



GEOQUÍMICA E MINERALOGIA DOS ELEMENTOS TERRAS RARAS NO DEPÓSITO DE NIÓBIO DE SEIS LAGOS (AMAZONAS): AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO POTENCIAL PARA EXPLOTAÇÃO COMO SUBPRODUTOS

Porto Alegre, 2015

Maurício Harm Bidone

**GEOQUÍMICA E MINERALOGIA DOS ELEMENTOS TERRAS RARAS NO
DEPÓSITO DE NIÓBIO DE SEIS LAGOS (AMAZONAS): AVALIAÇÃO
PRELIMINAR DO POTENCIAL PARA EXPLOTAÇÃO COMO SUBPRODUTOS**

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(a): Artur Cezar Bastos Neto

Porto Alegre,
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Bidone, Maurício Harm

Geoquímica e mineralogia dos elementos terras raras no depósito de nióbio de Seis Lagos (Amazonas): avaliação preliminar do potencial para exploração como subprodutos. / Maurício Harm Bidone. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2015.
[91 f.] il.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Graduação em Geologia. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2015.

Orientador(es): Artur Cezar Bastos Neto
Coorientador(es): Vitor Paulo Pereira

1. ETR 2. Laterita 3. Carbonatito 4. Bacia Esperança I. Título.

CDU 55

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Veleida Ana Blank

CRB 10/571

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Campus do Vale Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre - RS - Brasil

CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001.

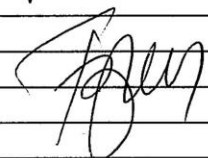
Fone: +55 51 3308-6329 Fax: +55 51 3308-6337

E-mail: bibgeo@ufrgs.br

GEO-03015 - PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

Título da Monografia: GEOQUÍMICA E MINERALOGIA DOS ELEMENTOS TERRAS RARAS NO DEPÓSITO DE NIÓBIO DE SEIS LAGOS (AMAZONAS): AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO POTENCIAL PARA EXPLOTAÇÃO COMO SUBPRODUTOS.	
Autor: Maurício Harm Bidone	
Orientador(es): Prof. Dr. Arthur Cezar Bastos Neto	
Nota Final (1 até 10):	9,0
Examinador: Profa. Tania Mara Martini de Brum	Data: 02/12/2015

1. O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia? Sim (x). Não (). Em parte ()
2. O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia ? Sim (x). Não (). Em parte ()
3. As ilustrações são úteis e adequadas? Sim (x). Não (). Em parte ()
4. O manuscrito apresenta estrutura organizada? Sim (<). Não (). Em parte ()
5. A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia? Sim (x). Não (). Em parte ()
6. Os materiais e métodos são descritos adequadamente? Sim (x). Não (). Em parte ()
7. Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente? Sim (x). Não (). Em parte ()
8. As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos? Sim (<). Não (). Em parte ()
9. As referências são convenientes e usadas adequadamente? Sim (<). Não (). Em parte ()
10. O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)? Sim (<). Não (). Em parte ()


Comentários:
Otimo trabalho.
Atende as exigências de uma monografia de conclusão de curso de graduação.


GEO-03015 - PROJETO TEMÁTICO EM GEOLOGIA III

Título da Monografia:	Geoquímica e mineralogia dos elementos terras raras no depósito de nióbio de seis lagos como zonas de evolução preliminar do potencial para o enriquecimento como subprodutos	
Autor:	Maurício Norm Bidone	
Orientador(es):	Artur Cezar Bastos Leite	
Nota Final (1 até 10):	9,5	
Examinador:	Luiz Alberto Vedana	Data: 02/12/2013

1. O título é informativo e reflete o conteúdo da monografia? Sim (X). Não (). Em parte ().
2. O resumo do trabalho informa sobre os tópicos essenciais da monografia? Sim (X). Não (). Em parte ()
3. As ilustrações são úteis e adequadas? Sim (X). Não (). Em parte ()
4. O manuscrito apresenta estrutura organizada? Sim (X). Não (). Em parte ()
5. A introdução apresenta os fundamentos para o restante do texto da monografia? Sim (X). Não (). Em parte ()
6. Os materiais e métodos são descritos adequadamente? Sim (X). Não (). Em parte ()
7. Os resultados são de qualidade e mostrados concisamente? Sim (X). Não (). Em parte ()
8. As interpretações e conclusões são baseadas nos dados obtidos? Sim (X). Não (). Em parte ()
9. As referências são convenientes e usadas adequadamente? Sim (X). Não (). Em parte ()
10. O manuscrito possui boa redação (digitação, ortografia e gramática)? Sim (X). Não (). Em parte ().

Comentários: ótimo trabalho, excelente apresentação. texto denso poderia ser melhor sintetizado nas discussões e conclusões, contudo, muito bom aquisição e tratamento de dados.



Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador e amigo Artur Cezar Bastos Neto pela oportunidade de trabalharmos juntos ao longo dos últimos quatro anos, agradeço ao Professor e amigo Vitor Paulo Pereira pelas boas conversas e ensinamentos, agradeço ao doutorando e amigo Arthur Lemos Giovannini pela paciência e imensurável apoio nestes anos de colegas de projeto.

Agradeço também, a todos os bons professores do curso de geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, amigos de dentro e fora da universidade, minha família que sempre me deu muito apoio em todas as minhas decisões, boas ou ruins, e por último a minha namorada Francyne Bochi do Amarante por estar do meu lado durante os momentos bons, e principalmente os difíceis destes anos de graduação.

Resumo

O ferrocarbonatito de Seis Lagos sofreu intensa fluidização rica em elementos terras raras (ETR), alterando e gerando uma capa de laterita que segura o relevo do morro, podendo atingir em algumas partes uma espessura de 250m. Associado a esta laterita, a CPRM verificou a existência do maior depósito de Nb já encontrado no mundo, e ainda constatou a existência de concentrações anômalas de elementos terras raras. O Morro de Seis Lagos possui três diferentes contextos geológicos, o primeiro é o carbonatito propriamente dito e sua forma alterada, chamada neste trabalho de brecha carbonática. O segundo é a crosta laterítica que constitui o minério de Nb e ainda possui média de 1,75% de ETR_2O_3 , principalmente na forma de cerianita $((\text{Ce,Th})\text{O}_2)$. O terceiro é representado por uma bacia de origem cárstica, chamada pela CPRM de Bacia Esperança, onde esta empresa encontrou teores anômalos de ETR. Neste trabalho foram detectados teores de ETR_2O_3 de até 3,1%, e com média de 1,68% ao longo de toda a Bacia Esperança, concentrados na forma de florencita $(\text{CeAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6)$, o que amplia a perspectiva da reserva em relação as expectativas da CPRM. Foi reconhecido em Seis Lagos além da cerianita e florencita, a monazita $((\text{Ce,La,Nd,Th,Ca})\text{PO}_4)$, bastnaesita $(\text{Ce}(\text{CO}_3)\text{F})$, thorbastnaesita $(\text{Th}(\text{Ca,Ce})(\text{CO}_3)_2\text{F}_2 \cdot 3(\text{H}_2\text{O}))$ como minerais de ETR. Entre eles a florencita e a cerianita se caracterizam por serem minérios de elementos terras raras leves (ETRL). Embora a monazita apresente alta concentração de cério (Ce), sua quantidade dentro do depósito não é satisfatória para caracterizar um mineral de minério. Além dos minerais de ETR foram encontrados minerais portadores destes elementos, como o pirocloro $((\text{Ca,Na})_2(\text{Nb,Ti,Ta})_2\text{O}_6(\text{OH,F,O}))$ e gorceixita $(\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6)$. O pirocloro é o mineral que melhor representa a evolução da alteração dentro do depósito e possivelmente foi o mineral que disponibilizou os ETR para o sistema. O carbonatito de Seis Lagos possui teores mais elevados de elementos terras raras pesados (ETRP), do que as outras litologias do

depósito, isto abre a possibilidade de estes elementos terem sido remobilizados de maneira similar ao depósito de Mount Weld (Austrália), e estarem concentrados na base da crosta laterítica, onde as sondagens não alcançaram.

Palavras Chave: ETR. Laterita. Carbonatito. Bacia Esperança.

Abstract

The iron carbonatite of Seis Lagos underwent through intense fluidization rich in rare earth elements (REE), altering and generating a laterite cover which sustains the hill's relief, and which reaches in some parts a thickness of 250 m. CPRM confirmed the existence of the greatest Nb deposit ever found in the world associated with this laterite, and also found the existence of anomalous concentrations of rare earth elements. The Morro de Seis Lagos has three different geological settings, the first is the carbonatite itself and its altered form, that in this work is called carbonate breccia. The second is the lateritic crust that forms the Nb ore and has an average of 1.75% of ETR_2O_3 , mostly in the form of cerianite $((\text{Ce}, \text{Th}) \text{O}_2)$. The third is represented by a basin of karstic origin, named Bacia Esperança by CPRM, where this company encountered anomalous concentrations of REE. In the current work there were detected ETR_2O_3 levels up to 3.1%, and an average of 1.68% through the entire Bacia Esperança, concentrated in the form of florencite $(\text{CeAl}_3 (\text{PO}_4)_2 (\text{OH})_6)$, which exceeds CPRM's expectations on the reservation. It was recognized in Seis Lagos, besides cerianite and florencite, as ETR minerals, monazite $((\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th}, \text{Ca}) \text{PO}_4)$, bastnaesite $(\text{Ce} (\text{CO}_3) \text{F})$, thorbastnaesite $(\text{Th} (\text{Ca}, \text{Ce}) (\text{CO}_3)_2 \text{F}_2 \cdot 3 (\text{H}_2\text{O}))$. Among those, florencite and cerianite are characterized by being light rare earth elements (LREE) ores. Although monazite presents high cerium (Ce) concentration, its quantity in the deposit is not suitable to define a mineral ore. In addition to the REE minerals, it was found minerals bearing these elements, such as pyrochlore $((\text{Ca}, \text{Na})_2 (\text{Nb}, \text{Ti}, \text{Ta})_2 \text{O}_6 (\text{OH}, \text{F}, \text{O}))$ and gorceixite $(\text{BaAl}_3 (\text{PO}_4) (\text{PO}_3\text{OH}) (\text{OH})_6)$. The pyrochlore is the mineral that best represents the alteration evolution within the deposit, and it was possibly the mineral which provided the ETR to the system. The carbonatite Seis Lagos has higher concentrations of heavy rare earth elements (HREE) than the other lithologies of the deposit, and that opens the possibility for these elements to have been remobilized similarly to the Mount Weld deposit (Australia) and to have concentrated at the base of lateritic crust, where the drills have not reached.

Keywords: ETR. Laterite. Carbonatite. Bacia Esperança.

Índice de Figuras

Figura I. 1	Localização do Complexo Carbonatítico de Seis Lagos no mapa da América do Sul e no mapa geológico do NW do Estado do Amazonas (CPRM, 2005).....	18
Figura II. 1	Mapa geológico da província do Rio Negro com o Complexo Carbonatítico de Seis Lagos circulado em branco (Rossoni, 2012).	25
Figura II. 2	Localização dos Furos de Sondagem efetuados pela CPRM.....	30
Figura II. 3	Perfil laterítico e suas respectivas subdivisões,.....	32
	Modificado de (Giovannini, 2013)	32
Figura III. 1	Caminho percorrido desde a amostra bruta até a mesma em pó, pronta para ser enviada para análise.....	34
Figura III. 2	Equipamentos utilizados para as análises. a) Difrator SIEMENS D-5000; b) ICP-MS; c) Microscópio petrográfico Leica DMLP; d) JEOL-JSM5800; e) Jeol JXA-8230	38
Figura IV. 1	Localização e perfil do furo de sondagem SG-02-AM.....	39
Figura IV. 2	Fotomicrografia carbonatito de Seis Lagos; a) Oxidação característica do carbonatito de Seis Lagos; b) Barita preenchendo espaços intersticiais; c) Oxidação bordejando cristais de siderita; d) Oxidação preenchendo fraturas no cristal de siderita.....	41
Figura IV. 3	Gráfico de ETR das principais amostras do carbonatito.	43
Figura IV. 4	Imagem carbonatito em MEV, com agregados de monazita ao centro.	46
Figura IV. 5	Foto monazita (MEV), com principais picos de seus elementos.	46
Figura IV. 6	Gráfico ternário de substituições na monazita. Pontos pretos: Monazita carbonatito; Pontos vermelhos: Monazita brecha carbonática.	49
Figura IV. 7	Distribuição de ETR's na monazita e no carbonatito.....	50
Figura IV. 8	Foto pirocloro (MEV), com principais picos de seus elementos.	51
Figura IV. 9	Gráfico ternário de substituições da gorceixita.....	54
Figura IV. 10	Gorceixita em MEV com principais picos de seus elementos.	54
Figura IV. 11	Localização e perfil furo de sondagem SG-04-AM.....	56
Figura IV. 12	Gráficos (<i>Spider</i>) comparativos entre a distribuição de elementos menores no carbonatito e brecha carbonática.....	58
Figura IV. 13	Gráficos comparativos de ETR no carbonatito e na brecha carbonática.	59
Figura IV. 14	Gráfico de dispersão do Bário em relação a vacância dos pirocloros da brecha carbonática e carbonatito.....	60

Figura IV. 15	Distribuição elem. Imóveis no carbonatito e brecha carbonática.....	61
Figura IV. 16	Thorbastnaesita (MEV) em agregado de microcristais.....	64
Figura IV. 17	Gráfico de dispersão da vacância pelo balanço de cargas dos pirocloro da brecha carbonática	66
Figura IV. 18	Monazita (MEV), brecha carbonática.....	67
Figura IV. 19	Gráfico de distribuição de ETR na monazita (14_C1_Mon_1) em relação a distribuição de ETR na amostra 14 da brecha carbonática.	67
Figura IV. 20	Figura de localização e perfil do furo de sondagem SG-04-AM.	69
Figura IV. 21	Fotografias de amostras representativas das 5 fácies de argilas da bacia Esperança. a) Argila Caulinítica; b) Argila carbonosa; c) Sedimento argiloso; d) Argila carbonosa mais oxidada; e) Argila carbonosa mais argila caulinítica.....	72
Figura IV. 22	fósforo X ETR, mostrando que estes elementos possuem correlação positiva entre eles.....	73
Figura IV. 23	Distribuição dos principais elementos ao longo dos argilitos da Bacia Esperança.	74
Figura IV. 24	Imagem ao MEV da florencita da Bacia Esperança (ponto 2), e argilas (Ponto 1) com suas respectivas análises.	75
Figura IV. 25	24 Imagem ao MEV de microcristais anédricos de florencita da Bacia Esperança (ponto 1), e argilas (Ponto 2) com suas respectivas análises.....	76
Figura IV. 26	Localização e perfil furo de sondagem SG-01-AM.....	77
Figura IV. 27	Perfil laterítico com teor médio de ETR por crosta.....	78
Figura IV. 28	(a) Goetita cortada por veio de holandita e Cerianita (mineral branco). (b) Intercrescimento de holandita e Cerianita dentro de veio cortando a goethita	79
Figura IV. 29	Pirocloro e respectiva análise (MEV).	81
Figura IV. 30	Florencita e respectiva análise (MEV).....	81
Figura V. 1	Comparação entre a distribuição de ETR entre a monazita do carbonatito e da brecha carbonática.	83
Figura V. 2	Gráfico comparativo do <i>trend</i> de ETR no carbonatito e brecha carbonática	83
Figura V. 3	Gráfico de distribuição de Lantânio por Thório na monazita do carbonatito.	85
Figura V. 4	Gráfico de distribuição de Cério pela vacância no pirocloro do depósito de Seis Lagos.....	86
Figura V. 5	Gráfico de distribuição de ETR nas análises químicas das amostras de carbonatito.....	87
Figura V. 6	Modelo usado por Bonow & Issler (1980) para calcular a tonelagem da fácies argila carbonosa da Bacia Esperança.....	89
Figura V. 7	Gráfico de distribuição de ETR no carbonatito em relação as subdivisões da crosta laterítica feitas por Giovannini (2013).	91

Índice de Tabelas

Tabela I. 1	Previsão de suprimento e demanda de ETR para 2016 (Hatch, 2012)	15
Tabela IV. 1	Análises química carbonatito de Seis Lagos	40
Tabela IV. 2	Análise de monazita por microsonda eletrônica e fórmula estrutural.	44
Tabela IV. 3	Análises de pirocloro por microsonda eletrônica e fórmula estrutural.	48
Tabela IV. 4	Análises de microsonda e fórmula estrutural da gorceixita.	51
Tabela IV. 5	Análises de microsonda Bastnaesita e Thorbastnaesita.	59
Tabela IV. 6	Fórmula estrutural Cerianita.	76

Índice de Quadros

Quadro IV. 1 Síntese de dados do estudo das argilas da bacia Esperança: profundidade das amostras, mineralogia identificada por difratometria de raios x, porcentagem de elementos terras raras leves (ETRL), pesados (ETRP), somatório de ETR e média de ETR por intervalo..... 70

Quadro V. 1 Teores médios de ETR por litologia e principais minerais de ETR..... 88

Quadro V. 2 Teores de ETR, principais minerais portadores e situação do projeto dos principais depósitos de ETR no mundo..... 85

Sumário

I– Introdução.....	17
I.1- Localização e vias de acesso.....	18
I.2 - Caracterização do Problema.....	19
I.3 – Objetivos e metas.....	22
II – Estado da Arte	23
II.1 – Geologia Regional (Província do Rio Negro – Complexo Cauaburi).....	23
II. 2 –Complexo Carbonatítico de Seis Lagos e Depósito Morro dos Seis Lagos.....	28
III - Metodologia e Métodos.....	33
III.1 Preparação de amostras	33
III.2 Difractometria de Raios X	34
III.3 Análise química por ICP-MS.....	35
III.4 Petrografia em lâmina delgada.....	36
III.5 Microscopia eletrônica de varredura.....	37
III.6 Microsonda eletrônica.....	37
IV - Resultados	39
IV.1 Carbonatito de Seis Lagos.....	39
V.1.1 Descrição	40
V.1.2 Geoquímica.....	42
V.1.3 Mineralogia.....	45
V.1.4 Minerais de ETR.....	45
IV.3 Brecha Carbonática	56
IV.3.1 Geoquímica	57
IV.3.2 Mineralogia.....	62
IV.3 Argilas da Bacia Esperança	69
IV.3.1 Descrição das fácies argilosas	70
IV.3.2 Geoquímica	72
IV.3.3 Mineralogia.....	75

IV.4 Laterita.....	77
IV.4.1. Geoquímica.....	78
IV.4.2 Mineralogia.....	78
V- Discussão	82
VI- Conclusão	92
VII- Referências Bibliográficas	94

I– Introdução

O Morro de Seis Lagos foi descoberto durante as atividades do projeto RADAM-BRASIL, no início dos anos 70, quando os geólogos tiveram sua atenção voltada para três estruturas circulares, que se destacavam na selva e que apresentaram anomalias radiométricas de até 15.000cps. Estas estruturas foram interpretadas como sendo três chaminés vulcânicas e este conjunto já recebeu diversas denominações diferentes, entre elas Distrito de Seis Lagos, Complexo Carbonatítico de Seis Lagos e Alcalinas de Seis Lagos. Neste trabalho é adotado o nome de Complexo Carbonatítico de Seis Lagos quando referido ao conjunto das três estruturas circulares, e Morro de Seis Lagos quando referido ao corpo principal.

Em 1975, a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) realizou estudos na área a partir de quatro furos de sondagem efetuados no Morro de Seis Lagos, cujos resultados foram apresentados no Projeto Seis Lagos (Viégas Filho & Bonow, 1976). Neste estudo, os autores revelaram a existência do maior depósito de Nb até hoje encontrado no planeta, o depósito do Morro de Seis Lagos, com uma reserva estimada de 81.431.237 toneladas de Nb_2O_5 , com um teor médio de 2,81%, cuja gênese foi tentativamente associada à lateritização de carbonatito. O depósito apresenta também concentrações anômalas de elementos terras raras (ETR), principalmente de Ce e La, e de Y, V, Sc, Zn, Be, Mn e Fe, que na época não despertaram maior interesse.

Mais recentemente, a China, responsável pelo abastecimento de 95% do mercado mundial de ETR, anunciou uma mudança na sua política de produção e venda de ETR gerando uma corrida mineral pelos ETR, tanto pela descoberta de novos depósitos, como pela exploração dos ETR como subprodutos de jazidas de outros bens minerais. Este fato renovou o interesse pelo depósito do Morro de Seis Lagos, que está sendo reestudado, não apenas para ETR, pelo grupo de pesquisa da UFRGS Mineralogia e Geoquímica de Depósitos Minerais. Neste estudo, que é realizado com o apoio do CNPq e em cooperação com a CPRM, enquadra-se a

presente monografia de conclusão de curso de graduação em geologia, que é focada nos minerais de ETR presentes no depósito do Morro de Seis Lagos.

I.1- Localização e vias de acesso

O Morro de Seis Lagos localiza-se no município de São Gabriel da Cachoeira, no noroeste do Estado do Amazonas, próximo às fronteiras com a Venezuela e Colômbia (Fig.I.1). A área pertence à folha NA19-Z-D-V e o acesso à cidade de São Gabriel da Cachoeira pode ser realizado por via aérea ou fluvial partindo da capital Manaus. De lá, segue-se por 65 km pela estrada BR-307, que liga São Gabriel da Cachoeira a Cucuí. Ao chegar à ponte sobre o igarapé la-Mirim, segue-se 8 km, por via fluvial, até o sopé do morro dos Seis Lagos. O presente trabalho foi realizado a partir de testemunhos de sondagem, não tendo sido realizados trabalhos de campo.

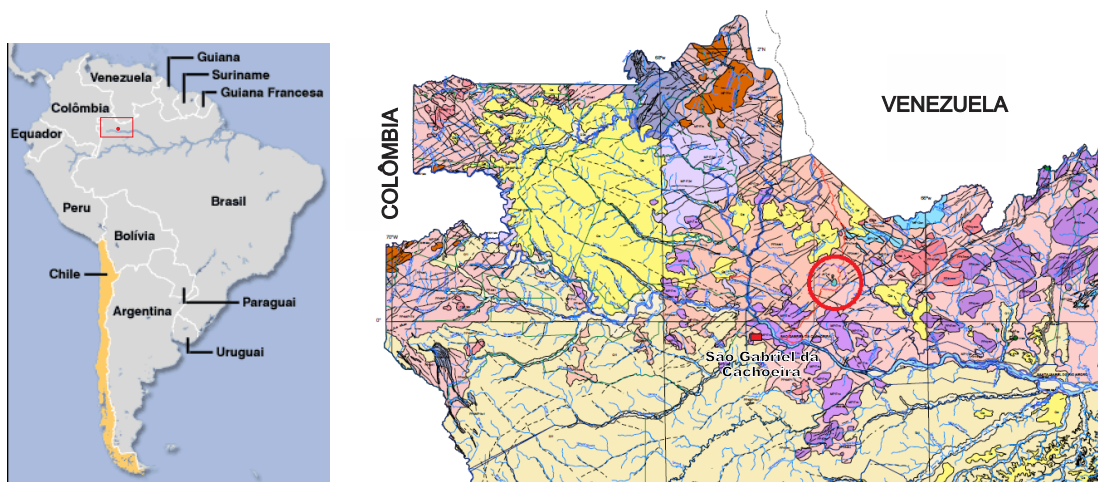


Figura I. 1 Localização do Complexo Carbonatítico de Seis Lagos no mapa da América do Sul e no mapa geológico do NW do Estado do Amazonas (CPRM, 2005).

I.2 - Caracterização do Problema

Devido ao grande número de aplicações em variados tipos de indústrias e processos, a demanda por ETR é imensa. Estes elementos não podem ser considerados elementos raros, pois estão presentes em baixas concentrações nos mais variados tipos de rocha. Entretanto, a formação de concentrações economicamente exploráveis é rara. Em termos geoquímicos, os ETR são divididos em elementos terras raras leves (ETRL) e elementos terras raras pesados (ETRP). Tanto os ETRP como os ETRL têm grande importância tecnológica e alto valor comercial. Comparativamente, os ETRP são mais valiosos do que os ETRL, devido a serem menos abundantes e a alguns elementos, especialmente pelo Dy, terem aplicações muito específicas. Entretanto, em termos de quantidade demandada pelo mercado atualmente ou na previsão para 2016 (Fig. I.2), os ETRL ainda são muito mais importantes do que os ETRP. Conforme Chakhmouradian (2012) os carbonatitos são destacadamente as rochas mais favoráveis para a prospecção de ETR e seu maior potencial é para ETRL. Há casos onde os ETR são explorados (seja como principal produto ou como subproduto) diretamente do carbonatito ou a partir de crosta laterítica desenvolvida pela alteração do carbonatito. Explica-se, assim, a renovação do interesse pelo depósito do Morro de Seis Lagos acima referida.

Tabela I. 1 Previsão de suprimento e demanda de ETR para 2016 (Hatch, 2012)

RE O	Demand © 150-170 kt/y TREO	Supply © 180-210 kt/y TREO
CeO ₂	60-70 kt	75-85 kt
Nd ₂ O ₃	25-30 kt	30-35 kt
Eu ₂ O ₃	625-725 t	450-550 t
Tb ₄ O ₇	450-550 t	300-400 t
Dy ₂ O ₃	1.5-1.8 kt	1.3-1.6 kt
Y ₂ O ₃	12-14 kt	9-11 kt

No caso do depósito do Morro de Seis Lagos, a investigação dos ETR, seja em termos de composição geoquímica de rocha/minério total ou de sua distribuição mineralógica, deve focar 3 contextos diferentes.

O primeiro contexto refere-se ao próprio carbonatito. A rocha primária que se alterou para formar o depósito laterítico do Morro de Seis Lagos foi tentativamente identificada no furo de sonda SG-02-AM como beforrito. Nenhum estudo sobre o conteúdo de ETR nesta ocorrência foi realizado pela empresa. Adicionalmente, o grupo da UFRGS verificou que a rocha descrita pela CPRM como brecha carbonática no furo SG-04-AM também se trata de siderita carbonatito. O estudo da brecha carbonática foi o tema da pesquisa de Iniciação Científica realizada por este autor (Bidone et al. 2013, SIC) anteriormente à presente monografia. Siderita carbonatito é um tipo muito raro de carbonatito e, ao nosso conhecimento, não existe nenhum estudo deste tipo de carbonatito voltado para seu conteúdo de ETR, o que reveste o presente trabalho de grande interesse científico.

O segundo contexto refere-se à crosta laterítica que constitui o minério de Nb. A CPRM constatou a existência de concentrações anômalas de ETR em testemunhos da crosta, mas, como estes elementos não despertavam interesse na época, não realizou estudos adicionais. Há que se realizar, portanto, estudos geoquímicos complementares e todo o estudo petrográfico e de química mineral voltado para os ETR associados à crosta laterítica. A jazida de ETR de Mount Weld na Austrália (Lottermoser, B.G & England, B.M.,1988; Lottermoser B.G., 1990), associada à lateritização de carbonatito, representa o principal caso análogo a ser comparado com o da mineralização de ETR associada ao depósito do Morro de Seis Lagos.

O terceiro contexto é representado pela bacia Esperança, nome dado pela CPRM a uma bacia de origem cárstica ou por abatimento associado a lateritização, que ocorre na parte central do Morro dos Seis Lagos. Na seção superior da bacia ocorre uma camada de argila com 70m de espessura com concentrações de até 3,1% de ETR₂O₃. A natureza desta mineralização de ETR não foi investigada pela CPRM. Ao iniciarmos este trabalho, tínhamos em mente 3 possibilidades para a formação desta mineralização. Os ETR podem estar (1) adsorvidos à argila, como nas mineralizações do tipo ion adsorption (Wang L., Xu C., Zhao Z., Song W., Kynicky J., 2015) exploradas na China, (2) podem estar contidos em minerais de ETR ou portadores de ETR do carbonatito e/ou da crosta, que foram erodidos e

depositados na bacia juntamente com as argilas e (3) podem estar contidos em minerais de ETR formados dentro da camada de argilas. Nenhuma das possibilidades excluiria as demais.

I.3 – Objetivos e metas

O objetivo geral deste trabalho é caracterizar a distribuição geoquímica e mineralógica dos ETR no depósito Morro de Seis Lagos. O principal resultado esperado deste estudo é que ele represente uma significativa contribuição para a avaliação da viabilidade de exploração dos ETR como subprodutos do minério de Nb do depósito Morro de Seis Lagos.

Para atingir este objetivo, as seguintes metas devem ser alcançadas:

- a) caracterização geoquímica e mineralógica da distribuição dos ETR no siderita carbonatito do furo SG-02-AM;
- b) caracterização geoquímica e mineralógica da distribuição dos ETR no siderita carbonatito do furo SG-04-AM (brecha carbonática);
- c) caracterização geoquímica e mineralógica da distribuição dos ETR nas camadas de argila da bacia Esperança;
- d) elaboração de modelos evolutivos do comportamento dos ETR em cada um dos contextos acima;
- e) integração dos modelos de cada contexto e elaboração de um modelo integrado do comportamento dos ETR no depósito Morro de Seis Lagos.

II – Estado da Arte

II.1 – Geologia Regional (Província do Rio Negro – Complexo Cauaburi)

O Complexo Alcalino Seis Lagos (Isler, 1980) está localizado no Cráton Amazonas (Santos et al. 2003), na província Rio Negro (Fig. II.1). Segundo Santos (2000, 2003 e 2006), o Cráton Amazonas apresenta sete províncias geocronológicas (Província Carajás, Província Amazônia Central, Província Transamazonas, Província Tapajós-Parima, Província Rio Negro, Província Rondônia-Juruena e província Sunsás). O trabalho revisará apenas a Província Rio Negro, na qual o Complexo Carbonatítico de Seis Lagos está inserido.

Esta província situa-se no setor noroeste do cráton, abrangendo no Brasil a maior parte da Bacia do Rio Negro, estendendo-se pelo SE da Colômbia (Guainia) e SW da Venezuela (bacias dos rios alto Orenoco, Ventuari e Cassiquiare) (Santos et al. 2000). É uma das regiões menos habitadas e conhecidas geologicamente do mundo, correspondente a quatro domínios, dois dos quais no Brasil, um na Venezuela (Ventuari) e outro na Colômbia (Guainia). No Brasil um está situado mais a noroeste (Domínio Alto Rio Negro), correspondendo à região conhecida como Cabeça-de-Cachorro, fazendo fronteira com Colômbia e Venezuela, e outro, mais a leste, chamado de Domínio Imeri (região entre o rio Negro e Venezuela). A principal distinção entre esses dois domínios é que o Domínio Imeri está muito mais afetado pelos cisalhamentos NE-SW K'Mudku (1,1 – 1,2 Ga, Barron 1966), enquanto no Domínio Alto Rio Negro diferentes estruturas pré-K'Mudku estão preservadas. A província faz limite a leste com a faixa orogênica Tapajós– Parima (2,05–1,87 Ga) enquanto seus limites para oeste, sudoeste e noroeste com a faixa orogênica Sunsás (1,42–1,00 Ga) não estão bem estabelecidos devido à escassez de informações e devido à presença de extensiva cobertura sedimentar cenozóica que inclui isolados inliers de embasamento. De forma simplificada, a província é

composta por quatro grupos principais de unidades: o embasamento do final do Paleoproterozóico, Estateriano (Cauaburi, ca. 1,80 Ga); granitóides de um primeiro arco continental (Suíte Marauíá, ca. 1,70 Ga); os granitoides mesoproterozóicos, calimianos (suítes Igarapé Reilau, Rio Içana, Marauíá, Uaupés, Tiquié e Marié-Mirim, 1,54–1,51 Ga); e os restos localizados de espessas seqüências de quartzitos e quartzo-arenitos, metamorfizados ou não, das unidades Tunuí, Neblina, Daraã e Aracá (1,70–1,33 Ga) (Santos, 2003).

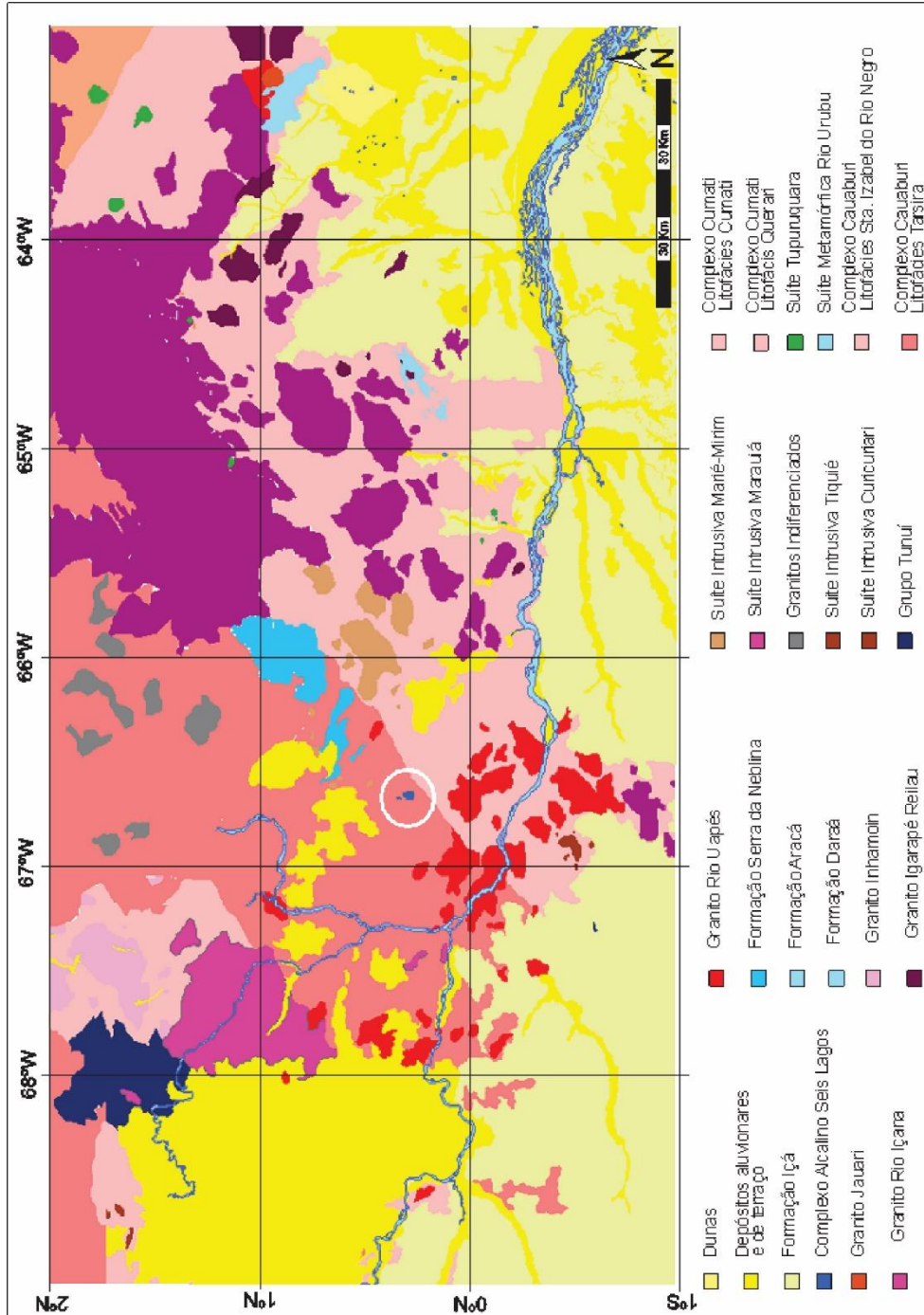


Figura II. 1 Mapa geológico da província do Rio Negro com o Complexo Carbonatítico de Seis Lagos circulado em branco (Rossoni, 2012).

O Embasamento da província Rio Negro compreende rochas tonalíticogranodioríticas foliadas ou bandadas, agrupadas no Complexo Cauaburi, que são intrudidas pelos granitóides das Suítes Igarapé Reilau, Rio Içana, Marauiá, Uaupés, Tiquié, Marié- Mirim e Tapuruquara e recoberto por rochas (meta) sedimentares das Formações Neblina, Daraá e Aracá e do Grupo Tunuí. No Domínio Serra Imeri, Brito et al. (2000) incluem biotita-hornblendagranodioritos e monzogranitos, com raros tonalitos e enclaves quartzo-dioríticos, além de metagranitóides e gnaisses com similar variação composicional e milonitos gerados sob condições de fácies xisto verde. Os granitoides colisionais tipo Uaupés (1,55 Ga) e Marauiá (1652 ± 57 , Rb-Sr), notadamente quando afetados pelos cisalhamentos K'Mudku (1,33 Ga), são de difícil distinção dos granitóides tipo Cauaburi, não tendo sido ainda estabelecidos critérios consistentes (estruturais e composicionais) para distinguir as rochas das duas unidades. O que leva à consideração de que a distribuição do Embasamento Cauaburi ainda não está bem estabelecida em mapas (Santos, 2003).

De acordo com Almeida et al. (2002), o embasamento do domínio Imeri encontra-se representado pelo Complexo Cauaburi, formado pelas litofácies Santa Izabel do Rio Negro (a leste) e Tarsira (a oeste). Possui direção estrutural preferencial NE-SW assinalada pelo alinhamento das serras Urucuzeiro, Imeri e Tapirapécó, além de faixas internas com deformação heterogênea desenvolvida no seu embasamento, evidenciada por extensos lineamentos associados a expressivas zonas de cisalhamento. A direção NW-SE é mais restrita e é marcante nos alinhamentos das serras Curupira e Aracá, encontrando-se com forte inflexão na proximidade do contato com o principal padrão NE-SW. O complexo atinge localmente o metamorfismo da fácies anfíbolito, sendo constituído predominantemente por magmatismo de caráter cálcio-alcálico expandido, embora predominem termos mais félsicos representados por (meta)granitóides e gnaisses com idades de cristalização em torno de 1,80 Ga (Santos et al., 2000; CPRM 2003). De acordo com Almeida et al. (2004), o domínio também é caracterizado por intrusões graníticas do tipo A representadas pelas suítes Marauiá e Marié-Mirim no intervalo 1,76–1,75 Ga, registrando ainda evidências de heranças de 1,80-1,78 Ga relacionadas ao embasamento Cauaburi. Os granitos tipo S da suíte Igarapé Reilau possuem idade estabelecida entre 1,54 e 1,52 Ga e importantes registros de heranças de rochas do

embasamento mais antigo. Idade em monazita metamórfica demonstra que a deformação e o metamorfismo responsáveis pelo espessamento crustal e geração da granitogênese tipo S pode ter se estendido no tempo até 1,42 Ga, ou representar por exemplo, ainda um novo evento (Grenvilliano?). Santos et al. (2006a) associam o metamorfismo de 1,49-1,42 Ga ao evento K´Mudku (1,34-1,00 Ga). A Formação Aracá, por sua vez, registra uma deformação que atingiu a fácies xisto verde, com evidência local de metamorfismo na fácies anfibolito. Essas rochas metassedimentares, também materializadas pelas formações Serra da Neblina e Daraá, apresentam tramas deformacionais ao longo de zonas de cisalhamento dúctil sob condições da fácies xisto verde.

II. 2 –Complexo Carbonatítico de Seis Lagos e Depósito Morro dos Seis Lagos

O complexo está representado na forma de três estruturas aproximadamente circulares. O corpo maior denominado “Morro dos Seis Lagos” possui 5,50 km de comprimento por 4,50 km de largura, enquanto que as menores apresentam diâmetro de 0,75 e 0,50 km, respectivamente. Morfológicamente é um relevo pseudo-cárstico, cuja estrutura maior revela diversas depressões por colapso, seis das quais, apresentando lagos que conduziram à denominação “Morro dos Seis Lagos”.

Rossoni (2012) utilizou técnicas de sensoriamento remoto para entender as estruturas que controlam o posicionamento do Morro de Seis Lagos. Para isso integrou os resultados obtidos a partir de um modelo digital de terreno, imagem de satélite Francês SPOT, e de dados geofísicos (aeromagnetométrico). De acordo com o autor, os dados geofísicos obtidos não deixam dúvidas de que o corpo carbonatítico é controlado por uma estrutura principal de direção E-W, identificada por aeromagnetometria, e contínua por mais de 250km, sendo intersectada pelo cruzamento das faixas estruturais NE-SW e NW-SE, sendo estas últimas estruturas apontadas pela CPRM (2006) e por Santos (2003) como sendo os trends principais das estruturas existentes na província Rio Negro.

De acordo com o mapa geológico do Estado do Amazonas, elaborado pela CPRM (Pinheiro et al., 1976), o Complexo Carbonatítico de Seis Lagos, é correlacionado ao período Juro-Cretáceo. A idade de 160Ma é inferida, pois não existe nenhuma datação isotópica do carbonatito.

Em 1975 a CPRM, além de levantamentos geofísicos e geoquímicos, efetuou quatro sondagens rotativas na área (Fig. II.2), cujos resultados constam em Projeto Seis Lagos (Viégas Filho & Bonow, 1976). O Furo SG-01-AM (Furo 1) avançou até 225m, e cortou em toda sua extensão laterita mineralizada. O Furo SG-02-AM (Furo 2), cortou 34m de laterita não mineralizada, logo em seguida cortou a rocha encaixante e, em 230m, penetrou material descrito na época como rocha com

carbonatos (beforsito?). Este material foi confirmado por Giovaninni (2013) como sendo uma apófise de ferrocarbonatito. O Furo SG-03-AM (Furo 3) cortou 9m de laterita mineralizada, 40m de crosta argilosa e, em seguida, perfurou o gnaiss encaixante e foi interrompido a 110m de profundidade. O Furo SG-04-AM (Furo 4), o mais profundo, com 493m. Este furo, que está localizado na bacia Esperança, é abaixo apresentado com um pouco mais de detalhe.

O furo SG-04-AM cortou inicialmente um pacote de material argiloso no qual a CPRM que identificou 5 diferentes fácies, são elas: argila caulínica (9,30-14,50m), argila carbonosa (16,40- 70,00m), sedimento argiloso (78,00-93,00m), argila carbonosa mais oxidada (99,80-119m) e argila carbonosa mais argila calcífera (133,00-166,55m). Bonow & Isler identificaram concentrações anômalas de ETR no intervalo 14,75m a 73,10m e estimaram de modo preliminar uma reserva de 7.838.879t de minério bruto de ETR nesta seção. De 73,10m até 230m, o furo penetrou variações de argila carbonosa, em alguns momentos com textura brechóide, até chegar à uma brecha carbonática que se estende de 230m até o fim do furo (493m). Esta brecha foi interpretada por Issler (1980) e Bonow e Issler (1980) como sendo carbonatito alterado.

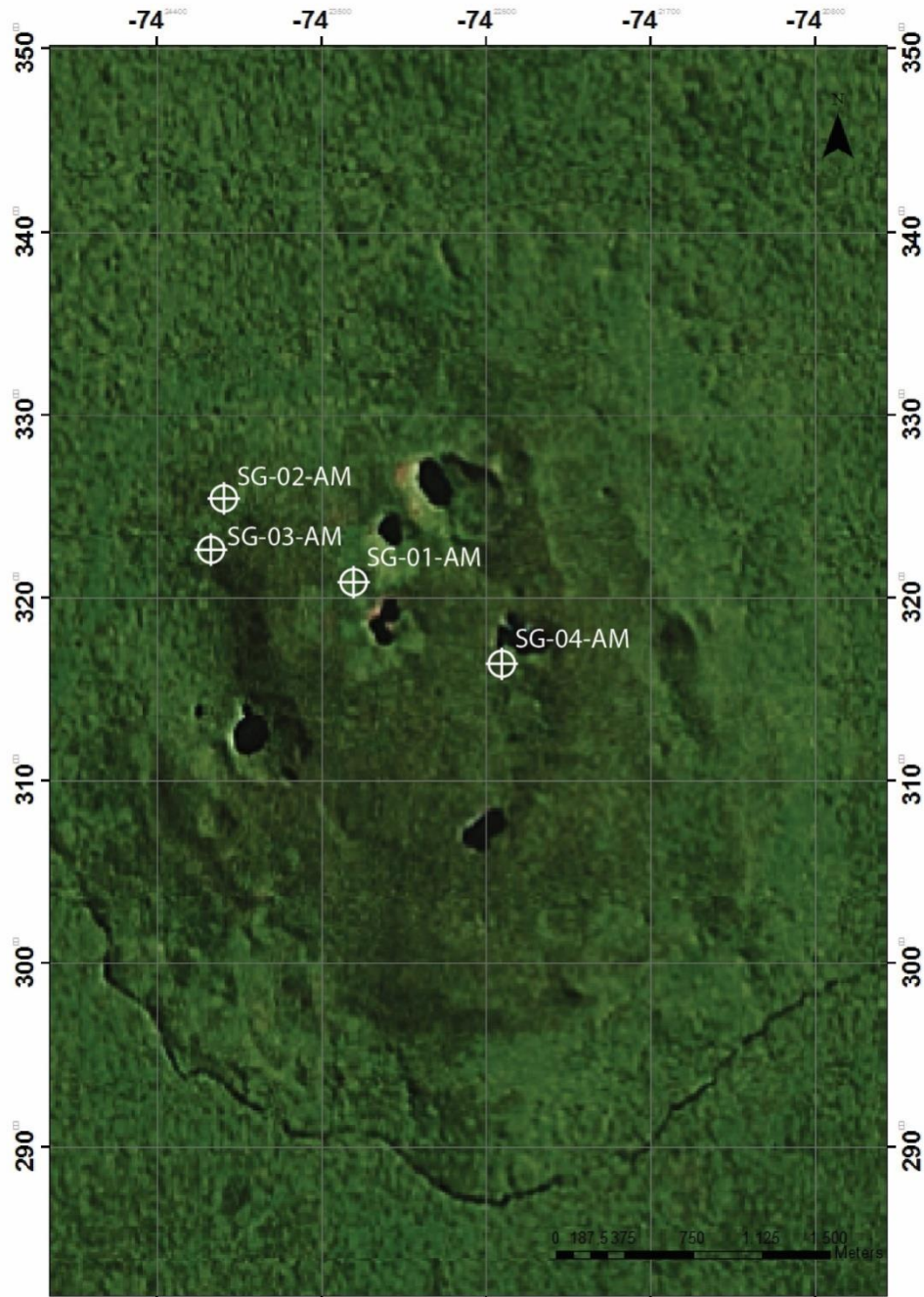


Figura II. 2 Localização dos Furos de Sondagem efetuados pela CPRM.

Corrêa (1995) e Corrêa & Costa (1997) realizaram os primeiros estudos científicos sobre Seis Lagos. Por motivos não esclarecidos, estes pesquisadores não tiveram, aparentemente, acesso aos testemunhos das sondagens. Para realizar o estudo, dispuseram de um grande número de amostras superficiais coletadas nos perfis de geoquímica de solo realizados pela CPRM. Entretanto, dos furos de sonda,

receberam apenas as alíquotas das amostras analisadas pela CPRM e somente dos Furos 1, 2 e 4 da primeira fase de sondagem. Mesmo sem poderem identificar, caracterizar e interpretar as texturas do minério, os referidos autores produziram importantes dados mineralógicos e geoquímicos (incluindo isótopos de O e C, especialmente da brecha carbonática do furo 4). Identificaram diversos minerais presentes no perfil laterítico do morro de Seis Lagos, caracterizando este como constituído essencialmente por minerais de ferro (hematita, goetita) com alguns acessórios localmente importantes, como, hollandita, romanechita, pirolusita, lithioforita, florencita, cerianita, gibbsita, ilmeno-rutilo, brookita niobífera e rutilo niobífero, além de monazita, zircão e quartzo. A paragênese foi considerada indicativa de que o substrato do morro dos Seis Lagos seria constituído por carbonatito. Os dados químicos da laterita foram comparados com dados químicos de carbonatitos de outras localidades e considerados típicos de alteração deste tipo de rocha. Baseados principalmente nos dados isotópicos (C e O) que teriam uma variabilidade muito grande para um carbonatito, os autores concluíram que a brecha carbonática da base do Furo 4 seria sedimento lacustre e não carbonatito alterado.

Giovaninni (2013) analisou amostras desta sondagem e com base em análises de microscopia ótica, de varredura e difração de raios x, este autor definiu o carbonatito como sendo um siderita carbonatito. Além disso, estabeleceu uma relação de gênese entre a crosta laterítica e o carbonatito subjacente a esta crosta. Com base nestas análises Giovaninni (2013) também identificou e caracterizou os principais minerais portadores dos minérios de Nb e reconheceu alguns dos minerais de ETR do carbonatito e da laterítica que são estudados detalhadamente no presente trabalho. O autor também definiu que a crosta laterítica existente sobre o morro de Seis Lagos tem características químicas e mineralógicas compatíveis com apófise de siderita carbonatito encontrada no Furo 2. A crosta laterítica foi subdividida por em sete tipos (Fig. II.3), de acordo com características texturais e mineralógicas, são elas: Crosta pisolítica (0-2,20m), Crosta fragmentada (2,20-9m e 17-19,75m), crosta mosqueada (9-17m), crosta roxa com oólitos (19,75-31m), crosta manganésifera (31-40m), crosta roxa (40-59m) e crosta marrom (59-100m).

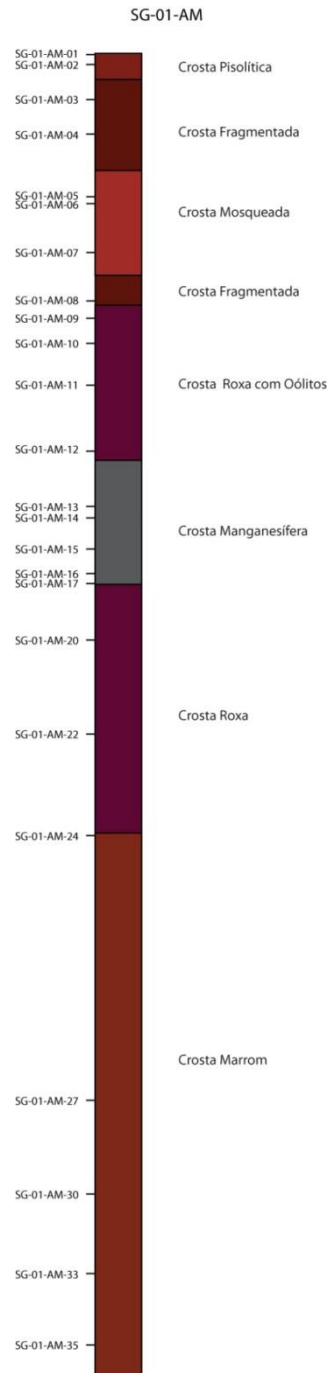


Figura II. 3 Perfil laterítico e suas respectivas crostas,
Modificado de (Giovannini, 2013)

III - Metodologia e Métodos

A metodologia para a execução do presente trabalho tem como ponto de partida uma ampla revisão bibliográfica associada à preparação das amostras, que foram obtidas na litoteca do DNPM de Manaus.

III.1 Preparação de amostras

Inicialmente as amostras foram moídas em graal de porcelana e ágata (Fig. III.1), a fim de serem analisadas por difratometria de raios X (DRX) para a identificação das fases minerais presentes. O mesmo material foi também encaminhado para análise química de rocha total. Dez Lâminas petrográficas foram confeccionadas pelo laboratório de lâminação da UFRGS com intuito de obter uma descrição petrográfica a nível de detalhe (principalmente do carbonatito), análises qualitativas por microscópio eletrônico de varredura e análises quantitativas por microsonda eletrônica. Parte das amostras dos argilas da bacia esperança previamente moídas foram decantadas conforme a lei de Stokes para separar a fração argila e assim também serem analisadas no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Além de amostras moídas, foi levado ao MEV lascas das argilas fixadas com fita de carbono a *stubs* metálicos.



Figura III. 1 Caminho percorrido desde a amostra bruta até a mesma em pó, pronta para ser enviada para análise

III.2 Difratometria de Raios X

A difração de raios X pelos cristais resulta de um processo em que os raios x são dispersos pelos elétrons dos átomos sem mudança de comprimento de onda (dispersão coerente ou de Bragg). Um feixe difratado é produzido por dispersão só quando algumas condições geométricas, expressas pela lei de Bragg, são satisfeitas.

A difração resultante de um cristal, compreendendo posições e intensidades das linhas de difração, é uma propriedade física fundamental da substância, servindo não só à identificação como também ao estudo de sua estrutura.

Este método foi utilizado para a identificação mineralógica do complexo, e determinação de espécies de argilominerais na área da bacia esperança. As

análises foram realizadas em rocha total, e, quando detectada a presença de argilominerais, foram submetidas a novas análises passando por processo de saturação com etileno-glicol (glicolada) e aquecimento a 550 °C durante duas horas (calcinadas), afim de precisar a identificação dos mesmos. A identificação mineralógica pelo método de difração de raio X foi realizada no Instituto de Geociências da UFRGS em difratômetro SIEMENS D-5000 (Fig. III.2a), utilizando radiação Cu-K (1,54 Å) e filtro de Ni, no intervalo entre 2 e 70° 2θ, com velocidade de 0,02°2θ por segundo. Para o tratamento dos dados dos difratogramas foi utilizado o programa Match 1.2(desenvolvido pela Crystal Impact).

III.3 Análise química por ICP-MS

ICP-MS (Fig. III.2b) é um tipo de espectroscopia de massa onde é possível detectar elementos químicos com concentrações muito pequenas (ppt). Isto é obtido pela ionização de uma amostra. Quando uma corrente elétrica varia ao passar por uma bobina se cria um campo magnético variável que produz correntes elétricas em um gás rarefeito. O argônio é um gás comumente usado para isso e fica eletricamente condutivo (ionizado) com o aquecimento indutivo ($\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{e}^-$). Com isso são geradas temperaturas na ordem de 6.000 a 10.000 graus Kelvin que fazem com que um material no estado sólido passe para o estado de plasma, que vai conter íons (partículas eletricamente carregadas). Este processo ocorre numa tocha formada por três tubos concêntricos, que são normalmente formados por quartzo. O plasma formado é parcialmente resfriado e canalizado e o líquido formado passa através de um nebulizador. As partículas (íons formados) são conduzidas para um espectrômetro de massa, onde os íons são separados com base na razão massa-carga e onde um detector recebe um sinal proporcional à concentração desses ions ($\text{M}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{M}$).

A concentração em uma amostra pode ser determinada com a calibração utilizando um padrão de referência. Isto assegura que a amostra permaneça

ionizada (como M^+) de modo que o espectrômetro de massa a possa detectar. Obviamente, o aparelho deve estar calibrado e ser frequentemente limpo.

Com o ICP podem ser analisados elementos com massa entre 7 e 250 (Li até U). Algumas massas não são determinadas como a 40 devido a abundância de Ar ou 80 devido ao dímero de Ar e a 56 devido ao ArO, sendo que esta dificulta a determinação de Fe nas amostras.

O ICP-MS é capaz de detectar os elementos químicos em concentrações de 10 a 100 miligramas por litro.

No presente trabalho, das setenta e três amostras referentes ao complexo carbonatítico de Seis Lagos, tanto do carbonatito propriamente dito como da brecha carbonática, laterita e argilas, setenta e uma amostras foram enviadas para a análise química por ICP-MS na ACME Labs. A grande maioria das amostras foram pré cominuídas no laboratório de processamento de amostras do instituto de geociências da UFRGS, e enviadas a ACME, sendo posteriormente moídas até a fração argila pelo próprio laboratório, afim de evitar contaminação. No caso das amostras das argilas da Bacia Esperança, devido a sua facilidade de cominuição até a fração argila, este processo foi inteiramente realizado no laboratório da UFRGS, usando apenas o graal de ágata.

III.4 Petrografia em lâmina delgada

A petrografia em lâmina delgada foi realizada em dez lâminas usando um microscópio petrográfico Leica DMLP (Fig. III.2c). Esta etapa do trabalho tem como principal objetivo a descrição de texturas do carbonatito, e tentar a partir delas descobrir um pouco de sua gênese e ordem de cristalização. Foi nesta etapa

também que foi feita a marcação de pontos a serem analisados posteriormente no microscópio eletrônico de varredura e microsonda eletrônica.

III.5 Microscopia eletrônica de varredura

Diversas sessões de MEV foram realizadas ao longo de 2 anos em dois locais diferentes, no Laboratório de geologia isotópica do IGEO-UFRGS, utilizando um equipamento JEOL JSM-6610LV, e no centro de microscopia eletrônica da UFRGS, utilizando um equipamento JEOL-JSM5800 (Fig. III.2d). Em todas as sessões as amostras foram metalizadas usando carbono, e devido aos elementos analisados serem ETR e possuírem massa atômica muito grande foi usado 20Kv de energia para realização das análises. Nestas sessões foram realizadas análises químicas pontuais qualitativas.

III.6 Microsonda eletrônica

Cinco sessões de microsonda eletrônica foram realizadas no laboratório de microsonda eletrônica da Universidade Federal de Brasília (UNB), o equipamento utilizado foi Jeol JXA-8230 (Fig. III.2e) com 5 espectrômetros WDS e um EDS. Os cristais analisadores disponíveis (TAPJ, LIF, LIFH, PETH, PETJ, LDE1 e LDE2) permitem que sejam dosados todos os elementos químicos com número atômico superior a 4, ou seja, a partir do elemento Boro. Para a realização das análises foram usados 3 programas diferentes. O intuito dos programas é conseguir distribuir todos os elementos a serem analisados entre todos os cristais analisadores, levando em consideração as limitações de cada cristal, cada programa abrange determinados elementos químicos que serão identificados por cada cristal de acordo

com o comprimento de onda emitido. As correntes usadas para as realizações das análises são de 15Kv para programas que leem a grande maioria dos elementos analisados e 20Kv para aqueles que realizam leituras em elementos terras raras, urânio, chumbo e tório.

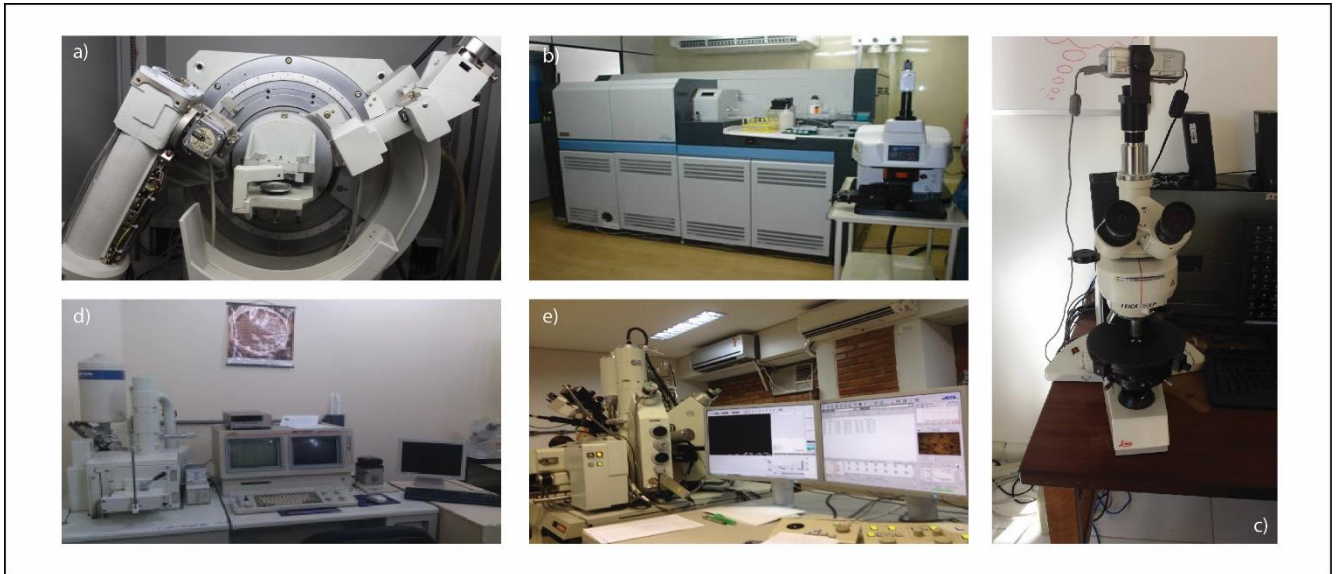


Figura III. 2 Equipamentos utilizados para as análises. a) Difratômetro SIEMENS D-5000; b) ICP-MS; c) Microscópio petrográfico Leica DMLP; d) JEOL-JSM5800; e) Jeol JXA-8230

IV – Resultados

Os resultados serão apresentados de maneira segmentada, conforme a litologia presente dentro do complexo e suas respectivas mineralogias.

IV.1 Carbonatito de Seis Lagos

Com o estudo do perfil laterítico do furo de sondagem SG-02-AM foi verificada a existência de um dique de carbonatito cortando a rocha encaixante a 225m de profundidade (fig. IV.1). Em relatório da CPRM, este carbonatito foi descrito como sendo um provável beforsito, porém GIOVANNINI (2013) verificou se tratar de um ferrocarbonatito, sendo a siderita o principal mineral carbonático.

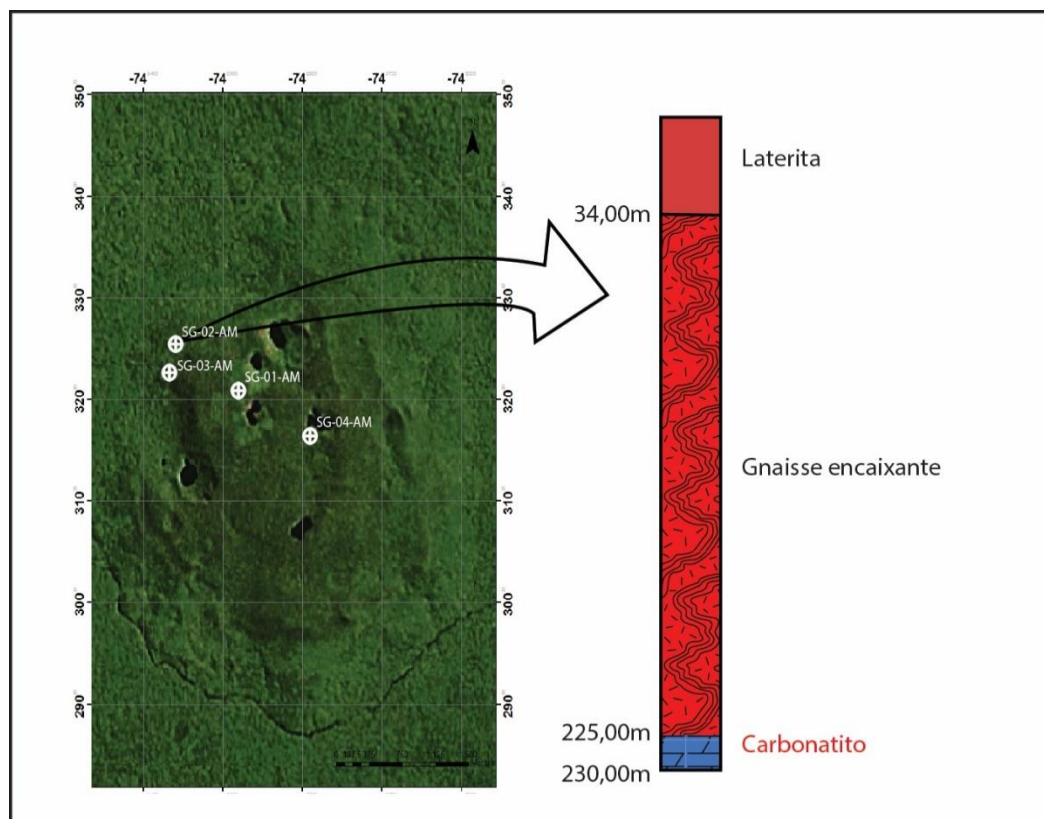


Figura IV. 1 Localização e perfil do furo de sondagem SG-02-AM.

V.1.1 Descrição

Macroscopicamente, o carbonatito de Seis Lagos possui coloração cinza o que confere uma aparência de ter sido fortemente hidrotermalizado.

Em lâmina petrográfica apresenta cristais de siderita (aproximadamente 70%) predominantemente subédricos, quebrados e dispostos aleatoriamente na rocha, algo semelhante a cristaloclastos. Estes cristais são inequigranulares possuem coloração bege à luz natural e polarizada, e variam de 150 até 800 μm , porém a maior parte apresenta tamanho entre 400 e 500 μm . A amostra está altamente oxidada. É possível observar a oxidação bordejando cristais de siderita e mais frequentemente nas fraturas dos mesmos (Fig. IV.2.c e d) . Em algumas porções mais localizadas da lâmina observa-se feições de corrosão pela oxidação (Fig. IV.2.a e b). Observa-se também a barita (aproximadamente 10%) preenchendo os espaços intersticiais (Fig. IV.2.b). Em certos locais da lâmina encontra-se aglomerados de microcristais altamente oxidados, não sendo possível reconhecer ao microscópio óptico a mineralogia original (Fig. IV.2.a).

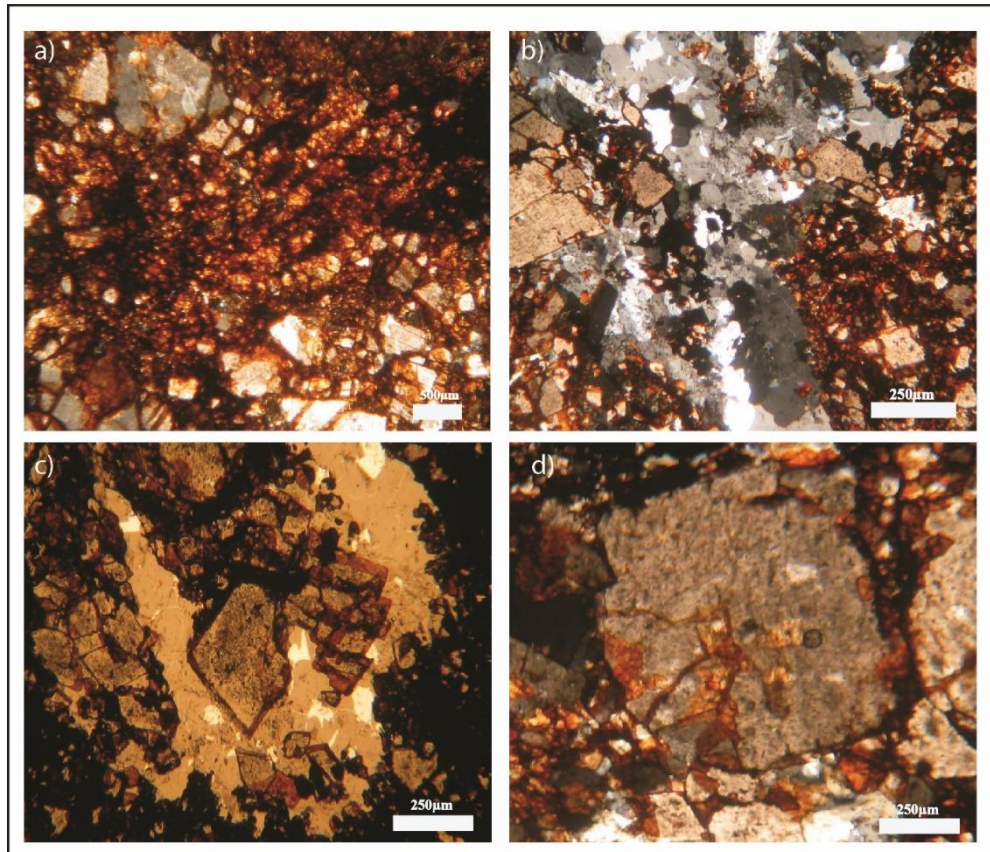


Figura IV. 2 Fotomicrografia carbonatito de Seis Lagos; a) Oxidação característica do carbonatito de Seis Lagos; b) Barita preenchendo espaços intersticiais; c) Oxidação bordejando cristais de siderita; d) Oxidação preenchendo fraturas no cristal de siderita.

V.1.2 Geoquímica

Para realizar as análises no siderita carbonatito, foram selecionadas 5 amostras entre o intervalo de 221m e 230m, são elas: SG-02-AM-53A, SG-02-AM-54A, SG-02-AM-54B, SG-02-AM-53C e SG-02-AM-54C. A partir dos resultados, apresentados na tabela IV.1, foi verificado na amostra SG-02-AM-54C, valores muito altos de SiO₂ e Al₂O₃ e teores baixos dos demais elementos quando em comparação com as demais amostras do intervalo. Considerando que esta amostra está no contato do carbonatito com o *augen* gnaissite encaixante, não deve ser representativa do carbonatito.

Com base nos resultados das análises químicas é possível verificar que o carbonatito caracteriza-se por apresentar teores relativamente altos de Fe₂O₃ (50%), LOI (24%), MnO (7%), Ba (>5%), e valores baixos de SiO₂ (0,36%), Al₂O₃ (1,15%), CaO (0,24%) e Na₂O (<0,01%).

Com relação aos ETR, o carbonatito apresenta enriquecimento relativo de ETRL (1314,37ppm) em relação aos ETRP (161,70ppm). Como é possível observar no gráfico abaixo (Fig. IV.3), existe um empobrecimento em La em relação aos outros ETRL. Realizando uma média dos ETRL do carbonatito chegamos ao valor de 1314,37ppm, quando comparado o La com esta média podemos afirmar que ele se apresenta 2,5 vezes mais empobrecido que esta média.

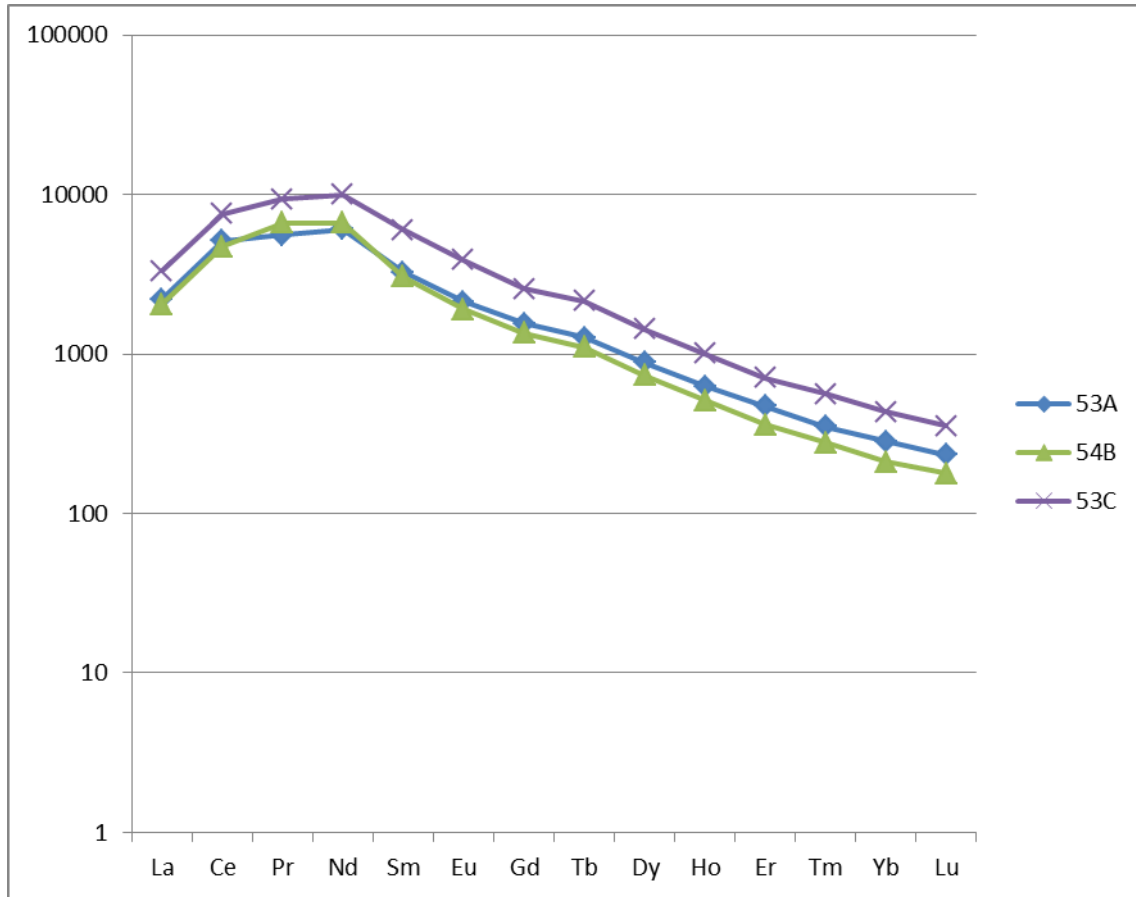


Figura IV. 3 Gráfico de ETR das principais amostras do carbonatito normalizadas ao condrito C1.

Tabela IV. 1 Análises química carbonatito de Seis Lagos

Amostras	SG-02-AM-53A	SG-02-AM-54A	SG-02-AM-54B	SG-02-AM-53C	SG-02-AM-54C
Prof. (m)	221,6				230,75
SiO ₂	1,58	0,32	0,36	0,38	16,62
Al ₂ O ₃	1,08	0,92	1,34	1,34	15,06
Fe ₂ O ₃	53,99	55,93	48,64	51,27	32,62
CaO	0,23	0,14	0,21	0,30	0,23
Na ₂ O	<0.01	<0.01	<0.01	0,01	<0.01
MnO	7,35	11,69	5,10	6,73	4,86
LOI	24,9	22,8	25,2	24,6	20,9
Ba	42371	28673	>50000	>50000	44280
Sr	305,0	475,3	1028,3	982,2	644,5
Nb	928,3	1102,8	1532,7	2291,6	754,7
La	522,4	183,5	483,8	783,4	678,4
Ce	3139,2	2986,5	2875,2	4604,8	1584,4
Pr	526,78	134,12	627,73	884,59	239,11
Nd	2813,6	709,8	3093,5	4662,4	1071,9
Sm	498,91	139,51	467,91	913,55	188,45
Eu	123,41	34,18	110,68	225,44	50,35
Gd	318,40	79,45	277,00	524,80	135,50
Tb	47,47	10,32	41,21	79,99	19,01
Dy	224,16	46,01	186,36	362,69	81,97
Ho	35,64	7,21	29,04	56,90	12,94
Er	78,24	17,80	59,77	117,23	28,07
Tm	8,92	2,20	7,07	14,26	3,22
Yb	48,17	12,44	35,98	73,58	16,90
Lu	5,90	1,58	4,54	8,99	2,03
Y	773,8	196,2	696,0	1292,2	303,4
ETR	8391,20	4364,62	8299,79	13312,62	4112,25
ETRL	1270,72	697,94	1276,47	2012,36	635,44
ETRP	152,79	117,99	102,25	234,93	192,26

V.1.3 Mineralogia

Através de análises por microscopia ótica, difração de raios x e microscopia eletrônica de varredura, foram identificados siderita, barita, gorceixita, monazita e pirocloro como minerais constituintes do carbonatito de Seis Lagos, sendo a siderita o principal mineral formador, representando 70% do mesmo.

V.1.4 Minerais de ETR

O carbonatito possui como principal mineral de ETR a monazita, porém estes elementos podem ser encontrados em menor quantidade em grande parte dos minerais que compõem a rocha. Além da monazita podemos destacar como principais minerais portadores destes elementos o pirocloro e a gorceixita.

V.1.4.1 Monazita

O fosfato de terras raras, monazita $(\text{Ce,La,Nd,Th})\text{PO}_4$, foi identificado primeiramente pela difração de raios x, e, posteriormente por análises de MEV e microsonda eletrônica. No depósito de Seis Lagos ela é o principal mineral de ETR e, além do carbonatito, é também encontrada na brecha carbonática.

A monazita cristaliza-se no sistema monoclínico e geralmente possui hábito prismático. Porém, em imagem por elétrons retroespalhados (backscattered electrons), realizadas pelo microscópio eletrônico de varredura, a monazita encontrada no carbonatito se apresenta em agregados (Fig. IV.4) com hábito fibrorradiado e representa aproximadamente 3% da rocha. Os cristais possuem em média 5 μm (Fig. IV.5).

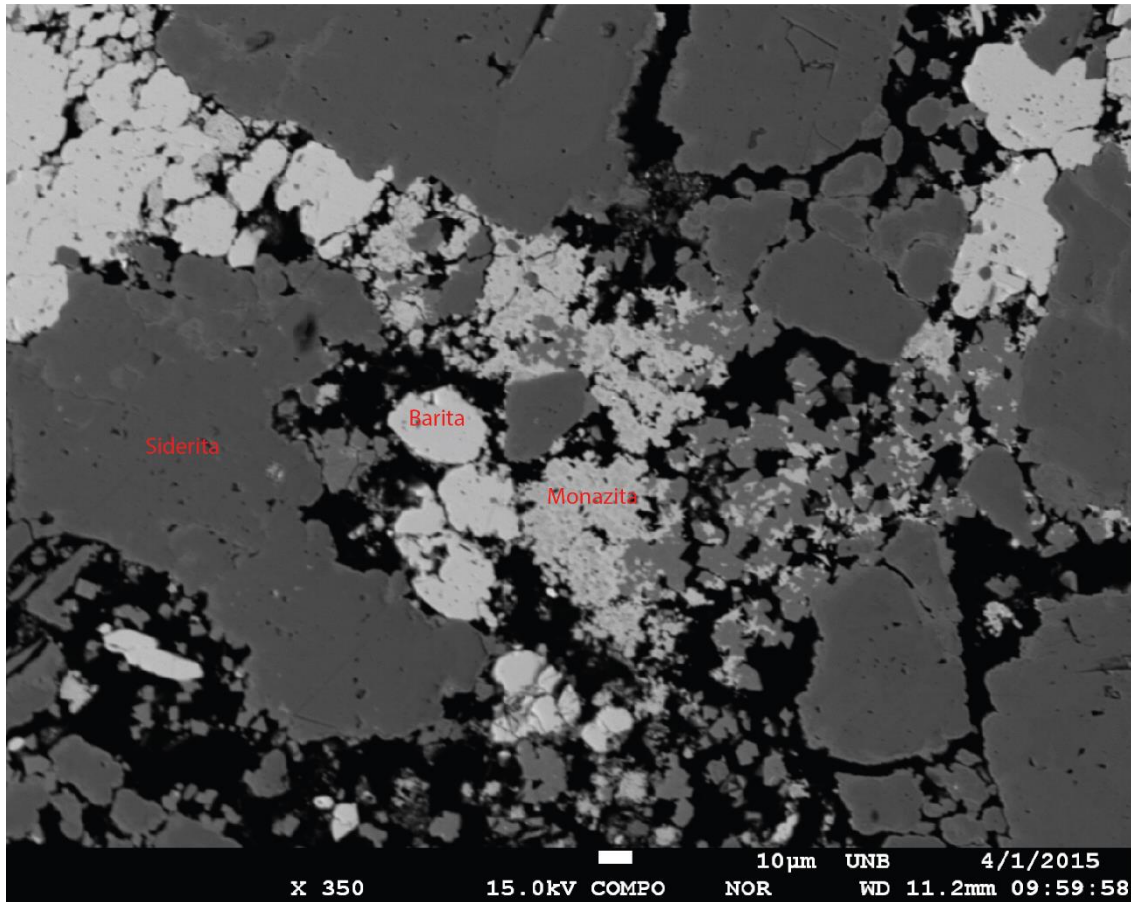


Figura IV. 4 Imagem carbonatito em MEV, com agregados de monazita ao centro.

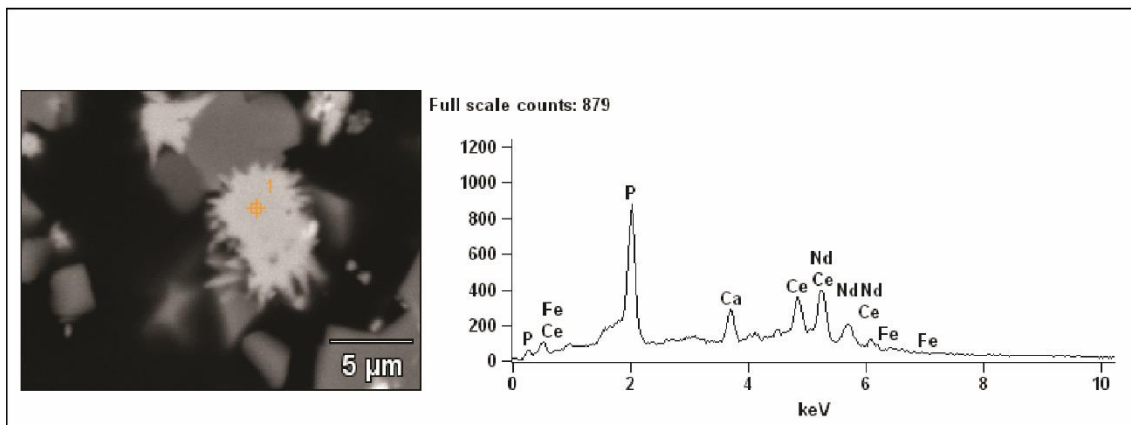


Figura IV. 5 Foto monazita (MEV), com principais picos de seus elementos.

Os resultados das análises químicas por microsonda eletrônica e as respectivas fórmulas estruturais da monazita são apresentadas na tabela IV.2. Observa-se que os diversos elementos presentes variam muito pouco. A fórmula estrutural média apresentada abaixo é, portanto, muito representativa:

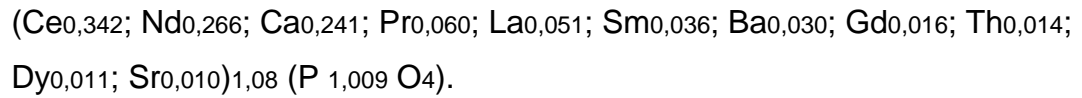


Tabela IV. 2 Análise de monazita por microsonda eletrônica e fórmula estrutural.

	Carbonatito							Brecha
	1	2	3	4	5	6	7	8
CaO	5,17	4,91	5,05	5,56	5,28	5,42	5,01	3,19
P2O5	28,24	27,24	25,47	27,80	27,74	27,63	27,56	24,82
SrO	0,54	0,85	1,37	2,06	0,63	0,57	0,54	1,29
BaO	1,77	2,17	1,88	2,28	1,96	2,98	2,66	0,00
Sm2O3	2,51	2,82	2,47	3,48	2,28	2,92	3,23	1,54
Gd2O3	1,14	1,83	1,23	1,82	0,85	1,18	2,00	0,14
Dy2O3	0,97	1,30	0,43	0,89	0,61	0,49	1,42	0,57
ThO2	3,01	3,30	3,69	7,60	0,78	1,45	2,81	3,68
La2O3	3,02	2,31	2,85	2,58	4,88	4,15	3,87	11,26
Ce2O3	21,69	21,39	22,23	17,79	24,50	22,51	20,55	26,60
Pr2O3	3,68	3,73	3,95	3,05	3,70	3,54	3,42	2,51
Nd2O3	17,35	18,45	17,73	16,24	17,29	17,54	17,77	8,39
Soma	89,09	90,30	88,34	91,16	90,49	90,38	90,84	83,99
	Cátions por célula unitária							
Ca	0,24	0,23	0,24	0,26	0,24	0,25	0,23	0,16
P	1,02	0,99	0,97	1,01	0,99	0,99	0,99	0,98
Sr	0,01	0,02	0,04	0,05	0,02	0,01	0,01	0,04
Ba	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,05	0,04	0,00
Sm	0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	0,04	0,05	0,02
Gd	0,02	0,03	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03	0,00
Dy	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
Th	0,03	0,03	0,04	0,07	0,01	0,01	0,03	0,04
La	0,05	0,04	0,05	0,04	0,08	0,06	0,06	0,19
Ce	0,34	0,34	0,37	0,28	0,38	0,35	0,32	0,46
Pr	0,06	0,06	0,06	0,05	0,06	0,05	0,05	0,04
Nd	0,26	0,28	0,28	0,25	0,26	0,27	0,27	0,14
Cátions	1,08	1,12	1,17	1,12	1,12	1,12	1,11	1,10

Fórmula estrutural calculada com base em oito oxigênios

As substituições na monazita ocorrem com a saída de dois ETR de carga +3, e entrada de um elemento bivalente, podendo ser Cálcio, Estrôncio e Bário mais outro elemento tetravalente como o Thório. A figura IV.6, nos mostra que esta substituição na monazita de Seis Lagos não ocorre como o esprado, pois com a saída dos ETR ocorre apenas o aumento dos elementos bivalentes sem o Thório (tetravalente) associado.

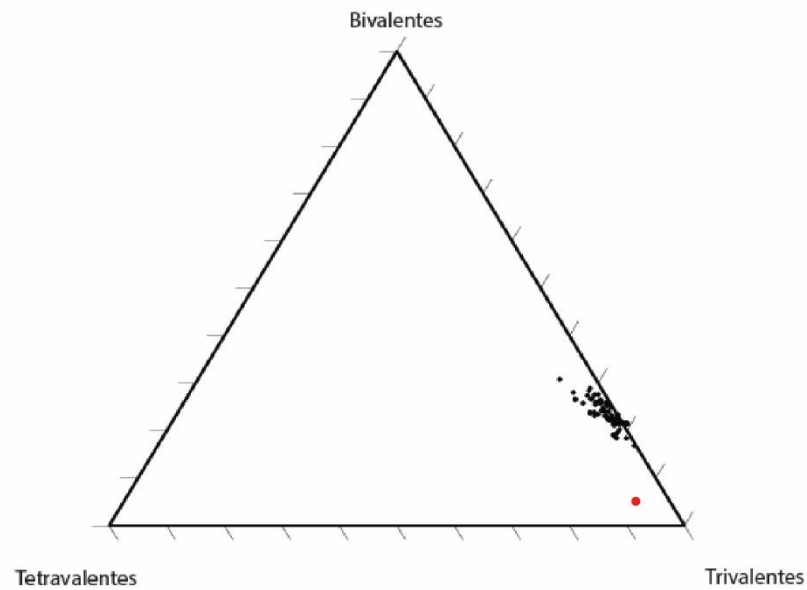


Figura IV. 6 Gráfico ternário de substituições na monazita. Pontos pretos: Monazita carbonatito; Pontos vermelhos: Monazita brecha carbonática.

O padrão de distribuição dos ETR nas monazitas, normalizados ao Condrito-C1 é apresentado na fig. IV.7 juntamente com o padrão de distribuição dos ETR no carbonatito. Quando observado apenas a distribuição de ETR no mineral, verifica-se o enriquecimento relativo dos ETRL em relação aos ETRP. Quando comparado os dois padrões de distribuição, observa-se que o comportamento destes elementos no carbonatito são o reflexo do comportamento dos mesmos na monazita.

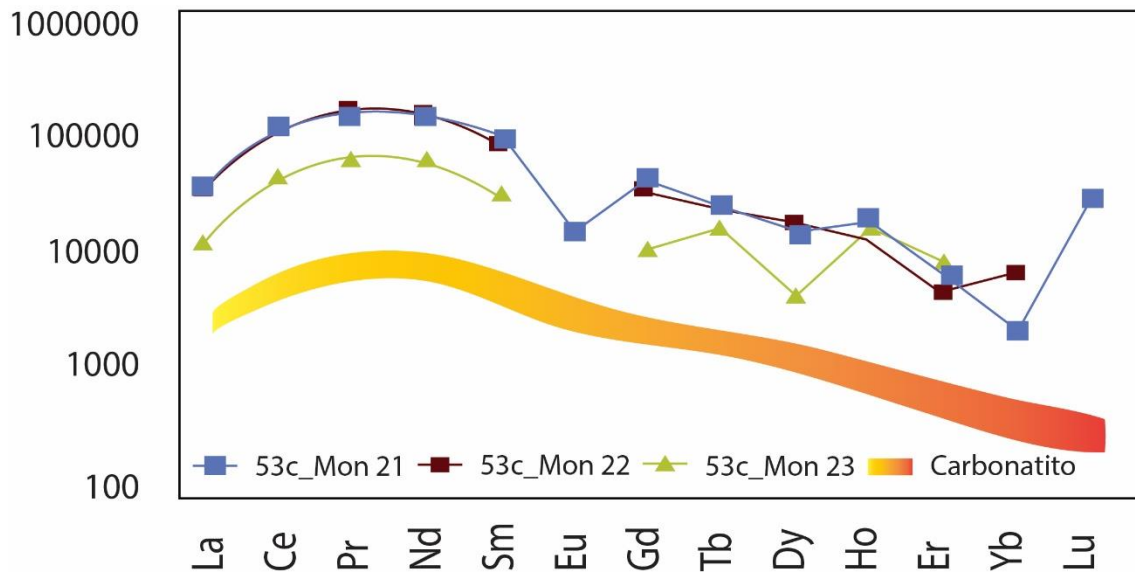


Figura IV. 7 Distribuição de ETR's na monazita e no carbonatito, normalizados ao condrito C1.

V.1.4.2 Pirocloro

O pirocloro $(Ca,Na)_2(Nb,Ti,Ta)_2O_6(OH,F,O)$ é um óxido de tântalo e cálcio, onde pode haver substituição de tântalo por nióbio ou titânio e substituição de cálcio por sódio, cristaliza-se no sistema cúbico. Este mineral, diferentemente dos demais do carbonatito foi identificado apenas por microscópio eletrônico de varredura (Fig. IV.8).

No carbonatito o pirocloro aparece normalmente na forma de cristais euédricos, o que facilita seu reconhecimento, e normalmente não é encontrado com mais de 5 μm .

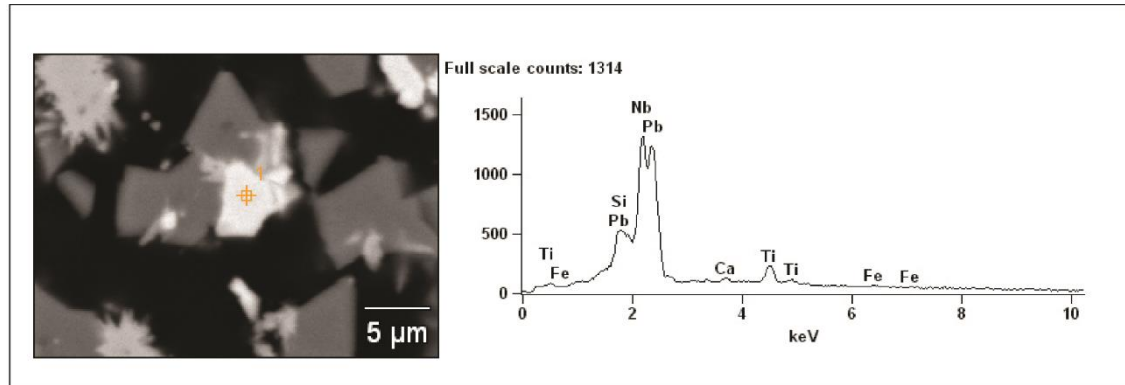
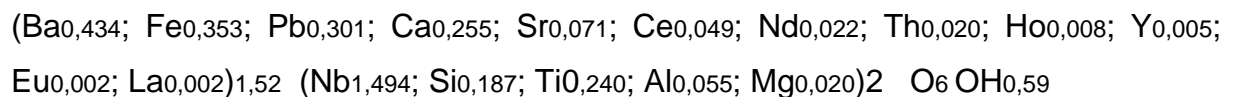


Figura IV. 8 Foto pirocloro (MEV), com principais picos de seus elementos.

A partir das análises de microsonda (Tabela IV.3) foi calculada a seguinte fórmula estrutural para o pirocloro:



O tamanho muito diminuto do pirocloro dificultou as análises por microsonda eletrônica. A análise com melhor fechamento é apresentada na tabela IV.3 com sua respectiva fórmula estrutural. Observa-se que ocorre uma vacância de 1,63 no sítio A. O pirocloro, quando alterado por hidrotermalismo ou por intemperismo apresenta vacância cada vez maiores no sítio A. Inicialmente ocorre perda de Na e La, e, em seguida do Ba. O processo ocasiona o enriquecimento relativo em Pb e ETR. É provável que isto tenha ocorrido com o pirocloro do carbonatito, e, conseqüentemente a análise teria uma boa qualidade.

O principal ETR no pirocloro é o Ce com uma concentração de 1,48% Ce_2O_3 , seguido pelo Nd, Eu e La.

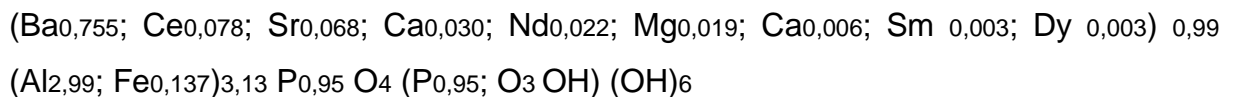
Tabela IV. 3 Análises de pirocloro por microsonda eletrônica e fórmula estrutural.

CARBONATITO	BRECHA CARBONÁTICA AMOSTRA 18						BRECHA CARBONÁTICA AMOSTRA 14						
	1	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Sítio A													
Ho2O3	0,3	0,21	0,12	-	0,22	0,11	0,36	-	-	0,07	0,19	0,06	-
Er2O3	0,03	0,07	-	-	-	0,11	0,13	0,02	-	-	0,06	0,01	-
PbO	12,21	4,76	4,52	5,02	4,46	4,71	4,91	8,27	8,78	7,64	7,84	6,37	7,89
Sm2O3	-	0,53	0,69	0,92	0,83	0,91	0,8	-	0,14	0,33	0,26	0,38	0,24
Eu2O3	0,09	0,37	0,45	0,47	0,31	0,23	0,16	0,15	0,11	0,05	0,29	0,08	-
Gd2O3	-	0,21	-	0,12	0,1	0,12	0,48	-	-	0,11	-	0,15	0,14
Dy2O3	-	0,22	0,12	0,18	0,22	0,13	0,1	0,11	0,08	-	0,2	0,04	-
ThO2	1	2,08	1,26	1,82	1,34	2,66	3,15	1,02	1,05	2,51	0,52	0,53	1,01
La2O3	0,08	0,9	0,73	0,79	0,79	1,03	0,61	0,89	1	1,11	1,24	0,68	0,89
Ce2O3	1,48	5,51	4,78	5,32	5	6,2	4,01	6,51	7,41	8,55	8,46	5,57	6,92
Pr2O3	-	0,3	0,16	0,23	0,21	0,25	0,1	0,13	0,31	0,54	0,3	0,21	0,28
Nd2O3	0,7	2,46	2,19	2,34	2,04	2,51	1,72	0,94	1,24	1,3	1,3	1,02	1,25
CaO	2,6	0,22	0,09	0,23	0,41	0,17	0,13	-	0,12	0,06	0,11	0,1	0,14
SrO	1,35	0,21	-	-	0,05	-	-	0,15	0,37	0,24	0,06	0,07	0,54
FeO	4,62	2,13	4,13	2,96	3,56	2,31	3,5	0,88	1,49	1,51	0,97	0,87	1,26
BaO	12,09	12,01	15,6	12,59	11,6	13,39	16,51	12,87	9,58	9,78	8,88	3,16	9,55
Y2O3	0,11	0,06	0,01	-	0,07	-	0,46	-	0,02	-	0,03	0,02	-
Sítio B													
Nb2O5	36,16	41,63	45,03	43,21	42,03	44,54	41,42	50,72	42,7	42,46	47,43	29	45,94
SiO2	2,05	2,07	1,7	1,57	1,75	1,17	1,19	0,08	1,9	1,72	0,92	1,79	1,96
Ta2O5	-	-	0,18	0,01	0,14	0,02	0,08	-	0,02	-	0,05	0,16	-
WO3	-	0,3	0,38	-	-	0,21	0,11	0,17	0,56	0,31	-	-	0,49
TiO2	3,51	4,05	2,79	4,72	3,44	4,06	6,73	1,35	5,07	4,17	2,12	2,75	5,27
MgO	0,15	0,06	0,04	-	-	0,03	0,02	0,04	0,05	-	0,05	0,03	0,01
Al2O3	0,54	0,09	-	0,09	0,1	0,08	0,06	-	0,01	0,35	0,04	0,07	0,1
Total	79,08	80,42	84,97	82,57	78,64	84,91	86,74	84,29	82,02	82,79	81,29	53,1	83,89
Cátion por célula unitária													
Sítio A													
Ho2O3	0,01	0,01	-	-	0,01	-	0,01	-	-	-	-	-	-
Er2O3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PbO	0,3	0,11	0,1	0,11	0,1	0,1	0,11	0,18	0,19	0,17	0,18	0,2	0,16
Sm2O3	-	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	-	-	0,01	0,01	0,02	0,01
Eu2O3	-	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	0,01	-	-
Gd2O3	-	0,01	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-	0,01	-
Dy2O3	-	0,01	-	-	0,01	-	-	-	-	-	0,01	-	-
ThO2	0,02	0,04	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,02	0,02	0,05	0,01	0,01	0,02
La2O3	-	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02
Ce2O3	0,05	0,17	0,14	0,16	0,16	0,19	0,12	0,2	0,22	0,26	0,26	0,24	0,19
Pr2O3	-	0,01	-	0,01	0,01	0,01	0	0	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
Nd2O3	0,02	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03
CaO	0,26	0,02	0,01	0,02	0,04	0,01	0,01	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
SrO	0,07	0,01	-	-	-	-	-	0,01	0,02	0,01	-	-	0,02
FeO	0,35	0,15	0,28	0,2	0,25	0,16	0,23	0,06	0,1	0,1	0,07	0,08	0,08
BaO	0,43	0,39	0,5	0,4	0,39	0,43	0,52	0,42	0,3	0,31	0,29	0,14	0,28
Y2O3	0,01	-	-	-	-	-	0,02	-	-	-	-	-	-
	1,53	1,03	1,19	1,06	1,11	1,09	1,18	0,96	0,93	1,01	0,93	0,81	0,83
	0,47	0,97	0,81	0,94	0,89	0,91	0,82	1,04	1,07	0,99	1,07	1,19	1,17
Sítio B													
Nb2O5	1,49	1,56	1,67	1,58	1,62	1,64	1,49	1,9	1,53	1,57	1,78	1,53	1,54
SiO2	0,19	0,17	0,14	0,13	0,15	0,1	0,1	0,01	0,15	0,14	0,08	0,21	0,15
Ta2O5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-
WO3	-	0,01	0,01	-	-	-	-	-	0,01	0,01	-	-	0,01
TiO2	0,24	0,25	0,17	0,29	0,22	0,25	0,4	0,08	0,3	0,26	0,13	0,24	0,29
MgO	0,02	0,01	-	-	-	-	-	-	0,01	-	0,01	-	-
Al2O3	0,06	0,01	-	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	0,03	-	0,01	0,01
	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

*Calculado com sítio B com base em dois cátions

V.1.IV.III Gorceixita

A gorceixita ($\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)(\text{PO}_3\text{OH})(\text{OH})_6$) é um fosfato de bário e alumínio, comumente formada a partir de alteração de fosfatos primários em carbonatito. Este mineral foi identificado primeiramente pela difração de raios x, e posteriormente por MEV. Pertencente ao Grupo da Crandalita, a gorceixita em Seis Lagos é encontrada apenas no carbonatito e ocorre como agregados poliminerálicos juntamente com a monazita e o pirocloro. Em análises ao MEV (Figuras IV.10) foi possível verificar que forma cristais euédricos com tamanho de $\cong 5 \mu\text{m}$. Com os resultados obtidos por microsonda eletrônica foi calculada a seguinte fórmula estrutural para a gorceixita:



A gorceixita compõe aproximadamente 7,5% do carbonatito e pode ter sido formada a partir da alteração de outros fosfatos, já que a rocha apresenta um alto grau de alteração.

Observando o gráfico ternário (Fig IV.9) observa-se que a gorceixita de Seis Lagos apresenta algumas substituições do Ba por Ca, e principalmente ETR. Essa substituição preferencial ocorre devido a maior semelhança do raio do Ba com ETR e a disponibilidade do mesmo.

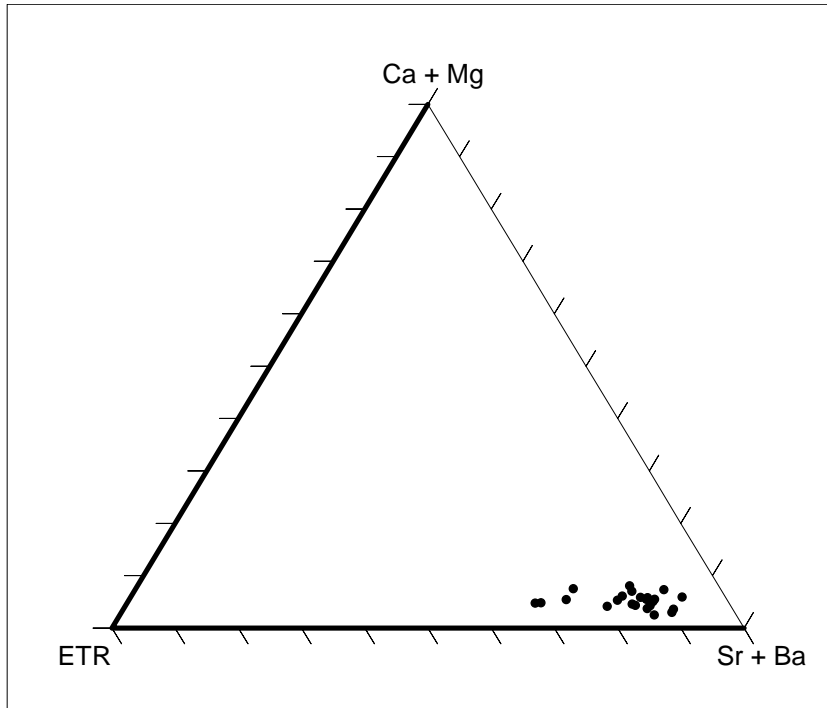


Figura IV. 9 Gráfico ternário de substituições da gorceixita.

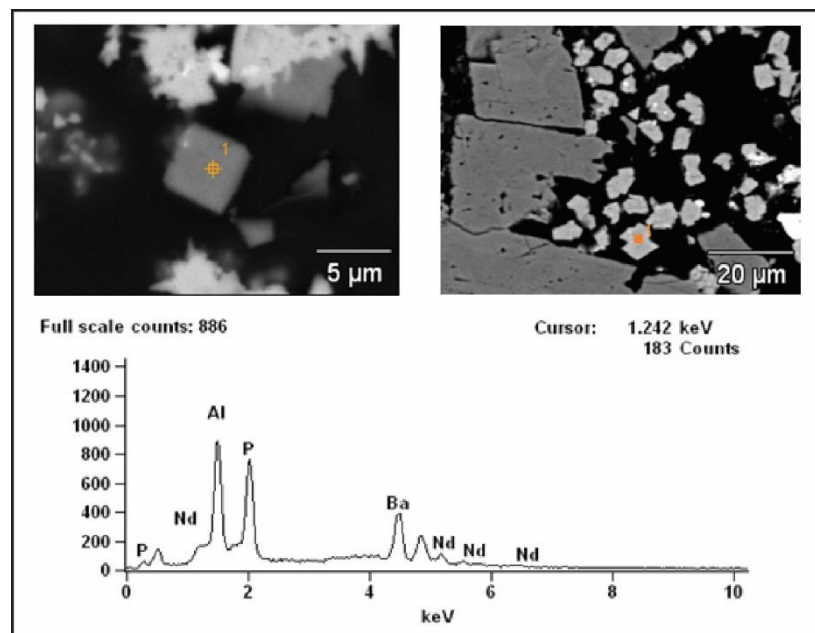


Figura IV. 10 Gorceixita em MEV com principais picos de seus elementos.

Tabela IV. 4 Análises de microsonda e fórmula estrutural da gorceixita.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sítio A										
MgO	0,10	0,04	0,05	0,03	0,15	0,11	0,10	0,10	0,07	0,08
CaO	0,42	0,61	0,71	0,33	0,46	0,79	0,66	0,37	0,56	0,57
SrO	1,19	1,67	1,82	1,11	1,97	1,52	1,83	1,46	1,55	1,71
BaO	21,13	22,29	21,37	17,36	24,24	22,75	22,22	22,16	24,70	23,28
Er ₂ O ₃	0,00	0,20	0,10	0,09	0,04	0,00	0,02	0,05	0,00	0,00
Sm ₂ O ₃	0,05	0,59	0,00	0,07	0,02	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00
Eu ₂ O ₃	0,05	0,00	0,12	0,17	0,16	0,00	0,03	0,02	0,08	0,02
Dy ₂ O ₃	0,12	0,55	0,15	0,18	0,01	0,13	0,17	0,05	0,08	0,24
La ₂ O ₃	0,17	0,84	0,43	0,43	0,56	0,41	0,21	0,49	0,33	0,37
Ce ₂ O ₃	1,29	6,36	3,12	3,28	4,06	3,41	1,90	3,39	3,21	3,16
Nd ₂ O ₃	0,26	3,97	0,78	1,00	1,56	0,85	0,54	0,86	0,80	0,80
Sítio B										
Al ₂ O ₃	28,67	31,21	30,37	12,24	28,73	30,45	30,02	26,71	29,47	30,45
FeO	0,54	1,03	0,55	0,44	0,54	1,26	0,75	0,30	0,38	0,55
Sítio C										
P ₂ O ₅	22,69	23,47	24,21	18,27	22,96	21,62	22,74	21,40	22,93	22,15
Somatório	76,67	92,81	83,77	55,01	85,48	83,30	81,19	77,51	84,16	83,37
Cátions por célula unitária										
Sítio A										
Mg	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Ca	0,04	0,05	0,06	0,04	0,04	0,07	0,06	0,03	0,05	0,05
Sr	0,06	0,07	0,08	0,08	0,09	0,07	0,09	0,07	0,07	0,08
Ba	0,70	0,67	0,66	0,86	0,77	0,73	0,71	0,76	0,79	0,75
Er	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sm	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Eu	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Dy	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
La	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
Ce	0,04	0,18	0,09	0,15	0,12	0,10	0,06	0,11	0,10	0,09
Nd	0,01	0,11	0,02	0,05	0,05	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
Sítio B										
Al	2,86	2,80	2,81	1,83	2,74	2,94	2,88	2,76	2,82	2,93
Fe	0,03	0,06	0,03	0,04	0,03	0,08	0,05	0,02	0,02	0,03
Sítio C										
P ₂	2,10	1,95	2,08	2,53	2,03	1,94	2,02	2,05	2,04	1,98
Sítio A	0,87	1,14	0,94	1,23	1,11	1,03	0,95	1,04	1,05	1,02
Sítio B	2,90	2,86	2,85	1,87	2,77	3,02	2,92	2,78	2,84	2,97
Sítio C	2,10	1,95	2,08	2,53	2,03	1,94	2,02	2,05	2,04	1,98

*Calculado com base em 10,5 oxigênios (Taylor et al., 1984).

IV.3 Brecha Carbonática

No estudo do furo de sondagem SG-04-AM (Fig. IV.11), agora na porção abaixo das argilitos, no intervalo 166m-494m, ocorre uma rocha descrita pela CPRM como brecha carbonática, que foi interpretada como carbonatito alterado. Em estudos posteriores, efetuados por geólogos da UFPA, foi interpretada como uma brecha de origem sedimentar na qual os cristais de siderita teriam sido formados por precipitação química em ambiente lacustre.

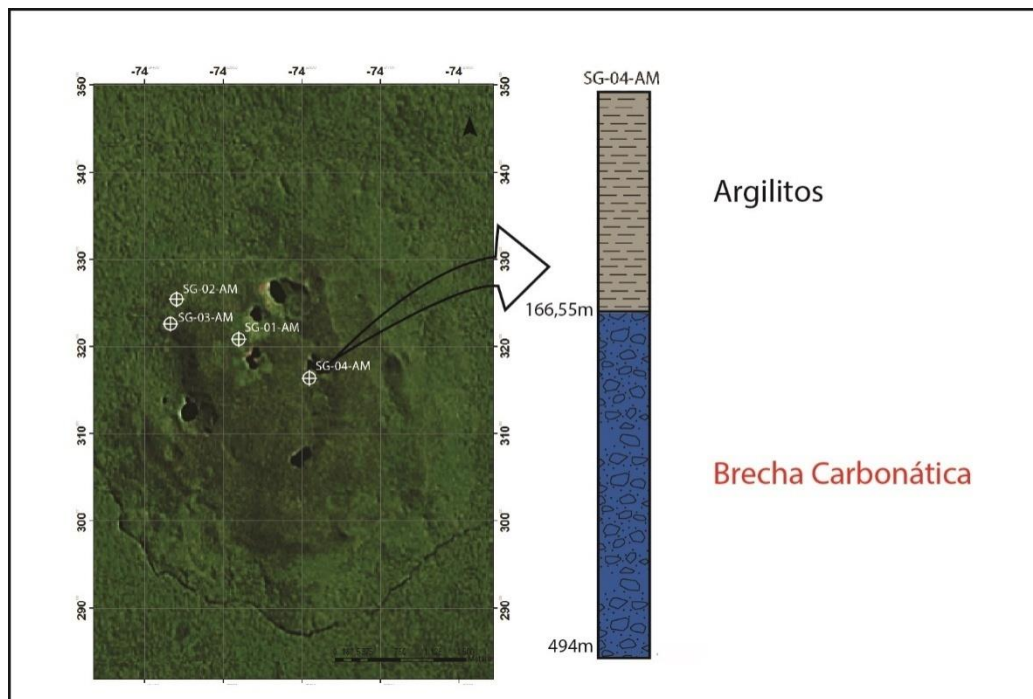


Figura IV. 11 Localização e perfil furo de sondagem SG-04-AM.

IV.3.1 Geoquímica

Para a realização do estudo geoquímico e para a compreensão da gênese desta brecha, foram utilizadas 10 amostras correspondentes ao intervalo que vai de 190m a 493m. Todas as análises químicas foram normalizadas ao condrito C-1 (McDonough & Sun 1995) e plotadas em gráficos a fim de comparar a assinatura geoquímica da brecha com a do carbonatito propriamente dito encontrado no furo de sondagem SG-02-AM e, então, tentar associar a gênese desta litologia à alteração de carbonatito, como a CPRM afirmou, ou à precipitação química em ambiente lacustre (Corrêa, 1995).

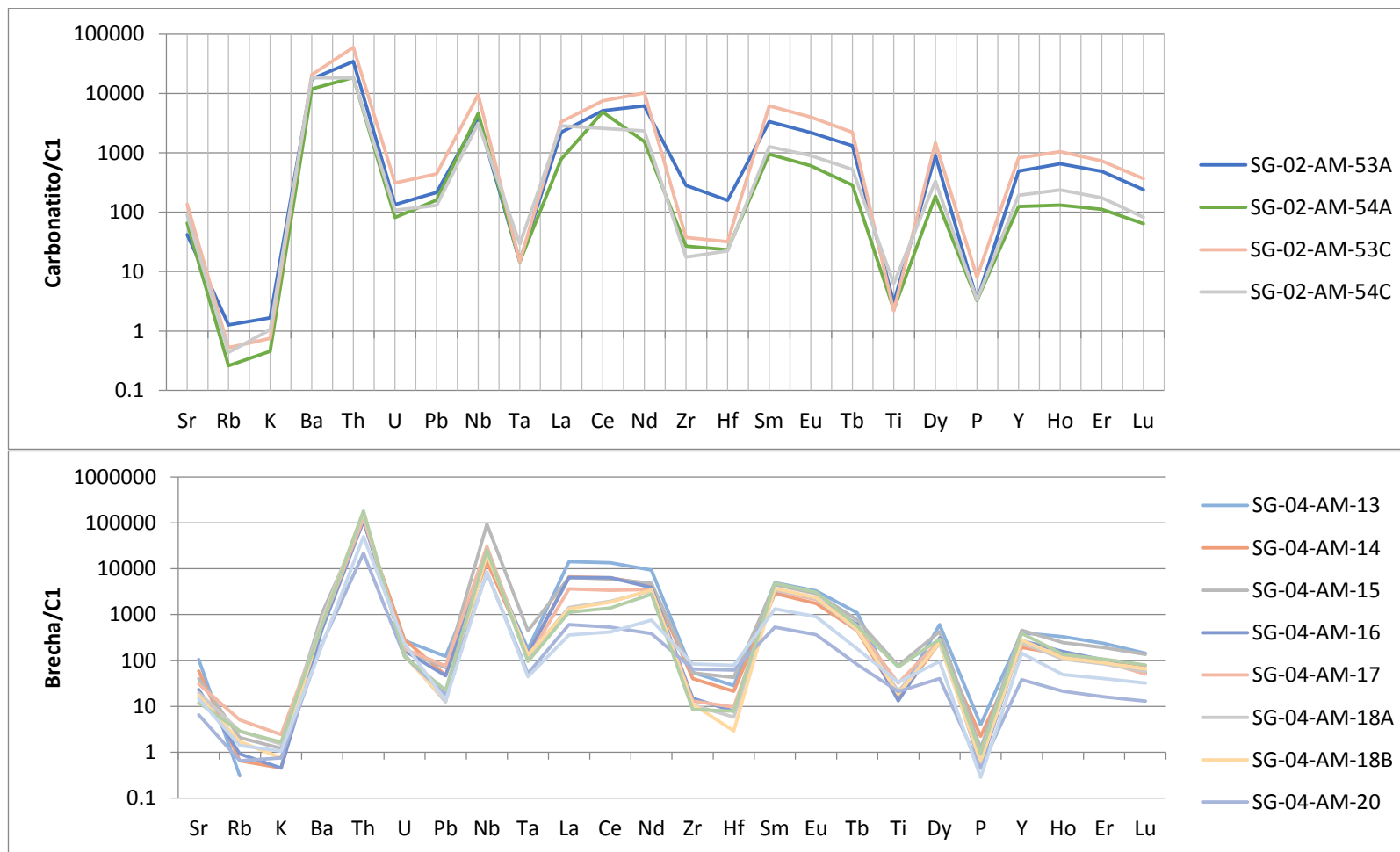


Figura IV. 12 Gráficos (*Spider*) comparativos entre a distribuição de elementos menores no carbonatito e brecha carbonática.



Figura IV. 13 Gráficos comparativos de ETR no carbonatito e na brecha carbonática.

Observando os gráficos, tanto o spider (Fig. IV.12) como o de distribuição de ETR (Fig IV.13), vemos que a assinatura geoquímica tanto para elementos traços como para os ETR são muito parecidas em ambas as litologias. O Bário é um elemento que quando observado no gráfico *spider* é nitidamente empobrecido na brecha carbonática. Este empobrecimento é explicado principalmente pela ausência da barita na brecha carbonática, enquanto no carbonatito este mineral está presente em grande quantidade (aproximadamente 10%). Outro fator que contribuiu para a diminuição do Bário pode ser explicado analisando o gráfico de dispersão deste elemento em relação à vacância no mineral pirocloro (Fig. IV.14). Quanto maior a vacância, ou seja, quanto mais alterado está o pirocloro, menos Bário está presente na estrutura deste mineral. Esta característica de o Bário sair da estrutura do mineral com o aumento da alteração nos mostra que a assinatura geoquímica da brecha carbonática é resultado de um comportamento do elemento em escala mineral, e não de que a brecha não possui este elemento, ou seja, apenas indica um estágio avançado de alteração de uma rocha com assinatura geoquímica semelhante à do carbonatito.

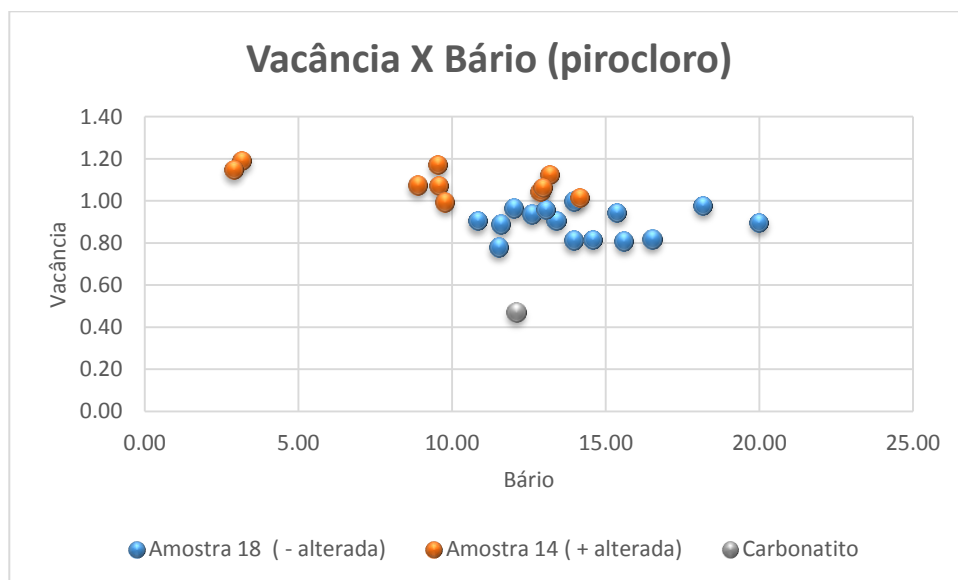


Figura IV. 14 Gráfico de dispersão do Bário em relação a vacância dos pirocloros da brecha carbonática e carbonatito.

Realizando uma média dos teores dos elementos considerados imóveis ao processo de alteração, tanto da brecha carbonática como do carbonatito, e plotando-os em um mesmo gráfico (fig. IV.15), observa-se que estes elementos apresentam enriquecimento relativo nas amostras da brecha carbonática, o que era esperado se a rocha fosse resultado de uma alteração.

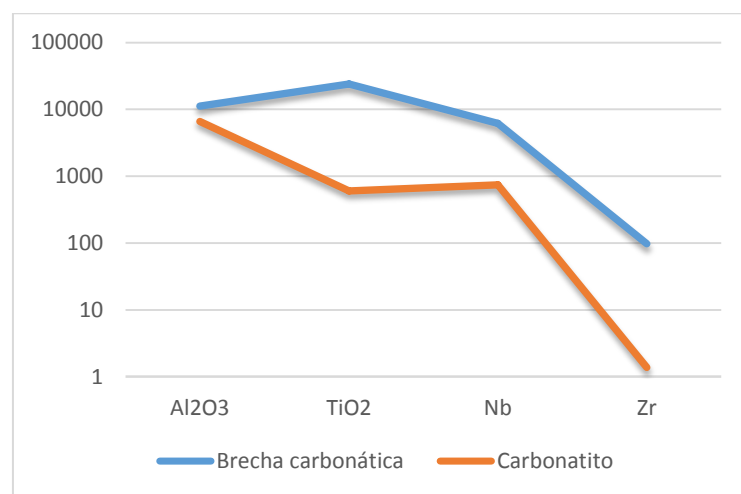


Figura IV. 15 Distribuição elem. Imóveis no carbonatito e brecha carbonática.

A assinatura geoquímica, e o enriquecimento relativo dos elementos imóveis na brecha carbonática corroboram a ideia dos geólogos da CPRM, de que esta brecha é, na realidade, fruto da alteração de rocha carbonatítica, porém afirmar com segurança que de fato a brecha carbonática é fruto da alteração do carbonatito será possível apenas com a assinatura isotópica de ambas as litologias.

IV.3.2 Mineralogia

Os resultados das análises de difração de raios x identificou caulinita, jarosita, rodocrosita, hematita, goethita, anatásio, rutilo, calcita, siderita, pirocloro, gibbsita e gipso, ao longo dos 320 metros de extensão desta litologia.

Em análises posteriores por microscópio eletrônico de varredura foram identificados a thorbastnaesita, bastnaesita e ainda a monazita, principal mineral de ETR do complexo. É justamente nestes minerais que estão as maiores quantidades de ETR da brecha.

IV.3.2.1 Bastnaesita/thorbastnaesita

Estas duas variações de carbonatos rico em terras raras, Bastnaesita, $Ce(CO_3)F$, e Thorbastnaesita, $Th(Ca,Ce)(CO_3)_2 \cdot 2.3(H_2O)$, foram identificadas por microscopia eletrônica de varredura, e posteriormente, por microsonda eletrônica. A thorbastnaesita é encontrada em agregado de microcristais (Fig. IV.16). Por estes minerais se tratarem de carbonatos, ao realizarmos análises de microsonda eletrônica o fechamento total destas análises fica na casa dos 70%, pois aproximadamente 30% da composição destes minerais é de CO_3 , que não é detectado pelo equipamento. Por este motivo, não foram realizados cálculos de fórmula estrutural destes minerais. Abaixo, na tabela IV.5, são apresentadas as análises de microsonda destes minerais.

Tabela IV. 5 Análises de microsonda Bastnaesita e Thorbastnaesita.

	Bastnaesita		Thorbastnaesita						
	1	2	1	2	3	4	5	6	7
Ho2O3	-	0,243	-	0,291	0,072	0,036	0,038	-	-
Er2O3	-	0,077	0,089	0,028	0,008	0,181	0,032	0,022	-
Tm2O3	-	0,042	0,159	0,125	0,13	0,121	0,259	0,322	0,128
Yb2O3	-	-	-	-	-	-	-	0,008	-
Lu2O3	0,106	0,031	-	0,071	0,118	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-	0,013	-	-
Sm2O3	0,781	1,572	3,306	3,733	4,1	4,315	5,177	4,807	4,16
Eu2O3	-	-	0,377	0,399	0,632	0,631	0,562	0,744	0,567
Gd2O3	-	0,547	1,366	1,51	1,456	1,43	1,81	1,701	1,468
Tb2O3	0,02	-	0,256	-	0,21	-	0,177	0,073	0,17
Dy2O3	0,003	0,632	0,113	0,033	0,296	0,59	0,44	0,4	0,497
ThO2	0,898	1,876	19,115	23,546	24,554	29,35	31,568	32,37	29,043
La2O3	18,512	14,373	1,048	1,368	1,268	1,591	1,529	1,635	1,487
Ce2O3	38,615	37,749	4,961	5,669	6,008	6,624	7,279	7,31	6,33
Pr2O3	3,028	3,264	1,067	1,368	1,086	1,383	1,638	1,478	1,346
Nd2O3	9,063	11,317	7,688	9,13	9,212	10,705	11,503	11,534	10,187
UO2	0,056	-	-	0,073	-	-	-	0,061	-
MgO	0,006	0,037	-	1,5	0,131	-	-	-	0,082
Al2O3	0,049	0,096	0,153	0,295	1,076	0,066	0,024	0,046	0,076
CaO	1,309	1,158	1,344	1,066	1,501	1,996	1,92	1,655	1,289
SO3	0,42	0,255	0,142	1,074	0,488	0,256	0,145	0,025	-
TiO2	-	0,119	0,49	0,536	-	0,283	0,659	0,485	1,091
MnO	-	-	-	2,075	0,227	-	-	-	0,112
CoO	0,176	0,02	0,019	0,294	0,084	-	-	-	0,043
P2O5	0,12	0,047	0,274	0,367	0,074	0,186	0,277	0,302	0,064
SrO	0,548	0,24	0,213	0,216	0,312	0,057	0,463	0,299	0,089
ZnO	0,09	0,127	0,026	0,155	-	-	0,297	0,388	-
FeO	3,712	2,24	3,779	42,656	9,758	5,266	5,539	4,534	10,095
BaO	-	-	0,1	0,222	0,134	-	0,047	0,198	0,172
Somatório	77,512	76,062	46,085	97,8	62,935	65,067	71,396	70,397	68,496

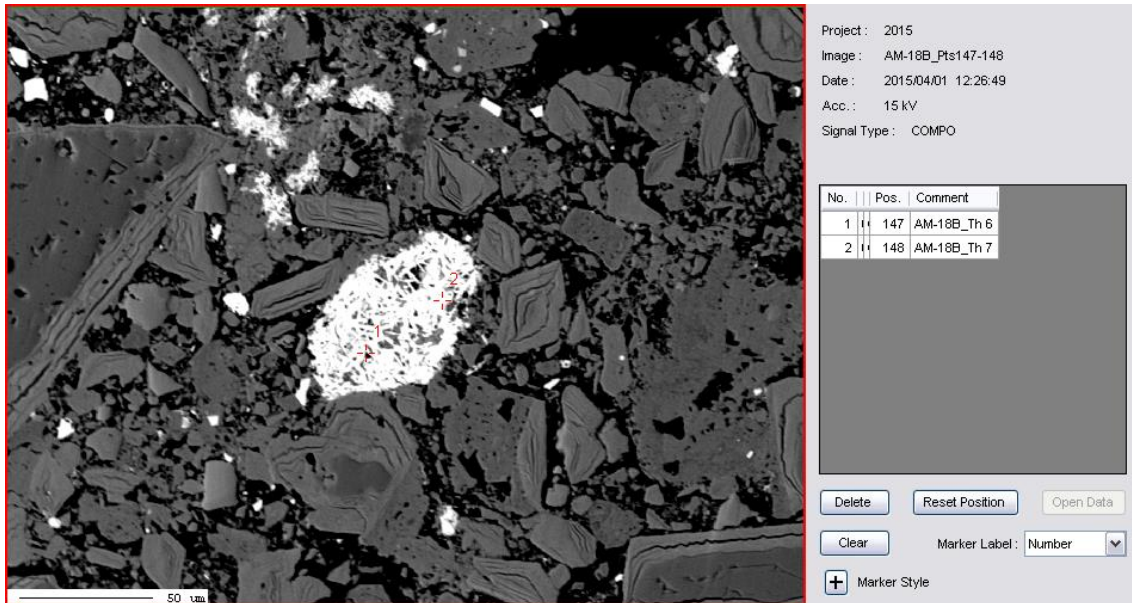


Figura IV. 16 Thorbastnaesita (MEV) em agregado de microcristais.

IV.3.2.2 Pirocloro

As análises do pirocloro encontrado na brecha carbonática permitiram dividir este mineral em dois campos, os pirocloros encontrados na amostra 14 a 337,00 metros de profundidade, e os encontrados na amostra 18 a 417,00 metros. Estes minerais se diferem em sua química e grau de alteração, sendo esta última representada pelo aumento da vacância no sítio A. A figura IV.17 mostra a relação do balanço de cargas com a vacância do sítio A, sendo possível notar que quanto menor o balanço de cargas maior será a vacância do mineral, em outras palavras podemos dizer que quanto mais alterado o pirocloro se encontra maior a vacância do sítio A. A partir dos cálculos de fórmula mineral, foram obtidas as seguintes fórmulas estruturais:

Amostra 14

(Ce_{0,256}; Ba_{0,313}; Pb_{0,335}; Fe_{0,103}; Th_{0,046}; Nd_{0,037}; La_{0,033}; Sm_{0,027}; Pr_{0,016}; Sr_{0,011}; Gd_{0,009};
Ca_{0,005}; Eu_{0,003})_{1,005}(Nb_{1,565}; Ti_{1,0255}; Si_{0,140}; Al_{0,032}; W_{0,006})₂ O₆ OH_{0,008}

Amostra 18

(Ba_{0,397}; Fe_{0,299}; Ce_{0,185}; Pb_{0,102}; Nd_{0,077}; Th_{0,029}; Ca_{0,027}; La_{0,026}; Sm_{0,023}; Sr_{0,012};
Eu_{0,011}; Dy_{0,007}; Pr_{0,007}; Y_{0,005}; Er_{0,002}; Gd_{0,002})_{1,2}(Nb_{1,555}; Ti_{0,250}; Si_{0,048}; Al_{0,038}; Mg_{0,004};
W_{0,003})₂O₆ OH_{0,36}

O pirocloro da amostra 14 possui o sítio A com vacância de até 1,20, enquanto o da amostra 18 possui no máximo 1,00 para o mesmo sítio.

Quando comparado ao pirocloro encontrado no carbonatito, o pirocloro da amostra 18 da brecha é mais parecido quanto a sua química, pois em ambos o Bário e o Ferro são os principais elementos, no entanto o encontrado na brecha possui forte enriquecimento em ETR, principalmente o elemento Cério e Lantânio.

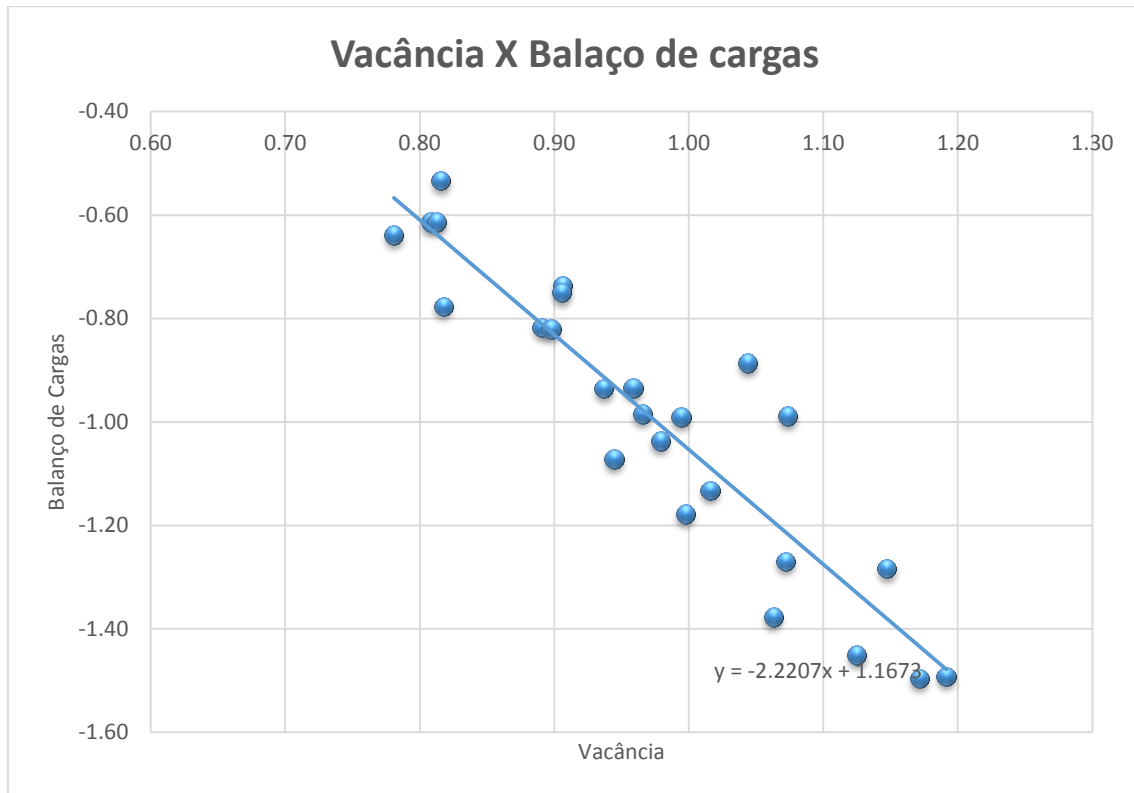


Figura IV. 17 Gráfico de dispersão da vacância pelo balaço de cargas dos pirocloro da brecha carbonática

IV.3.2.3 Monazita

A monazita também foi encontrada na brecha carbonática. Possui hábito fibrorradiado (Fig. IV.18) semelhante a monazita do carbonatito porém possui algumas características químicas diferentes das encontradas no carbonatito.

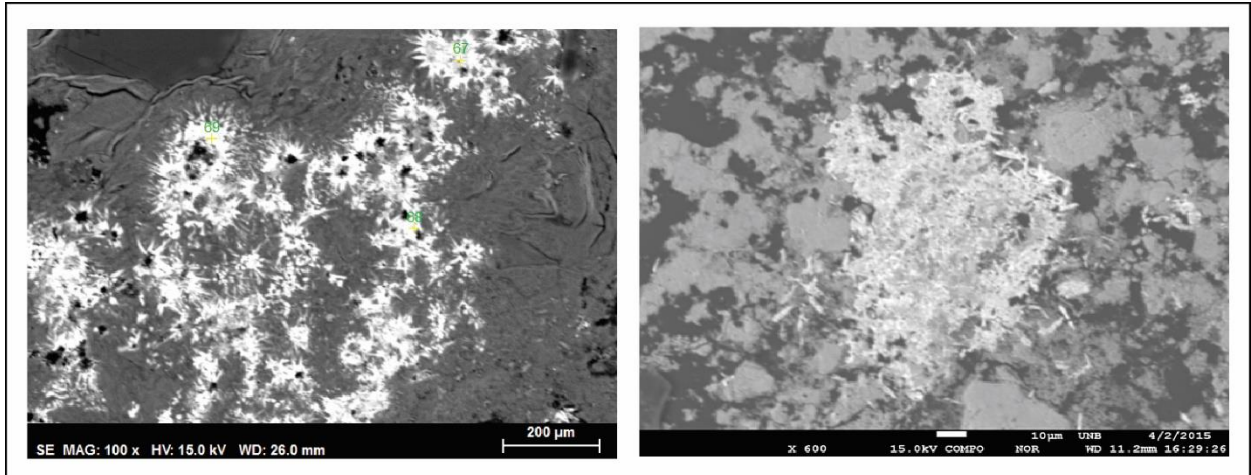


Figura IV. 18 Monazita (MEV), brecha carbonática.

Com base nas análises de microsonda eletrônica, foi calculada a seguinte fórmula estrutural para a monazita:

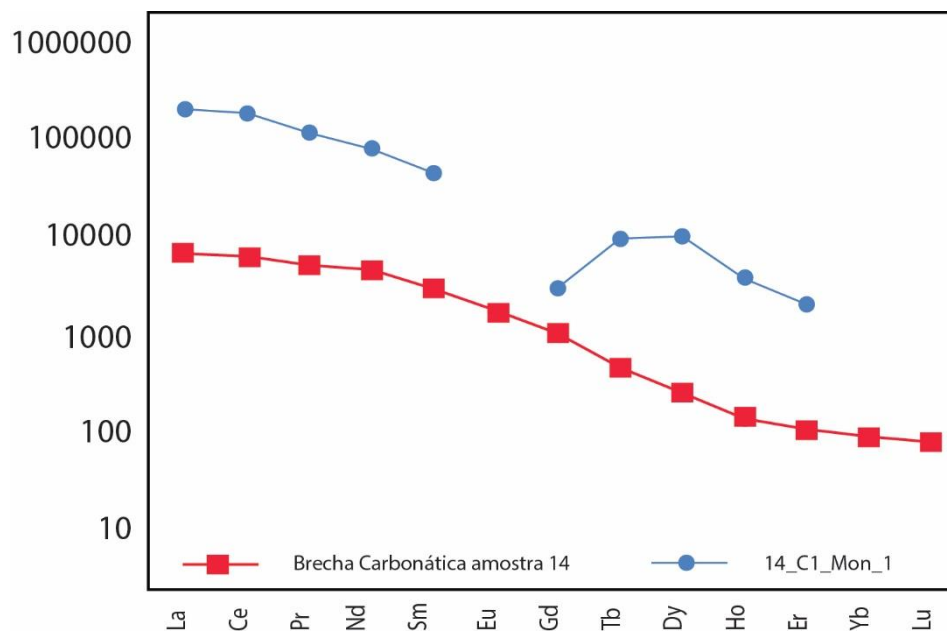
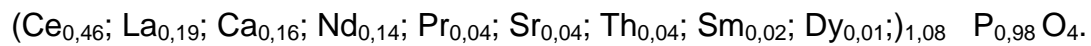


Figura IV. 19 Gráfico de distribuição de ETR na monazita (14_C1_Mon_1) em relação a distribuição de ETR na amostra 14 da brecha carbonática normalizadas ao condrito C1.

Quando realizado o gráfico de distribuição de ETR na brecha carbonática, e comparado ao da monazita (Fig. IV.19), nota-se que, assim como acontece no carbonatito, este padrão segue o reflexo da distribuição na monazita, indicando que, apesar de, nesta litologia, haver mais de um mineral portador de terras raras, como o pirocloro, bastnaesita e thorbastnaesita, a monazita é o mineral que mais influencia a composição total da rocha.

IV.3 Argilas da Bacia Esperança

O furo de sondagem SG-04-AM, localizado na região central do corpo carbonatítico, na bacia Esperança, cortou um pacote de argilas até a profundidade de 166,55 (Fig. IV.20). Bonow e Isler (1980) inferiram reservas de ETR para o intervalo 14,65m até 73,10m no qual o teor médio de ETR é de 1,5%. No presente trabalho, todo o pacote até a profundidade de 166,55m é investigado. Foram mantidos os intervalos e designações destes conforme o trabalho da CPRM. O quadro IV.1 apresenta uma síntese dos dados obtidos.

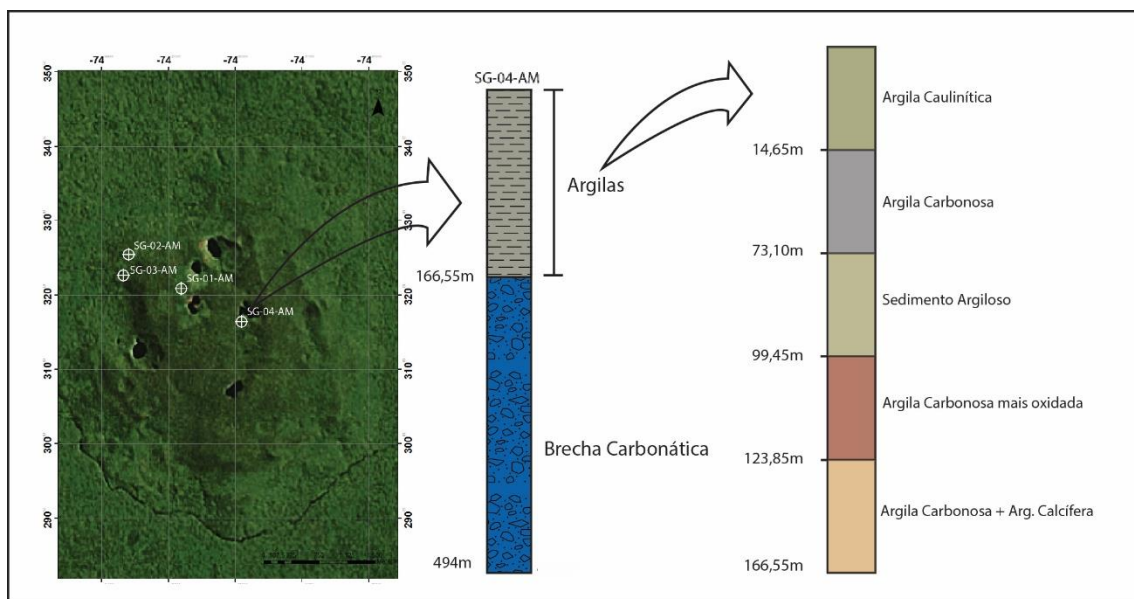


Figura IV. 20 Figura de localização e perfil do furo de sondagem SG-04-AM.

Quadro IV. 1 Síntese de dados do estudo das argilas da bacia Esperança: profundidade das amostras, mineralogia identificada por difratometria de raios x, porcentagem de elementos terras raras leves (ETRL), pesados (ETRP), somatório de ETR e média de ETR por intervalo.

Amostra	Profundidade	MINERALOGIA							ETRL (% óxido)	ETRP (% óxido)	ΣETR (%)	ETRL/ETRP	Média de ETR (% óxido) por camada
		Caulinita	Ilita	Quartzo	Hematita	Gibbsita	Florencita	Jarosita					
AM-02	9,30	X			X	X	X		1,39	0,04	1,43	37,71	3,13
AM-28	14,50	X				X	X		4,78	0,06	4,8	79,58	
AM-29	16,40	X					X	X	1,42	0,03	1,4	56,06	
AM-03	34,00	X					X		1,24	0,03	1,27	48,81	1,0
AM-32	50,00	X					X	X	2,09	0,06	2,1	37,67	
AM-34a	70,00	X		X					0,09	0,01	0,1	16,53	
AM-34b	70,00	X			X				0,18	0,01	0,2	25,86	
AM-36	78,00	X		X	X				0,95	0,03	1,0	32,81	1,0
AM-04	86,00	X		X	X		X		0,90	0,02	0,92	37,87	
AM-05	93,00	X		X	X				1,06	0,03	1,09	34,71	
AM-40	99,80	X		X	X				1,49	0,04	1,5	38,67	2,3
AM-06	105,00	X	X	X	X				3,82	0,07	3,89	57,65	
AM-43	119,00	X		X	X				1,45	0,02	1,5	66,84	
AM-07	133,00	X		X	X				1,61	0,07	1,68	23,56	1,04
AM-45	148,20	X		X			X		1,10	0,03	1,1	32,62	
AM-46	148,50	X			X				0,28	0,03	0,3	9,70	

IV.3.1 Descrição das fácies argilosas

O aspecto macroscópico de amostras representativas das 5 fácies individualizadas pela CPRM pode ser observado na figura IV.21. O material foi todo descrito pela CPRM como argila. Embora uma parte deste material apresente um grau de consolidação que permitiria enquadrá-lo como argilito, como sua distribuição é irregular, optou-se por manter a denominação utilizada pela CPRM. É importante notar na descrição que estruturas sedimentares não foram observadas em nenhuma das amostras descritas. Supõe-se que esta característica deva-se a alguma movimentação de fluidos ou reacomodação no ambiente de sedimentação.

Argila Caulinítica (9,30-14,50m): O intervalo apresenta rochas de coloração salmão, e em corte transversal ao longo do testemunho pode-se notar uma intercalação de pequenas lâminas irregulares (aproximadamente 1mm) salmão e branca, que é mais difícil de ser observada na parte exterior do testemunho. A rocha é muito friável e suja a mão com muita facilidade.

Argila carbonosa (16,40- 70,00m): O intervalo, em sua porção superior, apresenta rochas de coloração cinza escuro e é bastante friável. Possui estrutura maciça com poucos clastos de alguns milímetros dispersos aleatoriamente. Na parte

intermediária o intervalo apresenta rochas de coloração cinza escuro com uma densidade muito baixa, bastante porosa com uma estrutura maciça, e com clastos dispersos de até 1 cm. Na porção mais profunda do intervalo as rochas possuem coloração de cinza claro com micro pontos pretos dispersos.

Sedimento argiloso (78,00-99,80m): A amostra representativa deste intervalo tem coloração vermelha escura, devido a intensa oxidação, apresenta uma espécie de laminação cortando diagonalmente ao longo do testemunho, esta laminação só é visível devido a diferença de cor entre as lâminas, que variam em tons de vermelho.

Argila carbonosa mais oxidada (99,80-119m): O testemunho obtido deste intervalo apresenta o contato entre duas litologias diferentes, uma de cor vermelho escuro, oxidada, homogênea com alguns clastos que variam de poucos milímetro até no máximo 1 centímetro, de cor preta, dispostos aleatoriamente. Também é possível encontrar pequenas cavidades, com no máximo 1 cm, onde observa-se microcristais com brilho metálico. A outra litologia tem cor cinza claro também homogêneo com alguns poucos clastos dispersos em sua matriz. O contato entre estas duas litologias é nítido e abrupto, porém não é reto.

Argila Carbonosa + argila calcífera (133,00-166,55m): Nesta camada, em um intervalo muito curto, foram encontradas duas amostras com características bem distintas. A primeira possui cor cinza, é homogênea na parte externa do testemunho e na extremidade do mesmo em um corte perpendicular ao longo do testemunho, é possível observar diversas linhas brancas descontínuas adentrando-o, também pode-se notar pequenos clastos de cor preta dispersos. A rocha possui densidade baixa. Um pouco mais abaixo a sonda interceptou uma outra litologia com aspectos bem diferentes da anterior, esta se encontra notadamente mais alterada, tem coloração vermelha, devido a oxidação, com diversas manchas brancas e amarelas. Possui quantidade abundante de cavidades em sua superfície e novamente clastos são observados dispersos aleatoriamente. Possui densidade média a elevada.

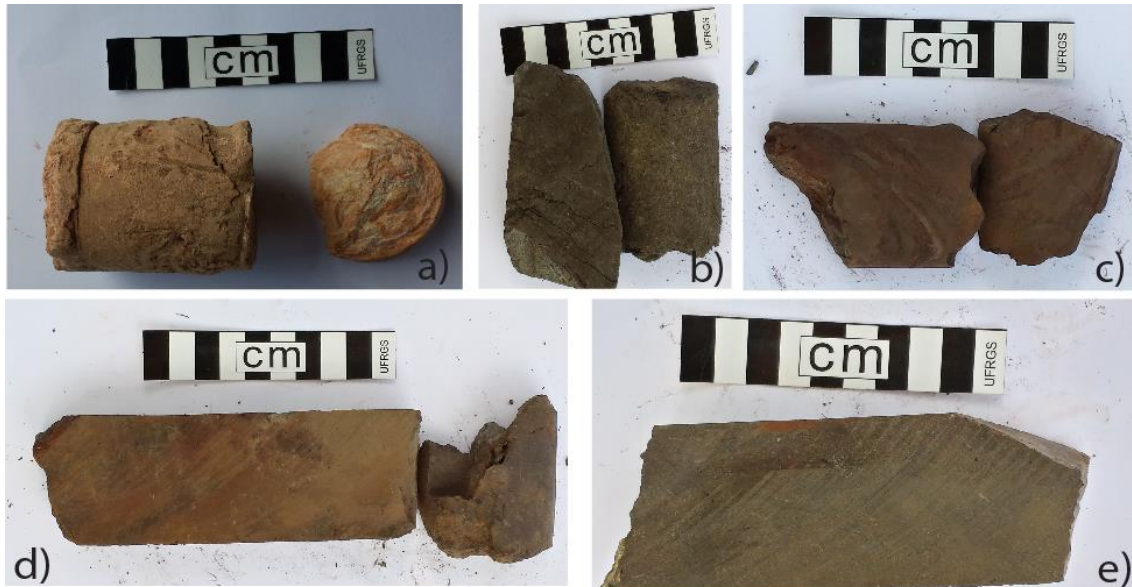


Figura IV. 21 Fotografias de amostras representativas das 5 fácies de argilas da bacia Esperança. a) Argila Caulinítica; b) Argila carbonosa; c) Sedimento argiloso; d) Argila carbonosa mais oxidada; e) Argila carbonosa mais argila caulinítica.

IV.3.2 Geoquímica

Nossos resultados (Quadro IV.1 e Fig. IV.23) confirmam a existência de mineralização de ETR em todo o pacote e não apenas no intervalo 14,65m até 73,10m. O teor mínimo é de 0,1% e o teor máximo é de 4,8%, mas a grande maioria das amostras têm teor de ETR entre 1 e 2 %. Quando observados os gráficos do fósforo e ETR notamos um padrão de concentrações extremamente semelhante ao longo de todo o perfil, indicando que estes elementos estão associados a uma mesma fase mineral. O diagrama de correlação ETR vs P (Fig. IV.22) mostra que existe uma correlação positiva válida para todas as amostras analisadas. Esta correlação é forte indicativo de que os ETR nas argilas não ocorrem adsorvidos às mesmas e sim na forma de fosfato.

Com os gráficos de distribuição dos elementos móveis, imóveis mais fósforo e ETR (Fig. IV.23) podemos observar uma intensa lixiviação nos primeiros 50,00 metros, representada pelos elementos Ca, Mg, Fe e Mn, que são praticamente inexistentes até esta profundidade. A partir dos 70,00 metros onde o teor de Fe aumenta significativamente, começa a se observar a presença de hematita nas amostras, o que não acontece em profundidades mais rasas, pois o Fe presente mais próximo a superfície é lixiviado e concentrado em maiores profundidades. O contrário ocorre com a gibbsita que é encontrada apenas nas profundidades mais rasas onde o alumínio é concentrado devido a remobilização dos outros elementos mais susceptíveis a lixiviação.

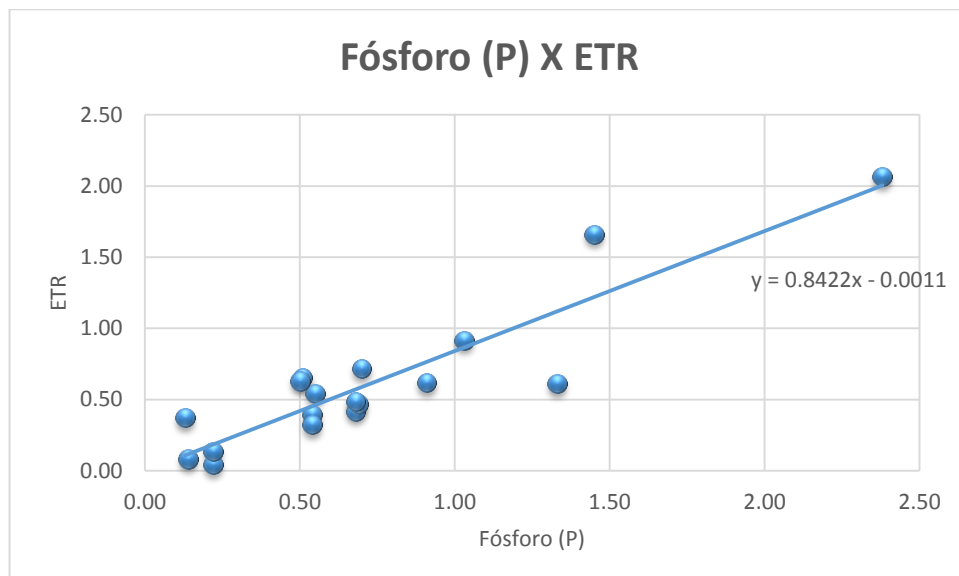


Figura IV. 22 fósforo X ETR, mostrando que estes elementos possuem correlação positiva entre eles.

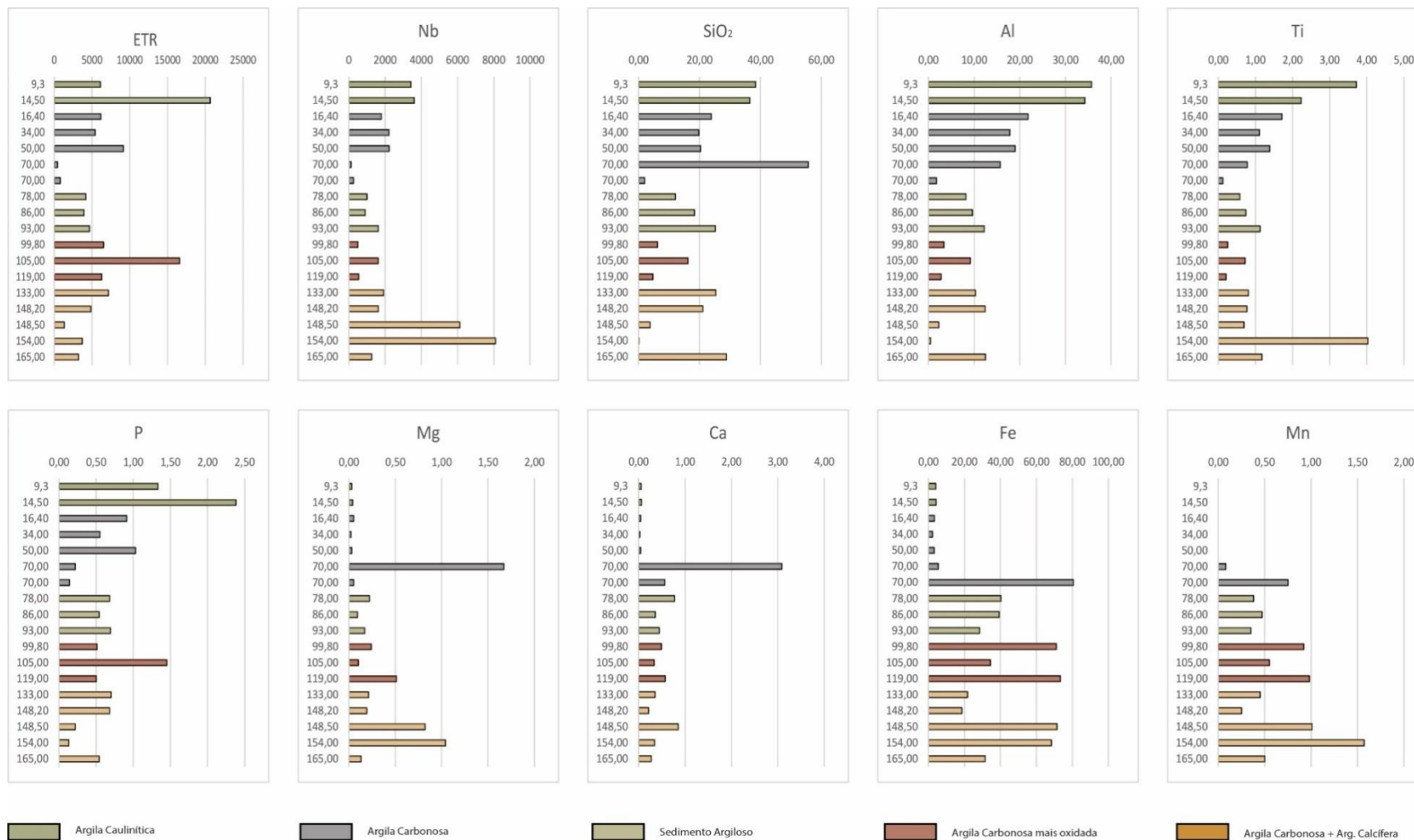


Figura IV. 23 Distribuição dos principais elementos ao longo dos argilitos da Bacia Esperança.

IV.3.3 Mineralogia

Ao longo dos 160,00 metros da Bacia foram identificados, através da difratometria de raios X, os seguintes minerais: caulinita, illita, quartzo, hematita, gibbsita, e florencita (quadro IV.1).

IV.3.3.1 Florencita

A florencita ($\text{CeAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$), que inicialmente foi detectada apenas nos primeiros 50 metros do perfil, foi também detectada no MEV, nas amostras SG-04-AM-36 e SG-04-AM-06, com profundidades de 78m e 105m, respectivamente. Em ambas as amostras a difração de raios x não detectou a presença da florencita, porém as análises químicas revelavam teores significativos de ETR, os quais, primeiramente foram atribuídos a adsorção iônica pelas argilas. A florencita (Fig. IV.24) é encontrada bem cristalizada com hábito prisma-acicular, sem orientação definida, e com tamanho variando entre 8 e 12 μm , envolta por argila (Fig. IV.24).

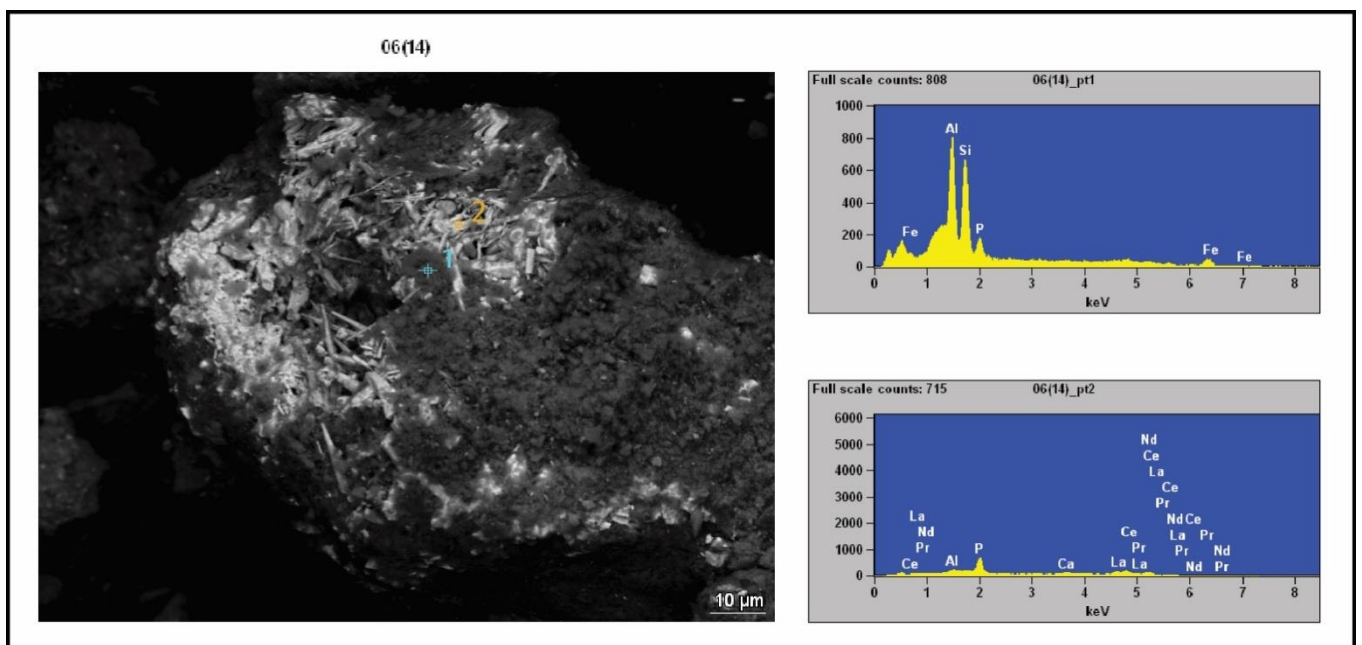


Figura IV. 24 Imagem ao MEV da florencita da Bacia Esperança (ponto 2), e argilas (Ponto 1) com suas respectivas análises.

Ela também é encontrada como microcristais anédricos formando agregados (Fig. IV.25). Estes agregados quando submetidos a análises por EDS, apresentam o

elemento Silício (Si), além dos elementos que compõem o mineral, como Cério (Ce), Alumínio (Al), Fósforo (P), Hidrogênio (H) e Oxigênio (O). Atribui-se a presença do Silício nos agregados de florencita à grande quantidade de argila presente junto a eles, possivelmente até entre os microcristais, o que não seria diferenciado pela magnificação do MEV usado.

Análises de WDS não foram feitas, pois as amostras foram levadas à microsonda na forma de pó, fixado a uma fita de carbono. No entanto, sob condições de vácuo, houve perda de aderência, impossibilitando a análise de ser concluída.

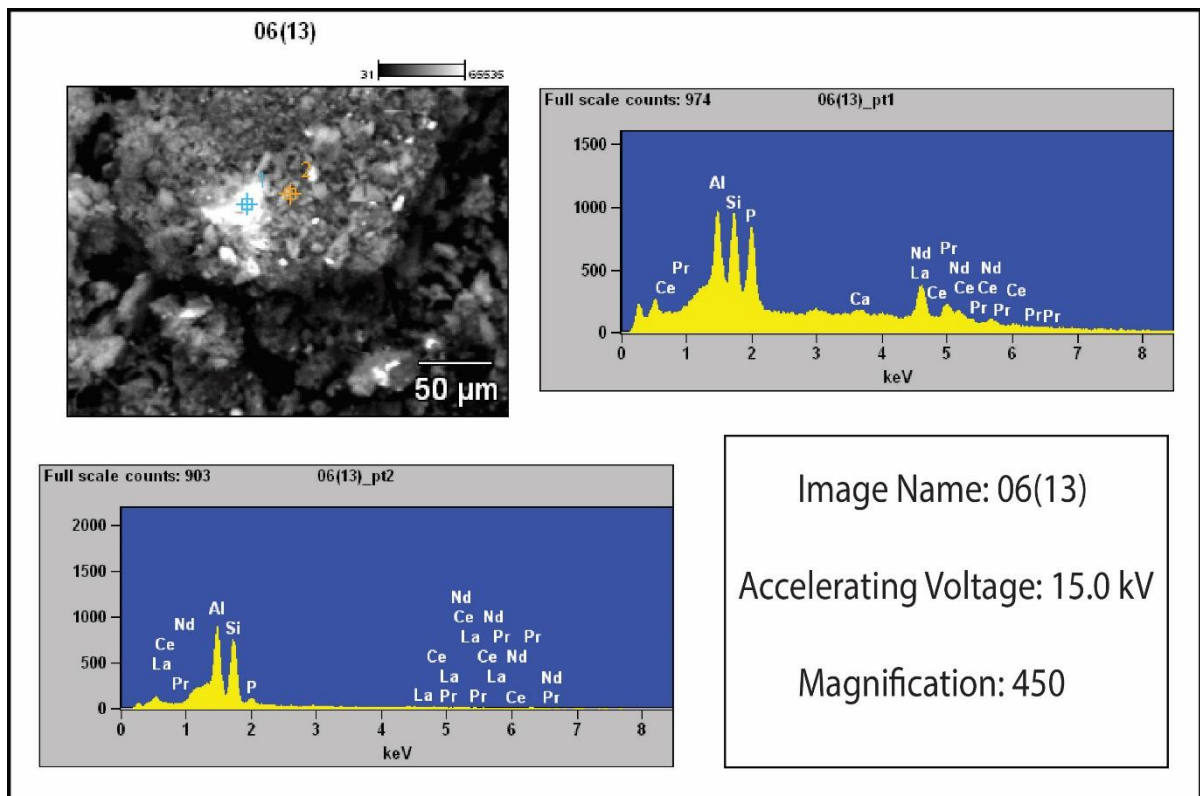


Figura IV. 25 26 Imagem ao MEV de microcristais anédricos de florencita da Baía Esperança (ponto 1), e argilas (Ponto 2) com suas respectivas análises.

IV.4 Laterita

A laterita corresponde ao principal minério do depósito de Seis Lagos formado a partir da alteração de carbonatito. A laterita aqui enfocada foi amostrada no furo de sondagem SG-01-AM (Fig. IV.26). Não se sabe ao certo sua espessura, pois a perfuração foi interrompida com 255 metros de profundidade, ainda na crosta laterítica.

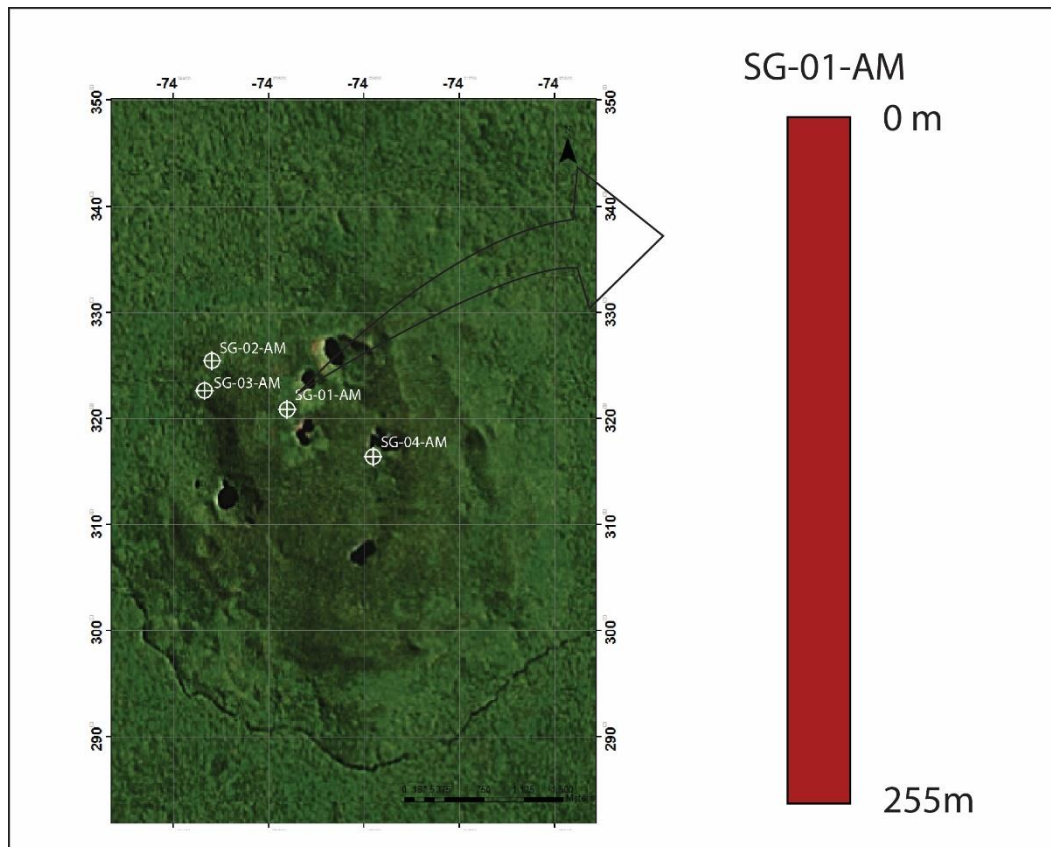


Figura IV. 27 Localização e perfil furo de sondagem SG-01-AM.

IV.4.1. Geoquímica

Em seu trabalho sobre a mineralização de Nb, Giovannini (2013) realizou análises multielementares de 33 amostras de crosta. Para o presente trabalho, nós utilizamos estas análises e calculamos os teores médios de ETR por crosta (Fig. IV.27). O teor médio do depósito laterítico do Morro de Seis Lagos é de 1,75% ETR.

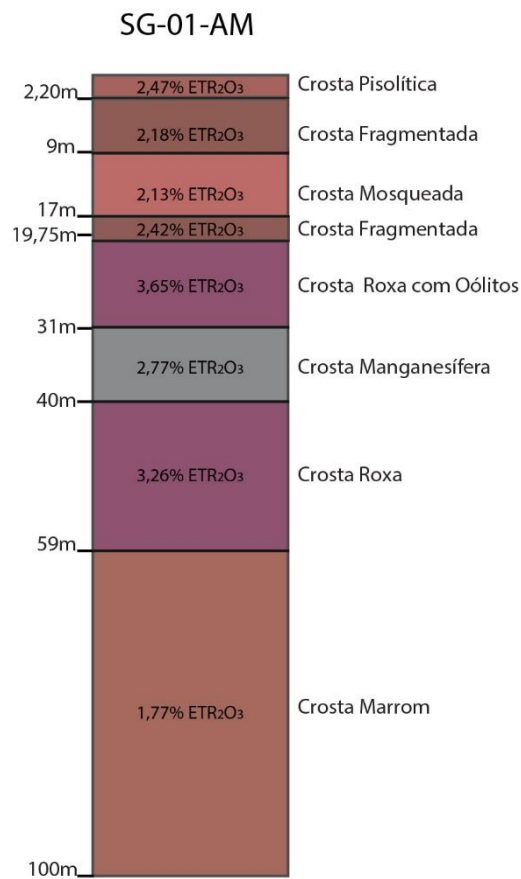


Figura IV. 28 Perfil laterítico com teor médio de ETR por crosta.

IV.4.2 Mineralogia

Giovannini (2013) identificou na crosta laterítica as ocorrências de florencita, cerianita (minerais de ETR) e de pirocloro (mineral portador de ETR). No quadro do presente trabalho foram estudados os conteúdos de ETR destes minerais.

IV.4.2.1 Cerianita

A Cerianita aparece associada com a hollandita na crosta manganésifera e em forma de veios monominerálicos na crosta roxa. A ocorrência da crosta manganésifera é a mais importante em termos de volume. Nesta, veios com até 4cm de espessura são formados por hollandita, pirolusita, goethita e cerianita combinados nas mais em diferentes proporções. A cerianita ocorre como bandas descontínuas ou como cristais internos às bandas de holanditta (Fig. IV.28).

Análises representativas da composição da cerianita e suas respectivas fórmulas estruturais são apresentadas na tabela IV.6. Em ambas as ocorrências o mineral é quase inteiramente composto por Ce com um pouco de Gd. Em quantidade menos expressiva, ainda foi detectado o Nd, Yb e o Lu. A fórmula estrutural média da Cerianita é $(\text{Gd } 0,14, \text{Ce } 0,85) \text{O}_2$.

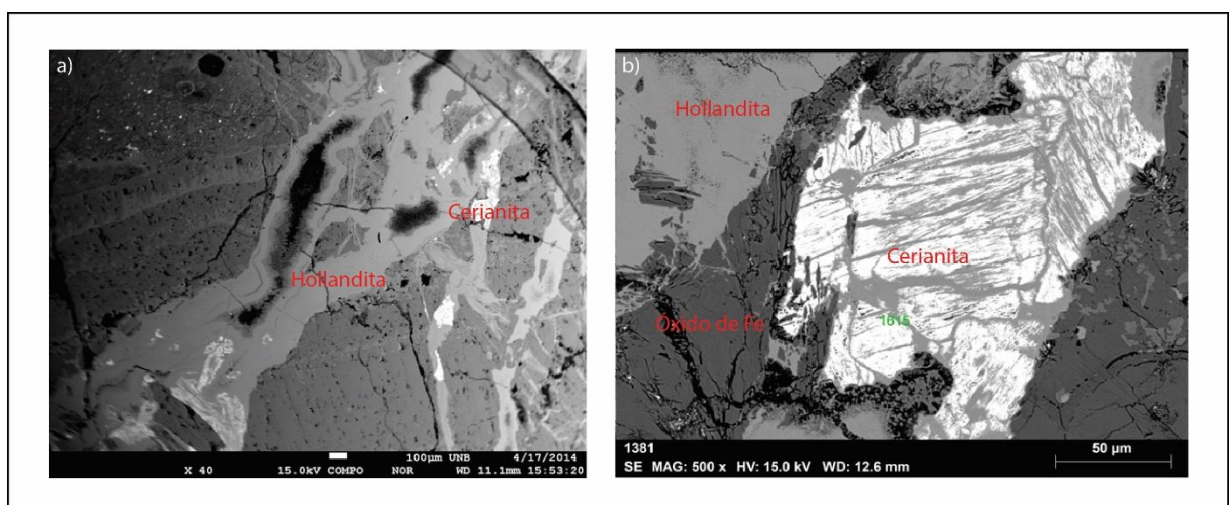


Figura IV. 29 (a) Goethita cortada por veio de hollandita e Cerianita (mineral branco). (b) Intercrescimento de hollandita e Cerianita dentro de veio cortando a goethita

Tabela IV. 6 Fórmula estrutural Cerianita

	Cerianita		
	1	2	3
Nd	-	0,002	0,005
Lu	0,002	-	-
Ce ⁴	0,85	0,853	0,851
Yb	0,001	-	-
Gd	0,146	0,145	0,144
Soma	1,00	1,00	1,00

IV.4.2.2 Pirocloro

O pirocloro ocorre na crosta laterítica na forma de cristais euédricos com no máximo 10 µm (Fig. IV.29). Não foi possível realizar análises de boa qualidade destes cristais por microsonda eletrônica. As análises por MEV (Fig. IV.29) indicam que o Ce é o ETR mais abundante neste mineral.

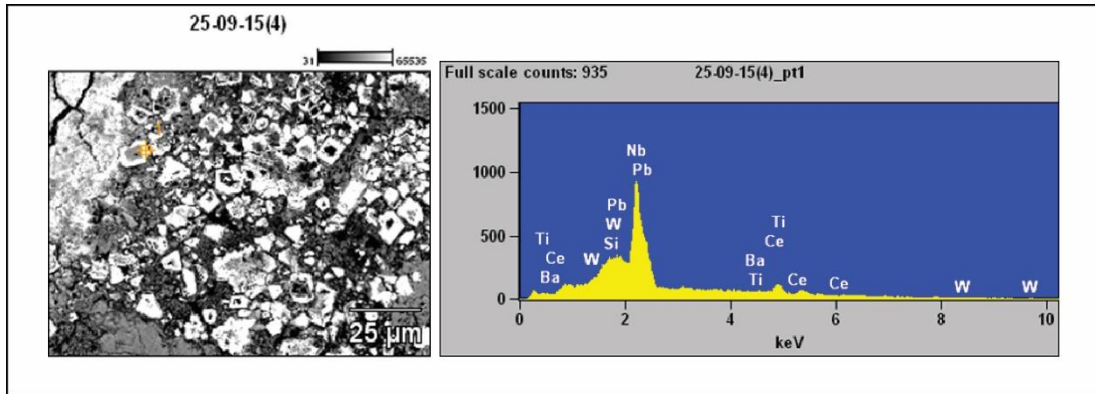


Figura IV. 30 Pirocloro e respectiva análise (MEV).

IV.4.2.3 Florencita

A florencita ocorre apenas na porção superior da crosta laterítica onde ocupa espaços intersticiais aos cristais de goetita e de hematita. Os cristais de florencita (Fig. IV.30) são muito pequenos (no máximo 15 µm) e contêm numerosas inclusões de óxidos de Fe e de minerais muito pequenos não identificados. Não foi possível realizar análises de boa qualidade nestes cristais de florencita por microsonda eletrônica. As análises por MEV (Fig. IV.30) indicam que o Ce é o ETR mais abundante neste mineral. Também foram detectadas concentrações de Dy que necessitam de comprovação, pois seria de esperar a presença de outros ETRL e não deste ETRP.

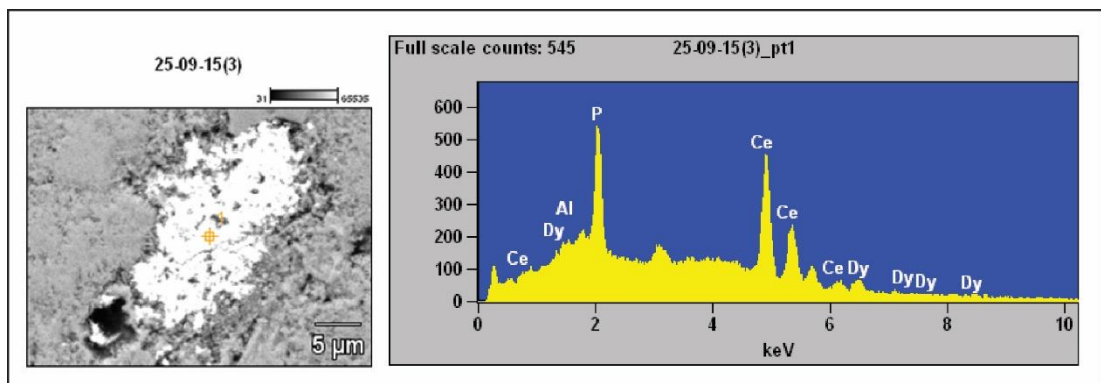


Figura IV. 31 Florencita e respectiva análise (MEV).

V- Discussão

O Complexo Carbonatítico de Seis Lagos, como podemos notar no capítulo anterior, possui diversos minerais ricos em elementos terras raras, e muitos destes minerais possuem variação composicional conforme seu estágio de alteração, como no caso do pirocloro e da monazita. Algumas destas variações serão discutidas afim de entender como se comportam e qual a importância delas para o enriquecimento ou empobrecimento dos ETR na estrutura mineral.

Observando a tabela IV.2, a monazita do carbonatito e da brecha carbonática apresentam diferença composicional entre elas, no entanto o estudo da monazita na brecha carbonática está baseado em apenas uma análise de microsonda, pois em apenas um ponto analisado o fechamento foi aceito, logo quaisquer comparações entre as monazitas das diferentes litologias serão passíveis de correções com o avanço do estudo.

Com os cálculos das fórmulas obtidas para ambas as monazitas pode-se notar um aumento significativo nas concentrações de Cério e Lantânio na da brecha em relação à do carbonatito (Fig. V.1). Este aumento reflete no *trend* dos elementos terras raras na brecha carbonática (Fig. V.2)

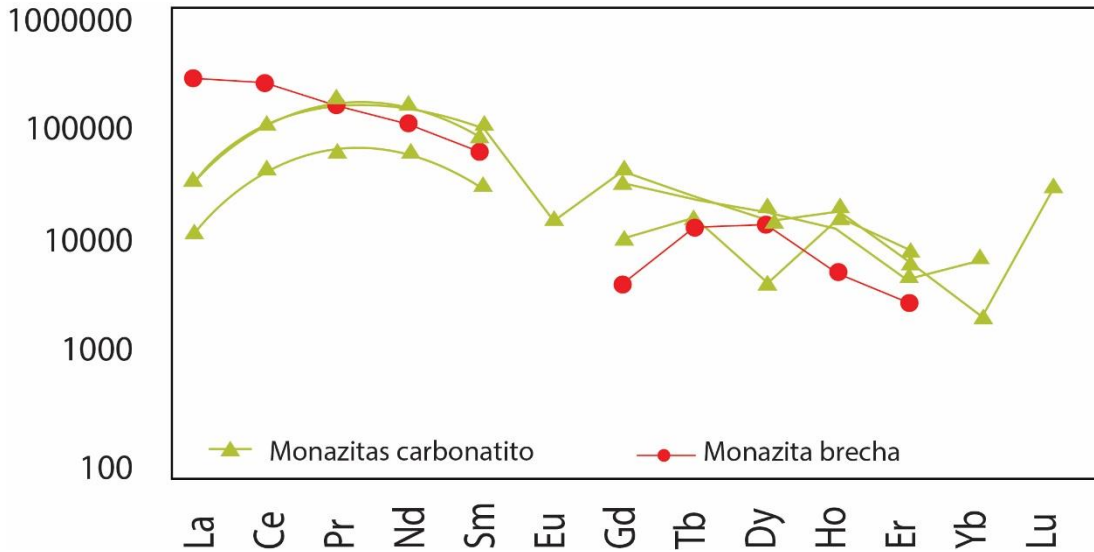


Figura V. 1 Comparação entre a distribuição de ETR entre a monazita do carbonatito e da brecha carbonática.

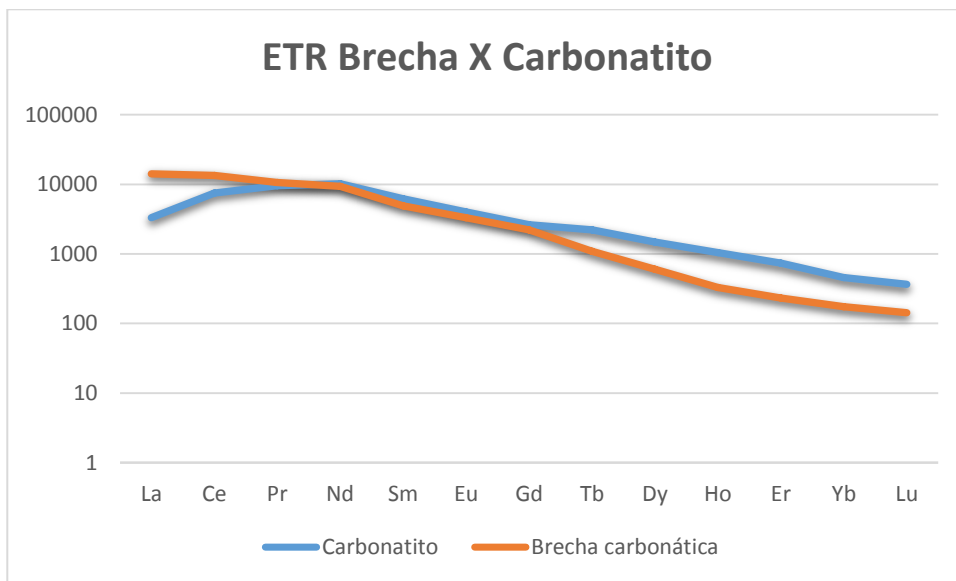


Figura V. 2 Gráfico comparativo do *trend* de ETR no carbonatito e brecha carbonática

Levinson (1966) e Bayliss & Levinson (1988), propuseram um sistema de nomenclatura dos minerais de ETR, definindo que as espécies de monazitas levariam após o nome o elemento terra rara predominante, no caso de Seis Lagos poderíamos aplicar esta denominação e chamarmos tanto a monazita do carbonatito quanto a da brecha carbonática de Monazita-(Ce), pois, nos dois casos, o Cério é o principal elemento terra rara, embora os teores deste elemento para as duas ocorrências tenham significativa diferença.

Segundo Overstreet (1967), os elementos terras raras presentes na monazita são normalmente os elementos do grupo do Ce: do La ao Eu (ETRL), sendo os pesados (a partir do Gd) muito menos abundantes. Fleischer & Altschuler (1969) ainda complementam mostrando que a monazita de carbonatito é ainda mais enriquecida em ETRL do que aquela formada em rochas graníticas ou pegmatitos graníticos. Este padrão é facilmente observado nas monazitas de Seis Lagos, sendo inclusive nestes elementos onde ocorrem as grandes diferenças entre as duas monazitas existentes no depósito de Seis Lagos. Assim, seguindo a nomenclatura recomendada por Levinson (1966) e Bayliss & Levinson (1988), as monazitas do carbonatito e da brecha, dois diferentes contextos geológicos no depósito, recebem o mesmo nome, mas os teores de Lantânio, Neodímio e, principalmente, Praseodímio revelam que a monazita do carbonatito e a da brecha sofreram diferentes processos de remobilização destes elementos.

Kitajima & Gaspar (1998) apresentaram um estudo sobre a composição química de monazita do complexo alcalino miasquítico de Rio do Peixe (Tocantins) e observaram uma relação indireta entre o Lantânio e o Thório, onde, quanto maior o enriquecimento em um dos elementos, maior o empobrecimento no outro. Os autores explicam tal variação como resultado de um processo evolutivo por cristalização com progressivo empobrecimento do Lantânio e enriquecimento relativo nos demais ETR. Esta relação entre o La e Th é observada na monazita do carbonatito, onde foi obtido fechamento nas análises de microsonda acima de 87% (Fig. V.3). Quando elaborado o mesmo gráfico com o resultado de todas as monazitas analisadas, incluindo aquelas com fechamento abaixo dos 80%, este comportamento não foi observado. Se Kitajima & Gaspar (1998) estiverem certo, esta relação poderia explicar o empobrecimento do Lantânio nas análises do carbonatito.

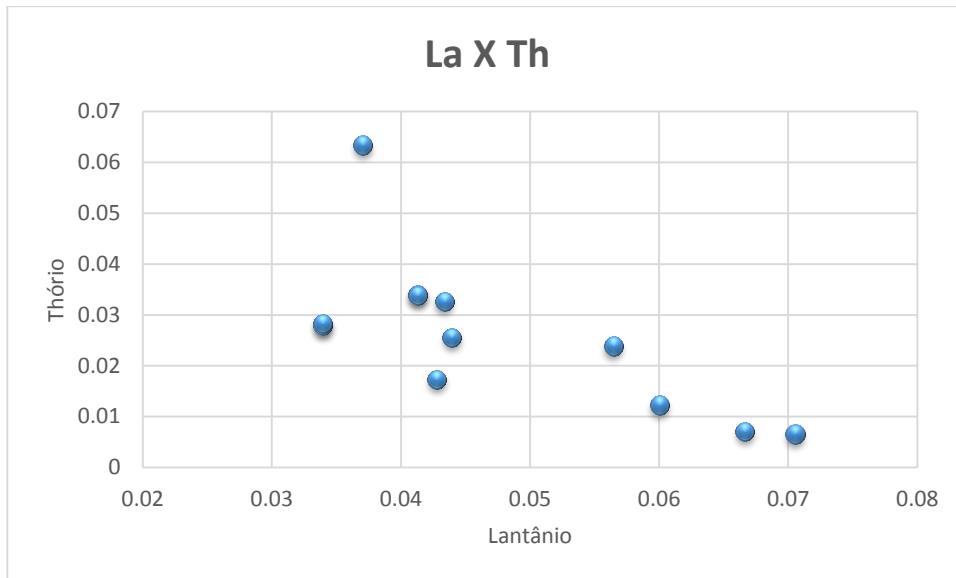


Figura V. 3 Gráfico de distribuição de Lantânio por Tório na monazita do carbonatito.

Os diferentes pirocloros encontrados no Complexo carbonatítico de Seis Lagos possuem elementos terras raras em suas estruturas. O teor de ETR no pirocloro é baixo e a quantidade deste mineral atualmente presente é pequena. Entretanto, certamente não foi assim na rocha primária, onde o pirocloro foi relativamente abundante, pois, foi a partir da alteração deste mineral que ocorreu a formação do Nb-rutilo, que é o principal mineral de minério do depósito de Seis Lagos (Giovannini 2013). No processo de alteração do pirocloro foram liberados ETR, pois estes elementos não ocorrem no Nb-rutilo. Assim, ETR liberados desta forma podem estar presentes em minerais de ETR secundários como a cerianita, a florencita e a própria monazita.

Uma característica do pirocloro é ter vacância no sítio A, e esta vacância no pirocloro analisados tende a aumentar conforme aumenta o grau de alteração do mineral. Observando as fórmulas minerais obtidas, nota-se que o pirocloro da amostra 14 da brecha carbonática, que se encontra mais alterado em relação aos da amostra 18 da mesma litologia, e do carbonatito, possui maior vacância entre todos, enquanto o pirocloro encontrado no carbonatito possui a menor vacância entre eles.

Em relação aos elementos químicos o Cério é o elemento que mais se concentra com a alteração, e este comportamento pode ser observado tanto no próprio pirocloro (Fig. V.4) como na monazita, assim como Giovannini (2013)

observou para os minerais da crosta laterítica. Em menor proporção, porém seguindo um comportamento similar, o Lantânio também tende a se enriquecer com o avanço da alteração. A liberação destes elementos ocorreu, portanto, quando aconteceu a quebra final da estrutura do pirocloro com sua alteração para Nb-rutilo e goetita.

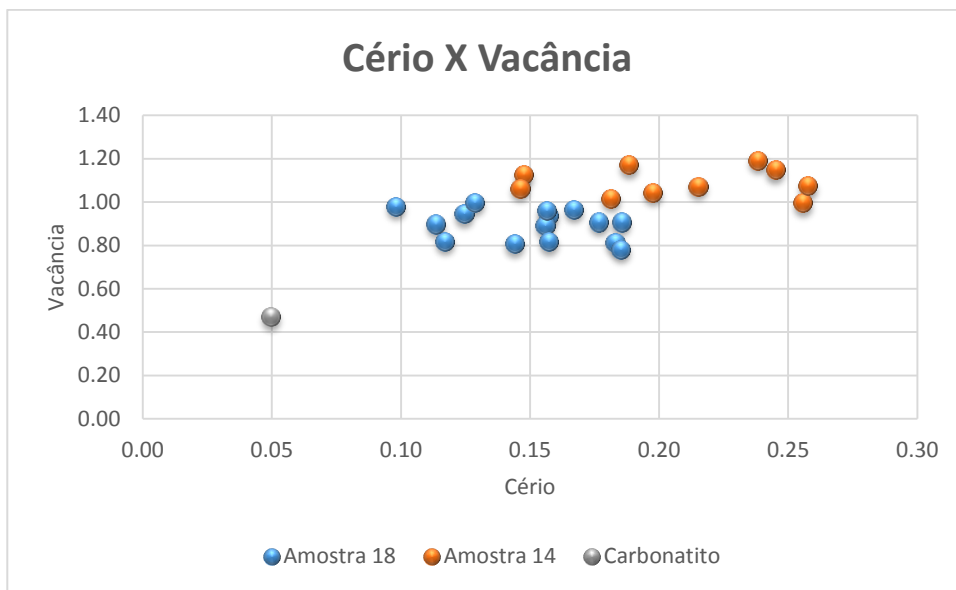


Figura V. 4 Gráfico de distribuição de Cério pela vacância no pirocloro do depósito de Seis Lagos.

Quando comparada as análises químicas dos diferentes contextos geológicos encontrados em Seis Lagos, nota-se que por exemplo a brecha carbonática em sua porção mais rasa (representado pela amostra SG-04-AM-13), onde o intemperismo é mais atuante, mais uma vez observa-se o enriquecimento do Cério e Lantânio em relação a análise da amostra fresca do carbonatito. A figura V.5 mostra que quando observada uma amostra da porção mais profunda da brecha carbonática (SG-04-AM-21), e por isso menos suscetível ao intemperismo, o *trend* de ETR tende a ser igual ao do carbonatito. Este padrão observado pela litoquímica é apenas uma representação em outra escala do que acontece em escala mineralógica com a monazita e o pirocloro como foi citado anteriormente.

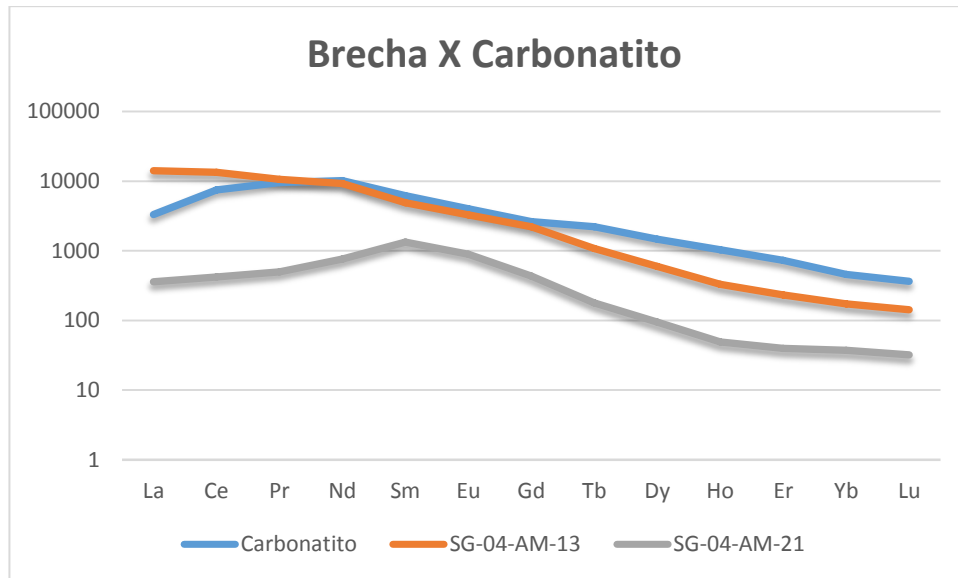


Figura V. 5 Gráfico de distribuição de ETR nas análises químicas das amostras de carbonatito.

Quanto às argilas da Bacia Esperança, é possível observar um empobrecimento considerável de ETRP quando comparado ao carbonatito, isto se deve pelo fato de o único mineral portador de terras raras encontrado neste contexto se tratar da florencita, que é um alumino-fosfato de terras raras leves. No caso de Jiangxi na China, em que os ETR estão adsorvidos às argilas, há uma concentração anômala de ETRP, justamente pela facilidade destes elementos se aderirem ionicamente a estrutura das argilas, algo que não é observado no contexto das argilas da Bacia Esperança, pois estes teores de ETR estão exclusivamente ligados a florencita. Devido à florencita ser encontrada euédrica (Fig. IV.24), evidenciando ter sido cristalizada dentro da própria bacia, indica que neste ambiente chamado Bacia Esperança houve uma percolação de fluídos ricos em ETR, os quais foram precipitados na forma de florencita. A falta de estruturas sedimentares reliquias nas amostras das argilas, é um indicativo de que algum evento pós sedimentação ocorreu destruindo estas estruturas.

Embora as argilas da Bacia Esperança não apresentem ETR adsorvidos e não possuam teores de ETRP consideráveis, como no caso de Jiangxi, as quantidades de ETRL presentes neste ambiente são consideráveis. Fazendo uma

média entre os teores encontrados em cada fácies de argila (Quadro IV.1) obtêm-se média de 1,68% (Quadro V.1) de ETR₂O₃.

Quadro V. 1 Teores médios de ETR por litologia e principais minerais de ETR.

Sondagem	Rocha	Média ETR em óxidos	Ton	% média de ETR						Principais minerais de ETR
				La	Ce	Pr	Nd	Sm	ETRP	
FURO SG-01-AM	Crosta laterítica	1,75	2800 ?	13,29	73,68	2,94	6,68	0,92	2,5	Cerianita/Florecita
FURO SG-02-AM	Carbonatito	3,2		7,73	42,72	5,87	29,63	5,24	8,80	Monazita
FURO SG-04-AM	Argilas	1,68		20,64	45,03	4,66	19,07	5,51	5,09	Florecita
	Brecha carbonática	1,6		14,89	35,89	4,83	25,86	9,51	9,01	Monazita/Bastnaesita /Thorbastnaesita

Bonow & Issler (1980) calcularam na Bacia Esperança um volume de 4.354.993m³ para o intervalo que vai de 14,65m até 73,10m. Contudo, o presente trabalho encontrou teores de ETR altos por toda a extensão vertical da Bacia Esperança, que se estende até 165,55m (Fig. V.6). Com base no mesmo modelo utilizado por Bonow & Issler (1980) calculamos para o intervalo desde a superfície até a profundidade de 166,55m um volume de 13.633.757m³. Utilizando para a argila mineralizada a mesma densidade (1,8 g/cm³) considerada por aqueles autores, obtivemos uma reserva de 24.540.762 toneladas com um teor médio de 1,68% de ETR₂O₃.

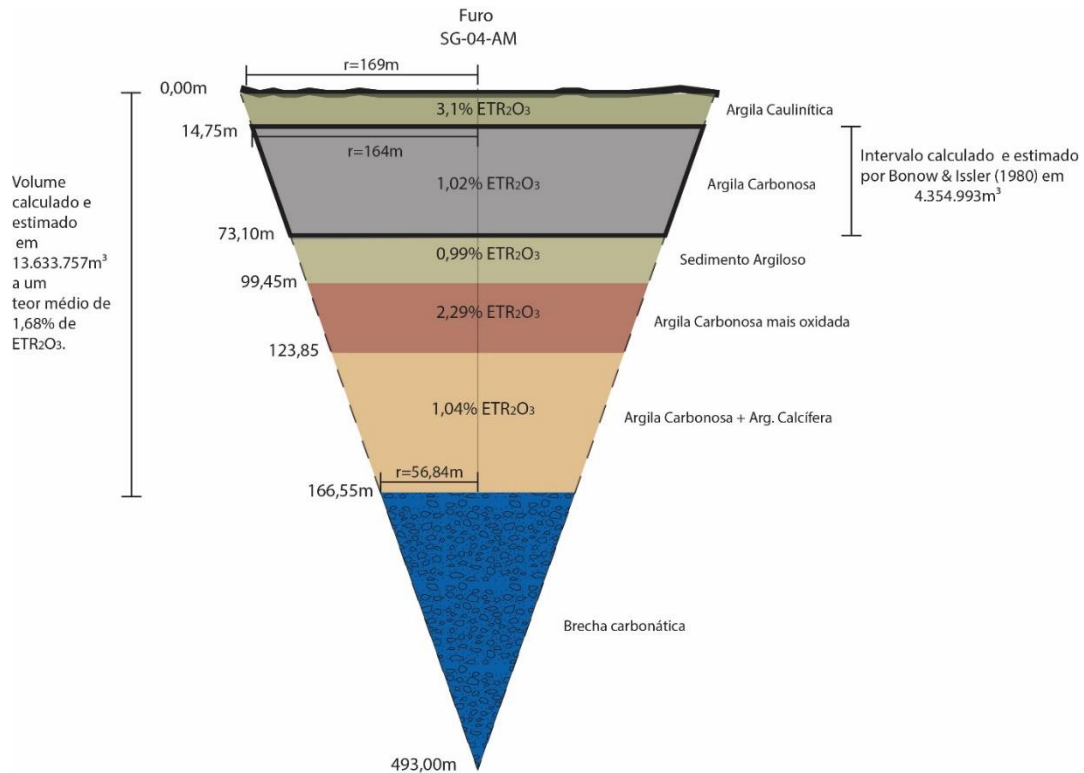


Figura V. 6 Modelo usado por Bonow & Issler (1980) para calcular a tonelagem da fácies argila carbonosa da Bacia Esperança.

Para discutirmos o contexto da laterita dentro do Complexo carbonatítico de Seis Lagos, o depósito de classe mundial de ETR associado a laterita de carbonatito, Mount Weld (Austrália), deve ser usado como comparativo. Este depósito, que já foi objeto de estudo de diversos autores como Mariano (1984), Lottermoser & England (1988), Willet, Duncane, Rankin (1989), entre outros, é talvez o principal exemplo conhecido hoje de mineralização de ETR associada a lateritização de carbonatito.

De acordo com Lottermoser (1990), o perfil laterítico de Mount Weld possui teor de ETR de 9,7% (Quadro V.2) na forma de fosfatos e alumino-fosfatos secundários, sendo a monazita largamente o mais abundante. Estes minerais estão distribuídos em uma zona supergênica de aproximadamente 90 metros sem zonação vertical complexa, o que já é bastante diferente do que acontece em Seis Lagos, onde a laterita apresenta uma zonação vertical bem definida ao longo de um perfil com profundidade ainda não conhecida, tendo em vista que o furo de sondagem- SG-01-AM foi interrompido antes mesmo de cruzar todo o perfil laterítico.

Em Mount Weld, os ETRP ocorrem mais concentrados na base do perfil laterítico, enquanto que os ETRL ocorrem mais concentrados no topo do perfil laterítico.

Quadro V. 2 Teores de ETR, principais minerais portadores e situação do projeto dos principais depósitos de ETR no mundo.

		Teores	Tonelagem	Minério	%	La	Ce	Pr	Nd	Sm	HREE	Situação do projeto
Austrália	Mount Weld	9,70	12,20	Monazita		26,0	45,0	5,0	19,0	2,0	2,0	Extração
	Nolans	2,80	30,30			20,0	47,0	6,0	28,0	2,0	2,0	
Canadá	Hoidas Lake	2,56	1,40			20,0	46,0	6,0	22,0	3,0	3,0	
	Thor Lake	1,79	64,20			18,0	44,0	5,0	20,0	4,0	9,0	
EUA	Mountain Pass	8,60	50,00			33,0	49,0	4,0	12,0	1,0	1,0	Reabertura
		9,40	20,00									
	Deep Sands	0,14 - 0,80	120,00	Areias com ETR		24,0	46,0	5,0	16,0	3,0	6,0	
Africa do Sul	Steemkampskrail	16,74	0,25	Rejeito		24,0	49,0	5,0	17,0	3,0	3,0	Fechada
Dinamarca (Groenlandia)	Kvanefjeld	1,07	457,00			30,0	46,0	4,0	14,0	2,0	4,0	Pre-viabilidade
China	Gansu	1,50	300,00	Sub Ferro		23,0	50,0	6,0	19,0	1,0	1,0	Extração
	Sichuan	3,00	17,00	Bastnaesita								Extração
	Jiangxi			Argilas		35,0	2,0	8,0	27,0	5,0	23,0	Extração

A laterita de Seis Lagos sofreu ação de fluidos os quais, assim como em Mount Weld, remobilizaram os ETR, formando cerianita e florencita. Porém até o momento não foi possível verificar que esta remobilização tenha separado os ETRP de ETRL, pois o fato de Seis Lagos apresentar uma mineralogia rica em ETRL não exclui a hipótese de os ETRP terem sido concentrados na base da crosta laterítica, pois as sondagens não atingiram a base da mesma.

Mount Weld possui como mineral de minério, uma monazita extremamente rica em Cério, e embora possua teores extremamente altos de ETR e tonelagem considerável (Quadro V.2), economicamente o Cério não é um elemento muito valorizado, tendo baixo custo. Seis Lagos no contexto geológico da laterita, embora possua os maiores teores de ETR distribuídos entre a florencita e principalmente cerianita, também apresenta o Cério como principal elemento. Isto se deve a características deste elemento de mudar sua valência de Ce^{+3} para Ce^{+4} na alteração e se tornar extremamente imóvel perante este processo. Este comportamento pode ser observado quando comparada a distribuição dos ETR do carbonatito com os da laterita (Fig. V.7), observa-se um pico de Cério em quase todas as crostas do perfil.

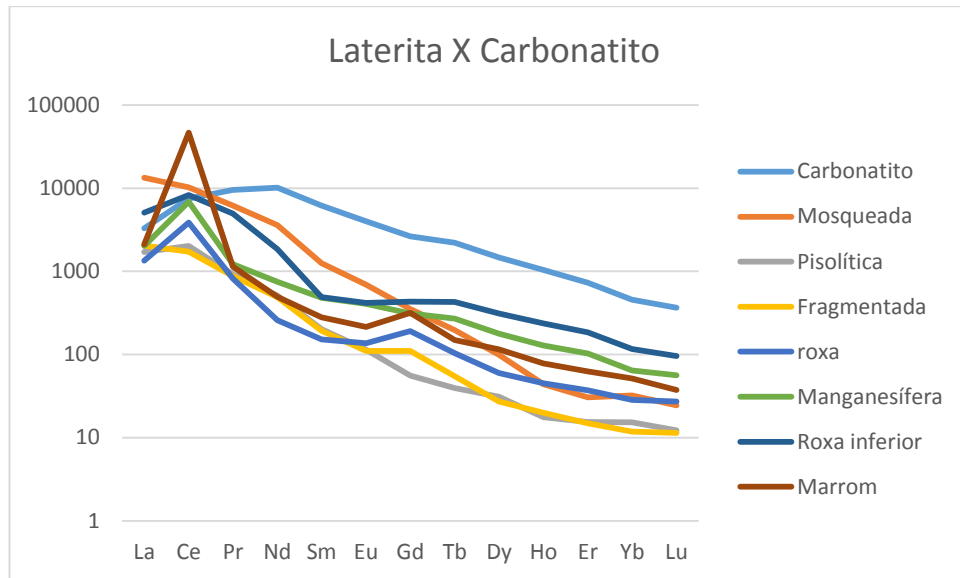


Figura V. 7 Gráfico de distribuição de ETR no carbonatito em relação às subdivisões da crosta laterítica feitas por Giovannini (2013).

O que torna a viabilidade da mineração na crosta laterítica inconsistente é o fato da difícil extração desta litologia aliada a um minério muito fino, complicando o processo do beneficiamento, apesar de apresentar média de 1,75% de ETR_2O_3 (Quadro V.1). O mesmo não ocorreria em relação as argilas da Bacia Esperança, pois por se tratarem de argilas com teor médio de ETR_2O_3 de 1,68% (Quadro V.1) tornaria a extração extremamente simples e lucrativa.

VI– Conclusão

O trabalho realizado permitiu concluir que:

Com os estudos geoquímicos e mineralógicos realizados até o presente momento, a litologia chamada de brecha carbonática trata-se, na verdade, do produto da alteração da rocha carbonatítica. Sendo assim, é coerente ao referirmos futuramente a esta litologia usarmos o nome de brecha carbonatítica ao invés de carbonática.

A monazita é o principal mineral de elementos terras raras do depósito de Seis Lagos, ela possui teores altos de Ce, e estes teores podem ser ainda maiores quando o mineral for submetido a processos intempéricos. No entanto, a monazita não representa um mineral de minério dentro do complexo, pois apesar de estar presente no carbonatito e na brecha, não possui quantidade significativa.

O pirocloro devido à sua estrutura relativamente mais complexa que as dos demais minerais encontrados e à sua ampla distribuição ao longo do depósito de Seis Lagos, é o mineral que melhor representa a evolução da alteração dentro do complexo. Quanto aos ETR, o pirocloro não representa um mineral de minério, tanto por ocorrer (atualmente) em pequena quantidade, como por não ser rico em ETR. A bastnaesita e thorbastnaesita encontradas na brecha carbonática apresentam alta concentração de ETR, porém por estarem presentes em pouca quantidade e grandes profundidades não são minérios.

A Bacia Esperança é a parte do depósito Seis Lagos com maior potencial econômico, potencial este aqui caracterizado como bem maior do que aquele identificado pela CPRM. Possui uma reserva reavaliada em 24.540.762 t, certamente muito fácil para ser lavrada e com teor de ETR de 1,68% (principalmente Ce) adequado para beneficiamento. O mineral de minério é a florencita neoformada dentro da argila. Não se trata, portanto, de um depósito do tipo ion adsorption, como o de Jiangxi (China).

A laterita de Seis Lagos representa uma reserva de 2800 t de minério de baixo teor de ETR (1,75%) contido principalmente em cerianita neoformada. A granulometria extremamente fina da cerianita (5 a 10 micras) pode representar uma grande dificuldade para o seu beneficiamento.

O carbonatito contém ETRP em concentrações bem maiores do que as encontradas na crosta laterítica. Isto abre a possibilidade de que, semelhantemente à jazida de ETR de Mount Weld (Austrália), os ETRP tenham sido concentrados nas partes mais inferiores da crosta, as quais não foram estudadas devido às sondagens terem cortado apenas a metade superior do perfil laterítico.

VII- Referências Bibliográficas

BAYLISS, P. & LEVINSON, A. A. 1988. A system of nomenclature for rare-earth mineral species: revision and extension. *American Mineralogist*, 73, p.422-423.

BONOW, C. E ISSLER, R. 1980. Reavaliação e aspectos econômicos do jazimento de terras raras e ferro-ligas do lago Esperança, complexo carbonatítico dos Seis Lagos- Amazonas-Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 31º, Balneário Camburiú. Anais... Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Geologia, 1980, *Anais*, 3:1431.

CORRÊA, S. 1996. *Evolução geoquímica das crostas lateríticas e dos sedimentos sobrepostos na estrutura de Seis Lagos (Amazonas)*. Tese de Doutorado, Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímicas, Centro de Geociências, Universidade do Pará, Belém, 212p.

CORRÊA, S,L.A; COSTA, M.L.; OLIVEIRA, N.P. Contribuição geoquímica à zona laterítica do Complexo Carbonatítico de Seis Lagos (Amazonas). In. Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Bélem, 1988. *Anais...* Bélem, SBG. v.4 , p. 1959-1968.

CHAKHMOURADIAN, A. R, Wall, F, 2012. Rare Earth Elements: Mineral, Mines, Magnets (and More). *Elements*, vol. 8, pp 333-340.

FLEISCHER, M. & ALTSCHULER, Z. S. 1969. The relationship of rare-earth composition of minerals to geological environment. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33(6) p.725-732.

GIOVANNINI, A. 2013. *Contribuição à geologia e geoquímica do carbonatito e da jazida (Nb, ETR) de Seis Lagos (Amazonas)*. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p. 128.

ISSLER, R. E SILVA, G. 1980. The Seis Lagos carbonatite complex. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31º, Balneário Camburiú. Anais... Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Geologia, 1980. *Anais*, 3:1564-1573.

KITAJIMA, L. F. W. & GASPAR, J. C. 1988. A monazita do Complexo do Peixe, TO. In. XL CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 40., 1988, Belo Horizonte. *Anais...* Belo Horizonte, SBG, v. 1, p.454.

KYNICKY, J., SMITH, M. E XU, C. 2012. Diversity of rare earth deposits: the key example of China. *elements*, 8(5):361-367

LAPIDO-LOUREIRO, F. 2013. *O Brasil e a reglobalização da indústria das terras raras*. CETEM (Centro de Tecnologia Mineral) / MCTI (Ministério de Ciência e Tecnologia e Inovação). Rio de Janeiro. Editoração eletrônica Fátima Engel. p. 219.

LEVINSON, A. A. 1996. A System of nomenclature for rare-earth minerals. *American mineralogist*, 51 p. 152-158.

LIMA M.I.C & PIRES J.L. Geologia da Região do Alto do Rio Negro-AM. In. SBG, Simpósio de Geologia da Amazonia, 2, Bélem. 1985 *Anais*.

LOTTERMOSER, B.G. & ENGLAND, B.M. Compositional variation on pyrochlores from the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia. *Min Petrol*. 38, 1988. P.37-51.

LOTTERMOSER, B.G. Rare-earth element mineralization within the Mt. Weld carbonatite laterite, Western Australia, In. *LITHOS*, volume 24, no.2, 1990 p.151-167.

MARIANO, A. E MARIANO, A, JR. 2012. Other view of REE deposits and mines in the world and in Brazil. www.adimb.com.br/simexmin2012. Acesso em 10/10/2014.

OVERSTREET, W. C. 1967. The geological occurrence of monazite. *Geological Survey Professional Paper*, 530, p.327.

PINHEIRO, S.S; FERNANDES, P. E. C. A.; PEREIRA, E.P.; VASCONCELOS, E. G.; PINTO, A. C.; MONTALVÃO, R. M. G.; ISSLER, R. S.; DALLAGNOLL, R.; TEIXEIRA, W.; FERNANDES, C. A. C. *Folha NA.19 Pico da Neblina; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra*. 1976. Rio de Janeiro, Cap. 2, p.19-138. (Levantamento de Recursos Naturais)

SANTOS, J. O. S. (2003): Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil Central. In *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. (L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves eds.); CPRM, Brasília, 169 – 226.

SANTOS, J.O.S., HARTMANN, L.A., GAUDETTE, H.E. 2000. A new understanding of the provinces of the Amazon cráton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, 3 (4). p.453-488.

SANTOS J.O.S.; HARTMANN L.A.; FARIA M.S.; RIKER S.R.; SOUZA M.M.; ALMEIDA M.E.; MCNAUGHTON N.J. *A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços*

ocorridos no período 2000-2006. In. SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 9, BÉLEM 2006 Anais.

TASSINARI, C. C. G, MACAMBIRA M. J. B., 2004. *A Evolução Tectônica do Cráton Amazônico.* In Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida; 471 – 486.

TASSINARI C.C.G., MACAMBIRA M.J.B. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Cráton. *Episodes*, 22 (3):174-182

TASSINARI, C. C. G, MACAMBIRA M. J. B., 2004. *A Evolução Tectônica do Cráton Amazônico.* in Geologia do Continente Sul Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida; 471 – 486.

VIEGAS, J. R. E BONOW, C. W. 1976 Projeto Seis Lagos. Relatório da CPRM-DNPM, Superintendência Regional de Manaus.