSTRACT

This work aims to conduct a geochemical and mineralogical study of the Três Estradas carbonatite (CTE). For this, some petrogenetic, environmental and technological aspects will be discussed. The CTE is a phlogopite-apatite-calcite-carbonate that contains tremolite, ilmenite, phlogopite, magnetite and pyrochlore. According to its shape it is classified as a linear type and occurs as sill which has a well developed a planar flow foliation. The CTE is genetically interdigitated with a alkaline ultramafic sequence in variable intensity. The carbonatite is hosted by a high metamorphic quartz feldspathic rock, that belongs to the Santa Maria Chico Granulitic Complex and, due to the intrusion of the carbonatite, was phenitized for a distance of up to approximately one hundred meters. Phenitization is manifested either as sodic, which is characterized by the occurrence of early albite and titanite, or potassic, with the occurrence of potassium feldspar, calcite, barite / celestite and epidote. Geotectonically, the CTE is part of the final events of the Brazilian Dom Feliciano Belt orogeny and is related to the Lavras do Sul Shoshonitic Association. Geochemical analysis indicated that CTE is relatively rich in Ti, Cr and. The study of the distribution and content of potentially toxic elements (U, Th) are compatible with those of other carbonatite bodies currently mined in Brazil, and Cd is under the detection limit. The occurrence of pyrochlore, as uranium and thorium carrier mineral, is erratic and occur in small proportions. Cd has values below the detection limit. With the beneficiation process the concentrations of these elements remain low in ore concentrates and tailings. Therefore, these small contents do not prevent or impair the exploitation of the ore. In addition, the high modal levels of apatite and the absence of contaminants in this mineral make it possible to consider phosphate ore as being of high quality.

KEY WORDS: Carbonatite; Três Estradas; Environmental geology. Uranium and Thorium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização do carbonatito Três Estradas. Em branco, o estado o Rio Grande do Sul. Em cinza, o município de Lavras do Sul, com o corpo carbonatítico representado pelo ponto em branco. Destacados também as sedes municipais mais próximas.	14
Figura 2. Diagrama de classificação química para carbonatitos com teor de SiO ₂ < 20 % em peso. Carbonatitos com teor SiO ₂ superior a 20 % em peso são silicocarbonatitos.	21
Figura 3. Mapa cronoestratigráfico da área de estudo, com as ocorrências dos carbonatitos no Rio Grande do Sul. (JC) Joca Tavares, (TE) Três Estradas, (PF) Passo Feio, (PT) Picada dos Tocos.	25
Figura 4. Esboço geológico do CTE, com as sondagens e seções geológicas utilizadas neste trabalho.	31
Figura 5. Distribuição da amostragem executada para este trabalho, em seção geológica.	32
Figura 6. Fotografias de testemunhos de sondagem, representativas de cada litologia da área de estudo. A) Gnaiss com fenitização incipiente. B) Gnaiss com fenitização intensa. C) Ultramáfica com carbonatação incipiente. D) Assimilação e mistura entre carbonatito e ultramáfica. E) Foliação de fluxo com dobramento, com carbonatito e ultramáfica. E) Carbonatito homogêneo.	33
Figura 7. Dosímetro Polimaster PM 1621M.	34
Figura 8. Fotomicrografias, em polarização paralela, de aspectos característicos do CTE. A) Aspecto padrão, com bandas descontínuas ricas em flogopita e tremolita. B) Nível rico em carbonato e apatita. C) Nível rico em flogopita. D) Nível rico em tremolita. Ap, apatita; Cal, calcita; Ilm, ilmenita; Mgt, magnetita; Tr, tremolita.	39
Figura 9. Fotografias de detalhe da variação composicional das bandas do CTE. A) Níveis distintos e descontínuos ricos em carbonato e flogopita, com assimilação incipiente. B) Nível heterogêneo, em que ambas as bandas ricas em carbonato e flogopita se mesclam.	40
Figura 10. Fotografias de testemunhos, onde se verifica a variação composicional e a assimilação. A) Carbonatito branco homogêneo, com pequena quantidade de minerais máficos. B) Assimilação intermediária, em que o carbonatito adquire a cor cinza devido à presença de flogopita e tremolita. C) Ultramáfica interdigitada com carbonatito.	41
Figura 11. Mapa composicional de pseudocor ao MEV-EDS. Em verde, dolomita, e em vermelho, calcita. Apatita em tom rosado no canto inferior direito, e magnetita em tom azulado no canto superior direito.	42
Figura 12. Fotomicrografias de aspectos texturais da apatita. A) Apatita equigranular do carbonatito com dissolução e substituição intragranular. B) Apatita alongada inclusa em flogopita. À direita, apatita equigranular do carbonatito. C) Dissolução intensa de apatita equigranular. D) Corrosão e carbonatação de borda da apatita.	43
Figura 13. Imagens por elétrons retroespalhados ao MEV. A) Na porção superior da fotomicrografia se observa dois grãos de monazita em branco; calcita em cinza claro; dolomita em cinza escuro e, na porção inferior, apatita em cinza claro. B) Allanita inclusa em flogopita circundada por barita e celestita.	44
Figura 14. Fotomicrografia de celestita-barita intergranular em calcita.	44
Figura 15. Fotomicrografia de aspectos texturais da flogopita em carbonatito. A) Flogopita com a cor castanha claro, com ilmenita associada. B) Expansão da flogopita por preenchimento da clivagem por calcita.	45
Figura 16. Fotomicrografias de pirocloro em lâmina delgada. A) Agregados dispersos de pirocloro, formando trilha descontínua, em calcita. B) Grão disperso em matriz calcítica. C) Agregado arredondado de pirocloro parcialmente incluso em flogopita. D) Grãos de pirocloro acompanhando a foliação do carbonatito.	46
Figura 17. Imagens de elétrons retroespalhados ao MEV de pirocloro. A) Seta indicando grão de pirocloro na borda de cristal de apatita. Seta indicando grão de pirocloro disperso em carbonato. C) e D) Grãos com alteração heterogênea.	47
Figura 18. Fotomicrografias em luz refletida de lâmina delgada polida. A) Pirita precoce, com magnetita posterior, em calcita. B) Detalhe de um nódulo de ilmenita (~2 cm), com inclusão	

de pirocloro.....	48
Figura 19. Aspectos texturais característicos do gnaissse encaixante. A) Contato entre xenólito de gnaissse no carbonatito. B) Detalhe da foliação marcada por biotita, em bandas máficas, e banda quartzofeldspática esbranquiçada. C) Xenólito de gnaissse à direita, incorporado ao carbonatito à esquerda. D) Dobramento típico do gnaissse.	49
Figura 20. Fotomicrografias de lâmina delgada registrando aspectos de fenitização incipiente no gnaissse. A) Recristalização do plagioclásio, e formação de albita intergranular. B) Formação de titanita, tremolita, clorita e calcita como produtos da fenitização.	50
Figura 21. Imagens por elétrons retroespalhados ao MEV de aspectos da fenitização intensa no gnaissse. A) Imagem em pseudocor a partir de mapa composicional por EDS. Em ordem de cristalização: Flogopita (amarelo), albita (verde), feldspato potássico (vermelho) e calcita (azul). B) Veio tardio preenchido por calcita e celestita-barita, à esquerda, e albita, feldspato potássico e ilmenita em fenito. C) Feldspato potássico tardio, em textura intergranular. Albita e calcita preoces, com borda corroída. D) Titanita muito fraturada, com preenchimento das fraturas por feldspato potássico.	51
Figura 22. Fotomicrografias de lâmina delgada. A e B) Fotomicrografia com polarização cruzada e paralela de fenocristal de anfibólio, totalmente substituído por clorita e calcita, em matriz de plagioclásio muito fino. C e D) Fotomicrografia com polarização cruzada e paralela de textura de fluxo, cinza escuro, no centro da lâmina, e venulação posterior preenchida por carbonato.....	52
Figura 23. Ordem de cristalização dos minerais observados na área de estudo.....	53
Figura 24. Diagrama de Harker em amostras do carbonatito Três Estradas, com dados geoquímicos de rocha total indicando a relação entre o SiO ₂ e os demais elementos maiores do carbonatito Três Estradas.	54
Figura 25. Diagrama de variação em amostras do carbonatito Três Estradas com dados geoquímicos de rocha total entre elementos maiores e CaO.	55
Figura 26. Diagrama de distribuição dos ETR normalizados por condrito (C1).	56
Figura 27. Diagrama de classificação de carbonatitos conforme a composição do carbonato dominante. Círculos azuis representam as 33 análises pontuais obtidas em análises por EDS ao MEV.	57
Figura 28. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristal de pirocloro do carbonatito portadores de U e Th.	61
Figura 29. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristal alterado de pirocloro do carbonatito portadores de U e Th.	62
Figura 30. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de apatita (5 e 9), ilmenita (6), magnetita (7), tremolita (8 e 10) e calcita (11) do carbonatito.	63
Figura 31. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de apatita (51), albita (52), titanita (53), mineral não identificado (54) e zircão (55) da ultramáfica.	64
Figura 32. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de titanita (24), flogopita (25), calcita (26) e magnetita (27) da ultramáfica.	65
Figura 33. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de magnetita (45), albita (46 e 47), titanita (48), calcita (49) e flogopita (50).	66
Figura 34. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristal de celestita-barita intersticial aos cristais de calcita do carbonatito.	67
Figura 35. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de flogopita (56), alanita (57), celestita (58) e calcita (59).	68

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Localização e Vias de Acesso	13
1.2 Objetivos e Metas	15
2. ESTADO DA ARTE	16
2.1 Contexto Geológico e Geotectônico	16
2.2 Associação Shoshonítica Lavras do Sul	18
2.3 Carbonatitos	19
2.4 Carbonatitos no Rio Grande do Sul	25
2.5 Geoquímica do Urânio e Tório	29
3. METODOLOGIA	30
3.1 Etapa Pré-campo	30
3.2 Etapas de campo	33
3.3 Preparação de Lâminas Delgadas	35
3.4 Geoquímica de Rocha Total	36
3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura	37
4. RESULTADOS	39
4.1 Petrografia	39
4.1.1 Carbonatito Três Estradas	39
4.1.2 Gnaiss	48
4.1.3 Lamprófiro espessartítico	51
4.2 Geoquímica	53
4.2.1 Aspectos petrológicos	53
4.2.2 Classificação	57
4.2.3 Aspectos tecnológicos	57
4.3 Química Mineral: U e Th	60
5. DISCUSSÃO	69
5.1 Aspectos Petrológicos e Tectônicos	69
5.2 Aspectos quanto ao Aproveitamento Tecnológico	71
5.2.1 Teores de U e Th	71
5.2.2 Implicações quanto ao uso como remineralizador	72
5.2.3 Implicações quanto ao beneficiamento do minério	74
6. CONCLUSÕES	76
7. REFERÊNCIAS	79
8. ANEXOS	83

1. INTRODUÇÃO

As novas ocorrências de corpos carbonatíticos no Rio Grande do Sul possuem uma enorme relevância para o desenvolvimento do estado, cuja produção agrícola para 2018 é estimada em 32,744 milhões de toneladas. Para esses números, o estado depende da importação de toda a matéria prima para os fertilizantes que usa (IBRAM. Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira. 6ª ed. Acessado em 04/10/2018).

Um constituinte essencial dos fertilizantes é o fósforo, que no Brasil é produzido a partir do fosfato extraído principalmente no centro-oeste e nordeste do país. O fósforo é um elemento de extrema importância na fase inicial de crescimento das plantas. Nos vegetais uma baixa absorção do nutriente deve ser corrigida com uma suplementação, que é necessária para o aumento nas taxas de produção agrícola. O fósforo se faz importante na fotossíntese, respiração, transferência de energia, favorecendo o crescimento de raízes e na qualidade de frutos, grãos e folhas. A deficiência deste nutriente na planta pode acarretar em uma redução considerável do tamanho do vegetal e atrasos no florescimento e redução da área foliar, resultando em danos econômicos.

As primeiras investigações acerca dos recentes carbonatitos no estado começaram no distrito de Três Estradas, a partir do projeto Palma, realizado pela Mineração Santa Elina S.A., concluído em 2008. Prospectando ouro na região, a partir de análises de geoquímica de solo, foram descobertas algumas anomalias de fosfato na região, e com algumas sondagens foi identificada uma rocha com quantidades de até 8% de P_2O_5 , cujo manto de intemperismo possui em torno de 20% deste óxido. A descoberta dos corpos carbonatíticos veio por meio do projeto Agrominerais do Rio Grande do Sul, realizado pela CPRM (2010), que definiu dois corpos, um na localidade de Joca Tavares e outro na localidade denominada de Três Estradas (SENHORINHO, 2012). Posteriormente foram descobertos os carbonatitos Passo Feio e Passo dos Tocos.

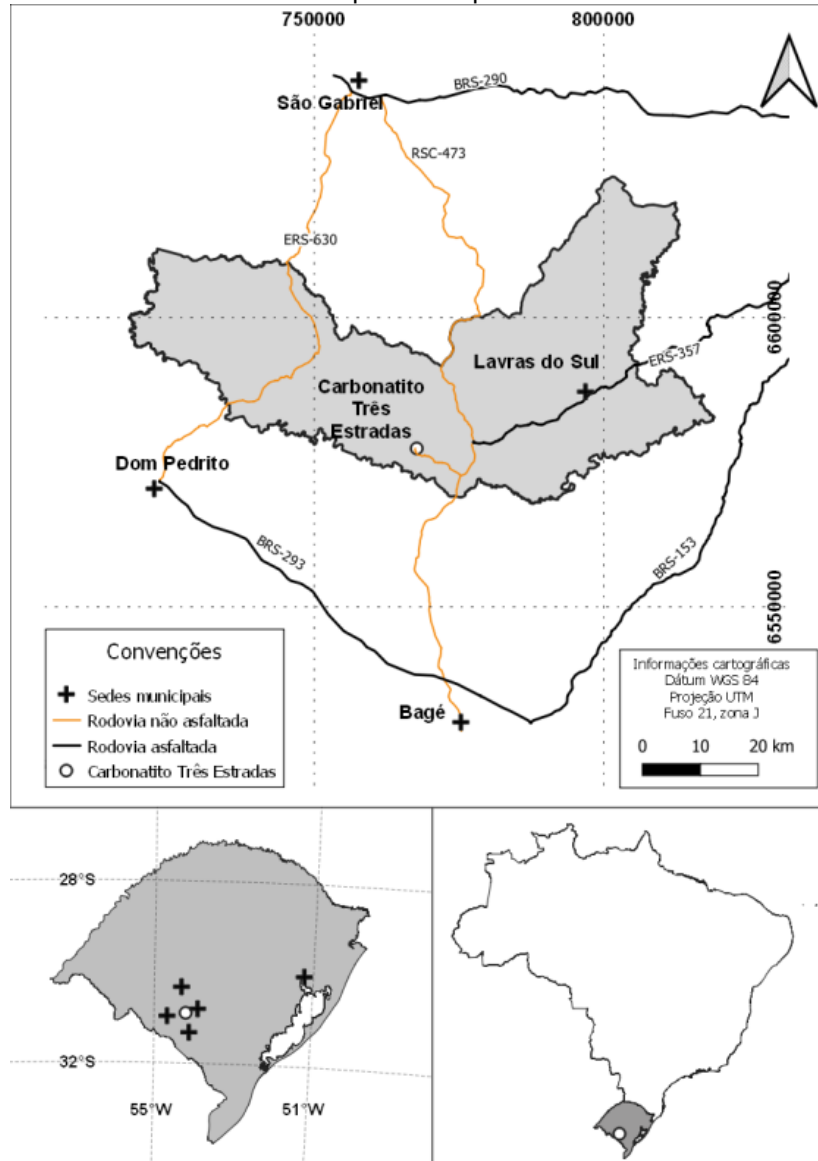
Apesar do grande interesse econômico devido à eventual concentração de elementos como nióbio, tântalo, titânio e elementos terras raras, os carbonatitos também são detentores de 31% dos recursos mundiais de tório, além de possuírem grande potencial de concentração de urânio (CUNEY E KYSER, 2015). Por isto, estes elementos recebem grande atenção dos órgãos ambientais.

Devido a esse potencial de mineralizações de urânio e tório, foi essencial uma investigação sobre a ocorrência dos potenciais contaminadores minerais do minério de fósforo que será produzido pela empresa. Por isto, foram investigadas as composições dos concentrados de minério a partir do beneficiamento e dos rejeitos gerados após os processos de beneficiamento que poderão compor uma eventual pilha de rejeitos. Destaca-se que o rejeito, por ser rico em carbonatos, também poderá ser utilizado como remineralizador de solo, não sendo necessária a construção de barragens para seu armazenamento.

1.1 Localização e Vias de Acesso

O Carbonatito Três Estradas está situado no distrito de Três Estradas (Figura 1), este pertencente ao município de Lavras do Sul, localizado na porção sudoeste do Escudo Sul-riograndense (RS).

Figura 1. Mapa de localização do carbonatito Três Estradas. Em branco, o estado o Rio Grande do Sul. Em cinza, o município de Lavras do Sul, com o corpo carbonatítico representado pelo ponto em branco. Destacados também as sedes municipais mais próximas.



Fonte: Do autor.

Para acessar o carbonatito Três Estradas é necessário percorrer uma distância aproximada de 360 km de Porto Alegre, sendo que a rota de acesso se dá via BR 290, no sentido oeste, até o trevo de Caçapava do Sul, no km 333 da rodovia. A partir daí, deve-se seguir para a saída para Caçapava do Sul, via RS 392, onde, na entrada da cidade, acessando a RS 357 até o entroncamento com a RS 473 com destino a Bagé, deve-se percorrer aproximadamente 7 km e virar à direita em uma rotatória, onde se percorre aproximadamente mais 8 km.

1.2 Objetivos e Metas

Os objetivos e metas estabelecidos com este trabalho foram a caracterização química e mineralógica do carbonatito Três Estradas, da rocha encaixante, do solo residual destas rochas e do concentrado de fosfato produzido, com atenção especial aos elementos urânio, tório e cádmio, por serem potenciais poluidores.

Os objetivos específicos estabelecidos foram:

Como objetivos específicos, têm-se os seguintes itens:

1. Caracterizar mineralogicamente o CTE.
2. Caracterizar geoquimicamente o CTE.
3. Definir, ainda que preliminarmente, a posição estratigráfica do CTE.
4. Avaliar o teor de elementos potencialmente tóxicos.
5. Avaliar a distribuição espacial de elementos potencialmente tóxicos.
6. Avaliar eventuais implicações quanto à utilização do CTE para remineralizador de solo.
7. Avaliar, ainda que sucintamente, eventuais implicações quanto à qualidade do minério fosfático.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Contexto Geológico e Geotectônico

O Carbonatito Três Estradas intrude a borda leste do Complexo Granulítico Santa Maria Chico (CGSMC), localizado no Terreno Taquarembó.

O Bloco Taquarembó (BT) constitui um terreno paleoproterozoico situado a oeste do Lineamento de Ibaré, representando o maior fragmento do Terreno Nico Perez e sendo constituído por granulitos paleoproterozoicos, intrusões e coberturas vulcano-sedimentares neoproterozoicas da Bacia do Camaquã e fanerozoicas da Bacia do Paraná (PHILIPP et al., 2016). No Rio Grande do Sul, é representado em sua maioria pelo Complexo Granulítico Santa Maria Chico. O Complexo Granulítico Santa Maria Chico (CGSMC) engloba as rochas mais antigas do estado do Rio Grande do Sul as quais, segundo Hartmann (2002), possuem idades de cristalização de até 2,5 Ga e idade de metamorfismo de 2,0 Ga. Este complexo é caracterizado pela presença de gnaisses quartzo-feldspáticos (tonalitos e trondhjemitos), gnaisses máficos, anortositos, ultramafitos e rochas supracrustais metamorfizadas em condições de fácies granulito, com retrometamorfismo nas fácies anfibolito e xisto verde (CPRM, 2017). Segundo Nardi e Hartmann (1979), o CGSMC é estruturado segundo a direção noroeste, com foliação de direção leste-oeste dominando na porção sul gradando a direção norte-sul na porção norte. Estes autores descrevem dois tipos de gnaisses: (i) quartzo-feldspáticos, com textura granoblástica e feições de retrometamorfismo pela paragênese actinolita-clorita-epidoto-carbonatos; (ii) básicos, apresentando menor quantidade de quartzo e maior quantidade de plagioclásio e minerais máficos. Os metaultramafitos possuem textura granoblástica e são compostos por ortopiroxênios, diopsídio, hornblenda, espinélio verde e plagioclásio. Os metapelitos são granada-silimanita-gnaisses, também com textura granoblástica.

Em contraste, a CPRM (2017) divide o CGSMC em três domínios: Unidade Ortoderivada Máfica, Unidade Ortoderivada Granítica e Unidade Paraderivada. A Unidade Ortoderivada Máfica está localizada na parte norte da Folha Lagoa da Meia Lua, apresentando estrutura maciça ou gnáissica, com intrusões graníticas. Possui composição básica e ultrabásica com textura granoblástica constituída de plagioclásio, hiperstênio, diopsídio, hornblenda e espinélios. Devido ao alto grau

metamórfico a textura granular é comum, assim como diopsídio com macla metamórfica e hiperstênio metamórfico. A Unidade Paraderivada situa-se no centro do Complexo e apresenta gnaisses com textura granonematoblástica, granolepidoblástica, milonítica e ultra-milonítica. Sua mineralogia apresenta cordierita, silimanita, granada e plagioclásio. Também são observados anfíbolitos e metamargas. Por fim, a Unidade Ortoderivada Granítica está localizada no sul do Complexo em contato com o Lineamento de Ibaré, apresentando estrutura gnáissica ou milonítica e ocorre em outras unidades como intrusões. A textura dominante é a granoblástica, ocorrendo texturas milonítica e ultra-milonítica de forma subordinada.

Com a evolução do ESRG, o Bloco São Gabriel, para Hartmann, Chemale Jr. e Philipp (2007), compreende a formação do arco intraoceânico Passinho ca. 880 Ma, em resposta à subducção para leste, resultando em uma acreção desse arco na margem do cráton Rio de la Plata (CRLP) e uma margem passiva no Microcontinente Encantadas (MCEnc). Um segundo evento de subducção sob a margem do CRLP e do então acrescido arco Passinho resulta na formação das rochas plutônicas cálcico-alcálicas do Complexo Cambaí e das rochas vulcânicas e vulcanossedimentares dos Complexos Palma e Bossoroca, sem contribuição significativa de crosta antiga para as fusões, indicado pelas idades modelo entre 1,1 a 0,8 Ga das rochas Cambaí, Palma e Bossoroca. Uma nova subducção para oeste causou cavalgamentos para sudeste, que na forma de um prisma acrescionário, metamorfoisou e empilhou os sedimentos e as vulcânicas máficas e ultramáficas dos Complexos Palma e Bossoroca (CHEMALE JR., 2000). A bacia de margem passiva, anteriormente aberta na margem do Microcontinente Encantadas, entra em subducção, consumindo o Oceano Charrua e gerando as rochas metavulcânicas, de afinidade cálcico-alcálicas, do Complexo Metamórfico Porongos. Ao final do estágio orogênico, entre 700 e 680 Ma ocorreu a colisão entre o CRLP com o MCEnc, com o encurtamento sendo acomodado no Cinturão Tijucas, representado pelo metamorfismo, cisalhamento lateral, dobramentos e empurrões para sudeste. Nesse último evento, o Granito Santa Zélia é relacionado com a subducção de crosta continental, além de sua característica tarditectônica. Portanto, Hartmann et al. (1999, 2000, 2007b) sugerem três eventos tectônicos principais: (i) o início de atividade de subducção marcado pelo metadiorito Passinho ca. 880 Ma; (ii) desenvolvimento do arco magmático na Orogênese São Gabriel, de 753 a 680 Ma, marcado pelos Complexos Cambaí, Palma e Bossoroca; (iii) desenvolvimento do

orógeno Dom Feliciano, produto de extensa fusão de crosta antiga localmente preservada ao longo das intrusões graníticas pós-colisionais do Batólito Pelotas (HARTMANN, CHEMALE JR. E PHILIPP, 2007).

2.2 Associação Shoshonítica Lavras do Sul

Como descrito por Lima e Nardi (1992), as rochas shoshoníticas no Rio Grande do Sul são definidas pela Associação Shoshonítica Lavras do Sul (ASLS), e são compostas por rochas vulcânicas básicas a intermediárias, hipoabissais a plutônicas com ampla composição.

As rochas básicas se formam em derrames ou pequenas intrusões semicirculares, possuem olivina como o mineral mais precoce, comumente transformada em serpentina, carbonatos, iddingsita ou boulingita, além da ocorrência de magnetita titanífera, apatita acicular, plagioclásio e clinopiroxênios. A presença de enclaves constituídos exclusivamente por anfibólio também é notável.

As rochas vulcânicas intermediárias, predominantes, ocorrem como derrames intercalados com tufos de queda e brechas, além de diques posteriores. Possuem fenocristais de plagioclásio, clinopiroxênios com textura glomeroporfirítica, magnetita titanífera, apatita idiomórfica e raramente olivina. Como mineralogia de alteração hidrotermal, ocorre pistacita, calcita, mica branca e clorita.

Estratigraficamente acima, ocorrem lamprófiros espessartíticos, na forma de pequenos derrames e diques. Mineralogicamente, são compostos por fenocristais de anfibólio, por vezes como produto de reação com um núcleo de clinopiroxênio, em uma matriz constituída principalmente por plagioclásio, por vezes com textura de reabsorção, além de sanidina subordinada.

As litologias hipoabissais são compostas por monzonitos a quartzo-monzonitos, e raros diques andesíticos e riolíticos. Os termos monzoníticos ocorrem como diques anelares ao redor do núcleo do granito Lavras, e são compostos por fenocristais de plagioclásio, feldspato alcalino, hornblenda e clinopiroxênio, em uma matriz fanerítica fina a média de plagioclásio. Quando mais diferenciados, apresentam também quartzo e fenocristais de biotita. Ainda há ocorrência de rochas cumuláticas anortosíticas associadas.

Os diques riolíticos cortam indiscriminadamente as outras litologias, e representam os estágios finais do evento magmático. São compostos por fenocristais de quartzo, plagioclásio e feldspato potássico e hornblenda, em uma matriz fina de quartzo e feldspato potássico.

As rochas intrusivas variam de termos monzoníticos a sienograníticos, do tipo epizonal, e possuem anfibólios idiomórficos e feldspato alcalino tardio. Também ocorrem enclaves microdioríticos. A composição química dos minerais é similar à das rochas extrusivas.

As rochas da ASLS possuem idade de aproximadamente 640 Ma e, devido ao contexto regional, com a presença de rochas metamórficas do embasamento e as sequências sedimentares associadas, bem como o caráter do magmatismo, são interpretadas como pós-cinemáticas ao evento compressivo brasileiro. Neste contexto, o magmatismo tardi-orogênico é decorrente da subducção.

2.3 Carbonatitos

Os carbonatitos foram descritos como rochas magmáticas pela primeira vez no Complexo Alcalino de Fen, na Noruega, em 1921 por Brøgger, apesar de originalmente terem sido descritas litologias similares com gêneses diversas por Bose, em 1884, na Índia. Importantes petrologistas da época, como Reginal Daly, em 1933, e James Shand, em 1943, sustentavam que as rochas descritas como “calcáreos ígneos” se tratavam de megaxenólitos sedimentares. A confirmação da possibilidade da origem ígnea dessas rochas se deu com o trabalho experimental de Wyllie e Tuttle, em 1960, em que se provou que a calcita poderia cristalizar a temperaturas de 650 °C em pressões de 0,1 GPa a partir de uma fase *liquidus*. Simultaneamente, estudos isotópicos também mostravam que fontes tanto do manto litosférico como do astenosférico participavam da extração dessas rochas, conforme descrito por Bell e Blenkinsop (1989, apud MITCHELL, 2005). Observa-se que, apesar do tempo, as questões genéticas destas rochas ainda continuam mal-entendidas.

Carbonatitos intrusivos podem ser classificados também conforme sua disposição espacial. Quando possuem geometria arredondada ou anelar são

classificados como sendo do tipo “Central”. Os corpos com geometria longitudinal, alongada, encaixados ou subconcordantes a falhas são classificados como sendo do tipo “Linear” (KRAVCHENKO et al. 1988).

A classificação recomendada pela IUGS para carbonatitos se refere a qualquer rocha ígnea, plutônica ou vulcânica, modalmente composta por 50 % ou mais de carbonatos primários (STRECKEISEN, 1978, 1979). Conforme sua mineralogia, podem ser classificados como:

Calcita-carbonatitos, quando o carbonato dominante é a calcita. Podem ser sôvitos quando possuem uma granulação grosseira, ou alvikitos quando a granulação é fina a média.

Dolomita-carbonatitos, quando o carbonato dominante é a dolomita. Podem ser referidos como beforsitos.

Ferrocronatitos, quando o carbonato dominante é rico em ferro (e.g. ankerita ou siderita).

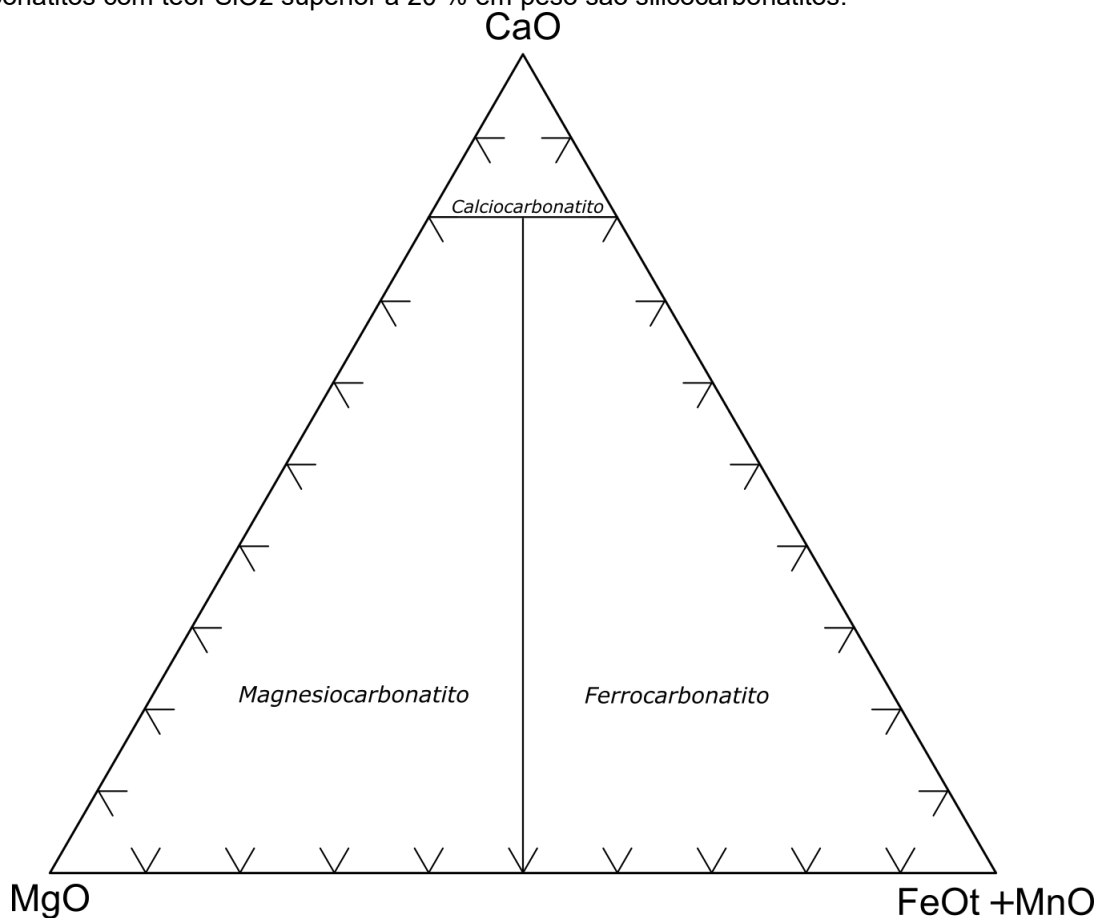
Natrocronatitos, quando o carbonato dominante é essencialmente composto por sódio. No presente, esse tipo de carbonatito ocorre exclusivamente como lavas no vulcão Oldoinyo Lengai, na Tanzânia.

Relativamente à presença de um constituinte com proporção modal menor que 10 % na composição de um carbonatito, pode-se qualificar a rocha (e.g. carbonatito rico em dolomita). Caso a proporção modal do carbonato seja menor que 10 % em uma litologia, pode-se qualificar a rocha (e.g. ijolito rico em calcita, peridotito rico em dolomita). Quando em proporção de 10 a 50 %, também se qualifica a rocha (e.g. ijolito calcítico, peridotito dolomítico).

Os carbonatitos, quando com granulação fina o suficiente para dificultar a classificação mineralógica, ou quando o carbonato dominante é composto por uma solução sólida complexa, podem ser classificados quimicamente conforme os exemplos a seguir:

- Para teores de SiO₂ acima de 20 % em peso, classifica-se como um silicocarbonatito.
- Para teores de SiO₂ abaixo de 20 % em peso (WOOLLEY e KEMPE, 1989), utiliza-se o diagrama de classificação química, com os campos cálcio-, magnésio- e ferro-carbonatito (Figura 2).

Figura 2. Diagrama de classificação química para carbonatitos com teor de SiO₂ < 20 % em peso. Carbonatitos com teor SiO₂ superior a 20 % em peso são silicocarbonatitos.



Fonte: Modificado de Woolley & Kempe (1989).

A classificação atual, por ter um caráter mineralógico-químico, reúne uma ampla diversidade de rochas, desde rochas plutônicas ricas em carbonato até veios calcínicos tardios formados em ambiente hidrotermal. Mitchell (2005) cita o Complexo Carbonatítico de Phalaborwa, África do Sul, em que há litologias modalmente compostas por 100 % olivina, 100 % magnetita, e apatita-calcita carbonatitos que, individualmente, são dunitos, magnetititos e apatita-carbonatitos, mas juntos compreendem um olivina-magnetita-apatita carbonatito. Portanto, o autor apresenta uma nova proposta, ainda que não definitiva, para uma classificação. Para Mitchell (2005), carbonatitos (*sensu lato*) possuem proporção modal com arbitrariamente um mínimo de 30% de carbonato ígneo, independente do conteúdo de sílica da rocha. Adjetivações em ordem crescente de proporção informam o conteúdo mineralógico essencial (e.g. flogopita dolomita carbonatito, olivina flogopita calcita carbonatito). Para rochas com conteúdo inferior a 30% de carbonato, mas pertencentes à mesma associação, segue-se a mesma lógica, porém com o

carbonato dominante aparecendo como adjetivo (e.g. calcita flogopitito, dolomita piroxenito). A partir dessa classificação mineralógico-genética, o autor concebe dois grandes grupos de carbonatitos: (i) carbonatitos *stricto sensu*, calcita e/ou dolomita carbonatitos, geneticamente relacionados a magmas compostos por significativa quantidade de componente mantélico (e.g. nefeliníticos, melilitíticos, kimberlíticos, dentre outros), e resíduos carbótermiais, derivados do fracionamento de uma ampla variedade de magmas com cristalização a menor pressão e temperatura. Estes resíduos são fluídos dominados por CO₂, quantidades expressivas de flúor, H₂O e enriquecimento em bário, estrôncio e ETR. Há, ainda, os veios e *skarns* anatéticos, formados por anatexia de rochas supracrustais, e que resultam em rochas modalmente compostas por mais de 50% de carbonatos. Para isso, o autor separa as associações de complexos carbonatíticos nos seguintes clãs:

- Clã dos nefelinitos. Representa a associação mais comum de carbonatitos, especialmente relacionados com rochas intrusivas, como a série melteigito-ijolito-urtito ou nefelina-sienitos e rochas extrusivas como nefelinitos e fonolitos. Possuem gênese em profundidades inferiores a 80 km e pressão litostática inferior a 2,7 GPa, o que caracteriza a ausência de rochas ricas em melilita, perovskita ou olivina. Os carbonatitos iniciam com composição calcítica e/ou dolomítica, e podem evoluir para membros ricos em siderita ou ankerita, com estágios carbótermiais enriquecidos em Sr, Ba e ETR.
- Clã dos melilititos. Compreende uma grande variedade de rochas ultramáficas compostas principalmente por melilita, calcita, olivina, flogopita, clinopiroxênio e perovskita. Podem ocorrer também fácies plutônicas lamprofíricas. Devido à gênese do magma ocorrer em profundidades entre 80 e 120 km, com pressão litostática entre 2,7 e 4 GPa, as rochas ricas em nefelina são muito pouco expressivas, sendo essa a principal diferença entre o clã dos melilitito e os componentes plutônicos do clã dos nefelinito. Caracteristicamente, são enriquecidas em magnetita, perovskita, apatita e flogopita, e representam as maiores fontes econômicas de Ti, Nb, Fe, ETR e fosfato.
- Clã dos kimberlitos: calcita-kimberlitos. Os carbonatos de kimberlitos comumente ocorrem como microfenocristais concentrados por fluxo magmático, e que localmente podem ser classificados como carbonatitos, mas que representam produtos de diferenciação do magma kimberlítico e não possuem relação genética com os carbonatitos associados aos clãs

nefelinítico-melilitíticos. Possuem gênese em profundidades superiores a 150 km, com pressão litostática acima de 5 GPa.

- Associação de carbonatitos-aillikitos. É composta por proporções variáveis de olivina, flogopita, calcita e dolomita, além de espinélio magnésiano, perovskita. Em mela-aillikitos podem ocorrer clinopiroxênio ou anfibólio. A ausência de feldspatóides como melilita, nefelina e leucita são critérios para diferenciá-los dos outros clãs carbonatíticos. Outra característica é a sua exposição em terrenos altamente erodidos, com nível crustal profundo exposto.
- Carbonatitos sem rochas silicáticas associadas. Cerca de 80 complexos carbonatíticos não apresentam alguma relação espacial com rochas silicáticas, excluindo os fenitos decorrentes da intrusão. Mitchell (2005) indica duas possibilidades: (i) não há exposição das rochas silicáticas mais profundas do complexo alcalino-carbonatítico, ou (ii) realmente há complexos carbonatíticos sem relação com as rochas silicáticas. Também há a possibilidade dos magmas silicáticos poderem intrudir nos mesmos condutos do carbonatito, e estarem espacialmente relacionados apesar de não terem relação genética. Nesses casos, esses corpos carbonatíticos representariam magmas primários.
- “Carbonatitos” relacionados a suites potássicas, (e.g. sienitos), saturados ou subsaturados em sílica, além da presença de barita, fluorita e carbonatos ricos em ETR. Estes carbonatitos não possuem relação genética com rochas ultramáficas pertencentes à série dos melilititos ou nefelinitos. A presença de feldspatóides como leucita, pseudoleucita e kalsilita é comum, mas também ocorre feldspato potássico. Apesar de serem referidos comumente como magmáticos, uma interpretação com base em resíduo carbotermal de um magma potássico é igualmente válida.
- “Carbonatitos” relacionados a suites sódicas, como descrito por Minakov et al. (1981) e Zaitsev et al. (1998), que demonstraram que sienitos peralcalinos sódicos, como os do Complexo Khibina, podem gerar líquidos residuais capazes de cristalizar carbonatos ricos em ETR, Na e Ca. Porém, são carbonatitos do tipo carbotermal, sem origem ígnea.

- Rochas carbonáticas ricas em ETR-F, mas sem relação com rochas alcalinas subsaturadas.
- Grupo de rochas diversas, que apresentam como similaridade um enriquecimento em Th, ETR e F, presentes em ETR-fluorcarbonatos, fluorita e outros minerais a base de flúor. Nas rochas de Rabelli-Lemhi ocorrem veios e diques de calcita e dolomita, acompanhados de barita e fluorita, em rochas metassedimentares proterozóicas.

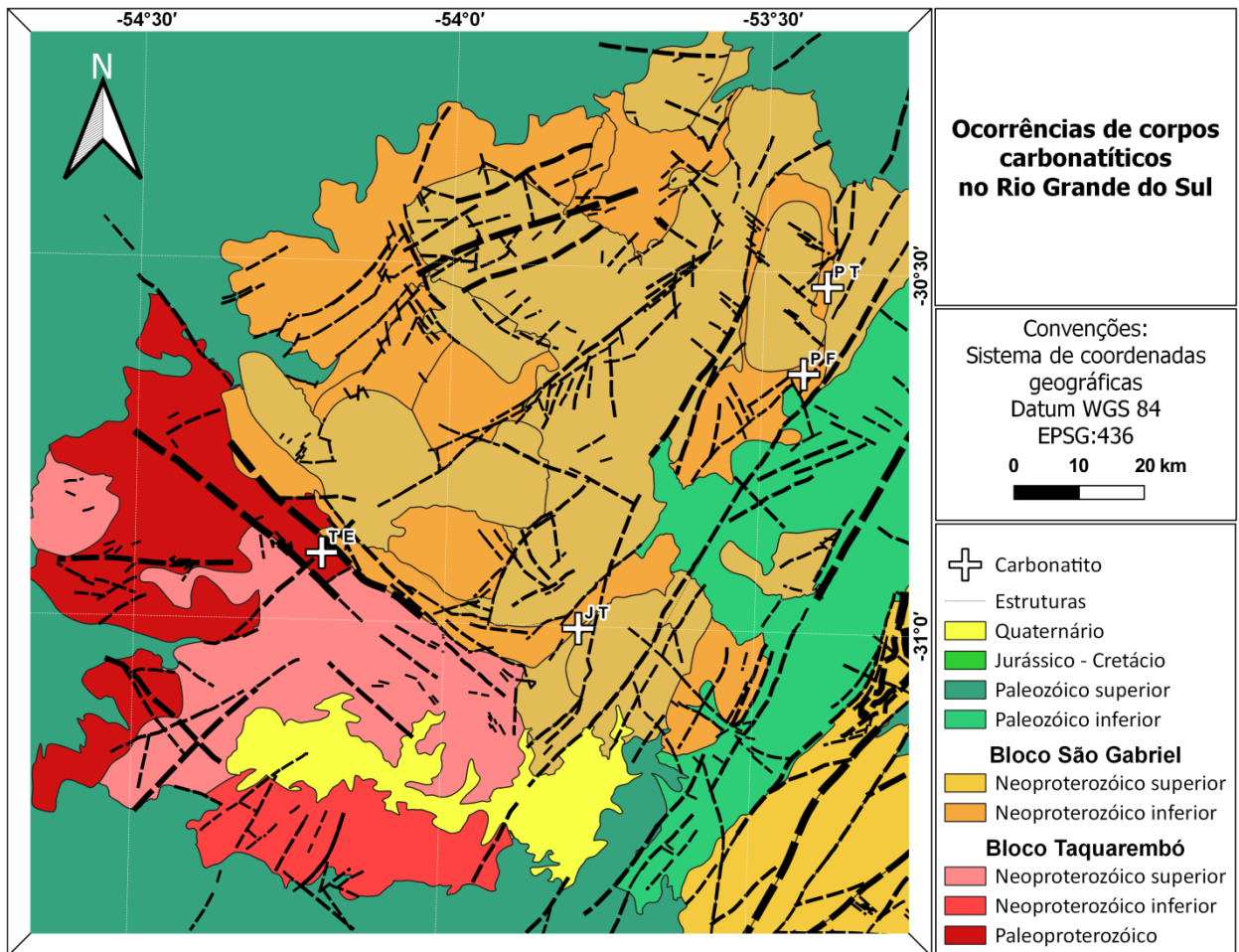
Mitchell (2005) distingue ainda os carbonatitos formados por anatexia de rochas crustais, sugerindo o termo “veio e *skarn* anatético”

Resíduos carbotermiais também podem se formar a partir do fracionamento de magmas formadores dos carbonatitos *stricto sensu*. Este autor sugere que ao menos quatro distintos carbonatitos podem ser produzidos a partir de magmas do clã nefelinítico. Analogamente, mais quatro poderiam ser produzidos a partir de magmas do clã melilitítico, somando ao menos oito variedades de carbonatito distinguíveis em um complexo carbonatítico amplamente desenvolvido.

2.4 Carbonatitos no Rio Grande do Sul

O mapa cronoestratigráfico com as ocorrências dos carbonatitos identificados no Rio Grande do Sul é apresentado na Figura 3.

Figura 3. Mapa cronoestratigráfico da área de estudo, com as ocorrências dos carbonatitos no Rio Grande do Sul. (JC) Joca Tavares, (TE) Três Estradas, (PF) Passo Feio, (PT) Picada dos Tocos.



Fonte: Do autor a partir de dados de CPRM (2013).

O carbonatito **Picada dos Tocos** apresenta uma aparente estruturação norte-sul, e forma uma série de diques paralelos à foliação regional, com mergulho variando entre 40 a 60° e sentido para 110°, formando um corpo de aproximadamente 2,2 km por 80 m de largura (ROCHA et al., 2013). Este carbonatito é composto por uma fase precoce calcítica, de cor rosa, enriquecida em sílica, e uma posterior dolomítica, de cor cinza. Com exceção do carbonato dominante, ambas as fases possuem minerais acessório similares: apatita, magnetita, ilmenita, rutilo, zircão, baddeleyita, barita, torita, pirocloro, monazita, bastnaesita e allanita. Ainda, em proporções variáveis, ocorrem pirita, calcopirita, clorita, quartzo e biotita.

O contato entre os carbonatitos ocorre de maneira complexa, variando de gradacional a abrupto. No contato basal, de caráter transicional entre o carbonatito e o anfibolito, ocorre uma camada muito rica em grossulária, que possui decréscimo em carbonato, apatita e magnetita. Este anfibolito é descrito como constituído por lentes espessas intercaladas com as bandas de carbonatito, e que possuem biotita, actinolita, hornblenda e cummingtonita, além de proporções variáveis da matriz, composta por calcita, magnetita, ilmenita, rutilo, apatita, pirita e resquílios de diopsídio. O enriquecimento da matriz do anfibolito em carbonato, apatita e magnetita é atribuído à intrusão do carbonatito. Esta rocha possui uma trama milonítica, principalmente próxima às zonas de falha, com processos metassomáticos representados por veios e *stockwork* de calcita, clorita, hematita, quartzo, pirita e calcopirita.

Apesar do contato brechado do carbonatito com as rochas sedimentares da Bacia do Camaquã, não há evidências de hidrotermalismo ou fentização resultante da intrusão carbonatítica.

O carbonatito **Passo Feio** apresenta uma estrutura controlada por falhamentos com direções nordeste e noroeste, e foliação dominante com mergulho aproximado de 30° para 315°. Sua mineralogia é composta predominantemente por calcita com granulação fina, apatita, ilmenita e magnetita, além de tremolita subordinada. Há também a presença abundante da rocha encaixante, classificada como titanita-hornblenda granofels, que é homogênea, e possui coloração esverdeada, com textura fanerítica média a grossa, por vezes com porfiroblastos centimétricos de hornblenda e titanita. Cerva-Alves (2017) também relata a ocorrência de grossulária e albita, resultantes de processos de fenitização, ainda que localizada. Apesar da escassez de afloramentos, os resultados aerogeofísicos indicam a presença de um corpo em subsuperfície intercalado com a rocha encaixante.

Ambos os carbonatitos Passo Feio e Picada dos Tocos apresentam evidências de deformação dúctil-rúptil marcada pela textura orientada dos grãos de carbonato, apatita e biotita. A atividade hidrotermal é identificada em um reticulado de veios tipo *stockwork* ocorrem com quatro paragêneses distintas, ordenadas da mais antiga a mais recente: (i) calcita-clorita; (ii) quartzo-clorita; (iii) pirita-calcopirita pervasiva em fraturas; (iv) hematita preenchendo fraturas. Segundo a classificação não oficial de Mitchell (2005), devido à presença expressiva de Nb, Ti e P, aliada às

baixas concentrações de ETR, Sr e Ba, este carbonatito pertence ao clã dos melilitos, apesar da não exposição das rochas silicáticas associadas. Através de relações de campo, foi possível verificar que o sistema carbonatítico é mais antigo que o Granito Caçapava, e mais novo que a Bacia do Camaquã. Cerva-Alves (2017) relata idade de cristalização de $603 \pm 4,5$ Ma em análise U-Pb em zircão. A partir da idade de cristalização, e devido a esse evento deformacional registrado tanto na mineralogia como na trama da rocha, Cerva-Alves (2007) interpreta ambos Picada dos Tocos e Passo Feio como metacarbonatitos.

O **Carbonatito Joca Tavares**, segundo Senhorinho (2012), se trata de um corpo aparentemente maciço, com geometria anelar típica de carbonatitos do Cretáceo, que intrudem rochas sedimentares cambrianas pertencentes ao Grupo Guaritas, da Bacia do Camaquã. Segundo Dalcin, Wildner e Sander (2015), há ocorrência de magnésiocarbonatitos, rochas silicáticas subsaturadas com melilita (katungitos) e foscoritos, intercalados ao longo de poucas centenas de metros. Sua gênese compreende três eventos principais: (i) episódios vulcânicos piroclásticos, com tufos e lapili-tufos particulados com fragmentos conatos juvenis de rochas carbonatíticas; (ii) episódios vulcânicos coerentes com estrutura de fluxo e textura microporfirítica de cristais aciculares de carbonato, com apatita, ilmenita, melilita, monazita e opacos.

O **Carbonatito Três Estradas**, segundo Senhorinho (2012), apresenta uma anomalia de vegetação intensa, tanto na rocha encaixante proximal como no corpo carbonatítico. O carbonatito varia de branco a rosado e se encontra intemperizado, com grãos de carbonato corroídos. Sua ocorrência se dá na forma de veios micrométricos a poucas dezenas de centímetros, em bandas predominantemente carbonáticas, felsicas ou máficas, interdigitadas entre si. As bandas felsicas, de coloração rosa ou alaranjada, compostas por feldspato alcalino, quartzo, biotita, plagioclásio, hematita e magnetita. As bandas máficas são constituídas por biotita, anfibólio, clorita, hematita e magnetita. Martinez (2019) descreve as bandas máficas como uma associação ultramáfica alcalina composta por tremolitos, flogopititos e glimmeritos, sendo que estes ocorrem associados indistintamente, e serão referidos neste trabalho como ultramáficas.

A relação de contato entre o carbonatito e a encaixante é abrupta, enquanto com o anfibolito é gradacional e interdigitada. Segundo Anzolin (2019), a transição do carbonatito não alterado para o perfil intemperizado é abrupta, e marcada pela

dissolução da dolomita, enquanto silício, manganês, ferro, alumínio e titânio são enriquecidos.

Segundo Anzolin (2015) o carbonatito é formado por minerais com grãos finos a médios com carbonato (75% a 90%), apatita (10% a 30%), flogopita (10%), minerais opacos (<5%) e raros grãos de anfibólio. O principal carbonato presente no carbonatito não alterado é a dolomita. A apatita primária possui texturas típicas de dissolução intempérica, como bordas e arestas arredondadas, além de preenchimento de fraturas por carbonato (ANZOLIN, 2019). Há também apatitas supergênicas, na forma de crescimento epitaxial e cristais micrométricos e fibrosos preenchendo as cavidades do alterito e em vênulos. Anzolin (2015) ainda relata teores de sódio e potássio abaixo do limite de detecção das análises realizadas com fluorescência de raios X.

Anzolin (2019) relata a presença de quatro tipos de apatita, nomeadas conforme sua ordem de cristalização, sendo que duas possuem origem metamórfica ou ígnea, e duas supergênicas. A apatita do tipo 1 ocorre como cristais equigranulares, com forma subédrica a anédrica, de até 1 mm, e fraturas preenchidas por carbonato. Quimicamente é classificada como flúor-hidroxiapatita, e possui substituição do cálcio por sódio, cério e estrôncio. A apatita do tipo 2 representa a alteração intempérica inicial, com bordas arredondadas. Também é classificada como um flúor-hidroxiapatita, enriquecida em cério e empobrecida em estrôncio, e ocorrendo a substituição do flúor por hidroxila. A desestabilização das apatitas primárias resulta na cristalização das apatitas supergênicas do tipo 3 e 4, que não serão aqui abordadas.

Segundo Senhorinho (2012), o CTE está localizado entre duas estruturas de grande porte, a falha Suspiro-Linhares e a falha Cerro dos Cabritos. Morfologicamente, este autor o define como do tipo linear, devido intensidade e frequência da foliação, disposição dos pontos de ocorrência, e pelos padrões irregulares da anomalia de vegetação, visíveis em aerofotografias e imagens de satélites. Para este autor, há duas possibilidades para sua gênese: (i) síncrono ao evento deformacional da encaixante paleoproterozóica, em que o corpo carbonatítico anteriormente circular é deformado; ou (ii) intrusão posterior aproveitando estruturas profundas que estruturam o embasamento, adquirindo a morfologia linear, gerando um bandamento por fluxo magmático e cisalhamento devido à falha reativada. Para Anzolin (2015), a presença de foliação e outras

estruturas deformacionais indicam influência metamorfismo, estando o CTE intercalado com anfibolitos e metagranitóides.

2.5 Geoquímica do Urânio e Tório

Os elementos químicos tório ($Z = 90$ e carga +4) e o urânio ($Z = 92$ e carga variável de +4 ou +6) pertencem à série dos actínidos, e apresentam comportamento geoquímico muito semelhante quando assumem o valor de carga +4 e, por isso, tendem a ocorrer em solução sólida nos minerais que os comportam contêm (KRAUSKOPF, 1967). Estes minerais são principalmente acessórios dos estágios finais de cristalização. Devido às suas relações de carga e raio atômico são denominados elementos incompatíveis, e continuamente são transferidos à crosta continental. A concentração média de Th na crosta superior é de 10,5 ppm (Rudnick & Gao, 2003), enquanto que a do U é de 3 ppm (CLARKE et al., 1966), sendo que em granitos e riolitos essa concentração média é elevada para 15 e 4,5 ppm, respectivamente. (CUNEY e KYSER, 2015). O tório em sistemas naturais, é transportado em complexos de sulfatos, fluoretos, fósforo e hidróxidos. O comportamento geoquímico do urânio depende da valência na qual ocorre (+4 ou +6). Quando +4, típico de magmas com menor fugacidade de oxigênio, apresenta baixa solubilidade, enquanto a espécie oxidada possui maior solubilidade em líquidos silicatados, e é transportado na forma de complexos com carbonato, sulfato, fosfato ou fluoreto. Em magmas com baixa polimerização, como é o caso dos magmas carbonatíticos, a solubilidade do Th e do U, bem como outros HFSE, são elevadas (CUNEY, 2010).

Os carbonatitos comumente contêm algumas dezenas de ppm de tório, porém em casos excepcionais como a Província de Gardar, na Groelândia, os carbonatitos podem conter até 843 ppm (UPTON e EMELEUS, 1987), o que confere à essa província 31% dos recursos globais deste elemento. Quanto à ampla distribuição mineralógica, os minerais comuns que contêm tório e urânio são pirocloro, monazita, apatita, perovskita, titanita, zircão e baddeleyita e, em casos menos frequentes, torianita, torita, betafita, cerita, bastnaesita, xenotima, allanita, aeschynita, torogumita e brookita.

Os depósitos associados à carbonatitos podem ser magmáticos, magmático-hidrotermais, ou por enriquecimento supergênico.

Em carbonatitos do tipo linear, devido a processos orogênicos, o enriquecimento em tório e urânio pode ocorrer tanto por processos supergênicos, em que se concentra devido à dissolução de minerais de menor estabilidade em condições intempéricas, como por magmático-hidrotermais, em que fluidos hidrotermais de alta temperatura podem formar depósitos do tipo “veios de uranotorita”, os quais ocorrem em níveis crustais rasos, em zonas de cisalhamento, falhas, fraturas, zonas de brecha e diatremas. Quanto ao urânio, o único caso de produção de U a partir de carbonatito é o de Phalabwora (África do Sul), onde é um subproduto da produção de cobre. Neste carbonatito seu teor médio é de 25 ppm, e está contido principalmente na uranotorianita e, em teores menores, na baddeleyita e thucholita (CUNEY e KYSER, 2015).

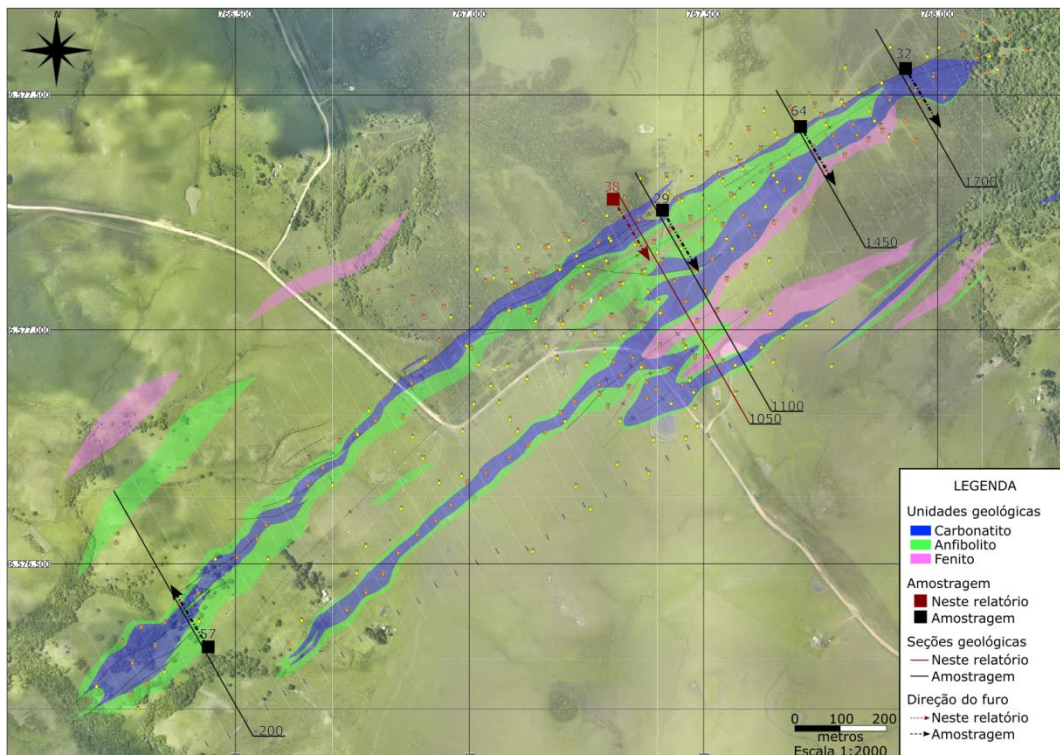
3. METODOLOGIA

3.1 Etapa Pré-campo

A etapa inicial consistiu na revisão de descrições dos testemunhos de sondagem da empresa e, com espectrorradiometria tanto de campo como de amostras, foi detalhada a distribuição espacial e a concentração, ainda que qualitativa, de tório e urânio no carbonatito e sua homogeneidade. A amostragem considerou a disposição espacial do corpo carbonatítico, a fim de reconhecer a heterogeneidade existente nas porções sudoeste, média e nordeste do corpo, e contou com seis testemunhos de sondagem. Durante esta fase foram estudados os relatórios e publicações sobre o carbonatito Três Estradas, bem como o de outros carbonatitos do Rio Grande do Sul. Com base no conhecimento bibliográfico, foi realizada uma visita à área do carbonatito (em 12/11/2018), que foi guiada pelos geólogos da Água Resources Limited, ocasião em que foram examinados afloramentos, trincheiras, e observados alguns locais de sondagens e malhas de amostragem para geoquímica de solo. Nesta etapa, procedeu-se ao estudo (i) das descrições litológicas realizada pela empresa das sondagens, (ii) de todos os dados geoquímicos das sondagens e de todas as sessões geológicas elaboradas pelos geólogos da empresa. Observa-se que no mapa geológico do carbonatito Três

Estradas (Figura 4) constam os seis testemunhos amostrados. A estrutura do carbonatito foi interpretada pelos geólogos da empresa como ligada a dobramentos, e está esquematizada na Figura 5.

Figura 4. Esboço geológico do CTE, com as sondagens e seções geológicas utilizadas neste trabalho.

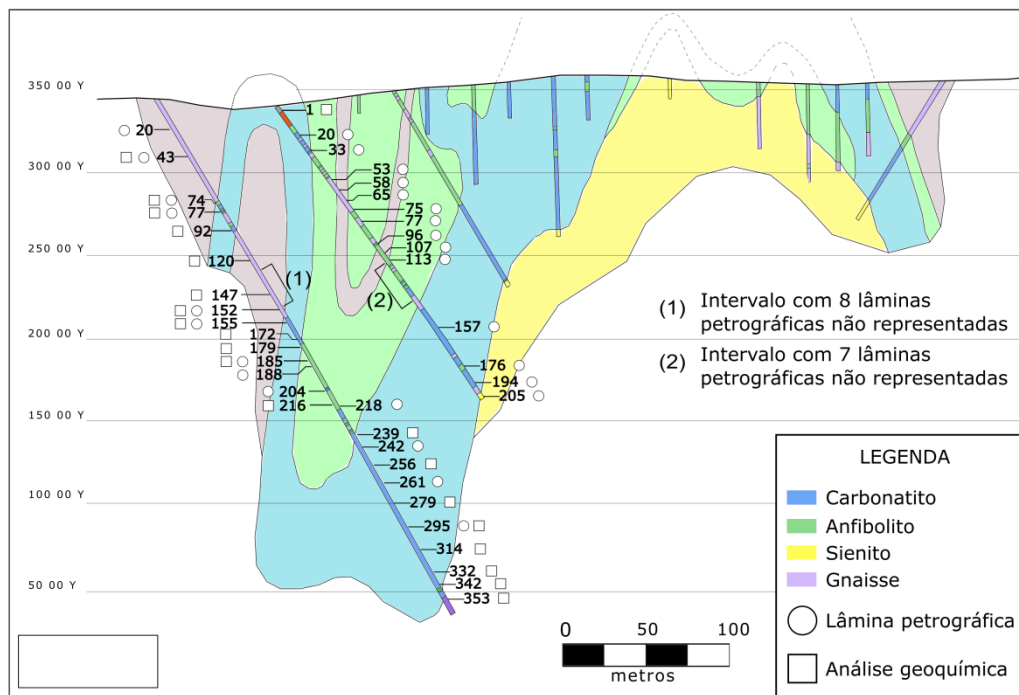


Fonte: adaptado de documentos da Água Resources Limited.

A partir da bibliografia consultada, são descritas quatro litologias que compõem o corpo carbonatítico, sendo elas: (i) carbonatito; (ii) anfibolito; (iii) sienito; (iv) saprolito mineralizado. A rocha encaixante do carbonatito é um paragnaisse de alto grau, composição quartzofeldspática e textura granoblástica poligonal, e hornblenda como mineral acessório.

Para o estudo detalhado destas unidades, foram amostrados segmentos de 30 a 50 cm de testemunhos representativos no intervalo de 20 m, assim como anomalias pontuais. Estas amostras foram utilizadas para análise geoquímica, estudos petrográficos e mineralógicos utilizando diferentes técnicas, que serão apresentadas posteriormente.

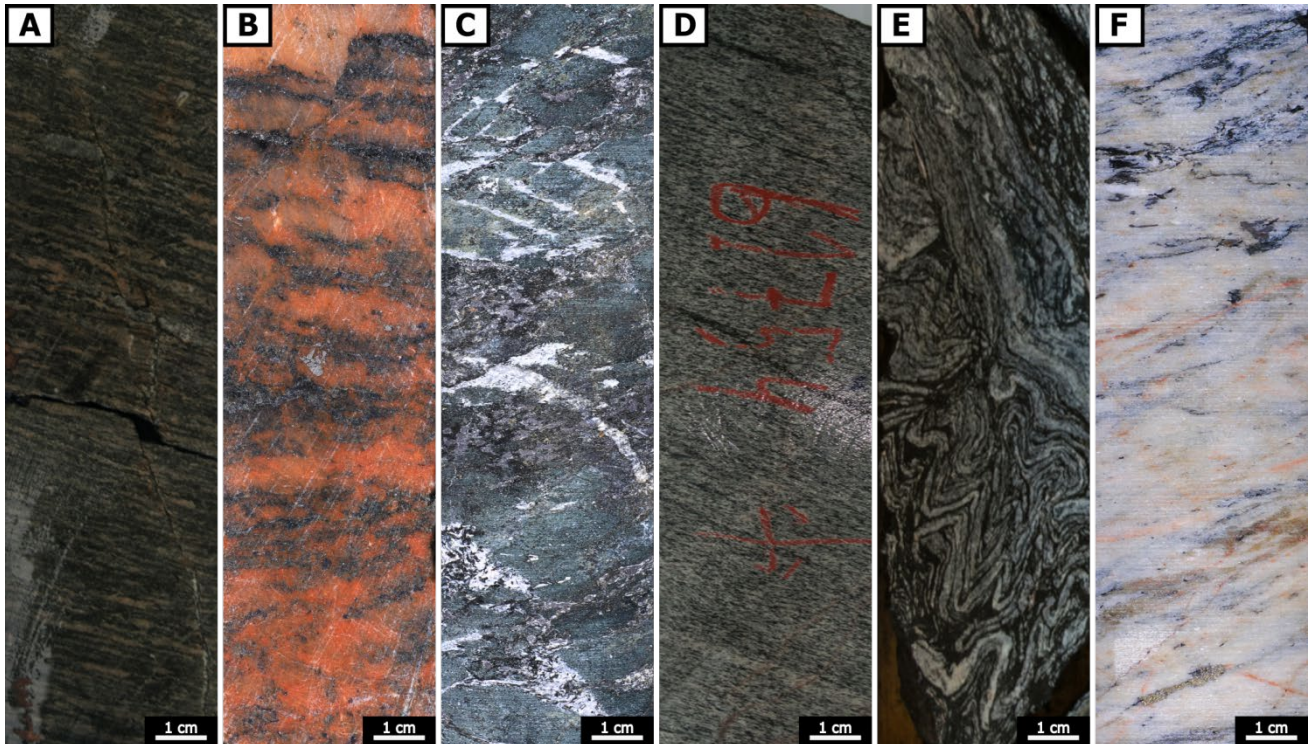
Figura 5. Distribuição da amostragem executada para este trabalho, em seção geológica.



Fonte: Modificado de Água Resources Limited.

Todas as amostras foram fotografadas individualmente e nas caixas de testemunhos, a fim de evidenciar a representatividade do segmento amostrado. A Figura 6 ilustra as amostras referentes a cada tipo litológico descrito pela empresa.

Figura 6. Fotografias de testemunhos de sondagem, representativas de cada litologia da área de estudo. **A)** Gnaiss com fenitização incipiente. **B)** Gnaiss com fenitização intensa. **C)** Ultramáfica com carbonatação incipiente. **D)** Assimilação e mistura entre carbonatito e ultramáfica. **E)** Foliação de fluxo com dobramento, com carbonatito e ultramáfica. **F)** Carbonatito homogêneo.



Fonte: Do autor.

3.2 Etapas de campo

Como método complementar, ao longo das etapas de avaliação dos testemunhos e de moagem no moinho de bolas, foi utilizado o Personal Dosimeter Polimaster modelo PM 1621M. Este dosímetro serve para determinar a radioatividade emitida pela rocha. Os valores foram obtidos conforme descrição do fabricante, com ângulo de incidência ortogonal entre a amostra e o detector e distância de 5 a 10 cm, não sendo detectada radiação acima do *background*. Comparativamente, foram utilizadas amostras do albita granito da mina Pitinga (AM), nas quais o equipamento detectou radiação nas mais diversas intensidades, conforme as variações de fácies desta rocha.

Os dosímetros registram dados de radioatividade a partir da ionização de elementos do detector por energia proveniente de decaimentos de elementos radioativos do ambiente. A quantificação é feita a partir de uma calibração criteriosa

dos fabricantes, com base em padrões que se encontram inseridos no equipamento. Nas análises realizadas foi considerado somente uma análise qualitativa binária, caso houvessem anomalias. A Figura 7 ilustra o equipamento utilizado.

Figura 7. Dosímetro Polimaster PM 1621M.



Fonte: Modificado do site do fabricante: en.polimaster.com

3.3 Preparação de Lâminas Delgadas

Setenta amostras foram encaminhadas ao laboratório de preparação de lâminas petrográficas no Instituto de Geociências da UFRGS. O processo de laminação foi descrito por Gamalho (2018, p. 46), e será aqui reproduzido:

“Primeiramente, a amostra é serrada para que se possa demarcar a superfície a ser laminada; após a amostra é novamente serrada obtendo um pequeno bloco cuja superfície é a área demarcada. O bloco passa pela politriz da marca Montasupal onde é polido, utilizando, em ordem, carbetos de silício 320 mesh e carbetos de silício 1000 mesh. O último polimento do bloco é realizado em uma lixa de polimento de 4000 mesh. A superfície fosca de vidro, onde vai ser colado o bloco serrado, deve ser polida, utilizando lixa de 320 mesh seguida por outra de 600 mesh. Após essa etapa, o bloco e o vidro são lavados com água e com álcool para a retirada dos resíduos abrasivos, estando eles prontos para serem colados. A cola utilizada é uma mistura com proporção 1:5 de catalisador aradur hy 951 com a resina araldite gy 279. O material é posto na estufa, por cerca de quatro horas. Utiliza-se a serra 04 do laboratório para separar o bloquinho da lâmina e, posteriormente, a serra diamantada 03 para fazer um desbaste de modo a restar 1 mm de lâmina de rocha colada no vidro. O desbaste da lâmina com espessura de 1 mm para 0,5 mm é realizado no Discoplan-TS, da marca STreurs. Para alcançar a espessura ideal da lâmina delgada (0,003mm), é necessário, ainda, um último polimento da lâmina, utilizando quatro lixas de polimento de 320, 600, 1500 e 4000 mesh.”

3.4 Geoquímica de Rocha Total

Sessenta e duas amostras foram selecionadas para análise geoquímica de rocha total, incluindo todas as litologias descritas e os produtos de ensaios de beneficiamento cedidos pela empresa, como o rejeito, concentrados do minério saprolítico e o carbonatito. As amostras foram britadas no Instituto de Geociências da UFRGS, em um britador de mandíbulas, com cuidados de limpeza entre cada amostra para evitar contaminação. Posteriormente, foram encaminhadas à empresa ALS Brazil Limited, em Goiânia, em dois momentos distintos, dezembro de 2018 e junho de 2019. Para a caracterização química, a empresa dispõe de vários procedimentos analíticos, dentre os quais foram utilizados: (i) espectroscopia de massa (ICP-MS); (ii) termogravimetria; (iii) coulometria; e (iv) espectrometria de emissão atômica (ICP-AES). Os limites de detecção fornecidos pela empresa estão listados no Quadro 1.

Quadro 1. Limites de detecção para as análises de cada elemento ou óxido.

Código	Analitos e limites de detecção (ppm)							
ME-ICP06	SiO ₂	0.01-100%	MgO	0.01-100%	TiO ₂	0.01-100%	BaO	0.01-100%
	Al ₂ O ₃	0.01-100%	Na ₂ O	0.01-100%	MnO	0.01-100%	LOI	0.01-100%
	Fe ₂ O ₃	0.01-100%	K ₂ O	0.01-100%	P ₂ O ₅	0.01-100%		
	CaO	0.01-100%	Cr ₂ O ₃	0.002-100%	SrO	0.01-100%		
ME-IR08	C	0.01-50%	S	0.01-50%				
ME-MS81™	Ba	0.5-10,000	Gd	0.05-1,000	Sm	0.03-1,000	W	1-10,000
	Ce	0.1-10,000	Hf	0.2-10,000	Sn	1-10,000	Y	0.1-10,000
	Cr	10-10,000	Ho	0.01-10,000	Sr	0.1-10,000	Yb	0.03-1,000
	Cs	0.01-10,000	La	0.1-10,000	Ta	0.1-2,500	Zr	2-10,000
	Dy	0.05-1,000	Lu	0.01-1,000	Tb	0.01-1,000		
	Er	0.03-1,000	Nb	0.2-2,500	Th	0.05-1,000		
	Eu	0.03-1,000	Nd	0.1-10,000	Tm	0.01-1,000		
	Ga	0.1-1,000	Pr	0.03-1,000	U	0.05-1,000		
ME-MS42™*	Ge	5-1,000	Rb	0.2-10,000	V	5-10,000		
	As	0.1-250	In	0.005-250	Se	0.2-250		
	Bi	0.01-250	Re	0.001-250	Te	0.01-250		
ME-4ACD81	Hg	0.005-25	Sb	0.05-250	Tl	0.2-250		
	Ag	0.5-100	Cu	1-10,000	Ni	1-10,000	Zn	2-10,000
	Cd	0.5-1,000	Li	10-10,000	Pb	2-10,000		
ME-MS61™	Co	1-10,000	Mo	1-10,000	Sc	1-10,000		
	Ag	0.01-100	Cu	0.2-10,000	Ni	0.2-10,000	Zn	2-10,000
	Cd	0.02-1,000	Li	0.2-10,000	Pb	0.5-10,000		
ME-MS61L™	Co	0.1-10,000	Mo	0.05-10,000	Sc	0.1-10,000		
	Ag	0.002-100	Cu	0.02-10,000	Ni	0.08-10,000	Zn	0.2-10,000
	Cd	0.005-1,000	Li	0.2-10,000	Pb	0.01-10,000		
	Co	0.005-10,000	Mo	0.02-10,000	Sc	0.01-10,000		

Fonte: Limites de detecção para as análises empregadas neste trabalho, retirado do catálogo da ALS Limited.

3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura

Na microscopia eletrônica de varredura uma amostra é irradiada com um feixe focalizado de elétrons, com energia normalmente de 15 keV para aquisição de imagens e microanálises qualitativas. A imagem é obtida a partir da focalização do feixe, com um pixel de dezenas de μm , sequencialmente por toda a superfície da amostra, e se obtém a intensidade do respectivo sinal, transformando-o em um tom de cinza que atribui tons brancos a sinais intensos e tons escuros para sinais fracos. Um ponto importante da análise é operar com um vácuo da ordem de 10^{-6} Pa. A partir da interação do feixe com a amostra são gerados espalhamentos dos elétrons, caracterizados como elétrons secundários, retroespalhados ou raios X

característicos, dependendo da energia detectada, e que possuem distintas aplicações, explicadas a seguir.

1. Elétrons secundários

Elétrons detectados a partir do espalhamento na superfície da amostra, com pouca penetração e energias abaixo de 20 eV. A partir desses elétrons pode-se obter uma imagem de elétrons secundários (SEI), e são mais bem utilizados para informações a respeito da topografia da amostra.

2. Elétrons retroespalhados

Possuem energias muito mais altas que os secundários, e são comumente utilizados para a imagem de elétrons retroespalhados (BEI), onde os tons de cinza refletem a composição da amostra, apesar de também apresentarem um contraste topográfico. Quando não se deseja o contraste topográfico são utilizadas amostras polidas, e o contraste da imagem adquirida fornece informações sobre o número atômico dos elementos presentes naquele pixel analisado, com tons mais claros para elementos de maior número atômico.

3. Microanálise

Consiste na determinação dos elementos químicos presentes na área analisada; comumente um micrômetro na amostra. O dado obtido é um espectro, que na abscissa registra os valores de energia dos fótons e na ordenada a intensidade de contagem. Os raios X característicos gerados no volume de ionização podem, em análises por microsonda eletrônica, ser detectados por dois tipos de espectrômetros, com distintas vantagens. Um deles é denominado Energy Dispersive Spectrometer (EDS), e detecta os elementos químicos a partir da energia dos raios X característicos que chegam ao detector. Este é o principal detector dos microscópios eletrônicos de varredura (MEV). Devido à baixa resolução espectral, da ordem de 100 eV, os picos do espectro devem ser muito bem desenvolvidos para serem representativos da amostra. Observa-se que é comum a confusão entre elementos químicos com raios X característicos similares. Comumente utilizada a energia de 15 keV de aceleração, devido a utilização em uma ampla gama de elementos químicos. No outro espectrômetro, denominado Wavelength Dispersive Spectrometer (WDS), a detecção se dá por dispersão em comprimento de onda, o que confere uma resolução espectral da ordem de 10 eV, fazendo-se a distinção entre elementos que se sobrepunham nas análises por EDS no MEV. Esse

espectrômetro é utilizado em microsondas eletrônicas e, devido a uma série de fatores como a estabilidade elétrica do sinal e à qualidade dos espectrômetros, permite a quantificação de elementos com até poucos ppm de concentração.

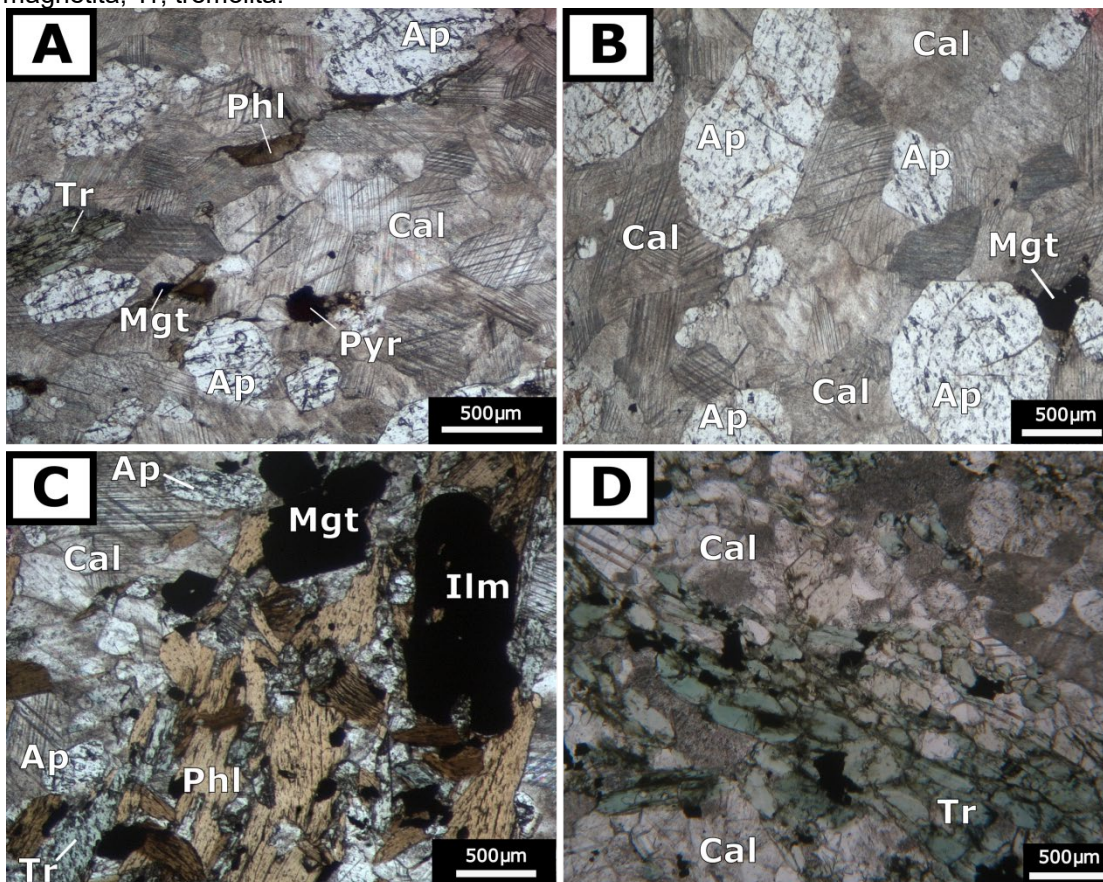
4. RESULTADOS

4.1 Petrografia

4.1.1 Carbonatito Três Estradas

O Carbonatito Três Estradas possui um aspecto bandado, cujas bandas possuem coloração esbranquiçada pela dominância de calcita e apatita (Figura 8-A e B) e coloração cinza escura a preta pela dominância de minerais máficos, comumente flogopita e tremolita (Figura 8-C e D).

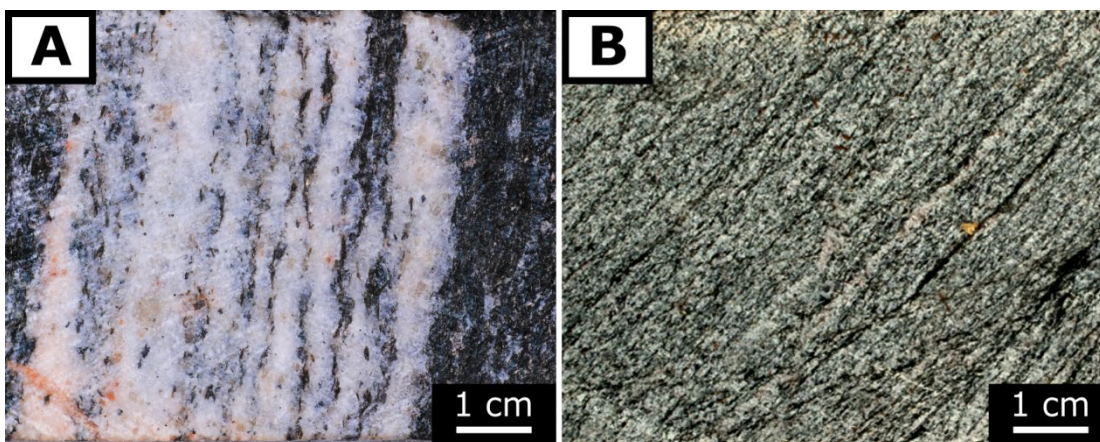
Figura 8. Fotomicrografias, em polarização paralela, de aspectos característicos do CTE. A) Aspecto padrão, com bandas descontínuas ricas em flogopita e tremolita. B) Nível rico em carbonato e apatita. C) Nível rico em flogopita. D) Nível rico em tremolita. Ap, apatita; Cal, calcita; Ilm, ilmenita; Mgt, magnetita; Tr, tremolita.



Fonte: do Autor.

O volume de minerais máficos é heterogêneo, o que confere ao CTE tonalidades cinza esbranquiçado à cinza escuro (Figura 9).

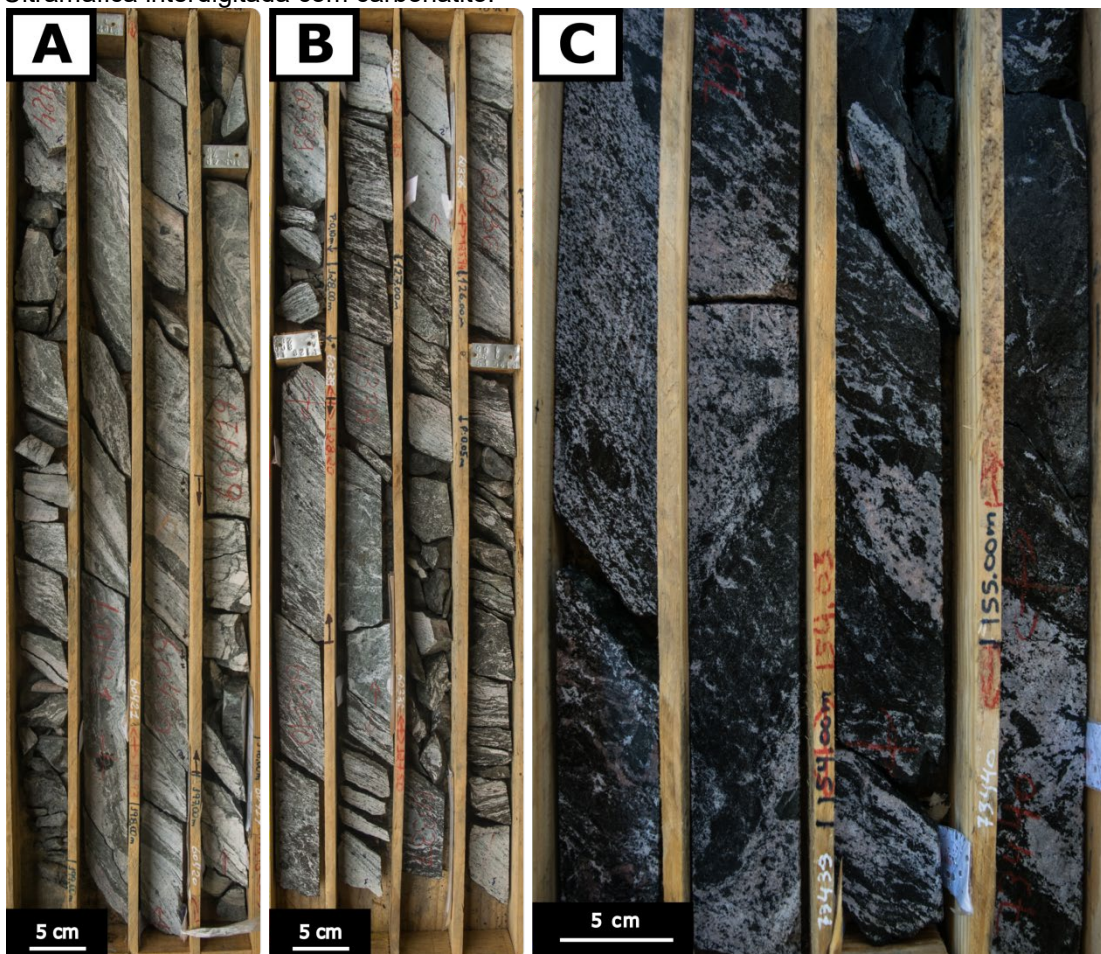
Figura 9. Fotografias de detalhe da variação composicional das bandas do CTE. A) Níveis distintos e descontínuos ricos em carbonato e flogopita, com assimilação incipiente. B) Nível heterogêneo, em que ambas as bandas ricas em carbonato e flogopita se mesclam.



Fonte: do Autor.

Ambas as bandas possuem espessura centimétrica e seu contato, por vezes difuso, torna subjetiva a distinção categórica entre as litologias quando avaliadas em escala métrica (Figura 10).

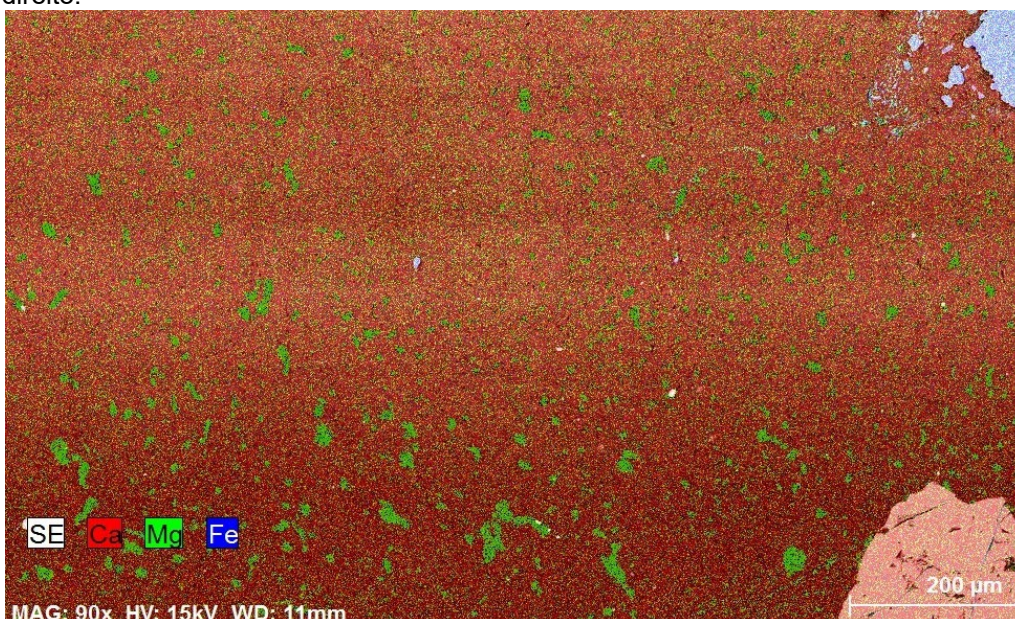
Figura 10. Fotografias de testemunhos, onde se verifica a variação composicional e a assimilação. **A)** Carbonatito branco homogêneo, com pequena quantidade de minerais máficos. **B)** Assimilação intermediária, em que o carbonatito adquire a cor cinza devido à presença de flogopita e tremolita. **C)** Ultramáfica interdigitada com carbonatito.



Fonte: do Autor.

Foi verificada no carbonatito a presença de calcita e dolomita. A calcita, que é o mineral dominante, possui granulação entre 0,5 a 1,5 mm, contatos difusos e comumente com feições de reequilíbrio como carbonatos com menor quantidade de inclusões ou diferença de densidade de maclas polissintéticas, e a extinção de alguns cristais, por vezes, é imperceptível. A dolomita ocorre associada, porém com menor expressão. A fim de identificar a relação entre os diferentes carbonatos, um mapa composicional por EDS ao MEV foi realizado (Figura 11).

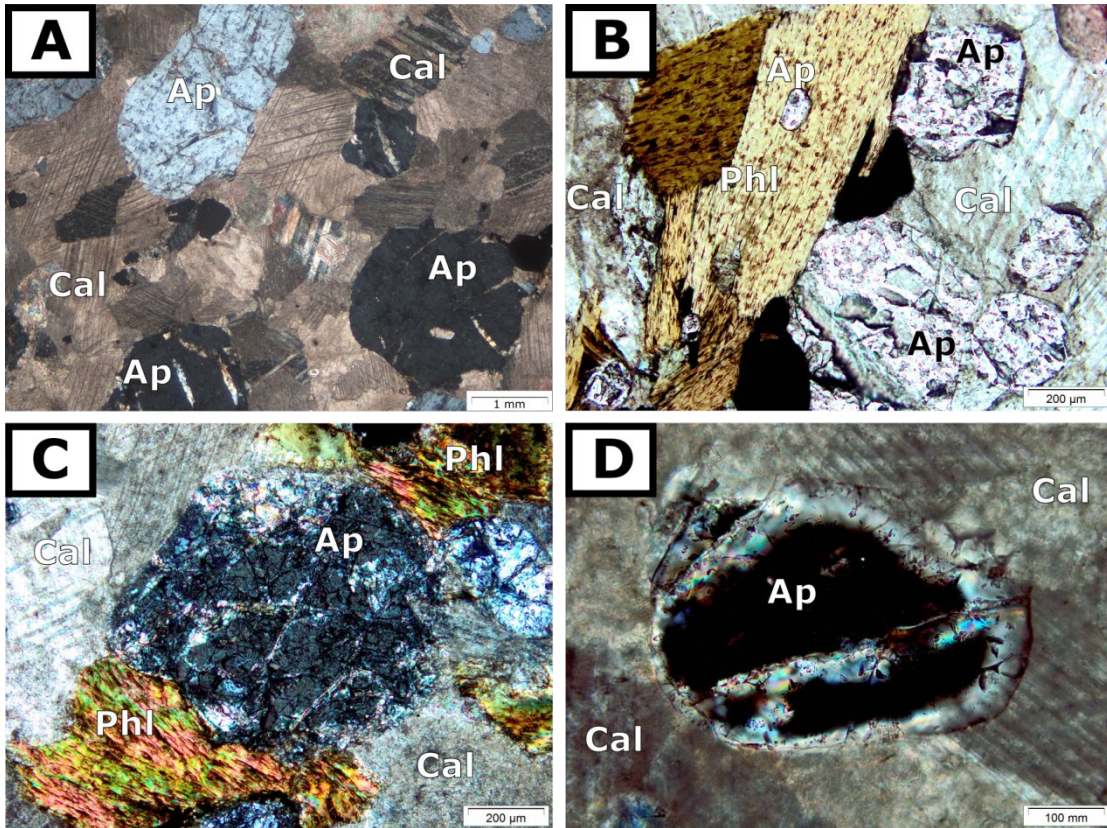
Figura 11. Mapa composicional de pseudocor ao MEV-EDS. Em verde, dolomita, e em vermelho, calcita. Apatita em tom rosado no canto inferior direito, e magnetita em tom azulado no canto superior direito.



Fonte: Do autor.

A apatita ocorre formando dois hábitos cristalinos distintos: arredondada ou com cristais alongados. A forma dominante é arredondada e típica de carbonatitos, com diâmetro variando de 0,4 a 0,6 mm, com raros grãos de até 1,5 mm, e ocorre tanto dispersa como alinhada na foliação. É comum sua dissolução e consequente substituição por carbonato, tanto intragranular (Figura 12-A e C), como nas bordas (Figura 12-D) como descrito por Anzolin (2015). A apatita também ocorre como inclusões na flogopita e, neste caso, possui hábito mais alongado, dimensões entre 0,2 a 0,3 mm (Figura 12-B), apesar de existir em menor quantidade.

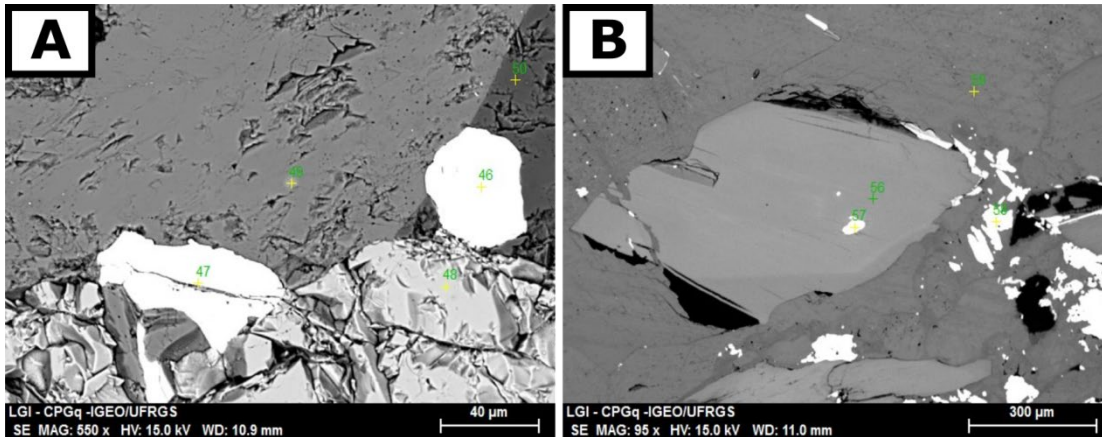
Figura 12. Fotomicrografias de aspectos texturais da apatita. **A)** Apatita equigranular do carbonatito com dissolução e substituição intragranular. **B)** Apatita alongada inclusa em flogopita. À direita, apatita equigranular do carbonatito. **C)** Dissolução intensa de apatita equigranular. **D)** Corrosão e carbonatação de borda da apatita.



Fonte: do Autor.

Destaca-se que também foi observada a formação de grãos anédricos de monazita nas bordas de grãos de apatita (Figura 13-A). A Figura 13-B ilustra um cristal subédrico de flogopita em matriz de calcita, e que possui allanita inclusa, bem como cristais de barita dispersos na calcita.

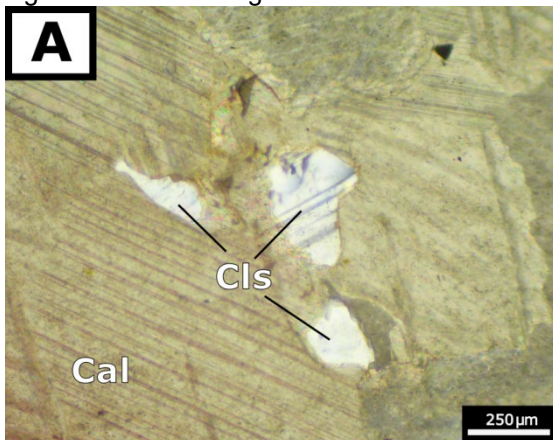
Figura 13. Imagens por elétrons retroespalhados ao MEV. **A)** Na porção superior da fotomicrografia se observa dois grãos de monazita em branco; calcita em cinza claro; dolomita em cinza escuro e, na porção inferior, apatita em cinza claro. **B)** Allanita inclusa em flogopita circundada por barita e celestita.



Fonte: do Autor.

Conforme citação anterior, também foi observada a ocorrência de barita e celestita, que possuem dimensões variadas, textura intergranular (Figura 14) em carbonato ou preenchendo porosidade intragranular em distintos minerais.

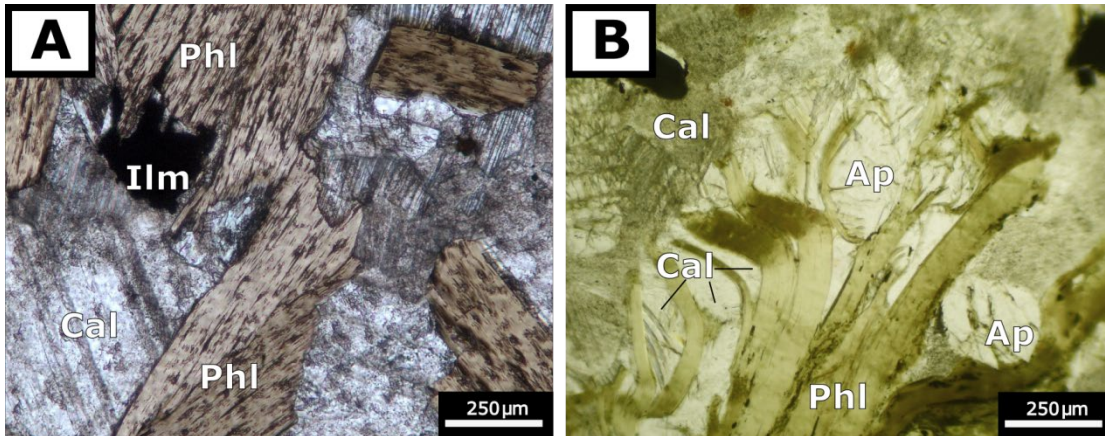
Figura 14. Fotomicrografia de celestita-barita intergranular em calcita.



Fonte: do Autor.

A flogopita possui a cor castanha escura (Figura 15-A), e ocorre preferencialmente na foliação, mas também de forma dispersa com poucos grãos alinhados, formando uma trilha descontínua com a mesma orientação da foliação. Seus cristais, com hábito placóide e dimensões de 0,1 a 1 mm, possuem inclusões de apatita alongada. Frequentemente se observa a expansão da flogopita devido ao preenchimento de suas clivagens por calcita (Figura 15-B).

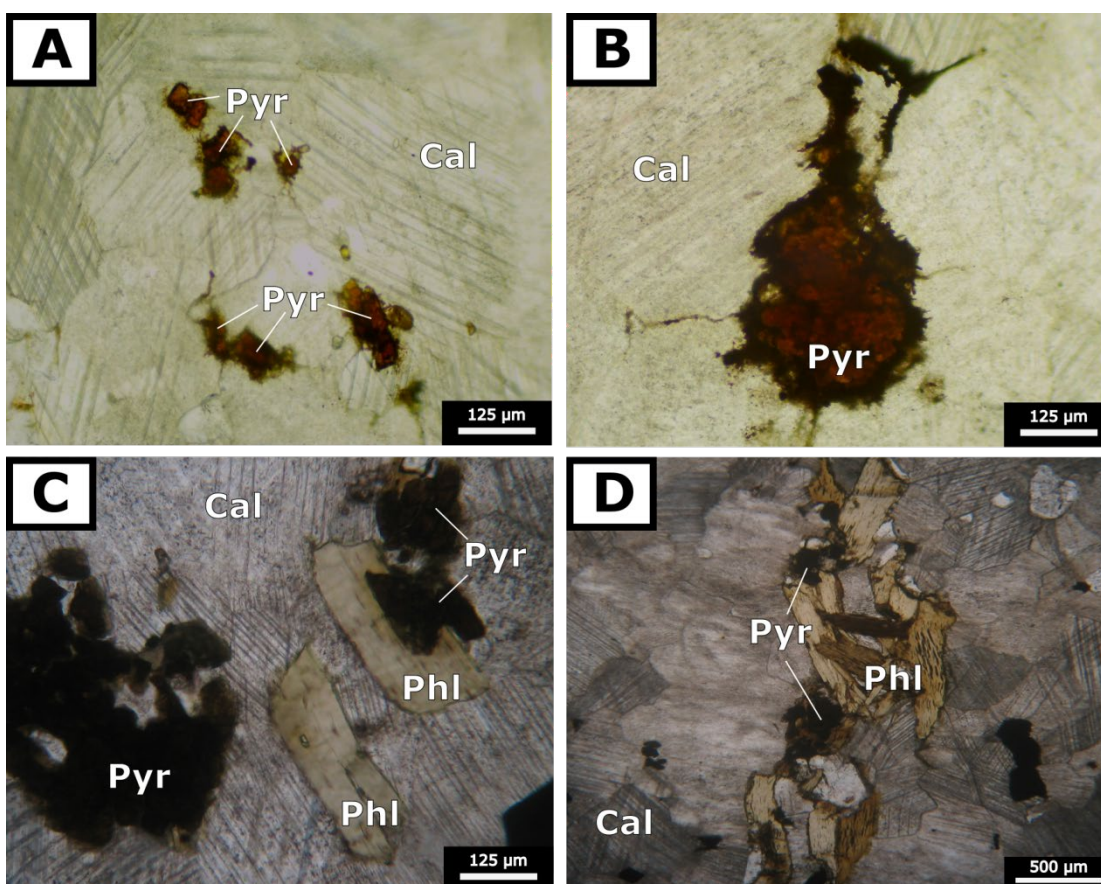
Figura 15. Fotomicrografia de aspectos texturais da flogopita em carbonatito. **A)** Flogopita com a cor castanha claro, com ilmenita associada. **B)** Expansão da flogopita por preenchimento da clivagem por calcita.



Fonte: do Autor.

Também foi registrada a presença de pirocloro no carbonatito. Os grãos observados são translúcidos, possuem a cor castanha escura avermelhada, e ocorrem tanto como cristais dispersos no carbonatito ou alinhados na foliação. Seus cristais se associam preferencialmente à pirita, ilmenita e magnetita, possuem forma anédrica e possuem dimensões de aproximadamente 0,1 mm, com uma alteração mais desenvolvida nas bordas (Figura 16). Também se observou, apesar de raríssimas vezes, a presença de grãos com até 1 mm.

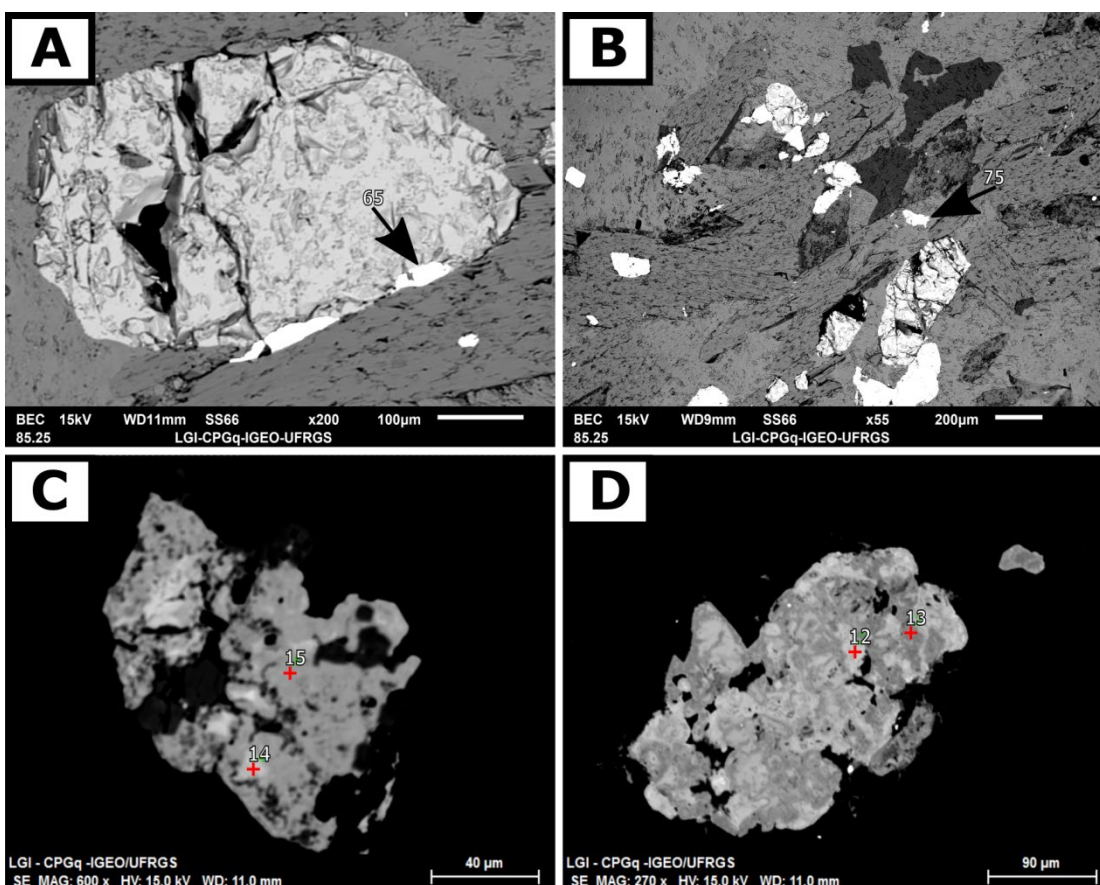
Figura 16. Fotomicrografias de pirocloro em lâmina delgada. **A)** Agregados dispersos de pirocloro, formando trilha descontínua, em calcita. **B)** Grão disperso em matriz calcítica. **C)** Agregado arredondado de pirocloro parcialmente incluso em flogopita. **D)** Grãos de pirocloro acompanhando a foliação do carbonatito.



Fonte: do Autor.

Quando observado ao MEV, o pirocloro possui uma heterogeneidade em sua composição. A Figura 17 contém duas imagens de MEV demonstrando a relação espacial entre o pirocloro e apatita (Figura 17-A) e com a foliação (Figura 17-B), bem como duas imagens de detalhe de distintos grãos (Figura 17-B e C).

Figura 17. Imagens de elétrons retroespalhados ao MEV de pirocloro. **A)** Seta indicando grão de pirocloro na borda de cristal de apatita. Seta indicando grão de pirocloro disperso em carbonato. **C) e D)** Grãos com alteração heterogênea.

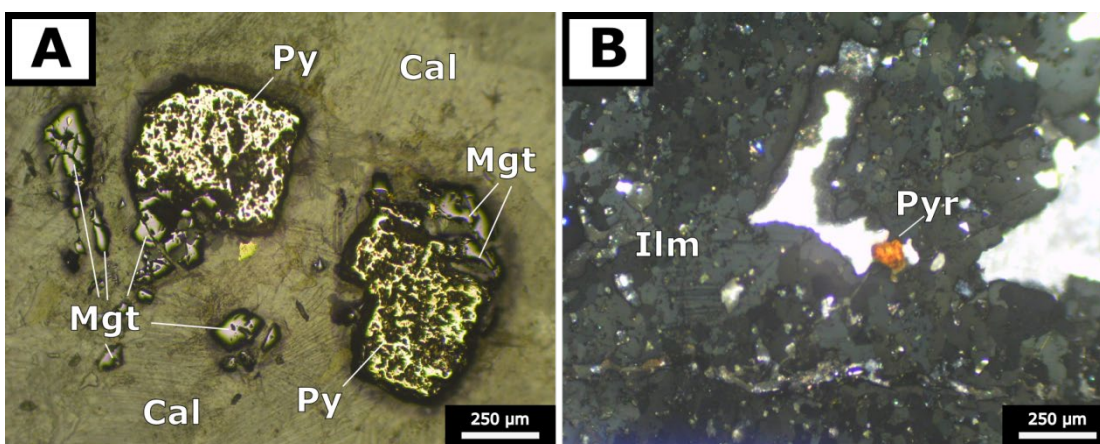


Fonte: do Autor.

A magnetita ocorre no carbonatito principalmente como agregados de pequenos cristais alotriomórficos espacialmente adjacente à pirita, por vezes substituindo-a e com textura intersticial (Figura 18-A), tanto dispersos como acompanhando a foliação da rocha. A pirita ocorre restrita à foliação e possui tamanho entre 0,2 a 0,5 mm, sendo que, em raras ocasiões, ocorre com tamanhos de até 1,5 cm (Figura 18-A). A ilmenita também está restrita à foliação; está espacialmente associada à magnetita e pirita, e possui dimensões entre 0,2 a 0,5

mm, sendo que raramente forma agregados circulares com até 2 cm de diâmetro. (Figura 18-B)

Figura 18. Fotomicrografias em luz refletida de lâmina delgada polida. **A)** Pirita precoce, com magnetita posterior, em calcita. **B)** Detalhe de um nódulo de ilmenita (~2 cm), com inclusão de pirocloro.



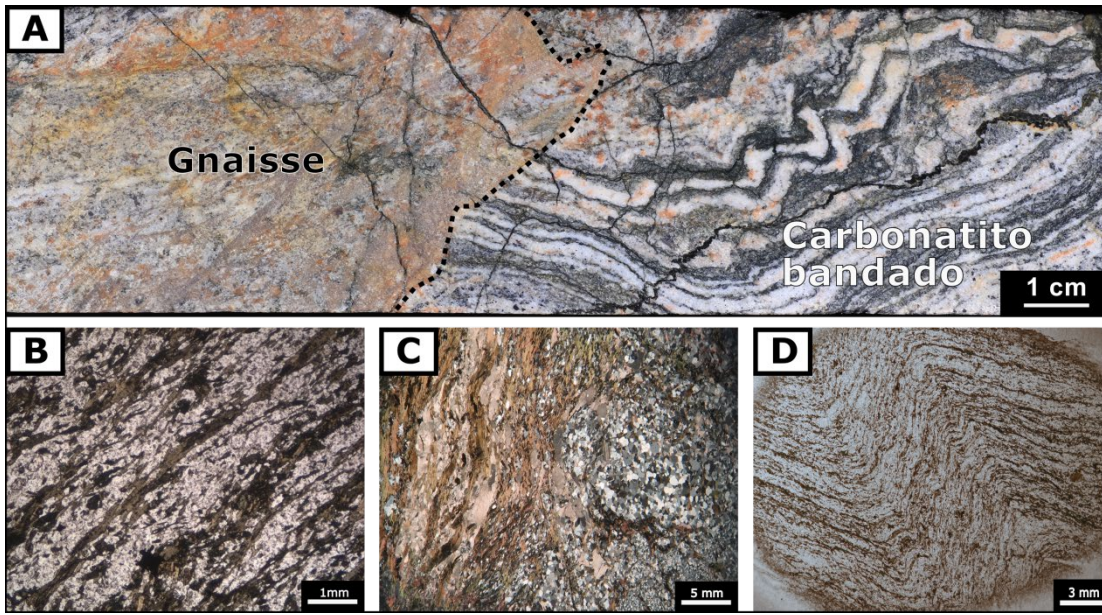
Fonte: do Autor.

4.1.2 Gnaisse

O gnaiss encaixante possui cor cinza escura, composição quartzofeldspática, com foliação bem desenvolvida, de espessura milimétrica, contínua e definida pela orientação de hornblenda e biotita. Ocorre como encaixante tanto do CTE como da associação ultramáfica, e comumente como xenólitos quartzofeldspáticos de até 40 cm e tons avermelhados. Feições de deformação rúptil e rotação são comuns (Figura 19-A e C). De composição quartzofeldspática, o gnaiss possui níveis muito finos de biotita na foliação (Figura 19-B), indícios de cisalhamento, e pequenas dobras de poucos centímetros de comprimento (Figura 19-D).

A textura granoblástica, com quartzo e feldspatos com dimensões similares, entre 0,3 e 0,5 mm e com contatos poligonais indica o alto grau metamórfico que essa rocha foi submetida. A hornblenda ocorre como porfiroblastos idiomórficos de até 0,8 mm, acompanhando a foliação, e biotita, com dimensões de 0,1 a 0,2 mm e cristais bem alongados. Ainda se observa uma mineralogia de menor temperatura, marcada por clorita, albita, epidoto e carbonato.

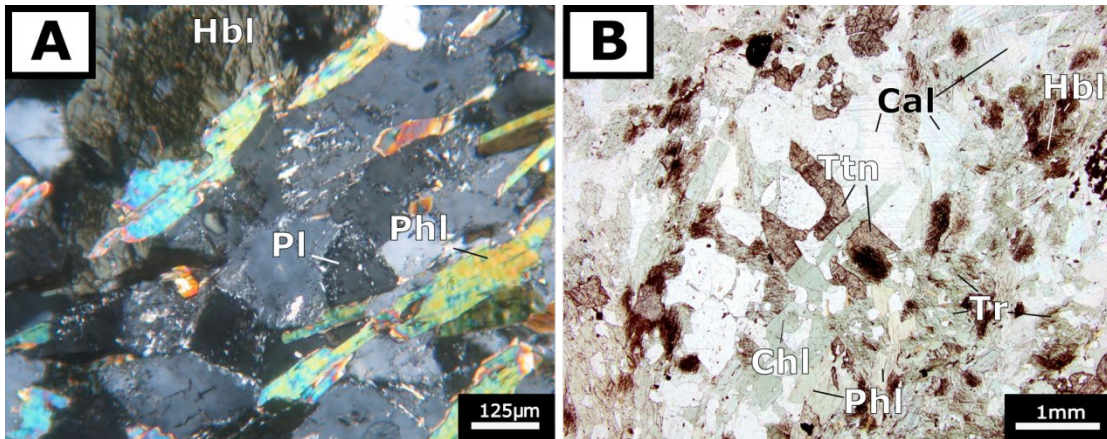
Figura 19. Aspectos texturais característicos do gnaiss encaixante. **A)** Contato entre xenólito de gnaiss no carbonatito. **B)** Detalhe da foliação marcada por biotita, em bandas máficas, e banda quartzofeldspática esbranquiçada. **C)** Xenólito de gnaiss à direita, incorporado ao carbonatito à esquerda. **D)** Dobramento típico do gnaiss.



Fonte: do Autor.

A fenitização no gnaiss se manifesta com a recristalização dos contatos dos feldspatos (Figura 20-A). A Figura 20-B ilustra a formação de titanita, calcita e clorita, que são indícios da fenitização causada pela percolação dos fluídos provenientes da intrusão do CTE.

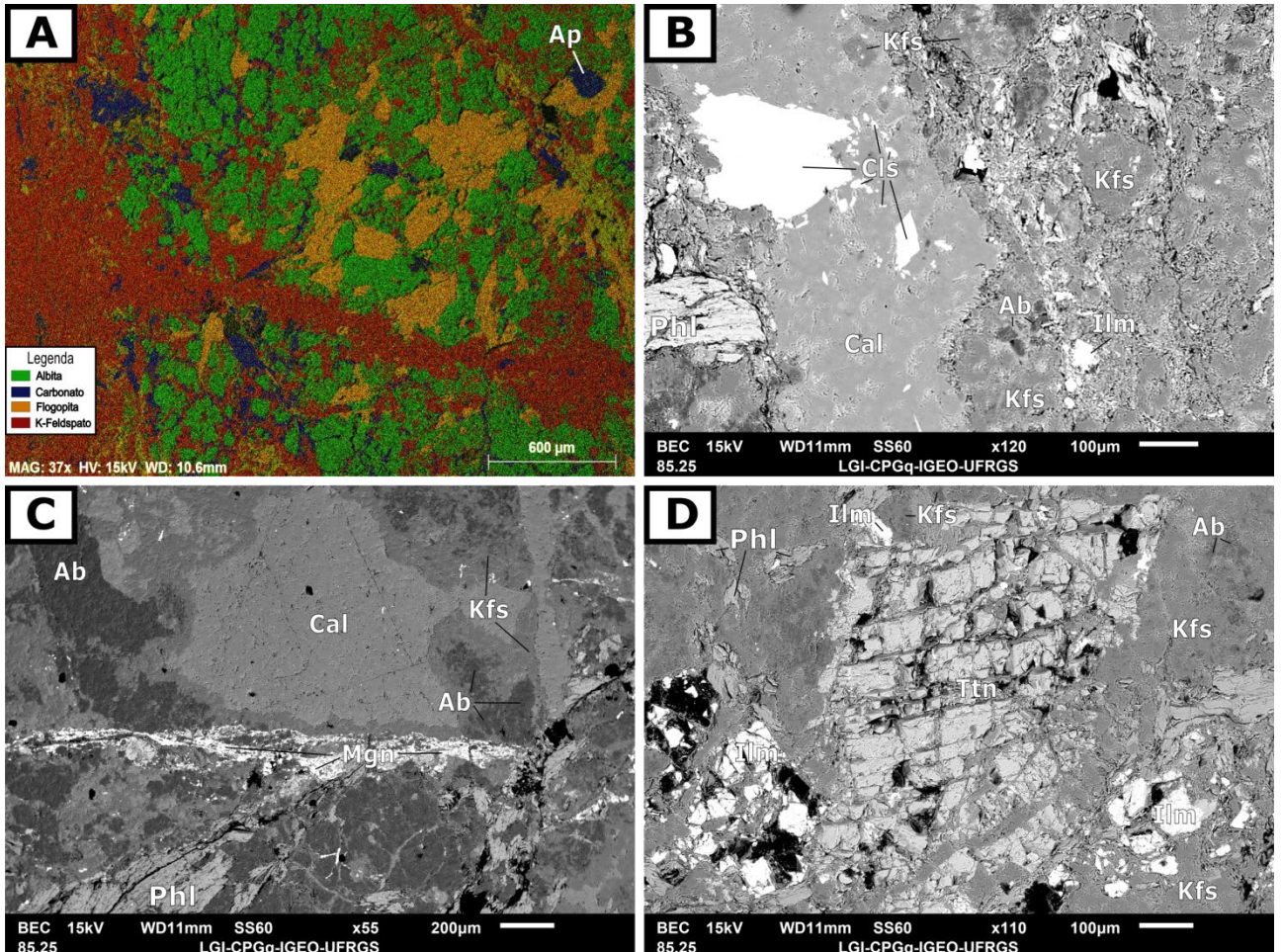
Figura 20. Fotomicrografias de lâmina delgada registrando aspectos de fenitização incipiente no gnaiss. **A)** Recristalização do plagioclásio, e formação de albita intergranular. **B)** Formação de titanita, tremolita, clorita e calcita como produtos da fenitização.



Fonte: do Autor.

Nos locais com maior intensidade, a fenitização produz um episienito, que é uma rocha avermelhada composta essencialmente por feldspatos e flogopita, com foliação de espessura milimétrica marcada pela orientação de flogopita (Figura 21-A). Ao MEV, se observa uma alteração pervasiva que promove a cristalização de feldspato potássico intersticial, com cristais fraturados de albita precoce (Figura 21-B e C). A fenitização é responsável pela coloração avermelhada da rocha, além de produzir veios posteriores de calcita, feldspato potássico e barita (Figura 21-C).

Figura 21. Imagens por elétrons retroespalhados ao MEV de aspectos da fenitização intensa no gnaíse. **A)** Imagem em pseudocolor a partir de mapa composicional por EDS. Em ordem de cristalização: Flogopita (amarelo), albita (verde), feldspato potássico (vermelho) e calcita (azul). **B)** Veio tardio preenchido por calcita e celestita-barita, à esquerda, e albita, feldspato potássico e ilmenita em fenito. **C)** Feldspato potássico tardio, em textura intergranular. Albita e calcita preoces, com borda corroída. **D)** Titanita muito fraturada, com preenchimento das fraturas por feldspato potássico.

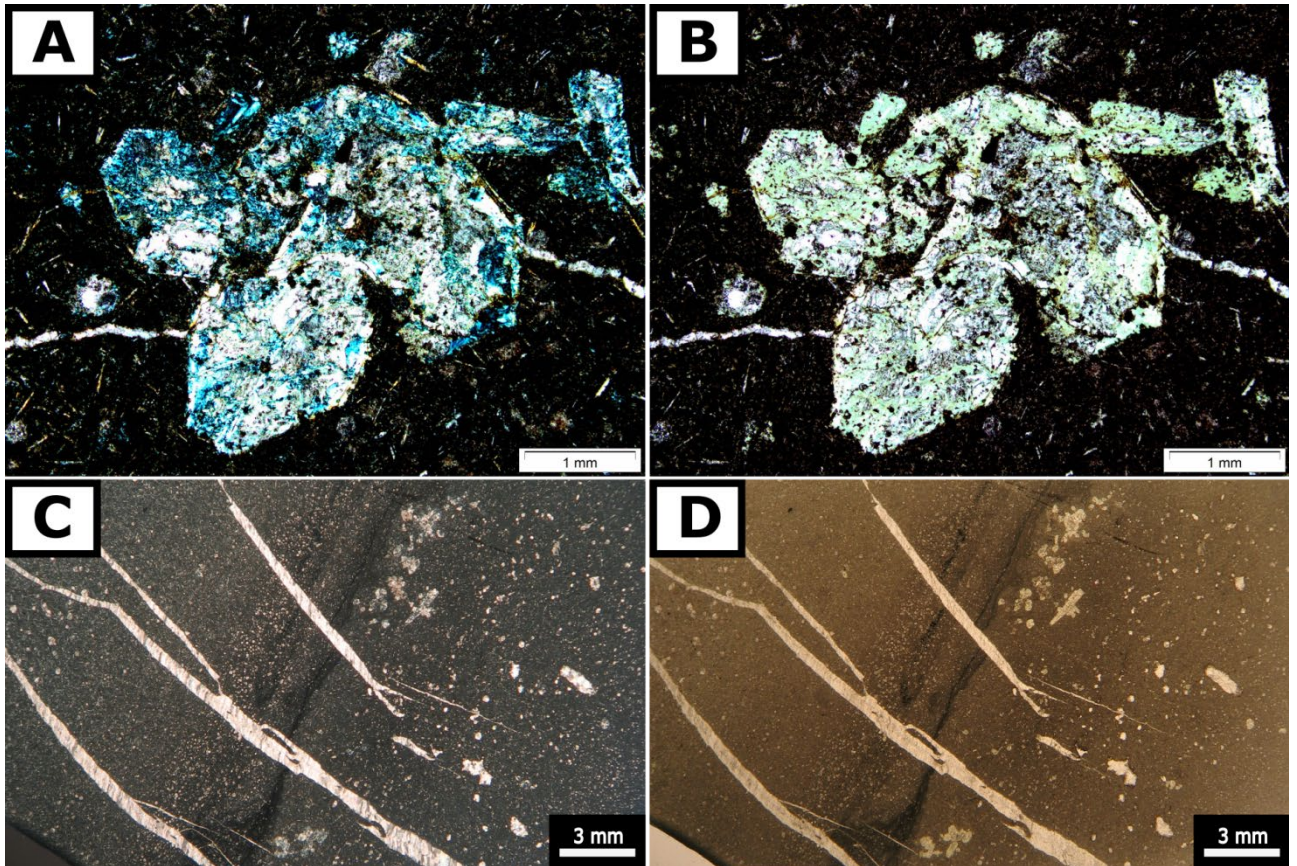


Fonte: do Autor.

4.1.3 Lamprófiro espessartítico

As rochas vulcânicas ocorrem como soleiras em diferentes profundidades. A relação entre essas rochas e o CTE não é clara devido à rara frequência em que é observada. Estes lamprófiros são compostos por fenocristais, possivelmente de hornblenda, mas que foram completamente substituídos por carbonato e clorita, e microcristais de plagioclásio em uma matriz afanítica (Figura 22-A e B). Nesta rocha também foi verificada a presença de venulações posteriores de carbonato, com direção diferente daquela existente nas demais rochas do complexo (Figura 22-C e D). Também foram observados brechas de fluxo magmático.

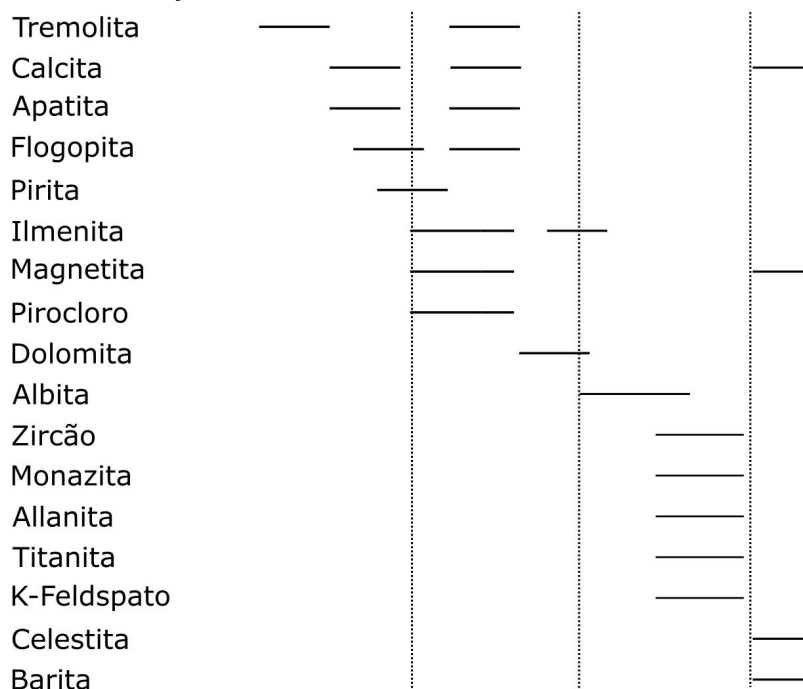
Figura 22. Fotomicrografias de lâmina delgada. **A e B)** Fotomicrografia com polarização cruzada e paralela de fenocristal de anfibólio, totalmente substituído por clorita e calcita, em matriz de plagioclásio muito fino. **C e D)** Fotomicrografia com polarização cruzada e paralela de textura de fluxo, cinza escuro, no centro da lâmina, e venulação posterior preenchida por carbonato.



Fonte: do Autor.

Uma representação esquemática da ordem de cristalização da mineralogia existente na área em estudo, com exceção do lamprófiro e do gnaiss encaixante, é apresentada a seguir (Figura 23).

Figura 23. Ordem de cristalização dos minerais observados na área de estudo.



Fonte: do Autor.

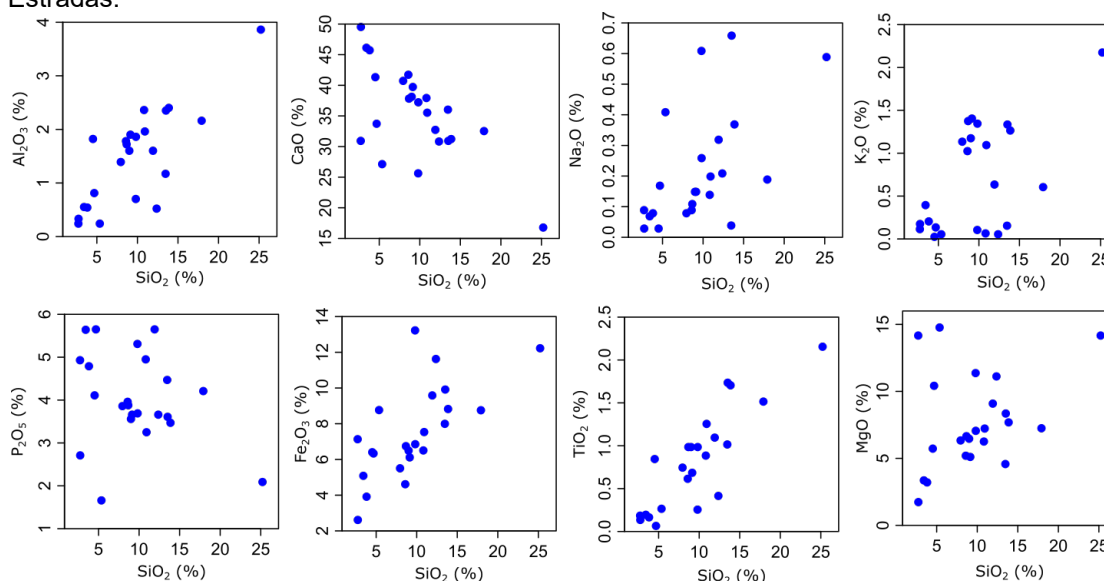
4.2 Geoquímica

4.2.1 Aspectos petrológicos

A normalização do CTE pelas médias propostas por Woolley e Kempe (1989) possibilitou verificar que este carbonatito é relativamente rico em SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , P_2O_5 e K_2O , enquanto que é relativamente empobrecido em MnO , CaO , Na_2O , BaO , SrO , Zn , Y , Nb , Th . Também se observou a concentração de ETRL e ETRP, com valores de aproximadamente metade da média (0,54 vezes) dos valores apresentados por Woolley e Kempe (1989).

Utilizando o diagrama de Harker, com o aumento de SiO_2 o CTE ocorre enriquecimento em Al_2O_3 , Na_2O , K_2O , Fe_2O_3 , TiO_2 e MgO , enquanto e redução nos teores de CaO e P_2O_5 (Figura 24).

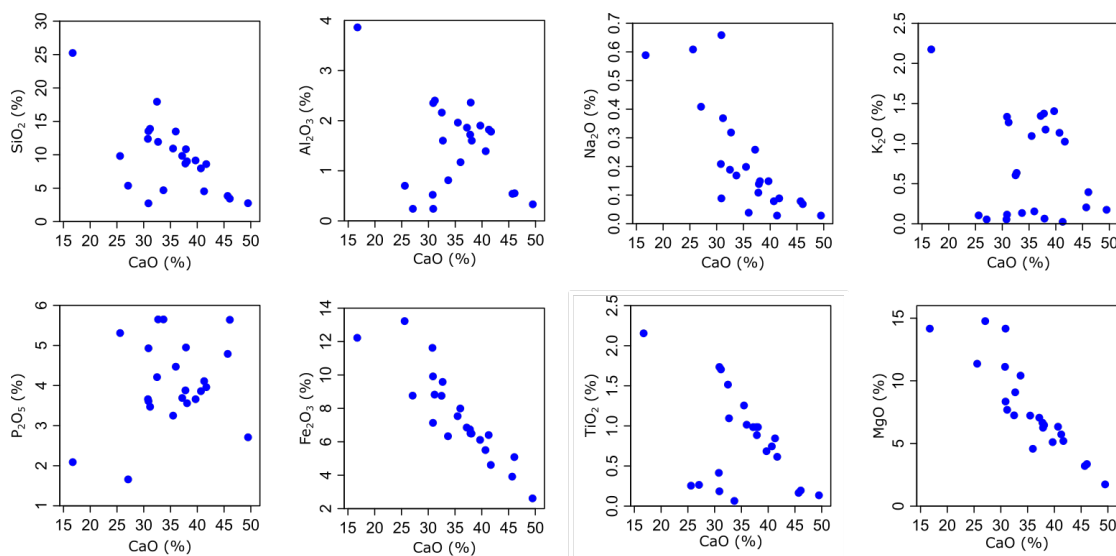
Figura 24. Diagrama de Harker em amostras do carbonatito Três Estradas, com dados geoquímicos de rocha total indicando a relação entre o SiO₂ e os demais elementos maiores do carbonatito Três Estradas.



Fonte: do Autor, em diagrama modificado de Harker (1909).

Para determinar o índice de diferenciação o CaO, também se utilizou um diagrama de variação (Figura 25). Nesta figura é possível verificar que conforme o enriquecimento em CaO, o CTE também enriquece em P₂O₅. Há um comportamento dúbio em relação ao Al₂O₃, que enriquece até um limite de 35% de CaO. Esse comportamento é devido à ocorrência de níveis ricos em flogopita e tremolita que, devido à sua composição, causam esse enriquecimento acoplado entre CaO e Al₂O₃ nas amostras que contêm menor expressão de carbonatos. Quanto aos outros óxidos (SiO₂, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, TiO₂ e MgO), o CaO tem correlação negativa visto que a calcita é o carbonato dominante e esses outros elementos se concentram nas fases silicáticas, principalmente no feldspato, flogopita e tremolita.

Figura 25. Diagrama de variação em amostras do carbonatito Três Estradas com dados geoquímicos de rocha total entre elementos maiores e CaO.



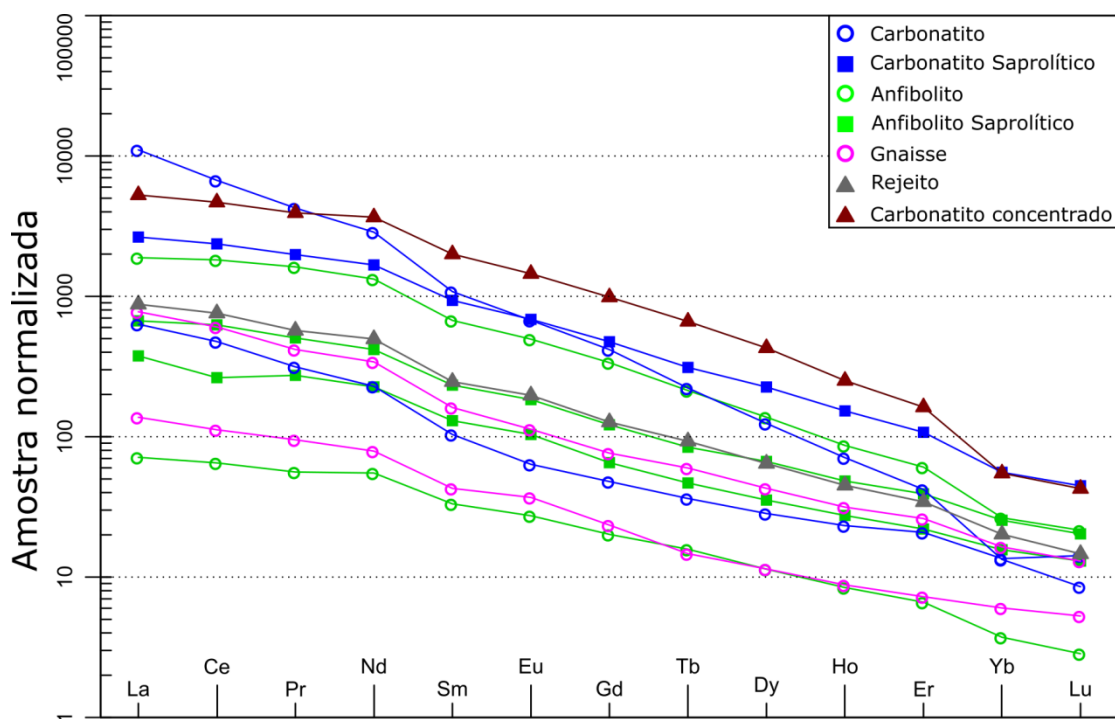
Fonte: do Autor.

Assim, ambos os diagramas de variação refletem a interação entre o carbonatito e a ultramáfica, visto que a tendência dos elementos obedece à composição química dos minerais da ultramáfica que são assimilados pelo CTE.

Assim, estes diagramas de variação registram as variações de composição entre o carbonatito e a ultramáfica, visto que a tendência dos elementos obedece à composição química dos minerais da ultramáfica que são assimilados pelo CTE.

Em um diagrama de distribuição dos ETR (Figura 26), foram representados os valores mínimos e máximos de cada rocha presente na área de estudo. As diferentes litologias exibem uma distribuição similar dos ETR, sugerindo a grande interação entre todas as rochas analisada. O CTE exibe o padrão típico de distribuição de ETR de carbonatitos, em que há um enriquecimento dos ETRL em relação aos ETRP. Verifica-se também a ausência de anomalia negativa de Eu, indicando que não ocorreu o fracionamento desse elemento. A ausência de anomalia positiva de Ce no saprólito do CTE deve ser melhor investigada em trabalhos futuros pois, com a oxidação do Ce^{3+} para Ce^{4+} , este elemento comumente concentra em perfis de intemperismo.

Figura 26. Diagrama de distribuição dos ETR normalizados por condrito (C1).



Fonte: do Autor. Dados do condrito C1 de Sun e McDonough (1995).

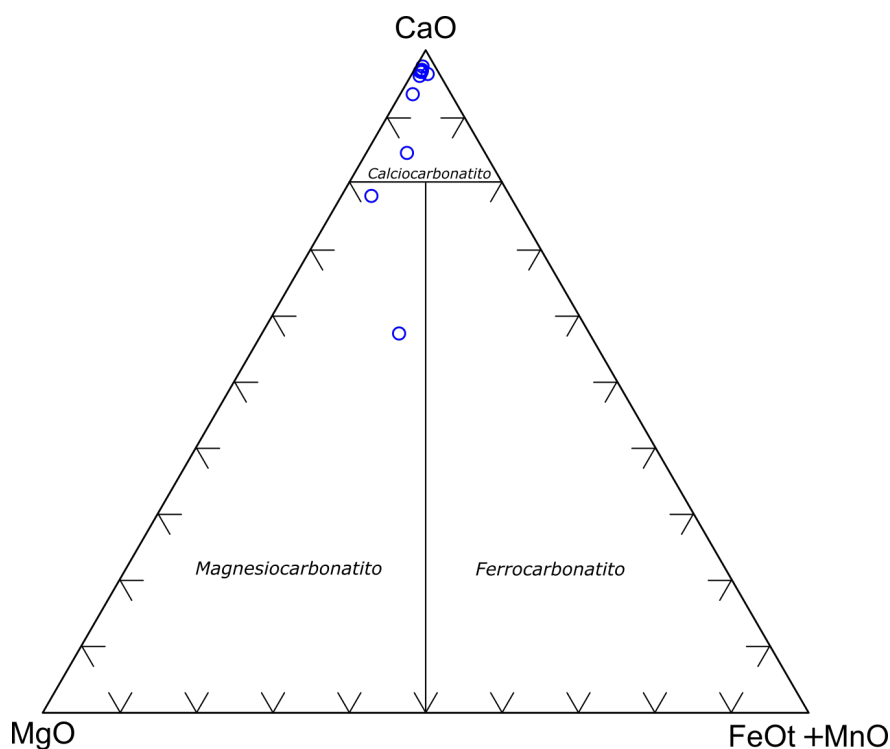
Observa-se que o padrão de variação dos ETR entre as litologias é muito similar, o que é um reflexo da intensa interação entre as rochas. O padrão do carbonatito comumente possui uma maior razão entre os ETR leves e os pesados. Porém, devido à presença de flogopita e tremolita em excesso, esse padrão é atenuado e resulta em uma inclinação menos acentuada no diagrama. Outro dado que reforça essa observação é a concentração dos ETR leves, pesados e totais de apenas metade da média proposta por Wooley e Kempe (1989) para os calciocarbonatitos no planeta.

Em relação às concentrações de ETR totais, o CTE possui em média 2245 ppm em peso, sendo eles 2153 da família dos ETR leves, e 91 ppm da família dos pesados. Esses elementos são concentrados predominantemente na apatita, mas também nas raras ocorrências de allanita e monazita.

4.2.2 Classificação

As análises por EDS permitiram a identificação da calcita como sendo o carbonato dominante no CTE. Sua composição é representada abaixo a partir de 33 análises pontuais (Figura X). Os dois pontos no campo dos magnésiocarbonatitos são decorrentes das análises em cristais de dolomita, porém pela sua ocorrência é restrita, e não refletem a composição do carbonatito como um todo.

Figura 27. Diagrama de classificação de carbonatitos conforme a composição do carbonato dominante. Círculos azuis representam as 33 análises pontuais obtidas em análises por EDS ao MEV.



Fonte: Dados do Autor, plotados em diagrama modificado de Woolley e Kempe (1989).

4.2.3 Aspectos tecnológicos

Quando comparados os teores de U e Th do CTE com as médias de calciocarbonatitos publicadas por Woolley e Kempe (1989), verifica-se que a concentração de U é 2,66 vezes maior, e a de Th de 0,76 vezes menor. Ainda que relativamente enriquecido, a concentração média de U (23,14 ppm), e de Th (21,71

ppm), são similares, conforme a Tabela 1. Destaca-se que os teores médios de U (13,85 ppm) no saprólito do carbonatito beneficiado os valores são significativamente menores, e no rejeito (24,50 ppm) permanecem praticamente constantes. O teor médio de Th (74,95 ppm) aumenta no saprólito do carbonatito beneficiado, e diminui no rejeito (19,62 ppm).

Por existirem carbonatitos que contêm conteúdos significativos de Cd, este elemento também foi analisado, porém, os teores obtidos foram abaixo ou muito próximos do limite de detecção (0,5 ppm).

Tabela 1. Média de elementos e óxidos do CTE e de outras referências, e suas relações de enriquecimento e empobrecimento.

	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	K ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	Cr (ppm)	Nb (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	V (ppm)	Ni (ppm)	ETRL (ppm)	ETRP (ppm)	ETRT (ppm)
Média 3E	9,97	1,61	7,73	0,91	0,82	4,00	157,69	498,90	39,68	21,33	133,08	63,27	2137,11	108,07	2245,18
Média Bell*	2,72	1,06	3,26	0,15	0,26	2,10	13,00	1204,00	52,00	8,70	80,00	18,00	3527,00	203,70	3730,70
Média Araxá¹	1,44	0,08	4,24	0,21	0,11	5,35	20,83	82,93	205,63	20,76	50,00	31,83	2951,68	247,41	3199,09
Media Salitre²	11,75	2,60	4,27	0,42	1,78	2,48	14,46	324,77	37,75	23,44	69,63	6,68	1620,49	70,82	1691,31
Media Angico³	2,97	0,32	4,18	0,09	0,09	7,74	n.d.	0,23	12,24	1,40	5,00	33,38	3558,02	148,62	3706,64
3E/Bell	3,55	1,40	3,35	5,51	2,70	1,93	11,91	0,37	0,76	2,66	1,66	3,44	0,55	0,53	0,55
3E/Araxá	6,92	21,04	1,82	4,33	7,55	0,75	7,57	6,02	0,19	1,03	2,66	1,99	0,72	0,44	0,70
3E/Salitre	0,85	0,62	1,81	2,15	0,46	1,61	10,91	1,54	1,05	0,91	1,91	9,47	1,32	1,53	1,33
3E/Angico	3,36	5,06	1,85	10,24	9,09	0,52	n.d.	2205,08	3,24	15,26	26,62	1,90	0,60	0,73	0,61

* WOOLLEY & KEMPE. In: BELL, Keith. (Ed.) 1989. Carbonatite: Genesis and Evolution. London. Unwin Hyman. 1st Edition. 300 p.
¹ TRAVERSA, GIANBOSCO et al. Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil). An. Acad. Bras. Ciênc. [online]. vol.73, n.1, pp.71-98, 2001.
² BARBOSA, Elisa Soares Rocha. Mineralogia e petrologia do complexo carbonatítico-fosforítico de Salitre, MG. 2009. 258 f., il. Tese (Doutorado em Geologia)—Universidade de Brasília. Brasília, 2009.
³ LUCIANO, R.L. Petrografia e geoquímica das rochas metacarbonatíticas do Complexo Angico dos Dias, divisa Bahia/1:1048576Piauí, Brasil. Tese (Doutorado em Geologia)—Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

Fonte: do Autor, referências inclusas.

Assim, estes baixos teores de U, Th e Cd possibilitam realizar a lavra do CTE sem a necessidade de processos para retirar estes elementos dos concentrados de minério ou mesmo dos rejeitos da mineração, pois não oferecem riscos para sociedade.

Como um dos objetivos deste trabalho foi avaliar as concentrações de U e Th, foi realizada uma avaliação estatística destes elementos, com base nos coeficientes de variação. Definido pela relação entre o desvio padrão e a média das análises,

convencionalmente coeficientes entre 1 e 5 significam que as análises possuem baixa variação dos resultados, caracterizando um comportamento homogêneo. O valor obtido destes coeficientes para o U no carbonatito foi de 0,86, no saprólito do carbonatito já beneficiado foi de 0,02, e no rejeito foi de 0,02. Relativamente ao Th, no carbonatito o valor é de 0,55, no saprólito do carbonatito já beneficiado é de 0,05, e no rejeito é de 0,03. Assim, conclui-se que os teores destes elementos são homogêneos e reduzidos no Carbonatito Três Estradas.

O Quadro 2 demonstra o efeito relativo dos processos de beneficiamento e intemperismo nas concentrações dos óxidos e elementos analisados neste trabalho. Por vezes o enriquecimento das concentrações de alguns elementos no minério beneficiado em relação à rocha sã é produto do enriquecimento prévio pelo processo intempérico, e não reflete o empobrecimento causado pelo próprio processo de beneficiamento. Neste caso, devido ao processo causar a redução da concentração, estes elementos foram classificados como “reduzidos”, apesar de possuírem concentração elevada em relação à rocha sã. Os elementos classificados como insignificantes possuem uma variação de no máximo 10 %, definidos arbitrariamente.

Quadro 2. Comportamento da concentração de elementos e óxidos conforme processo de beneficiamento ou intemperismo.

Rejeito			Concentrados			Saprólito		
Aumenta	Reduz	Insignificante	Aumenta	Reduz	Insignificante	Aumenta	Reduz	Insignificante
BaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	SiO ₂	Na ₂ O	SiO ₂	CaO	Cr ₂ O ₃
Ta	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SrO	Al ₂ O ₃	MgO	TiO ₂
	P ₂ O ₅	CaO	BaO	Fe ₂ O ₃	Hg	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Cs
	TiO ₂	MgO	S	MgO	Sb	Na ₂ O	SrO	Se
	ETR	Na ₂ O	Hf	K ₂ O	Cd	MnO	BaO	
	Th	K ₂ O	ETR	Cr ₂ O ₃		P ₂ O ₅	SrO	
	V	MnO	Th	MnO		ETR	Rb	
	Y	SrO	Y	Cs		Hf	Th	
	As	S	Zr	Rb		Nb	U	
	Se	Cs	As	Sn		Sn		
	Ni	Hf	Bi	Ta		Ta		
	Zn	U	Pb	U		V		
		Zr		V		Y		
		Bi		Se		Zr		
		Hg		Co		As		
		Sb		Ni		Bi		
		Cd		Sc		Hg		
		Co		Zn		Sb		
		Pb				Cd		
		Sc				Co		
						Ni		
						Pb		
						Sc		
						Zn		

Fonte: do Autor.

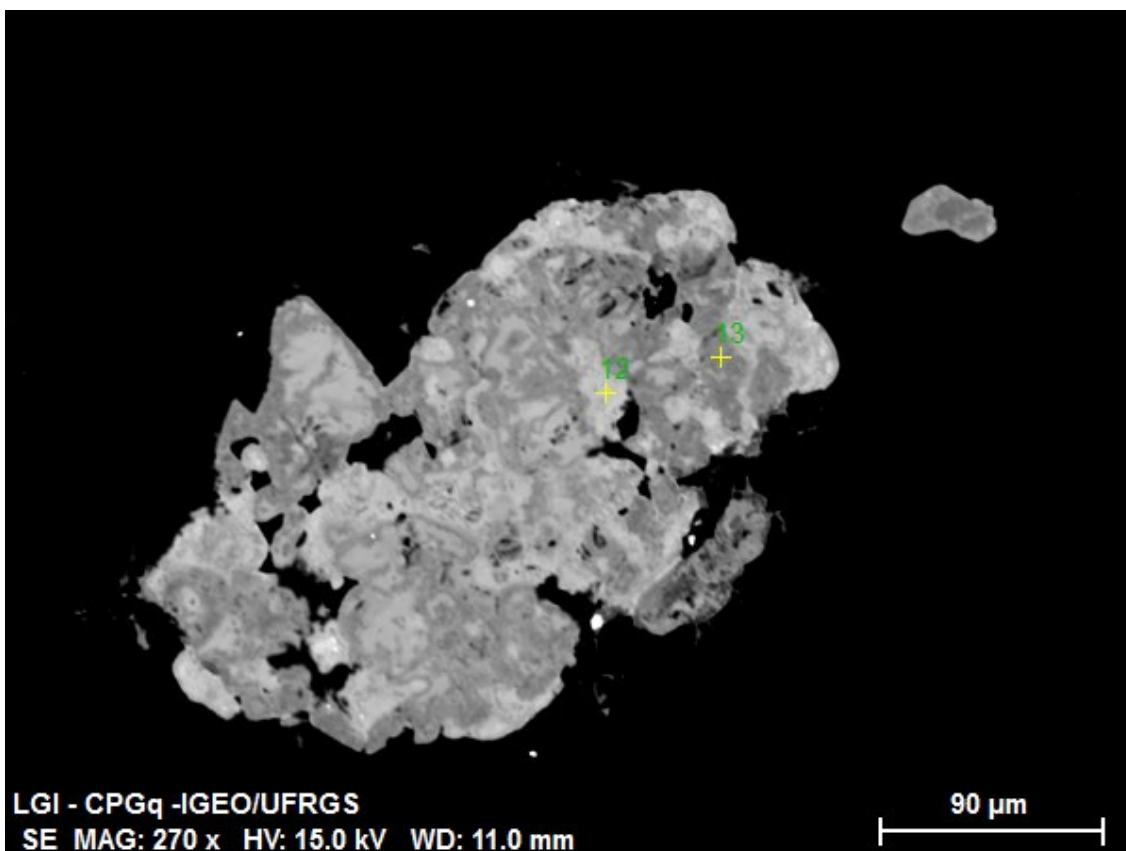
4.3 Química Mineral: U e Th

As lâminas selecionadas para análises continham minerais passíveis de portarem quantidades significativas de Th e U: pirocloro, apatita, titanita, barita-celestita e zircão e, portanto, se priorizou a análise destes minerais. A seguir, serão apresentadas imagens de microscopia eletrônica de varredura com análises de EDS de grãos representativos dos resultados obtidos.

A Figura 28 apresenta duas análises de um cristal de pirocloro do carbonatito. No ponto 12, a concentração de 9,62 % wt. de UO₂ é compatível com U-pirocloro,

enquanto que, no ponto 13, a concentração diminui para 2,44 % wt. de UO_2 , mas destaca-se a presença de Th (1,77 % wt. de ThO_2).

Figura 28. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristal de pirocloro do carbonatito portadores de U e Th.

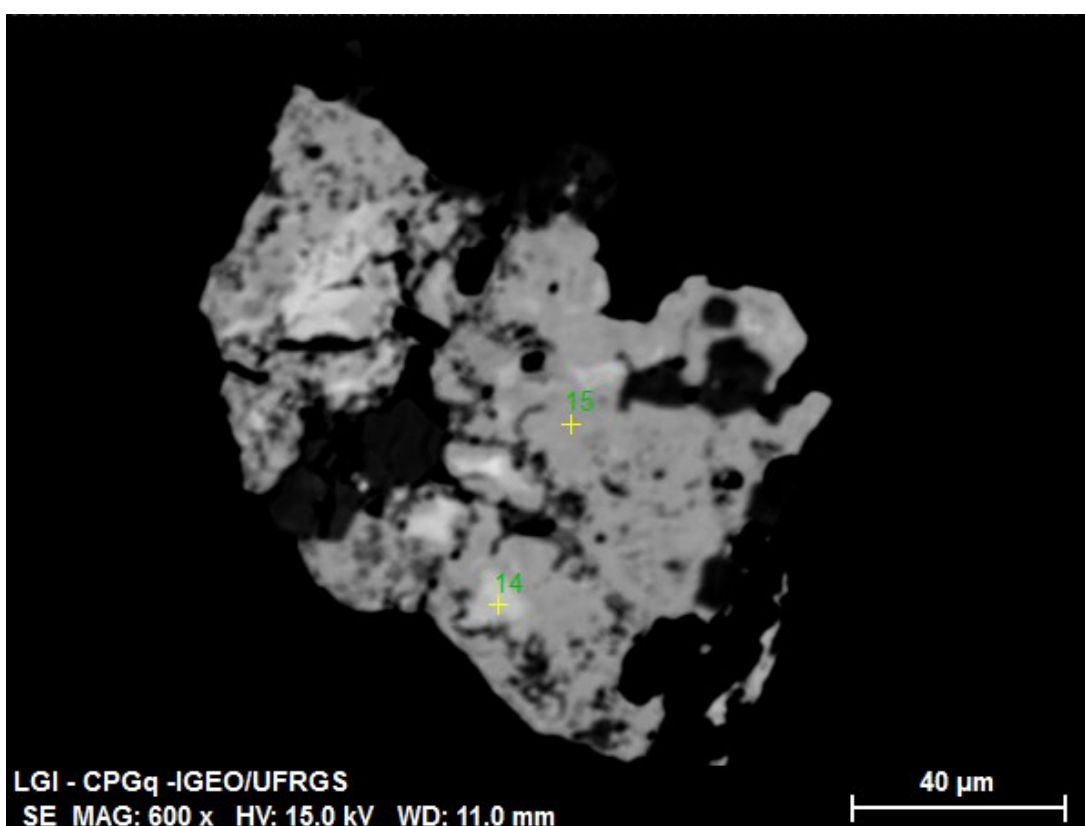


Mass percent (%)													
Spectrum	C	O	Nb	Ta	SiO ₂	CaO	TiO ₂	FeO	BaO	Nd ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	UO ₂	ThO ₂
12	0.00	0.00	10.18	0.23	1.74	3.01	7.79	3.13	1.17	1.25	1.09	9.62	-
13	0.00	0.00	12.01	0.03	2.25	2.93	8.55	2.89	1.65	2.14	2.07	2.44	1.77
Mean value:	0.00	0.00	11.10	0.13	1.99	2.97	8.17	3.01	1.41	1.69	1.58	6.03	1.77
Sigma:	0.00	0.00	1.30	0.14	0.36	0.06	0.54	0.17	0.34	0.63	0.70	5.07	0.00
Sigma mean:	0.00	0.00	0.92	0.10	0.26	0.04	0.38	0.12	0.24	0.44	0.49	3.59	0.00

Fonte: do Autor.

O pirocloro da Figura 29 apresenta composição mais homogênea, correspondendo a um Ce-pirocloro, com baixo teor de U e com concentrações de Th de 1,33 e 1,97 % wt. de ThO₂ nos pontos 14 e 15, respectivamente.

Figura 29. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristal alterado de pirocloro do carbonatito portadores de U e Th.

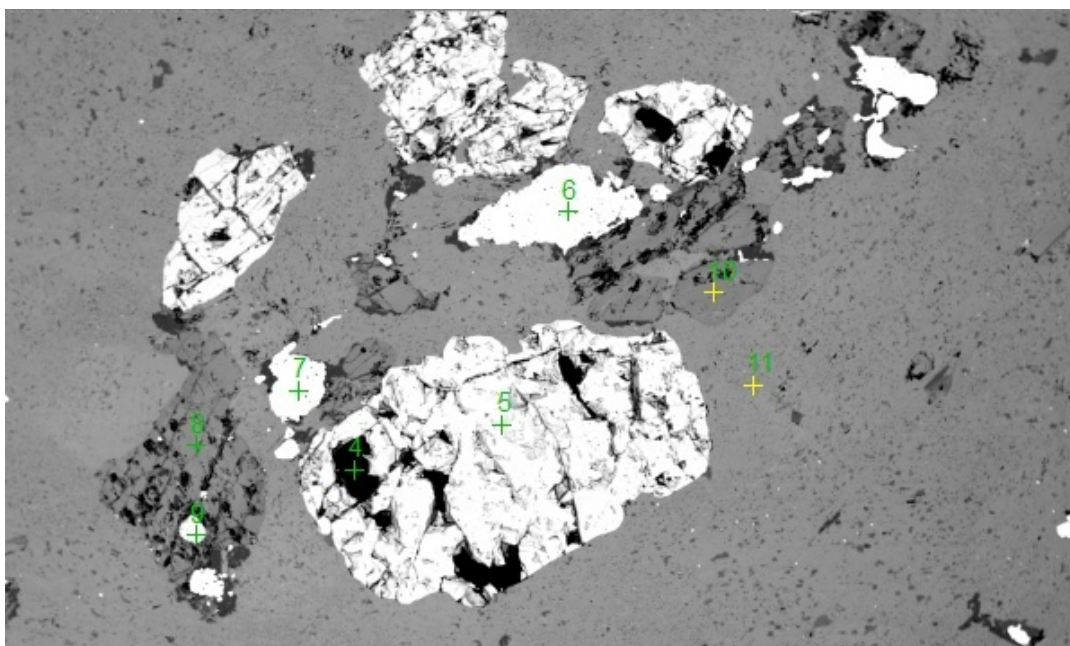


Mass percent (%)													
Spectrum	C	O	Nb	Ta	TiO ₂	Ce ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	CaO	BaO	FeO	ThO ₂	SiO ₂	UO ₂
14	0.00	0.00	12.05	-	11.36	5.89	3.70	1.88	1.93	2.38	1.33	-	-
15	0.00	0.00	12.82	0.13	8.76	3.21	2.68	1.92	1.39	1.71	1.93	2.68	0.33
Mean value:	0.00	0.00	12.43	0.13	10.06	4.55	3.19	1.90	1.66	2.04	1.63	2.68	0.33
Sigma:	0.00	0.00	0.55	0.00	1.84	1.89	0.72	0.03	0.38	0.47	0.42	0.00	0.00
Sigma mean:	0.00	0.00	0.39	0.00	1.30	1.34	0.51	0.02	0.27	0.33	0.30	0.00	0.00

Fonte: do Autor.

As dezenas de análises de cristais de apatita realizadas em lâminas de carbonatito e da ultramáfica não deixam dúvida quanto à ausência U e Th neste mineral. Na Figura 30, constam as análises de apatita texturalmente diferentes. O ponto 5 foi realizado em apatita equigranular do carbonatito, enquanto que o ponto 9 foi realizado em cristal precoce, incluso em uma tremolita, tipicamente assimilada da ultramáfica.

Figura 30. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de apatita (5 e 9), ilmenita (6), magnetita (7), tremolita (8 e 10) e calcita (11) do carbonatito.

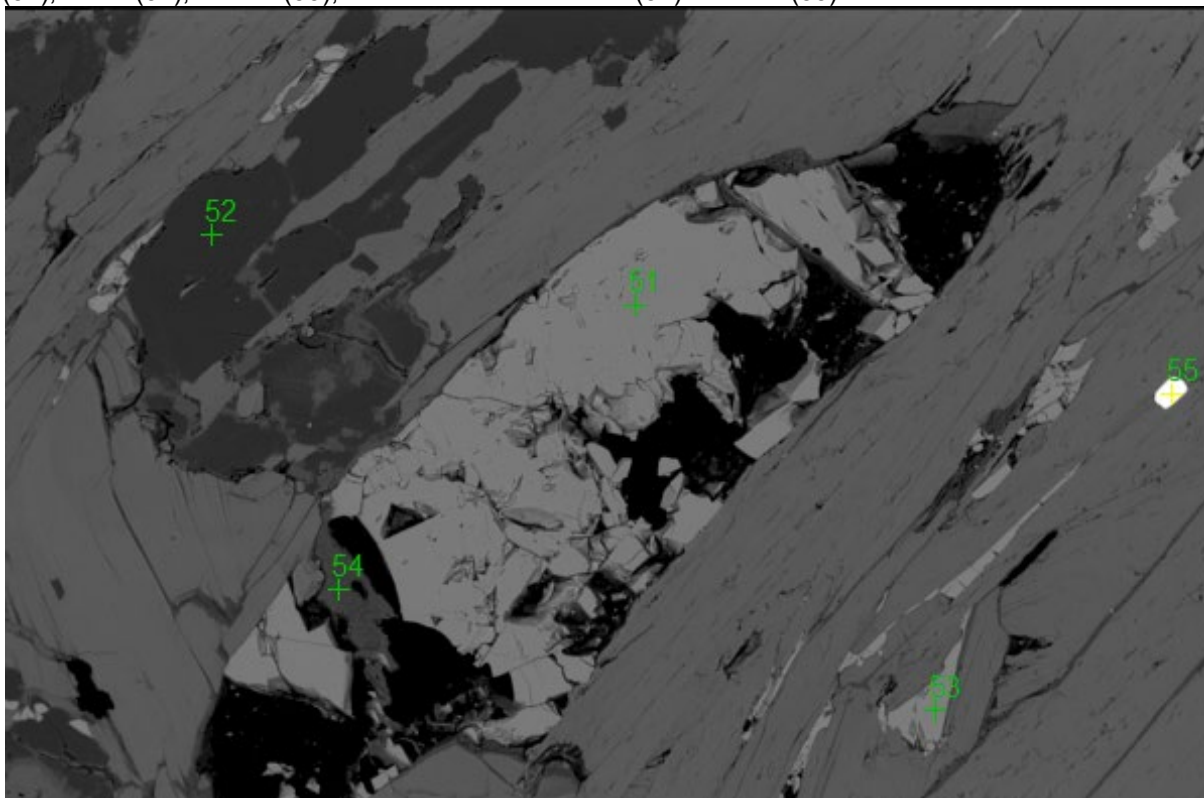


Mass percent (%)	C	O	F	Cl	Na2O	Al2O3	SiO2	CaO	P2O5	Sm2O3	TiO2	FeO	MgO	NiO	SrO	Dy2O3
Spectrum																
4	0.00	0.00	0.60	0.59	0.32	0.23	0.20	0.23	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0.00	0.32	1.78	-	-	-	-	48.48	37.17	1.49	-	-	-	-	-	-
6	0.00	0.39	-	-	-	-	-	-	-	-	50.33	31.81	-	-	-	-
7	0.00	0.04	-	-	0.98	4.59	-	-	-	-	-	76.91	-	-	-	-
8	0.00	0.00	-	-	1.42	2.32	38.31	7.22	-	-	-	6.54	11.79	-	-	-
9	0.00	0.16	1.74	-	-	-	-	48.19	36.72	1.81	-	-	-	-	-	-
10	0.00	0.00	-	-	1.31	4.78	40.39	9.17	-	-	-	5.76	14.77	-	-	-
11	0.00	0.42	-	-	-	-	-	66.42	-	-	-	0.47	1.03	0.78	1.62	0.44
Mean value:	0.00	0.17	1.38	0.59	1.01	2.98	26.30	29.95	36.95	1.65	50.33	24.30	9.20	0.78	1.62	0.44
Sigma:	0.00	0.18	0.67	0.00	0.50	2.15	22.63	27.70	0.32	0.23	0.00	31.83	7.23	0.00	0.00	0.00
Sigma mean:	0.00	0.06	0.24	0.00	0.18	0.76	8.00	9.79	0.11	0.08	0.00	11.25	2.56	0.00	0.00	0.00

Fonte: do Autor.

A Figura 31 mostra uma apatita típica da ultramáfica, observando-se um cristal de apatita alongado, no ponto 51, concordante com a foliação conferida pela flogopita. A titanita, mineral frequente na ultramáfica, também não apresenta concentrações de U e Th, sendo o ponto 53 representativo das titanitas analisadas.

Figura 31. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de apatita (51), albita (52), titanita (53), mineral não identificado (54) e zircão (55) da ultramáfica.

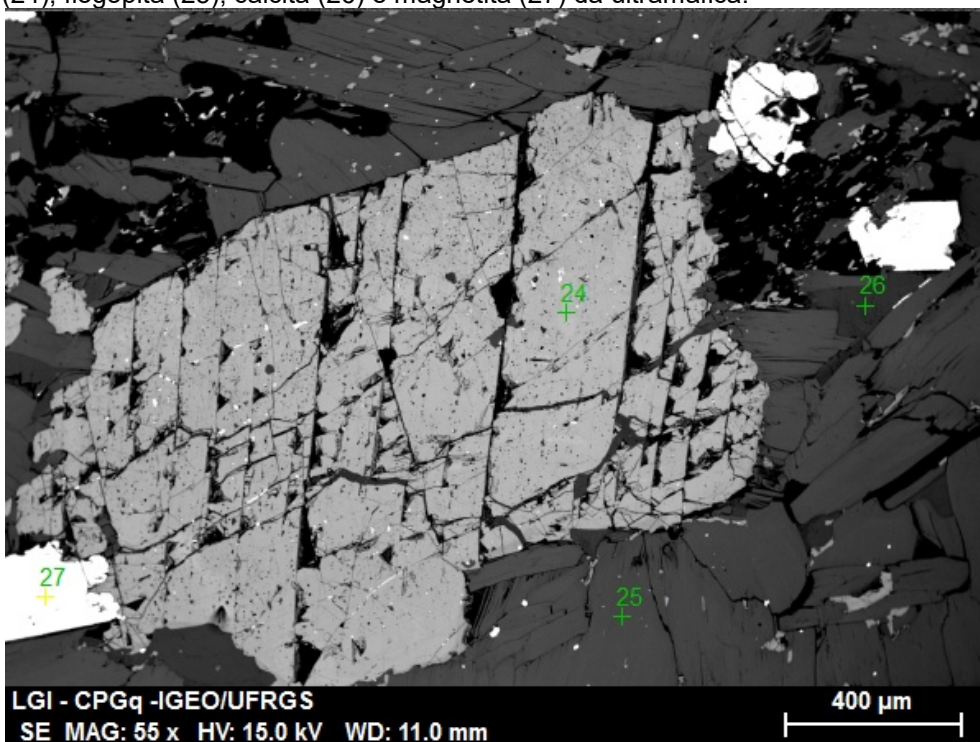


Mass percent (%)													
Spectrum	C	O	F	P2O5	CaO	Na2O	Al2O3	SiO2	TiO2	FeO	MgO	ZrO2	HfO2
51	0.00	0.37	2.03	38.26	55.15	-	-	-	-	-	-	-	-
52	0.00	0.17	-	-	-	11.12	19.13	62.91	-	-	-	-	-
53	0.00	0.36	-	-	27.33	-	-	28.74	37.37	0.92	-	-	-
54	0.00	0.23	-	-	-	-	15.15	29.23	-	14.89	23.32	-	-
55	0.00	0.13	-	-	-	-	-	32.71	-	-	-	64.51	0.62
Mean value:	0.00	0.25	2.03	38.26	41.24	11.12	17.14	38.40	37.37	7.91	23.32	64.51	0.62
Sigma:	0.00	0.11	0.00	0.00	19.67	0.00	2.82	16.44	0.00	9.88	0.00	0.00	0.00
Sigma mean:	0.00	0.05	0.00	0.00	8.80	0.00	1.26	7.35	0.00	4.42	0.00	0.00	0.00

Fonte: do Autor.

Na Figura 32 foi analisado um grande cristal de titanita, no ponto 24.

Figura 32. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de titanita (24), flogopita (25), calcita (26) e magnetita (27) da ultramáfica.

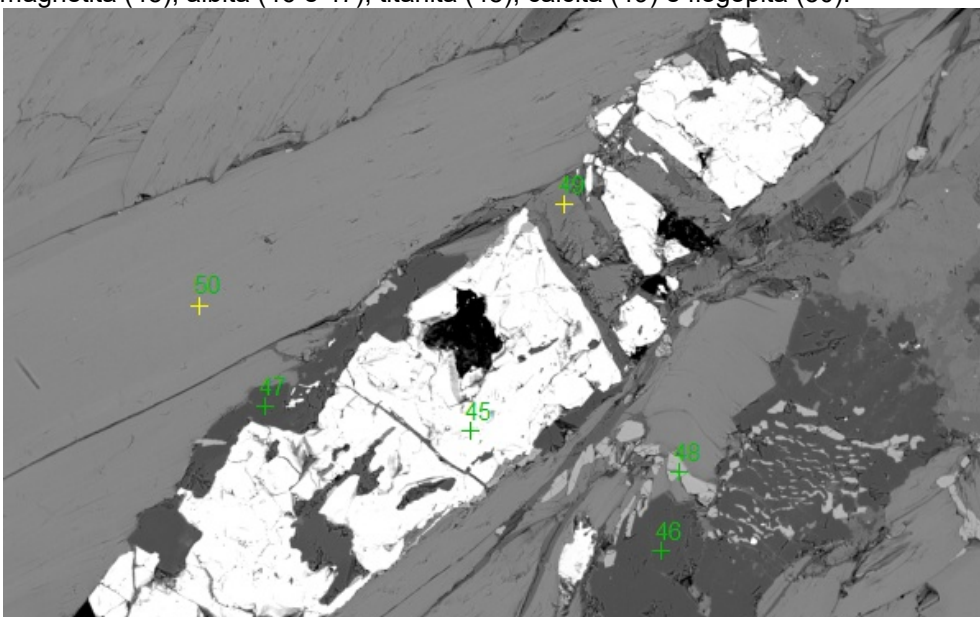


Mass percent (%)													
Spectrum	C	O	Al2O3	SiO2	CaO	TiO2	FeO	MgO	K2O	MnO	NiO	SrO	Na2O
24	0.00	0.06	1.40	28.63	26.21	33.44	0.72	-	-	-	-	-	-
25	-	0.09	11.81	31.49	-	2.18	13.42	14.16	7.59	-	-	-	-
26	0.00	0.29	-	-	66.92	-	0.71	1.15	-	0.52	0.51	1.39	-
27	0.00	0.56	-	-	-	-	79.98	-	-	-	-	-	1.17
Mean value:	0.00	0.25	6.60	30.06	46.57	17.81	23.71	7.66	7.59	0.52	0.51	1.39	1.17
Sigma:	0.00	0.23	7.36	2.02	28.79	22.10	37.99	9.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Sigma mean:	0.00	0.12	3.68	1.01	14.39	11.05	18.99	4.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: do Autor.

Na Figura 33, o ponto 48 representa a análise de titanita associada à albita.

Figura 33. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de magnetita (45), albita (46 e 47), titanita (48), calcita (49) e flogopita (50).

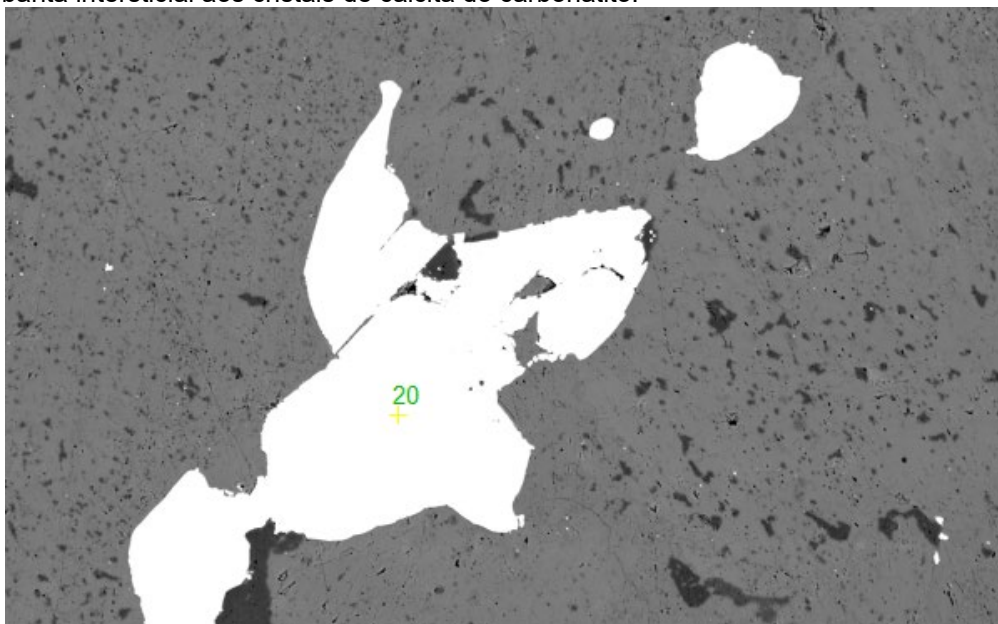


Mass percent (%)												
Spectrum	C	O	Sn	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	Na ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	K ₂ O
45	0.00	0.01	-	0.97	2.27	1.60	78.25	-	-	-	-	-
46	0.00	0.00	0.58	-	18.61	61.04	-	11.04	-	-	-	-
47	0.00	0.09	0.62	-	19.10	63.20	-	11.47	-	-	-	-
48	0.00	0.08	-	-	1.12	30.36	0.91	-	25.85	35.20	-	-
49	0.00	0.78	-	-	-	-	-	0.51	70.68	-	1.18	-
50	-	0.15	-	15.53	13.19	35.20	13.81	-	-	2.89	-	8.27
Mean value:	0.00	0.19	0.60	8.25	10.86	38.28	30.99	7.68	48.27	19.05	1.18	8.27
Sigma:	0.00	0.30	0.03	10.29	8.69	25.28	41.43	6.20	31.70	22.85	0.00	0.00
Sigma mean:	0.00	0.12	0.01	4.20	3.55	10.32	16.91	2.53	12.94	9.33	0.00	0.00

Fonte: do Autor.

A celestita também não apresenta concentrações de U e Th em nenhum caso. A Figura 34 mostra alguns grãos de celestita, em que o ponto 20 representa a análise de um desses grãos, texturalmente intersticial aos cristais de calcita do carbonatito.

Figura 34. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristal de celestita-barita intersticial aos cristais de calcita do carbonatito.



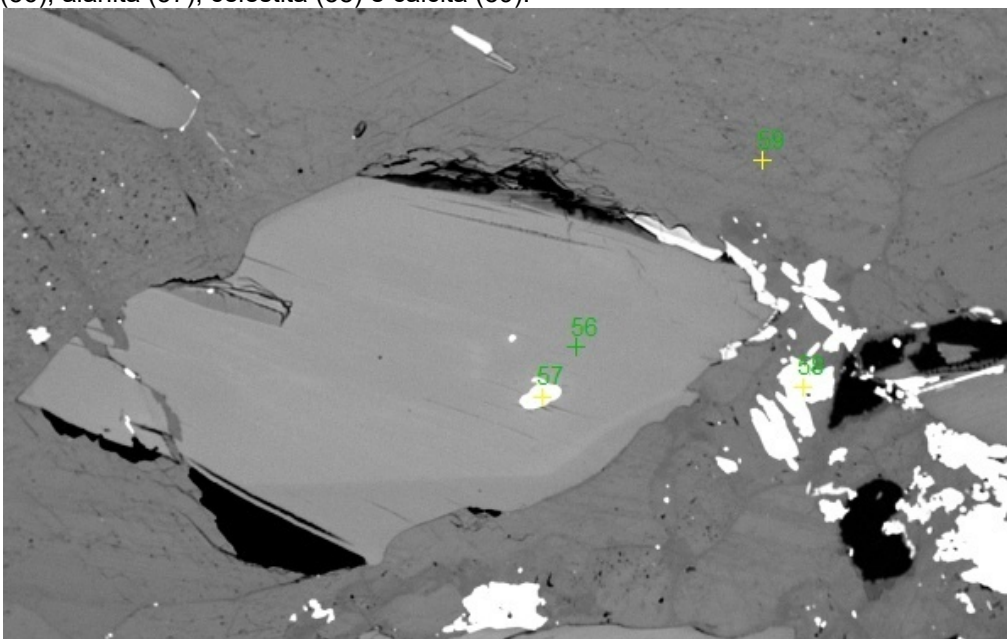
Spectrum: 20

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Compound	Comp. C [wt.%]	norm. Comp. C [wt.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Ba	56	L-series	33.62	39.14	10.17	BaO	43.70	37.54	0.99
S	16	K-series	12.77	14.87	16.55	SO3	37.12	31.88	0.47
Sr	38	L-series	13.82	16.08	6.55	SrO	19.02	16.34	0.58
O	8	K-series	25.69	29.91	66.73		0.16	0.14	2.74
C	6	K-series	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00

Fonte: do Autor.

Na Figura 35 observa-se aglomerados de cristais de celestita, representados pela análise do ponto 58. Também se observa um grão de allanita no ponto 57, que também poderia, mas não possui nenhum teor de U ou Th.

Figura 35. Imagem por microscópio eletrônico de varredura e análises por EDS de cristais de flogopita (56), allanita (57), celestita (58) e calcita (59).



Mass percent (%)																
Spectrum	C	O	MgO	Al2O3	SiO2	K2O	TiO2	FeO	CaO	La2O3	Ce2O3	Nd2O3	SO3	SrO	BaO	MnO
56	-	0.15	16.22	13.61	36.38	8.35	2.83	13.58	-	-	-	-	-	-	-	-
57	0.00	0.21	-	12.32	24.18	-	-	11.01	9.89	3.01	6.34	2.06	-	-	-	-
58	0.00	0.11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38.57	52.83	3.44	-
59	0.00	0.00	0.87	-	-	-	-	0.86	67.79	-	-	-	-	1.00	-	0.60
Mean value:	0.00	0.12	8.54	12.97	30.28	8.35	2.83	8.48	38.84	3.01	6.34	2.06	38.57	26.92	3.44	0.60
Sigma:	0.00	0.09	10.85	0.91	8.63	0.00	0.00	6.72	40.94	0.00	0.00	0.00	0.00	36.65	0.00	0.00
Sigma mean:	0.00	0.04	5.43	0.45	4.31	0.00	0.00	3.36	20.47	0.00	0.00	0.00	0.00	18.33	0.00	0.00

Fonte: do Autor.

5. DISCUSSÃO

5.1 Aspectos Petrológicos e Tectônicos

Devido à gênese em ambiente muito específico, a ocorrência de corpos carbonatíticos possui uma grande importância para o entendimento do contexto geológico em que estão inseridos. Também contribuem para o entendimento de como essas rochas se originam, pois há poucas centenas de carbonatitos reconhecidos no mundo.

Como apresentado na Figura 3, apesar de intrudir rochas do CGSMC, o CTE ocorre no limite entre os blocos Taquarembó e São Gabriel. Portanto, as estruturas que propiciam a intrusão dos carbonatitos no Rio Grande do Sul devem estar associadas a falhamentos com grande expressão e profundidade.

Algumas características permitem definir o CTE como sendo um complexo alcalino-carbonatítico, conforme segue: a associação de rochas carbonatíticas contendo até 20 % de apatita; a presença de pirocloro, pirita e ilmenita precoces no carbonatito; as inclusões de apatita em tremolita e flogopita nas ultramáficas; a presença de titanita e allanita como produtos de remobilização hidrotermal nas ultramáficas; os elevados teores de titânio e magnésio em flogopita, pois atestam o caráter ígneo das rochas da área de estudo. A existência de tremolita-actinolita é comumente interpretada como resultante de processo metamórfico, porém, aqui foram interpretadas como produto de reequilíbrio posterior, em um ambiente quimicamente favorável, devido à presença de cálcio e magnésio provenientes das rochas do próprio complexo.

Como observado na Figura 11, a interação entre as rochas na área de estudo se dá de forma heterogênea, porém sistematicamente ao longo de todo o corpo. Isto dificulta uma clara distinção dos limites entre as litologias, e indica a simultaneidade de cristalização entre ambas, o que é confirmado pela similaridade dos padrões de distribuição nos diagramas de ETR. A presença de feições de deformação dúctil e rúptil na rocha são frequentes, porém a mineralogia incipientemente deformada sugere um mecanismo deformacional concorrente à cristalização do CTE. Assim, associado à forma alongada do corpo do tipo linear (SENHORINHO, 2012), a foliação possui características de fluxo magmático, com minerais precoces

acompanhando, apesar da distinção entre a deformação relacionada ao metamorfismo e a cristalização sob tensão ser tênue.

Com base no contexto geotectônico do Escudo Sul-riograndense, assim como descrito por Cerva-Alves (2017) para os Carbonatitos Passo Feio e Picada dos Tocos, o CTE também está inserido no contexto de magmatismo tardi-orogênico relacionado à orogênese brasileira. A especificidade de magmas carbonatíticos, e ainda associados espacialmente a outros tipos muito específicos de rochas como lamprófiros espessartíticos, sugere a relação genética entre elas, visto que os ambientes geotectônicos para a geração de ambas são comuns. Conforme Lima e Nardi (1992), a Associação Shoshonítica Lavras do Sul além das rochas shoshoníticas compreende também lamprófiros espessartíticos, como os presentes na área de estudo. Porém, os dados aqui interpretados são de caráter genérico e, para posicionar estratigraficamente o CTE, um estudo com esse objetivo é necessário.

Quanto à fenitização, são observados efeitos por aproximadamente uma centena de metros. No gnaiss, se verifica uma fenitização sódica anterior à potássica, com albita fraturada e preenchimento posterior por feldspato potássico, calcita e barita/celestita, como visto na Figura 22. Epidoto e minerais de titânio também são produtos da fenitização, como a ilmenita e a titanita decorrentes da alteração da hornblenda.

Nas ultramáficas, a fenitização potássica resulta no processo de glimmeritização, formando, por vezes, flogopititos. A fenitização sódica também ocorre posteriormente, com presença de albita e titanita cristalizando nas clivagens da flogopita e com zircão e allanita como inclusões freqüentes nos minerais produtos da fenitização.

A Tabela 1 apresenta uma comparação das médias de alguns elementos químicos entre o CTE e os carbonatitos brasileiros de Araxá, Salitre e Angico dos Dias por possuírem produção de fosfato apatítico. A partir das médias desses elementos, nota-se um enriquecimento significativo em SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 e K_2O no CTE em relação a Araxá e Angico dos Dias. Isto é aqui interpretado como decorrente da interação entre as ultramáficas e o carbonatito como decorrente da concentração e assimilação de flogopita. Quanto aos elementos-traço, Cr, V e Ni são relacionados à magnetita associada, enquanto que o Nb é devido à presença de pirocloro. Quanto aos ETR, os minerais que concentram esses elementos possuem baixos teores

modais e ocorrência restrita e errática, estando restritos à alteração hidrotermal incipiente da apatita, ou inclusão de allanita em flogopita.

5.2 Aspectos quanto ao Aproveitamento Tecnológico

5.2.1 Teores de U e Th

Na crosta, de um modo geral, a concentração de Th é 2 a 3 vezes maior do que a de U. Mas esta regra não funciona na maioria dos carbonatitos. A vocação principal dos carbonatitos é maior para depósitos de Th do que para depósitos de U.

Conforme a Tabela 1 acima, os teores de U e Th são similares a outros corpos carbonatíticos que são lavrados atualmente, um indício da viabilidade da exploração do minério caso seguidas as boas práticas.

Em depósitos de Th associados a carbonatitos, as concentrações deste metal são muito maiores do que as de Três Estradas, sendo expressas em porcentagem: 0,3 a 0,4% ThO₂ (ou seja, 3000 a 4000 ppm) em Telemark; No albita granito de Pitinga, rocha que usamos para testar nosso radiômetro, as concentrações médias de Th e U (759 e 328 ppm, respectivamente) são cerca de 20 vezes maiores do que as de Três Estradas, e ainda assim são lavrados para estanho-nióbio-tântalo.

A Tabela 2 demonstra as concentrações de urânio e tório nos produtos de beneficiamento e rejeitos do CTE.

Tabela 2. Médias de concentração de U e Th no minério fosfático e produtos de beneficiamento do CTE.

UNIDADE	MÉDIA U	MÉDIA Th
CTE	21,33 ppm	39,67 ppm
CTE beneficiado	5,63 ppm	35,95 ppm
Saprólito do CTE	15,36 ppm	23,26 ppm
Saprólito do CTE beneficiado	13,85 ppm	74,95 ppm
Rejeito	24,50 ppm	19,62 ppm

Fonte: do Autor.

Por se tratar de um estudo preliminar, não se objetivou a caracterização exaustiva do pirocloro, mas seu simples reconhecimento como o mineral portador tanto de U como de Th no CTE.

5.2.2 Implicações quanto ao uso como remineralizador

Em relação ao aproveitamento do carbonatito para remineralização, a instrução normativa nº 05, de 10 de março de 2016 do MAPA define os conteúdos mínimos e máximos para a utilização de rochas para esse fim. Os conteúdos do CTE e limites da instrução normativa são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Limites de concentração para constituintes de remineralizadores de solo, e média do CTE a partir de análises geoquímicas de rocha total.

Restrições	Tolerância	Média
CaO + MgO + K ₂ O > 9 peso%	Entre 7,5 e 10,5 peso%	43,64 % em peso
K ₂ O >= 1 peso%	>= a 0,75 peso%	0,76 % em peso
SiO ₂ livre =< 25 vol%	<= 30 vol%	0,00 % em peso
Arsênio =< 15 mg/kg	<= 18,75 mg/kg	1,78 mg/kg
Cádmio =< 10 mg/kg	<= 12,50 mg/kg	0,26 mg/kg
Mercurio =< 0,1 mg/kg	<= 0,125 mg/kg	0,01 mg/kg
Chumbo =< 200 mg/kg	<= 250 mg/kg	52,71 mg/kg
pH de abrasão conforme registrante	>= 6	*

Fonte: dados do Autor, tabela compilada da instrução normativa nº 05, de 10 de março de 2016, do MAPA. * Dado não obtido.

A “soma de bases”, definida pela soma em peso dos óxidos CaO, MgO e K₂O, e está acima do tolerável para o uso, principalmente devido ao alto teor de CaO associado à quantidade de calcita, e somente com algum processo de beneficiamento para a redução de CaO poderá ser utilizado como remineralizador. O teor de K₂O, apesar de próximo, está dentro do limite aceitável, e está principalmente contido na camada interlamelar de flogopita, o que é um fator favorável à utilização como remineralizador. A única condição em que o CTE apresenta SiO₂ livre é quando assimila o gnaisse encaixante, porém com teores muito abaixo do limite da instrução normativa. Quanto aos elementos potencialmente

tóxicos, todos se encontram a pelo menos 10 vezes abaixo dos limites toleráveis. O item “pH de abrasão” não foi avaliado nesse trabalho, e pode ser um fator limitante para a esse uso. Assim, uma redução no teor de CaO pode ser o suficiente para a viabilização do uso do CTE como remineralizador de solos.

As concentrações de potássio no CTE são hospedadas majoritariamente em flogopita, sendo essa uma característica muito favorável devido à facilidade de liberação dos íons de potássio dos sítios intercamadas da flogopita. A liberação desses íons tem sido estudada devido à abundância de micas, e da freqüente presença de potássio nos sítio intercamada. Segundo estudos (ACKER e BRICKER, 1992; KUWAHARA e AOKI, 1995), micas trioctaédricas possuem capacidade de liberação de potássio muito maior que micas dioctaédricas, devido à repulsão causada pela maior proximidade entre hidrogênio e potássio nas micas trioctaédricas, fato este que favorece a liberação do potássio em solução. Entre as micas trioctaédricas, a maior concentração de ferro retarda a liberação do potássio devido à oxidação do ferro, promovendo um caráter dioctaédrico às micas. Outro dado importante é a dissolução da flogopita, que tanto em ambientes desde muito ácidos a muito básicos, possuem uma rápida taxa de liberação do K em relação a outros íons (Al, Mg, Fe e Si) que são muito mais lentas, e assim resultam em enriquecimento somente em potássio, e não nos outros íons indesejáveis mas presentes na estrutura da flogopita.

Devido às características especiais das micas trioctaétricas acima descritas e, mais especialmente da flogopita, rochas com estas micas têm sido prioritariamente testadas em inúmeros experimentos de rochagem com resultados altamente positivos para a liberação do K.

A partir desses dados, experimentos de remineralização com distintas rochas com micas trioctaédricas foram desenvolvidos pela, como a Embrapa Cerrados e UNB com várias rochas silicáticas ricas em flogopita ou biotita (NASCIMENTO e LOUREIRO, 2004), com biotita xisto, brecha alcalina, carbonatito, flogopitito e ultramáfica alcalina (RESENDE et al. 2005), e com flogopitito da Bahia (SOEIRA DA SILVA et al. 2010).

5.2.3 Implicações quanto ao beneficiamento do minério

O rejeito do beneficiamento não produz alteração significativa na rocha original, devido à remoção de minerais que possuem grande concentração de algum elemento, mas que em volume não são significativos, como é o caso da magnetita que, quando removida, reduz significativamente os teores de cromo, vanádio e ferro.

Nos concentrados do beneficiamento, nota-se o enriquecimento nos elementos e óxidos relacionados ao minério, cálcio, fósforo e ETR, além de outros elementos que possuem comportamento geoquímico similar, como bário.

O processo de intemperismo enriquece o saprólito em elementos formadores de argilominerais, apatita e minerais resistatos, como zircão, pirocloro, magnetita, ilmenita, dentre outros, e altera significativamente a química da rocha, conforme visto no Quadro 3.

A qualidade do minério fosfático pode ser influenciada por fatores predominantemente químicos ou físicos, reunidos no Quadro 4.

Quadro 4. Fatores que influenciam a qualidade do minério fosfático.

Caráter	Tipo de complicações
Físico	Textura da rocha: dureza, porosidade, cimentação ou cutículas minerais
Físico	Granulometria da apatita
Físico	Grau de cristalinidade da apatita
Físico	Tratamentos físicos: natural ou calcinado
Químico	Teor de fósforo na rocha
Químico	Teor de flúor na apatita
Químico	Teor de carbonato na apatita
Químico	Teor de carbonato livre
Químico	Razão CaO/P ₂ O ₅ da rocha: Minerais acessórios
Químico	Teor de ferro e alumínio (R ₂ O ₃)
Químico	Teor de magnésio
Químico	Óxidos e silicatos inertes na ganga
Químico	Teor de sódio e potássio
Químico	Teor de matéria orgânica, nativa ou de beneficiamento
Químico	Teor de cloretos na rocha
Químico	Metais pesados (Cd, Pb, Zn, Hg)
Químico	Elementos tóxicos (Se, As, Cr, V)
Químico	Radionuclídeos (U, Th, Ra, Rn) na apatita

Fonte: Modificada de UN Industrial Development Organization (Ed.), Fertilizer Manual, Holanda. Springer Netherlands, 1998.

Desses fatores, destacam-se a ausência de películas de ferro na apatita primária. Segundo Uliana (2010), o recobrimento da apatita por películas limoníticas altera o comportamento da apatita no beneficiamento, devido à modificação na carga superficial causada pela presença de íons de Fe, Ca e Mg. A partir dessas informações acerca da qualidade do minério, este estudo possibilitou caracterizar o minério fosfático quanto a:

1. Cutículas limoníticas ausentes na apatita.
2. Granulometria grosseira da apatita.
3. Alto grau de cristalinidade.
4. Apatita frequentemente com borda carbonatada, com teores aproximados de 6 peso% de CO₂ (ANZOLIN, 2018).
5. Carbonato livre presente em proporções de 50 a 60 vol%, conferindo uma alta razão CaO/P₂O₅.
6. Pouca expressão de metais pesados Cd, Pb, Zn, Hg.
7. Elementos tóxicos como Cr e V, concentrados em minerais de ganga de fácil remoção, como magnetita.
8. Ausência de radionuclídeos na apatita.

Assim, com base nestes critérios, se verifica que a apatita do CTE é adequada ao uso como fertilizante.

6. CONCLUSÕES

O CTE é um flogopita-apatita-calcita carbonatito, que no diagrama CaO, MgO, FeO_t + MnO foi classificado como calciocarbonatito. Sua mineralogia primária é constituída por ilmenita, pirita, pirocloro, magnetita, dolomita, apatita e calcita. Também possui uma mineralogia decorrente da assimilação da ultramáfica, que consiste em tremolita e flogopita. Uma cristalização tardia, de gênese carbohidrotermal, compreende calcita, barita, celestita, feldspato potássico, albita, titanita, allanita, monazita, zircão e clorita.

A mineralogia primária do CTE encontra-se alterada, principalmente pela reação com o líquido carbonático tardio. Isto pode ser verificado nas bordas carbonatadas dos cristais de apatita ou pela formação de magnetita em venulações posteriores a partir da pirita e ilmenita ou, ainda, a formação de monazita e allanita como produtos de alteração carbo-hidrotermal. A intrusão do carbonatito, cuja idade ainda não foi determinada, produz a fenitização do gnaiss encaixante, o que resulta na geração de uma mineralogia rica em titânio, bário, estrôncio, sódio e potássio no gnaiss encaixante.

Com a intrusão do CTE ocorreu a fenitização do gnaiss encaixante, sendo que a relação de contato entre o gnaiss e o fenito gnáissico é gradual, enquanto que o contato do gnaiss com a ultramáfica, carbonatito e o lamprófiro ocorre de forma abrupta. Tanto o carbonatito, como a ultramáfica e o lamprófiro ocorrem como soleiras que intrudem rochas quartzofeldspáticas pertencentes ao Complexo Granulítico Santa Maria Chico. O aspecto bandado e interdigitado do CTE com as ultramáfica por vezes torna difícil a distinção entre essas duas litologias. Este bandamento é decorrente da foliação magmática e produto de seu *emplacement* em ambiente tarditectônico, que ocorreu em falhas de grande porte provavelmente reativadas posteriormente.

As análises químicas em rocha total possibilitaram verificar que a interação entre o carbonatito e a ultramáfica promove, no carbonatito, o enriquecimento em silício, potássio, ferro, titânio, cromo, vanádio e magnésio, e um decréscimo em ETR, fósforo e cálcio. O estudo geoquímico dos ETR no carbonatito Três Estradas

possibilitou verificar que apresentam um padrão de distribuição característico de carbonatitos, com enriquecimento relativo dos ETRL em relação aos ETRP, porém sem anomalia negativa de Eu. Isto significa que o magma carbonatítico não era relativamente pobre em Eu e que este não foi retirado do magma pela cristalização de alguma fase mineral concentradora deste elemento como os plagioclásios. Além disto, o CTE é mais rico em ETR do que a ultramáfica, e este também tem maiores concentrações do que o gnaiss encaixante. As análises geoquímicas em rocha total possibilitaram concluir que os ETR aumentam no concentrado de carbonatito. Por isto, o rejeito do minério carbonatítico tem menores concentrações nestes elementos. Observa-se que os teores relativamente elevados de ETRT nos concentrados de minério poderão ser avaliados no futuro com a possibilidade de explorar também os ETR, pois suas concentrações totais chegam a 0,8 % em peso nestes concentrados. A apatita não possui elementos radioativos como U e Th que, em outros carbonatitos do mundo chegam a possuir teores elevados, fato que não ocorre no CTE.

A inexistência de anomalia positiva de cério nas amostras do minério fosfático supergênico deve ser mais bem investigada em trabalhos futuros, visto que este elemento, com a oxidação de Ce^{3+} para Ce^{4+} , tende a acumular nos perfis intempéricos.

A investigação das concentrações de urânio e tório no carbonatito e nos concentrados de minério permitiu verificar que os teores destes elementos são reduzidos e possuem a mesma ordem de grandeza daqueles de outros corpos carbonatíticos que atualmente produzem minério fosfático. A distribuição espacial desses elementos acompanha a ocorrência do pirocloro, que é um mineral traço, que está homoganeamente distribuído ao longo do corpo carbonatítico. Além disto, esta fase mineral é excluída dos concentrados apatíticos e também não tem teores significativos nos rejeitos. Observa-se que nas amostras analisadas verificou-se que o CTE também não possui outros elementos tóxicos.

A possibilidade de uso do CTE para remineralizador de solo é predominantemente favorável, ainda que a concentração de CaO seja elevada, e pode vir a cumprir os requisitos da instrução normativa nº 5 de março de 2016 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, desde que tomadas as devidas precauções quanto a redução dos elevados teores de cálcio existentes no carbonatito, fato este que provavelmente não deve inviabilizar seu uso. Portanto,

além da ausência de elementos tóxicos, radioativos, outros fatores que poderiam prejudicar o beneficiamento do minério, como a presença de películas limoníticas na apatita, e também se mostraram favoráveis ao beneficiamento.

Estratigraficamente o CTE pode ser inserido, ainda que preliminarmente, no contexto tarditectônico do Cinturão Dom Feliciano, em concordância com os eventos geradores da Associação Shoshonítica Lavras do Sul, esta que também ocorre na área de estudo na forma de lamprófiros espessartíticos. Assim, de idade possivelmente neoproterozóica, como as idades obtidas por Cerva-Alves (2017) para o Carbonatito Passo Feio, o CTE aproveita as estruturas profundas criadas nesse evento que domina o Escudo Sul-riograndense para ascender à crosta.

7. REFERÊNCIAS

ACKER, J. G. e BRICKER O. P. **The influence of pH on biotite dissolution and alteration kinetics at low temperature**. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 56, ed. 8, p. 3073-3092, 1992.

ANZOLIN, Henrique de Maman. **Mineralogia e Geoquímica do Perfil de Intemperismo do Carbonatito Três Estradas**, RS. 2015. 116f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ANZOLIN, Henrique de Maman. **Multigerações de apatitas no carbonatito Três Estradas, sul do Brasil: significado físico-químico e implicações para a qualidade do minério fosfático**. 2018. 90f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ANZOLIN, Henrique de Maman et al . **Apatite multi-generations in the Três Estradas Carbonatite, Southern Brazil: physical and chemistry meaning and implications to phosphate ore quality**. *Braz. J. Geol.*, São Paulo , v. 49, n. 2, e20180092, 2019 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2317-48892019000200309&lng=en&nrm=iso>. access on 10 Nov. 2019. Epub July 01, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/2317-4889201920180092>.

BARBOSA, Elisa Soares Rocha. **Mineralogia e petrologia do complexo carbonatítico-foscorítico de Salitre**, MG. 2009. 258 f., il. Tese (Doutorado em Geologia)—Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

BRASIL, **Resolução CNEN nº 167, de 30 de abril de 2014. Gerência de rejeitos radiativos de baixo e médio níveis de radiação**. Ministério da Ciência, tecnologia e inovação. Brasília, DF, 2014.

BRASIL, **Resolução MAPA nº 05, de 10 de março de 2016. Remineralizadores e substratos para plantas**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Brasília, DF, 2016.

CERVA-ALVES, Tiara. **Geologia dos carbonatitos ediacaranos de Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil**. 2016 103 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

CHEMALE JUNIOR, Farid. **Evolução Geológica do Escudo Sul-Riograndense**. In: HOLZ, Michael; DE ROS, Luiz Fernando (Org.). *Geologia e Estratigrafia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, 2000, p. 03-44.

COMPANHIA DE PESQUISA EM RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. Escala 1:750.000. 2013.

CUNEY, Michel; KYSER, Kurt. **The Geology and Geochemistry of Uranium and Thorium Deposits**. Canadá. Mineralogical Association of Canada. 2015. 345p.

HADLICH, Ingrid Weber. **Mineralização de torita associada ao Depósito Madeira (Sn-Nb-Ta), Pitinga, Amazonas, Brasil**. 2017. 124 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS, 2017. Ori.: Bastos Neto, Artur Cezar. Co-Ori.: Pereira, Vitor Paulo.

HARTMANN L. A.; CHEMALE JUNIOR., F.; PHILIPP, R. P. In: IANNUZZI, Roberto; FRANTZ, José Carlos. (Ed.) **50 anos de Geologia** : Instituto de Geociências. Contribuições. Porto Alegre : Comunicação e Identidade, 2007. 396 p. : il. ; 30 cm + 1 CD-ROM

HARTMANN, Léo Afraneo et al. **Zircon and titanite U-Pb SHRIMP geochronology of Neoproterozoic felsic magmatism on the eastern border of the Río de la Plata Craton, Uruguay**. *Journal of South American Earth Sciences*. v. 15, n. 2, p. 229-236, 2002.

IBRAM. **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. 6ª ed. Disponível em: http://portaldamineração.com.br/wp-content/uploads/2018/09/ibram_informacoes-e-analises-da-economia-mineral-brasileira_port_out11.pdf. Acessado em 04/10/2018

KUWAHARA, Y. e AOKI, Y. **Dissolution Process of Phlogopite in Acid Solutions**. In: *Clays Clay Miner*, vol. 43, p. 39-53, 1995. <<https://doi.org/10.1346/CCMN.1995.0430105>>

LAPIN, A. V., IWANÜCH, W., PLOSHKO, V. V. 1999. **Carbonatitos lineares de cinturões móveis: uma síntese**. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(4):483-490.

LE MAITRE, Roger Walter; STRECKEISEN, A. **Igneous rocks : a classification and glossary of terms : recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks.** 2nd. ed. Cambridge : Cambridge University Press, 236 p., 2004.

LIMA, Evandro Fernandes de; NARDI, Lauro Valentim Stoll. **O magmatismo shoshonítico no estado do Rio Grande do Sul : uma revisão.** In: Pesquisas : Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre vol. 19, n. 2 (1992), p. 190-194 : mapa

LUCIANO, R.L. **Petrografia e geoquímica das rochas metacarbonáticas do Complexo Angico dos Dias, divisa Bahia/Piauí, Brasil.** Tese (Doutorado em Geologia)—Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

MARTINEZ, Guilherme Annes. **Caracterização das rochas glimeríticas do Complexo Alcalino-carbonatítico Três Estradas, Lavras do Sul, RS.** 2019. 72f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

MITCHELL, Roger. **Carbonatites and carbonatites and carbonatites.** The Canadian Mineralogist. 2005. v. 43, p. 2049-2068. [doi:10.2113/gscanmin.43.6.2049]

NARDI, Lauro Valentim Stoll; HARTMANN, Leo Afraneo. **O complexo granulítico santa maria chico do escudo sulriograndense.** In: Estudos Tecnológicos, Acta Geologica Leopoldensia. Sao Leopoldo, RS. vol.3, n.6, p. 45-75, 1979.

NASCIMENTO, M. e LOUREIRO Fel. **Fertilizantes e sustentabilidade: O potássio na agricultura brasileira, fontes e rotas alternativas.** Rio de Janeiro: Ministério da Ciência e Tecnologia; 2004.

PHILIPP, R. P.; PIMENTEL, M. M.; CHEMALE JUNIOR, F. **Tectonic evolution of the Dom Feliciano Belt in Southern Brazil: Geological relationships and U-Pb geochronology.** Brazilian Journal of Geology. v. 46, p. 83-104, issn: 2317-4692, 2016.

RESENDE, F. V. et al. **Uso de cobertura morta no controle da umidade e temperatura do solo, na incidência de plantas invasoras e na produção da cenoura em cultivo de verão.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras - MG, v. 29, n.1, p. 100-105, 2005.

SENHORINHO, Eiel Martins. **Controle estrutural dos carbonatitos no Rio Grande do Sul: análise de produtos de sensoriamento remoto e aerogeofísicos**. 2012. 162f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto de Geociências, Curso de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

TRAVERSA, Gianbosco et al. **Petrography and mineral chemistry of carbonatites and mica-rich rocks from the Araxá complex (Alto Paranaíba Province, Brazil)**. An. Acad. Bras. Ciênc. [online]. 2001, vol.73, n.1, pp.71-98

ULIANA, Daniel; KAHN, Henrique; BRAZ, André B. **Caracterização tecnológica dos tipos de minério de fosfato do Complexo Alcalino de Salitre, MG - Área Fosfertil** [doi:10.1590/S0370-44672009000400015]. Rem: Revista Escola de Minas [online], 2009, vol. 62, n. 4, p. 511-516.

UN INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION (Ed.), **Fertilizer Manual**, Holanda. Springer Netherlands, 1998.

WOOLLEY e KEMPE. In: BELL, Keith. (Ed.) 1989. **Carbonatite: Genesis and Evolution**. London. Unwin Hyman. 1st Edition. 300 p.

8. ANEXOS

Anexo 1. Análises geoquímicas das rochas ultramáficas: tremolítico, glimmerito e flogopítico.

Amostra	49	53	36	11	27	25	2	46	10	24	47	12	26	35	48
Litologia	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G	T/G
SiO2 (%)	25,8	26,6	28,5	29,9	30,8	31,1	32,5	33	33,1	33,6	33,6	33,8	35,7	39	45
Al2O3 (%)	6,87	4,35	3,65	3,76	11	5,99	6,38	7,61	4,53	6,43	6,27	5,09	4,63	6,84	9,41
Fe2O3 (%)	12,8	11,4	19,75	16,65	13,8	13,45	13,65	16,8	13,1	25	20,1	18,4	16,2	17	9,36
CaO (%)	21,9	23,3	19,6	21,1	11,9	23	19,1	14,85	19,1	12,35	14,15	16,45	19,05	13,25	14,45
MgO (%)	8,57	8,84	7,45	8,06	10,2	6,09	8,7	9,76	8,21	8,38	10,2	9,8	8,09	10,75	5,74
Na2O (%)	1,42	0,87	0,83	1,46	1	1,71	1,4	0,6	2,19	1,12	0,49	1,36	2,04	1,13	4,8
K2O (%)	3,33	2,54	0,63	0,39	5,38	0,7	1,76	4,64	0,27	1,03	3,65	1,68	0,51	2,24	0,32
Cr2O3 (%)	0,012	0,011	0,012	0,021	0,131	0,022	0,014	0,061	0,016	0,067	0,01	0,042	0,069	0,062	0,002
TiO2 (%)	2,6	2,75	5,14	3,91	2,71	2,95	3,58	5,06	5,67	7,53	5,09	5,69	2,87	4,35	3,27
MnO (%)	0,24	0,25	0,25	0,21	0,34	0,3	0,24	0,34	0,27	0,21	0,19	0,27	0,34	0,31	0,18
P2O5 (%)	4,27	2,97	5,01	6,3	1,07	7,76	2,97	1,29	2,73	0,57	0,23	2,27	2,06	1,97	1,92
SrO (%)	0,34	0,32	0,57	0,2	0,24	0,24	0,38	0,17	0,34	0,07	0,11	0,1	0,17	0,08	0,21
BaO (%)	0,11	0,17	0,09	0,01	0,44	0,12	0,14	0,22	0,9	0,09	0,23	0,05	0,06	0,1	0,01
C (%)	3,27	3,65	1,22	1,66	2,29	1,37	2,27	1,86	2,01	0,67	1,73	1,32	1,94	0,41	1,4
S (%)	0,48	0,38	2,96	1,34	0,09	0,19	0,51	1,16	0,97	0,31	0,67	0,47	1,4	0,42	0,94
LOI (%)	12,55	13,8	5,75	7,19	9,99	5,43	9,11	7,02	7,63	2,99	6,84	6,15	6,28	2,6	5,58
Total (%)	100,81	98,17	97,23	99,16	99	98,86	99,92	101,42	98,06	99,44	101,16	101,15	98,07	99,68	100,25
Ce (ppm)	484	569	1145	1115	231	897	311	342	601	92,9	39,9	287	287	376	343
Cr (ppm)	120	120	90	190	940	160	120	450	150	480	100	350	500	440	40
Cs (ppm)	1,92	1,72	0,14	0,45	1,79	0,16	1,3	4,1	0,26	0,68	3,72	1,12	0,14	1,58	0,19
Dy (ppm)	22,5	19,15	31,2	33,9	10	20,6	15,05	15,25	18,5	4,77	2,8	14,85	10,95	14,1	13,7
Er (ppm)	8,09	5,75	8,62	9,72	3,52	6,7	4,95	5,06	4,85	1,89	1,06	5	3,85	5,3	4,63
Eu (ppm)	13,35	13,55	26	27,9	6,03	15,2	9,93	9,2	16,2	2,97	1,54	10,75	7,16	9,18	8,6
Ga (ppm)	21,1	15,3	17,8	20,1	23	17,1	36,5	22,7	17,8	20,3	22,3	19,1	14,1	20,5	19,8
Gd (ppm)	33,2	31,8	56,4	67,1	14,5	36,9	26,5	22,1	40,1	7,76	4,01	26,7	17	20,7	22,1
Ge (ppm)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Hf (ppm)	11,7	9,6	10,6	11,5	7	7,3	23,3	14,4	16,4	7,4	6	11,5	8,9	12,4	20,8
Ho (ppm)	3,48	2,81	4,42	4,73	1,57	3,29	2,39	2,3	2,56	0,75	0,46	2,27	1,74	2,27	2,07
La (ppm)	213	235	432	447	97	431	131,5	134	236	36,8	16,9	134,5	116,5	149	128,5
Lu (ppm)	0,53	0,44	0,46	0,53	0,33	0,52	0,32	0,4	0,3	0,13	0,07	0,32	0,4	0,44	0,41
Nb (ppm)	198,5	289	346	230	198,5	124	388	236	370	58,7	19,1	134	146	173,5	185,5
Nd (ppm)	252	294	585	607	117	379	170	185	334	52,4	25,2	198,5	148,5	182	187
Pr (ppm)	57,6	67,3	143	150,5	27,5	99,3	41,2	42,6	81,1	11,85	5,2	46,9	35,7	45	42,2
Rb (ppm)	77,8	74,5	10	8,9	142,5	8,5	54,9	144,5	5,8	20,6	117,5	46	4,4	84,3	5,8
Sm (ppm)	45,4	47,2	100,5	99,7	21,7	59,2	32,9	32,5	56,4	10,55	4,92	36,5	26,3	32,2	32,7
Sn (ppm)	5	5	4	5	4	4	6	4	8	4	4	5	3	4	4
Sr (ppm)	2740	2830	4270	1745	1855	1865	3300	1310	3010	543	857	905	1365	609	1755
Ta (ppm)	19	11,9	28,5	23,1	7,6	7,3	8,4	16,8	27,6	3,5	1,5	12,7	7,2	9,4	15,3
Tb (ppm)	4,69	3,91	6,36	7,7	1,99	4,19	3,35	2,95	4,39	0,99	0,57	3,16	2,11	2,77	2,84
Tm (ppm)	15	14,95	68,7	72,6	7,2	16,05	13,5	9,46	25,8	3,21	1,38	7,85	7,22	9,29	20,1
Th (ppm)	0,86	0,65	0,87	0,94	0,48	0,77	0,57	0,56	0,62	0,2	0,11	0,53	0,46	0,61	0,72
U (ppm)	11,8	2,32	7,38	6,59	2,9	1,48	3,46	4,97	3,1	0,61	0,56	1,52	0,78	1,03	2,62
V (ppm)	329	331	382	386	315	353	300	385	310	752	533	480	348	416	156
W (ppm)	1	1	2	5	1	1	3	1	6	1	1	1	1	1	2
Y (ppm)	90,2	69	92,6	99,1	38,7	79,8	51,1	55,4	57,6	18,6	11,4	54,4	43	54,2	52,1
Yb (ppm)	4,4	3,35	3,81	4,26	2,16	3,87	2,41	3,06	2,05	0,97	0,6	2,8	2,62	3,15	3,46
Zr (ppm)	686	402	491	474	312	302	752	604	522	236	115	351	413	521	1060
As (ppm)	0,4	0,8	2,6	2	0,5	2,7	0,8	0,2	0,8	0,4	0,3	0,9	0,6	1	0,8
Bi (ppm)	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,06	0,01	0,01	0,01	0,01
Hg (ppm)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
In (ppm)	0,074	0,048	0,051	0,056	0,131	0,098	0,062	0,067	0,024	0,028	0,044	0,038	0,046	0,029	0,026
Re (ppm)	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Sb (ppm)	0,05	0,05	0,05	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se (ppm)	0,3	0,4	2,4	2,4	0,9	2	0,8	0,7	1,2	0,4	0,9	0,5	0,8	0,6	0,6
Te (ppm)	0,06	0,05	0,13	0,09	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08	0,03	0,23	0,05	0,03	0,03	0,06
Tl (ppm)	0,17	0,18	0,03	0,12	0,23	0,03	0,26	0,62	0,03	0,08	0,7	0,11	0,02	0,17	0,03
Ag (ppm)	0,5	0,5	1,3	0,8	0,5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,5	1,6	0,5	0,6	0,5	0,5
Cd (ppm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Co (ppm)	34	35	108	50	46	33	44	67	41	84	99	49	49	52	19
Cu (ppm)	43	60	248	201	84	56	56	148	94	305	870	55	95	56	209
Li (ppm)	20	10	10	10	30	10	10	30	10	10	10	10	10	10	10
Mo (ppm)	2	2	3	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2
Ni (ppm)	40	65	118	71	203	56	35	170	56	230	338	118	198	207	28
Pb (ppm)	27	31	18	32	12	14	35	28	50	4	33	7	17	3	13
Sc (ppm)	12	20	9	10	21	12	16	15	12	36	53	19	15	18	9
Zn (ppm)	113	103	99	105	198	115	135	176	119	114	131	139	131	168	75
ETRL (ppm)	1052	1212,5	2431,5	2447,1	500,23	1880,7	696,53	736,1	1324,7	207,47	92,12	764,15	621,16	793,38	733,4
ETRP (ppm)	91,1	81,41	112,14	128,88	34,55	76,84	55,54	60,88	73,37	17,46	11,22	55,63	39,13	49,34	58,53
ETRT (ppm)	1143,1	1293,91	2543,64	2575,98	534,78	1957,54	752,07	796,98	1398,07	224,93	103,34	819,78	660,29	842,72	791,93

Anexo 2. Análises geoquímicas do carbonatito.

Amostra	30	52	54	50	28	19	13	16	9	51	18	8	15
Litologia	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
SiO2 (%)	6,77	13,9	16,5	2,8	2,82	3,5	3,9	4,6	4,76	5,44	8,03	8,67	8,75
Al2O3 (%)	1,34	2,43	4,07	0,25	0,34	0,56	0,55	1,83	0,82	0,25	1,4	1,79	1,73
Fe2O3 (%)	6,19	9,07	12,35	7,16	2,64	5,11	3,94	6,43	6,36	8,79	5,53	4,64	6,77
CaO (%)	41,5	31	17,65	31	49,6	46,2	45,8	41,4	33,8	27,2	40,8	41,8	37,9
MgO (%)	4,11	8,98	10,6	14,2	1,77	3,39	3,24	5,76	10,45	14,8	6,37	5,23	6,69
Na2O (%)	0,18	0,26	0,08	0,09	0,03	0,07	0,08	0,03	0,17	0,41	0,08	0,09	0,11
K2O (%)	0,6	1,93	2,57	0,12	0,18	0,4	0,21	0,03	0,14	0,06	1,14	1,03	1,38
Cr2O3 (%)	0,002	0,041	0,018	0,002	0,002	0,003	0,002	0,023	0,005	0,015	0,017	0,011	0,021
TiO2 (%)	0,51	1,6	2,52	0,19	0,14	0,2	0,17	0,85	0,07	0,27	0,75	0,62	0,99
MnO (%)	0,29	0,24	0,32	0,48	0,17	0,17	0,19	0,21	0,42	0,47	0,21	0,23	0,24
P2O5 (%)	4,46	3,01	3,45	4,94	2,72	5,65	4,8	4,12	5,66	1,67	3,87	3,97	3,89
SrO (%)	0,61	0,49	1,84	0,63	0,78	0,64	0,72	0,62	1,08	0,64	0,62	0,51	0,72
BaO (%)	0,24	0,1	5,92	0,16	0,13	0,09	0,19	0,13	1,88	0,12	0,19	0,09	0,25
C (%)	8,51	6,45	4,06	9,94	10,5	9,09	9,64	8,83	8,87	10,2	8,32	8,46	8,1
S (%)	0,27	0,64	1,88	0,4	0,46	0,29	0,4	0,97	0,57	0,43	0,3	0,23	0,6
LOI (%)	31,2	23,8	15,55	36,3	37,6	32,2	34,3	32,1	32,7	36,8	29,9	30,3	29,2
Total (%)	98	96,85	93,44	98,32	98,92	98,18	98,09	98,13	98,32	96,94	98,91	98,98	98,64
Ce (ppm)	822	736	3760	528	789	803	817	737	871	581	734	757	730
Cr (ppm)	30	350	160	50	20	30	20	190	50	150	120	100	170
Cs (ppm)	0,35	1,19	2,01	0,09	0,01	0,21	0,11	0,05	0,17	0,04	0,48	0,64	0,77
Dy (ppm)	28	23	23,1	17,95	22,4	30,5	29,7	24,2	19,85	8,33	25,6	25	25,5
Er (ppm)	8,74	7,01	5,99	4,7	7,46	9,4	9,99	8,46	5,2	2,32	8,28	8,25	8,36
Eu (ppm)	20,1	16,3	22,9	12,4	15,7	21,7	22,3	17,85	18	8,38	18,5	18,2	18,4
Ga (ppm)	8,4	14,1	25,7	4,8	4,8	6,6	6,5	10,8	8,1	6	8,6	9,9	10,6
Gd (ppm)	49,1	37,9	45,5	29,8	38	58,8	55	44,7	43,8	17,2	48,9	44,9	46,3
Ge (ppm)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Hf (ppm)	3,4	5,6	7,7	0,3	1,2	4,2	2,2	4,3	1	0,6	4,7	4,9	4,9
Ho (ppm)	4,13	3,33	3,14	2,34	3,43	4,52	4,59	3,91	2,81	1,21	3,93	3,84	3,85
La (ppm)	357	323	2590	218	357	339	346	323	400	277	331	329	316
Lu (ppm)	0,6	0,45	0,37	0,21	0,62	0,54	0,63	0,59	0,23	0,17	0,48	0,51	0,57
Nb (ppm)	74,2	549	2010	177	153	61,9	45,8	328	144,5	273	169	200	361
Nd (ppm)	433	359	1075	278	352	442	450	378	430	255	384	392	379
Pr (ppm)	104,5	85,3	330	63,7	92,4	97,6	109	92,6	110,5	64,4	88,1	97	94,2
Rb (ppm)	16,2	49	81	3,4	2,9	9	4,8	0,8	3,2	1	24,9	26,9	34,4
Sm (ppm)	77,2	57,7	98	44,7	57,7	78,1	79,3	63,3	69,3	33,1	65,9	67,1	65
Sn (ppm)	3	5	7	1	1	2	3	3	1	3	1	4	3
Sr (ppm)	4440	4170	10000	5380	5890	5550	6300	5350	9190	5490	5020	4360	6310
Ta (ppm)	4	13,2	15,3	53,3	12,7	4,8	5,2	37,2	21,6	55,8	8,9	10,2	16,5
Tb (ppm)	5,72	4,71	5,23	3,73	4,49	6,95	6,64	5,58	4,8	1,95	5,66	5,3	5,42
Th (ppm)	31,2	51,9	40	13,4	30,6	20,7	21,2	40,9	20,6	14,25	30,4	41,1	50,3
Tm (ppm)	0,88	0,67	0,64	0,43	0,89	0,95	1,02	0,96	0,51	0,3	0,79	0,88	0,92
U (ppm)	2,37	13,65	6,18	61,3	44,2	4,34	6,72	65,8	32,6	62,1	9,7	8,73	25,3
V (ppm)	96	186	129	40	60	73	57	141	18	108	107	89	137
W (ppm)	1	1	2	1	1	2	1	7	2	1	2	3	1
Y (ppm)	99,3	78	77,6	59,6	86,8	96,5	105	94,4	66,2	30,5	84,5	93,5	93,8
Yb (ppm)	4,94	3,7	2,69	1,97	4,11	4,62	4,87	4,54	1,78	1,49	4,22	4,22	4,34
Zr (ppm)	241	316	344	13	70	305	150	252	58	16	299	327	332
As (ppm)	0,5	1,7	0,8	0,3	5,5	2,8	1,3	1,6	0,2	0,1	2,4	4,1	1,1
Bi (ppm)	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,06	0,04	0,04	0,01	0,02	0,05
Hg (ppm)	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,02	0,016	0,013	0,005	0,006	0,009	0,005
In (ppm)	0,074	0,052	0,074	0,066	0,058	0,076	0,085	0,093	0,066	0,077	0,057	0,047	0,079
Re (ppm)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
Sb (ppm)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se (ppm)	3,4	0,4	0,3	0,5	3	3,7	4,3	3,5	2,6	0,2	2,9	2,8	3,1
Te (ppm)	0,09	0,06	0,04	0,04	0,08	0,05	0,15	0,54	0,09	0,12	0,07	0,06	0,06
Tl (ppm)	0,08	0,17	0,23	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,09	0,08	0,12
Ag (ppm)	0,8	0,6	0,8	0,5	0,8	0,7	0,7	1,1	1	0,7	0,5	0,5	0,8
Cd (ppm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5
Co (ppm)	16	32	40	10	7	12	9	18	6	24	15	14	21
Cu (ppm)	16	38	55	10	12	9	9	22	6	12	23	24	27
Li (ppm)	10	10	20	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Mo (ppm)	1	1	3	1	1	1	5	1	39	22	1	1	1
Ni (ppm)	8	127	87	12	1	1	3	64	30	41	41	34	54
Pb (ppm)	38	19	26	46	17	13	19	33	92	102	15	13	30
Sc (ppm)	10	18	30	23	6	13	10	10	9	49	11	8	13
Zn (ppm)	81	126	149	49	25	66	45	78	83	60	76	56	95
ETRL (ppm)	1813,8	1561	7853	1132,4	1663,8	1781,4	1823,6	1611,75	1898,8	1210,5	1621,5	1660,3	1602,6
ETRP (ppm)	102,11	97,07	109,56	73,53	81,4	116,28	112,44	92,94	78,98	41,35	97,86	92,9	95,26
ETRT (ppm)	1915,91	1658,07	7962,56	1205,93	1745,2	1897,68	1936,04	1704,69	1977,78	1251,85	1719,36	1753,2	1697,86

Anexo 2. Continuação

Amostra	38	17	4	14	33	41	29	3	37	34	31	40	32
Litologia	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
SiO2 (%)	9,08	9,22	9,88	9,9	10,9	11	12	12,45	13,55	13,6	13,95	18	25,3
Al2O3 (%)	1,81	1,91	0,71	1,87	2,37	1,97	1,61	0,53	1,18	2,36	2,41	2,17	3,87
Fe2O3 (%)	6,52	6,14	13,25	6,88	6,53	7,56	9,61	11,65	8,02	9,94	8,85	8,78	12,25
CaO (%)	38,2	39,8	25,7	37,3	38	35,6	32,8	30,9	36,1	31	31,3	32,6	16,85
MgO (%)	6,5	5,14	11,4	7,09	6,29	7,26	9,12	11,15	4,61	8,38	7,72	7,28	14,2
Na2O (%)	0,15	0,15	0,61	0,26	0,14	0,2	0,32	0,21	0,04	0,66	0,37	0,19	0,59
K2O (%)	1,18	1,41	0,11	1,35	0,07	1,1	0,64	0,06	0,16	1,34	1,27	0,61	2,18
Cr2O3 (%)	0,02	0,013	0,01	0,022	0,014	0,033	0,003	0,006	0,031	0,036	0,042	0,036	0,087
TiO2 (%)	0,99	0,69	0,26	0,99	0,89	1,26	1,1	0,42	1,02	1,74	1,71	1,52	2,16
MnO (%)	0,23	0,21	0,5	0,22	0,2	0,24	0,27	0,5	0,18	0,23	0,37	0,24	0,44
P2O5 (%)	3,57	3,67	5,32	3,7	4,96	3,26	5,66	3,67	4,48	3,62	3,48	4,22	2,1
SrO (%)	0,58	0,8	1,57	0,57	0,45	0,66	0,39	0,64	0,59	0,47	0,46	0,63	0,29
BaO (%)	0,19	0,15	1,18	0,14	0,07	0,17	0,1	0,17	0,49	0,08	0,23	0,39	0,09
C (%)	7,83	8,16	7,27	8,05	7,01	7,59	6,52	7,61	7,21	6,75	6,74	6,05	4,02
S (%)	0,49	0,71	1,67	0,42	0,05	0,55	0,22	1,16	0,61	0,39	0,52	0,42	1,29
LOI (%)	29,3	28,8	24,4	28,7	30,4	28,1	24,7	25,8	27,6	24,8	25,2	24	15
Total (%)	98,12	98,1	94,9	98,99	101,28	98,41	98,32	98,16	98,05	98,26	97,36	100,67	95,41
Ce (ppm)	777	592	4110	733	1025	887	1120	474	726	746	790	960	466
Cr (ppm)	160	110	80	190	110	230	30	50	220	270	320	250	640
Cs (ppm)	0,69	0,82	0,14	0,72	0,36	0,7	0,46	0,25	0,16	1,08	1,22	0,51	1,72
Dy (ppm)	25	18,4	30,6	24,7	31,6	23,1	42,7	11,65	26,8	24,5	21,9	28,3	11,7
Er (ppm)	8,19	6,57	6,74	8,17	9,6	7,63	13,25	3,08	8,57	7,85	6,74	8,85	3,68
Eu (ppm)	18,8	13,2	38	18,4	24,1	17,3	29,1	10,9	18,3	17,8	17,05	21,2	9,38
Ga (ppm)	9,9	10,5	24,6	11,2	14,4	11,1	12,5	8,8	8,5	13	12,5	14,7	15,8
Gd (ppm)	42	32,2	83,1	45,8	56,6	39,1	69,9	24,3	45,4	42,3	38	48,7	21,5
Ge (ppm)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Hf (ppm)	4,6	3	0,7	5,4	5,4	4,8	11	1,2	4,4	5,9	4,5	6,8	5,4
Ho (ppm)	3,67	2,95	3,67	3,85	4,69	3,74	6,63	1,59	4,13	3,8	3,36	4,11	1,69
La (ppm)	333	282	2620	316	430	433	443	195	302	311	339	426	193,5
Lu (ppm)	0,58	0,5	0,21	0,54	0,61	0,56	0,8	0,13	0,61	0,5	0,45	0,56	0,21
Nb (ppm)	327	219	2500	306	150,5	484	147,5	2500	205	368	280	288	650
Nd (ppm)	386	279	1310	381	504	390	606	242	387	376	389	484	233
Pr (ppm)	93	71,6	395	95,1	126,5	100,5	142	60,2	92,3	90,9	96,2	119,5	57,9
Rb (ppm)	29,2	43,3	1,6	36,7	1,6	30,3	19,4	2,2	4,4	37,5	37,8	16,2	66,9
Sm (ppm)	67,2	45,9	160	64,2	88,2	64,7	111,5	39,5	69,3	67,3	67,3	80,4	38,4
Sn (ppm)	3	2	8	3	4	3	2	4	3	4	4	5	4
Sr (ppm)	4300	7170	10000	4990	3190	5050	2980	5550	4510	3560	3520	5570	2410
Ta (ppm)	11,7	8	18,8	13,4	9,4	15,7	13,9	38,7	21,3	11,1	10,4	10,9	9,7
Tb (ppm)	5,33	3,96	8,02	5,46	6,88	4,75	8,65	2,78	5,49	5,08	4,41	6	2,6
Th (ppm)	47,1	22,9	121	46,9	42,8	54	62	10,8	39,6	55,1	42,7	34	46,1
Tm (ppm)	0,88	0,75	0,57	0,93	1	0,91	1,38	0,31	1,02	0,84	0,78	0,95	0,45
U (ppm)	17,95	26,8	21,5	18,45	4,52	17,1	6,6	25,5	24,1	13,35	10,9	17,2	7,52
V (ppm)	118	199	272	146	103	128	143	99	165	194	194	210	248
W (ppm)	1	1	2	1	1	2	1	7	2	1	2	2	6
Y (ppm)	89,5	74,1	83	90,2	112	87	148,5	35,9	95,9	86,9	78,1	103	42,7
Yb (ppm)	4,38	4	2,15	4,42	4,8	4,12	6,93	1,39	4,45	3,92	3,39	4,79	1,8
Zr (ppm)	283	223	24	330	376	299	1170	39	243	384	263	398	261
As (ppm)	1	1,6	1	1,7	2,4	0,5	2,1	1,4	1,8	2,6	0,8	0,5	0,9
Bi (ppm)	0,04	0,03	0,42	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03	0,09	0,02
Hg (ppm)	0,005	0,008	0,012	0,013	0,005	0,005	0,008	0,007	0,01	0,005	0,005	0,02	0,012
In (ppm)	0,064	0,057	0,069	0,055	0,051	0,057	0,044	0,059	0,08	0,045	0,069	0,086	0,036
Re (ppm)	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Sb (ppm)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06
Se (ppm)	3	2,5	3,1	3,2	3,7	2,6	4,2	1,3	3,7	3,4	2,7	3	1,1
Te (ppm)	0,02	0,09	0,27	0,06	0,03	0,05	0,02	0,11	0,08	0,05	0,05	0,07	0,1
Tl (ppm)	0,1	0,12	0,02	0,12	0,07	0,11	0,05	0,02	0,02	0,15	0,19	0,05	0,51
Ag (ppm)	0,6	0,8	2,5	0,7	0,5	0,6	0,5	0,9	0,5	0,5	0,6	0,5	0,8
Cd (ppm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5	1,2	1,4
Co (ppm)	26	14	27	21	22	29	18	29	22	27	36	24	89
Cu (ppm)	31	16	51	27	29	31	19	44	25	37	25	51	72
Li (ppm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20	30
Mo (ppm)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ni (ppm)	76	40	19	65	50	93	4	6	85	121	125	102	356
Pb (ppm)	33	16	234	44	22	55	11	40	25	40	50	162	143
Sc (ppm)	12	10	30	13	9	15	6	48	13	15	18	23	22
Zn (ppm)	85	92	94	100	96	80	110	92	93	133	190	138	334
ETRL (ppm)	1675	1283,7	8633	1607,7	2197,8	1892,5	2451,6	1021,6	1594,9	1609	1698,55	2091,1	998,18
ETRP (ppm)	90,03	69,33	135,26	93,87	115,78	83,91	150,24	45,23	96,47	88,79	79,03	102,26	43,63
ETRT (ppm)	1765,03	1353,03	8768,26	1701,57	2313,58	1976,41	2601,84	1066,83	1691,37	1697,79	1777,58	2193,36	1041,81

Anexo 3. Análises geoquímicas do gnaiss encaixante.

Amostra	20	45	39	23	42	55	1	7	6	5
Litologia	G	G	G	G	G	G	G	G	G	G
SiO2 (%)	59,6	33	36,7	47,6	48,6	49,7	52,7	55,8	56,7	61,5
Al2O3 (%)	16,05	8,74	9,3	13,15	16,95	15,05	16,05	16,95	16,9	13,75
Fe2O3 (%)	6,05	11,05	11,3	9,98	8,06	6,7	7,56	7,71	7,73	4,72
CaO (%)	3,99	16,7	14,8	9,07	5,54	6,47	6,64	4,06	3,77	3,99
MgO (%)	1,34	6,51	7,09	5,97	2,52	3	4,72	4,99	4,75	2,54
Na2O (%)	8,31	3,03	1,73	4,05	4,07	5,45	3,93	4,43	4,67	5,66
K2O (%)	0,77	2,48	4,03	1,24	4,76	3,92	2,2	3,03	2,43	1,4
Cr2O3 (%)	0,003	0,026	0,053	0,033	0,002	0,006	0,02	0,021	0,022	0,014
TiO2 (%)	1,26	2,75	3,07	1,98	1,88	2,01	0,88	0,87	0,9	0,57
MnO (%)	0,06	0,24	0,3	0,16	0,18	0,13	0,07	0,08	0,07	0,06
P2O5 (%)	0,51	1,17	0,82	0,4	0,53	0,88	0,48	0,5	0,55	0,27
SrO (%)	0,23	1,19	0,3	0,1	0,35	0,14	0,15	0,14	0,16	0,1
BaO (%)	0,28	1,69	0,29	0,14	0,56	0,37	0,28	0,12	0,19	0,28
C (%)	0,59	2,94	2,33	1,3	1,11	1,18	0,86	0,29	0,27	0,8
S (%)	0,3	1,25	0,11	0,35	0,13	0,11	0,02	0,12	0,1	0,13
LOI (%)	2,26	11,15	9,5	6,82	6,33	6,02	6,03	2,47	3,16	4,92
Total (%)	100,71	99,73	99,28	100,69	100,33	99,85	101,71	101,17	102	99,77
Ce (ppm)	292	371	241	102,5	269	239	104,5	68,7	130,5	104,5
Cr (ppm)	30	190	380	230	20	80	180	180	190	100
Cs (ppm)	0,21	1,36	1,53	0,54	0,47	0,71	0,35	0,66	0,75	0,26
Dy (ppm)	6,98	10,55	10,3	4,39	8,28	7,48	4,02	2,81	4,14	1,94
Er (ppm)	3,33	4,18	4,62	1,94	2,65	2,88	1,98	1,16	1,86	0,8
Eu (ppm)	3,58	6,36	5,47	2,98	5,24	5,28	2,36	2,08	2,6	1,86
Ga (ppm)	19,4	18	21,9	20,3	23	19,6	23,9	22,2	22,6	17,2
Gd (ppm)	9,54	15,2	14,35	5,73	11,3	11	6,27	4,67	7,11	3,8
Ge (ppm)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Hf (ppm)	5,6	5,3	10,5	4,8	5,4	6,6	6,5	4,8	6	4,4
Ho (ppm)	1,27	1,72	1,77	0,76	1,32	1,2	0,76	0,48	0,77	0,33
La (ppm)	150	184	120,5	51	123,5	114	50,2	32,6	64,6	57
Lu (ppm)	0,35	0,32	0,46	0,2	0,21	0,26	0,22	0,13	0,2	0,08
Nb (ppm)	104,5	181,5	110	41	141,5	138,5	7,9	7	28,2	34
Nd (ppm)	104,5	156	103	45,9	109	108,5	48,9	36,1	63,1	42,4
Pr (ppm)	29,2	38,8	26,8	11,55	29,9	26,4	12,55	8,82	15,85	11,4
Rb (ppm)	11,9	63,7	89,2	24,2	74,3	64,5	55,4	70,2	60	17,5
Sm (ppm)	15,35	23,9	18,6	9,02	17,35	17,05	8,94	6,34	10,75	6,23
Sn (ppm)	1	4	3	3	3	3	3	1	3	1
Sr (ppm)	1775	9410	2430	781	2810	1225	1270	1120	1350	825
Ta (ppm)	3,6	10,6	5	2	6	6,4	0,1	0,1	0,2	0,2
Tb (ppm)	1,31	2,16	1,88	0,83	1,62	1,52	0,79	0,53	0,85	0,4
Th (ppm)	14,3	5,73	11,9	3,08	14,4	5,58	1,28	0,78	1,34	4,97
Tm (ppm)	0,45	0,46	0,53	0,28	0,34	0,39	0,27	0,19	0,28	0,14
U (ppm)	1,77	4,05	1,93	0,66	0,8	1,01	1,22	0,33	0,49	0,53
V (ppm)	152	260	305	218	233	198	141	147	146	76
W (ppm)	1	3	1	1	3	1	2	2	2	2
Y (ppm)	32,9	46,6	47,5	20,4	30,3	30,9	19,2	12,8	19,7	8,8
Yb (ppm)	2,18	2,64	3,14	1,5	1,84	1,82	1,54	0,97	1,41	0,54
Zr (ppm)	269	208	435	204	216	255	267	198	248	176
As (ppm)	0,5	0,3	0,3	0,6	0,9	0,2	0,2	0,1	0,1	0,5
Bi (ppm)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,03
Hg (ppm)	0,013	0,01	0,005	0,012	0,01	0,005	0,005	0,013	0,006	0,018
In (ppm)	0,051	0,05	0,05	0,046	0,043	0,051	0,038	0,032	0,039	0,028
Re (ppm)	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Sb (ppm)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Se (ppm)	0,4	0,5	0,3	0,6	0,6	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2
Te (ppm)	0,04	0,06	0,01	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04
Tl (ppm)	0,03	0,15	0,27	0,05	0,04	0,08	0,04	0,12	0,21	0,03
Ag (ppm)	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Cd (ppm)	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Co (ppm)	10	33	37	34	11	18	14	24	22	15
Cu (ppm)	78	68	14	44	3	86	6	30	16	14
Li (ppm)	10	20	10	20	10	10	20	10	20	10
Mo (ppm)	1	11	1	1	1	1	1	1	1	1
Ni (ppm)	7	90	160	95	8	23	69	77	67	39
Pb (ppm)	3	83	16	20	22	16	2	8	11	10
Sc (ppm)	3	16	18	19	3	6	15	23	17	8
Zn (ppm)	36	127	167	99	112	77	99	109	99	57
ETRL (ppm)	594,63	773,7	515,37	222,95	553,99	504,95	227,45	154,64	287,4	223,39
ETRP (ppm)	25,41	43,59	37,05	15,63	27,56	31,83	15,85	10,94	16,62	8,03
ETRT (ppm)	620,04	817,29	552,42	238,58	581,55	536,78	243,3	165,58	304,02	231,42

Anexo 4. Análises geoquímicas. (C) Carbonatito; (S) Saprólito; (R) Rejeito; (T/G) Tremolíticos e glimmeritos; (c) concentrado.

Amostra	62	61	59	60	58	57	22	21	44	56	43
Litologia	Cc	Cc	R	R	SCc	SCc	S.T/G	S.T/G	SC	SC	SC
SiO2 (%)	3,06	3,14	10,85	10,95	3,41	3,5	36,3	56,3	21,8	22	23,3
Al2O3 (%)	0,37	0,37	1,64	1,67	0,34	0,33	10,75	8,46	7,36	7,17	7,9
Fe2O3 (%)	1,87	1,85	5,34	4,99	1,12	1,09	21,7	13,8	19,7	20	19,15
CaO (%)	47	48,3	36,1	35,2	49,5	49,9	4,94	1,12	18,05	18,25	17,55
MgO (%)	2,42	2,41	8,3	8,38	0,54	0,56	6,38	4,42	3,37	3,65	3,61
Na2O (%)	0,23	0,24	0,33	0,23	0,34	0,21	1,64	0,85	0,46	0,52	0,46
K2O (%)	0,13	0,13	0,7	0,69	0,05	0,03	0,82	0,31	0,13	0,13	0,14
Cr2O3 (%)	0,002	0,002	0,01	0,009	0,004	0,002	0,002	0,118	0,01	0,01	0,013
TiO2 (%)	0,07	0,07	0,75	0,77	1,13	1,16	6,03	4,28	0,72	0,71	0,81
MnO (%)	0,07	0,07	0,35	0,35	0,11	0,1	0,27	0,21	0,76	0,75	0,75
P2O5 (%)	32,9	33,7	1,08	1,11	35,4	35,2	2,92	0,58	14,4	14,2	13,6
SiO (%)	1,27	1,29	0,65	0,66	0,67	0,69	0,07	0,02	0,31	0,31	0,29
BaO (%)	0,68	0,68	0,35	0,35	0,71	0,69	0,08	0,06	0,32	0,3	0,29
C (%)	1,36	1,32	8,89	8,88	0,68	0,69	0,09	0,01	0,43	0,46	0,47
S (%)	1,08	1,05	0,51	0,5	0,16	0,16	0,05	0,01	0,02	0,03	0,07
LOI (%)	4,52	4,54	33,2	33,1	3,17	3,26	7,98	11,25	10,8	10,85	11,8
Total (%)	94,59	96,79	99,65	98,46	96,49	96,72	99,88	101,78	98,19	98,85	99,66
Ce (ppm)	2830	2870	465	476	3680	3400	384	161,5	1440	1510	1450
Cr (ppm)	40	50	100	100	50	40	20	850	100	110	100
Cs (ppm)	0,13	0,12	0,57	0,6	0,04	0,05	0,34	0,17	0,56	0,6	0,61
Dy (ppm)	106,5	105,5	15,85	15,95	120,5	118,5	16,4	8,7	57,2	57,8	55,6
Er (ppm)	26,4	26	5,5	5,17	32,6	32,3	6,27	3,52	17,65	17,55	17,2
Eu (ppm)	79,6	81,6	11,1	11,1	92,1	86,9	10,35	5,84	38,4	39,5	38,6
Ga (ppm)	17,4	17,5	8,6	8,5	20,5	20,4	26,5	19,9	27,9	27,7	26,6
Gd (ppm)	199,5	196,5	25,3	24,5	223	214	24,2	13	95,1	96,1	94,5
Ge (ppm)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Hf (ppm)	4,2	4,2	4,5	4,3	35,8	35,7	9,6	7,5	11	12,9	12
Ho (ppm)	14,2	13,7	2,46	2,41	16,55	16,45	2,64	1,5	8,39	8,49	8,34
La (ppm)	1225	1250	208	213	1655	1535	158,5	89,2	627	651	627
Lu (ppm)	1,02	1,05	0,36	0,37	1,63	1,72	0,5	0,32	1,13	1,08	1,1
Nb (ppm)	37,5	36,5	387	368	309	312	136	88,5	396	420	436
Nd (ppm)	1640	1675	227	236	2010	1895	191	103,5	796	811	765
Pr (ppm)	360	365	53	55,5	456	424	46,9	25,4	176,5	183	184
Rb (ppm)	3,7	3,6	19,3	19,6	0,9	0,8	15	6	6,1	6,3	5,7
Sm (ppm)	286	296	36,5	37,2	331	312	34,5	19,25	138,5	142	138,5
Sn (ppm)	2	2	4	3	3	3	5	4	8	9	10
Sr (ppm)	10000	10000	5580	5490	5810	5770	576	174	2560	2610	2280
Ta (ppm)	3,1	3	23,4	22	15,2	15,1	8,6	4,2	30,5	30,4	29,8
Tb (ppm)	24,3	23,9	3,35	3,34	27,2	26	3,04	1,69	12,3	12,2	11,25
Th (ppm)	36	35,9	23,9	25,1	78	71,9	5,65	6,48	23	22,3	24,5
Tm (ppm)	2,4	2,45	0,64	0,64	3,2	3,2	0,73	0,46	1,93	1,85	1,88
U (ppm)	5,49	5,78	19,4	19,85	14,05	13,65	1,19	1,61	14,95	16,1	15,05
V (ppm)	26	22	73	65	108	101	497	318	280	302	259
W (ppm)	1	1	3	3	2	1	3	7	3	3	3
Y (ppm)	339	333	61,5	61,9	396	391	64,9	37,9	213	217	191,5
Yb (ppm)	9,89	8,84	3,25	3,24	14,65	14,9	4,09	2,52	9,27	9,87	8,98
Zr (ppm)	258	259	305	299	2100	2130	308	244	615	735	710
As (ppm)	7,8	9	0,1	0,1	8,5	8,6	0,8	1,1	12,6	13	12,4
Bi (ppm)	0,75	0,56	0,06	0,05	0,13	0,1	0,02	0,05	0,27	0,29	0,32
Hg (ppm)	0,014	0,005	0,005	0,005	0,011	0,005	0,005	0,014	0,026	0,021	0,034
In (ppm)	0,023	0,023	0,071	0,076	0,034	0,035	0,124	0,096	0,36	0,362	0,345
Re (ppm)	0,028	0,027	0,002	0,002	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Sb (ppm)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,11	0,07
Se (ppm)	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,4	1,1	0,7	0,2	0,2	0,6
Te (ppm)	0,29	0,32	0,09	0,09	0,08	0,08	0,05	0,2	0,45	0,5	0,41
Tl (ppm)	0,02	0,03	0,08	0,07	0,02	0,02	0,02	0,03	0,14	0,13	0,14
Ag (ppm)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,7
Cd (ppm)	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,9	0,8	1,8
Co (ppm)	14	16	23	18	2	3	51	73	52	49	44
Cu (ppm)	63	61	22	23	6	7	40	126	57	57	56
Li (ppm)	10	10	10	10	10	10	40	40	20	20	10
Mo (ppm)	196	175	17	14	4	3	1	1	4	4	3
Ni (ppm)	31	32	44	45	17	17	2	315	125	118	131
Pb (ppm)	426	419	53	48	82	82	22	10	295	261	260
Sc (ppm)	3	2	16	16	11	11	19	32	48	46	47
Zn (ppm)	63	59	74	75	17	16	178	141	266	259	267
ETRL (ppm)	6341	6456	989,5	1017,7	8132	7566	825,25	404,69	3178	3297	3203,1
ETRP (ppm)	463,81	459,54	67,81	66,72	531,43	513,97	57,87	31,71	241,37	244,44	198,85
ETRT (ppm)	6804,81	6915,54	1057,31	1084,42	8663,43	8079,97	883,12	436,4	3419,37	3541,44	3401,95